



Pengaruh Penambahan Variasi Fraksi Massa Serbuk Cangkang Kelapa Sawit (PKS) pada Sifat Mekanis Komposit Hibrid *Fiberglass-Epoxy*

Vina Nanda Garjati^{1*}, Vika Rizkia², Dewin Purnama³, Tia Rahmiati⁴, Amalina Shomami⁵

^{1,5}Program Studi Teknik Mesin, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta, Jl. Prof. G. A.

Siwabessy, Kampus UI, Depok, 16425

^{2,3}Program Studi Teknologi Rekayasa Manufaktur, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta, Jl.

Prof. G. A. Siwabessy, Kampus UI, Depok, 16425

⁴Program Studi Teknologi Rekayasa Pemeliharaan Alat Berat, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta, Jl. Prof. G. A. Siwabessy, Kampus UI, Depok, 16425

Email: ^{1*}vina.nanda@mesin.pnj.ac.id

Abstract

The demand for renewable energy sources in Indonesia continues to rise in line with national energy transition efforts. Wind energy represents a significant but underutilized potential, yet its development is hampered by high investment costs, particularly in manufacturing wind turbine blades that rely on expensive composite materials. This research aims to identify more economical and sustainable material alternatives without compromising the necessary mechanical strength. Hybrid composites were developed by combining fiberglass and palm kernel shell (PKS) powder as reinforcement within an epoxy matrix. Variations of PKS addition were set at 12 wt.%, 20 wt.%, and 24 wt.%. Flexural test results indicated that PKS addition significantly influenced flexural strength, with the highest value (169.67 MPa) observed in specimen A3 (12 wt.% PKS) and the lowest (58.74 MPa) in specimen A1 (24 wt.% PKS). Shore D hardness testing revealed a complex trend: specimen A4 (30% fiberglass) exhibited the highest hardness, whereas specimen A2 showed the lowest. These findings underscore the importance of balancing fiberglass and PKS proportions to achieve optimal and sustainable mechanical performance.

Keywords: Hybrid Composite, Palm Kernel Shell Powder, Fiberglass, Flexural Strength, Hardness.

Abstrak

Salah satu potensi energi terbarukan yang menjanjikan di Indonesia adalah energi angin, namun pengembangannya terkendala oleh biaya investasi tinggi, terutama pada proses pembuatan bilah turbin angin yang menggunakan material komposit mahal. Penelitian ini bertujuan untuk mencari alternatif material yang lebih ekonomis dan berkelanjutan tanpa mengurangi kekuatan mekanis yang dibutuhkan. Komposit hibrid dikembangkan dengan memanfaatkan kombinasi fiberglass dan serbuk cangkang kelapa sawit (PKS) sebagai penguat pada matriks epoksi. Variasi penambahan PKS dilakukan sebesar 12 wt.%, 20 wt.%, dan 24 wt.%. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis korelasi sifat mekanis terhadap penambahan serat cangkang kelapa sawit. Hasil uji lentur menunjukkan bahwa penambahan PKS memengaruhi nilai kekuatan lentur, dengan nilai tertinggi (169,67 MPa) dicapai pada spesimen A3 (12 wt.% PKS), sementara nilai terendah (58,74 MPa) pada A1 (24 wt.% PKS). Hasil uji kekerasan Shore D menunjukkan tren yang kompleks. Penurunan signifikan pada kekuatan lentur dan kekerasan pada fraksi PKS tinggi diindikasikan akibat potensi terbentuknya porositas tinggi dan penurunan homogenitas matriks. Dari hasil uji lentur dan kekerasan, secara keseluruhan Sampel A3 dan A4 memiliki potensi besar untuk dikembangkan sebagai material bilah turbin yang lebih ekonomis dan berkelanjutan.

Kata Kunci: Komposit Hibrid, Serbuk Cangkang Kelapa Sawit, Fiberglass, Kekuatan Lentur, Kekerasan.

1. PENDAHULUAN

Energi terbarukan menjadi fokus global dalam upaya mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil serta menekan dampak negatif terhadap lingkungan. Indonesia, sebagai negara berkembang dengan populasi besar dan pertumbuhan ekonomi yang pesat, menghadapi tantangan signifikan dalam memenuhi kebutuhan energi yang terus meningkat. Menurut *Indonesia Energy Transition Outlook*, permintaan energi di Indonesia diproyeksikan meningkat lebih dari tiga kali lipat akibat pertumbuhan populasi dan ekonomi (Renewable Energy Agency, 2022). Selain itu, kebutuhan listrik pada tahun 2050 diperkirakan mencapai lima kali lipat dibandingkan tahun 2022. Untuk memenuhi permintaan tersebut, Indonesia perlu mempertimbangkan pemanfaatan sumber energi yang berkelanjutan sejalan dengan upaya transisi energi nasional.

Pemanfaatan sumber energi terbarukan seperti tenaga surya, biomassa, dan tenaga angin menjadi solusi strategis untuk mewujudkan ketahanan energi jangka panjang. Berdasarkan potensi geografisnya, Indonesia memiliki potensi energi angin sebesar 155 GW, terdiri dari 60,6 GW dari angin darat dan 94,2 GW dari angin lepas pantai (Renewable Energy Agency, 2022). Namun, pemanfaatan energi angin saat ini masih sangat rendah, hanya mencapai sekitar 154,3 MW atau kurang dari 0,1% dari total potensi yang tersedia. Meskipun demikian, beberapa proyek seperti PLTB Sidrap dan PLTB Jeneponto telah menunjukkan bahwa energi angin dapat menjadi solusi yang berkelanjutan untuk memenuhi kebutuhan listrik nasional (Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2023). Salah satu hambatan utama dalam akselerasi teknologi ini adalah biaya manufaktur bilah turbin yang tinggi, yang secara teknis harus mampu menahan beban kompleks seperti beban statis, dinamis, dan benturan selama siklus operasi jangka panjang.

Bilah turbin angin umumnya menggunakan material komposit berbasis serat kaca (*fiberglass*) karena memiliki kekuatan tarik yang baik, namun material ini memiliki kelemahan pada berat jenis yang relatif tinggi dan keterbatasan dalam aspek keberlanjutan (Samuel et al., 2022). Secara teknis, bilah turbin membutuhkan material dengan rasio kekuatan terhadap berat (*strength-to-weight ratio*) yang tinggi serta stabilitas dimensi yang baik untuk menghadapi tegangan fatigue dan erosi permukaan akibat kecepatan ujung bilah (*tip speed*) yang tinggi. Oleh karena itu, strategi hibridasi dengan menambahkan penguat alami menjadi solusi teknis untuk memodifikasi sifat mekanis komposit tanpa menambah beban massa yang signifikan.

Berbagai penelitian telah mengeksplorasi potensi serat alam sebagai penguat komposit untuk aplikasi energi terbarukan dengan hasil yang menjanjikan. (Fauzan et al., 2024) menunjukkan bahwa limbah serat daun nanas memiliki potensi besar untuk bilah turbin arus laut karena sifatnya yang dapat menunda korosi serta memiliki kekuatan tarik yang tinggi. Dalam aplikasi turbin angin, (Ferdiansyah & Soetanto, 2024) membuktikan bahwa penggunaan serat pohon lontar yang dikombinasikan dengan *fiberglass* menghasilkan modulus elastisitas yang jauh lebih tinggi dibandingkan tanpa *fiberglass*. Selain itu, penggunaan material berbasis kayu seperti mahoni juga telah terbukti layak secara manufaktur untuk bilah turbin angin tipe *taperless* (Nursidik et al., 2021). Efektivitas serat alam lainnya, seperti serat bambu dalam struktur *honeycomb sandwich*, juga menunjukkan performa mekanis yang optimal pada kekuatan lentur dan kekakuan untuk aplikasi sudut turbin (Marsono et al., 2021).

Transisi penggunaan serbuk cangkang kelapa sawit (*Palm Kernel Shell* - PKS) dalam penelitian ini didasari oleh karakteristik teknis PKS yang memiliki kadar silika tinggi dan struktur mikro yang keras serta getas. Berbeda dengan serat kontinu, PKS dalam bentuk serbuk berfungsi sebagai *particulate filler* yang mampu mengisi celah antar

serat (*interstitial sites*) pada matriks epoksi. Secara teknis, keberadaan partikel keras PKS di dalam matriks dapat meningkatkan ketahanan deformasi plastik pada permukaan komposit dan meningkatkan kekakuan (*stiffness*) struktural, yang sangat dibutuhkan untuk menjaga aerodinamika bilah turbin saat menerima beban angin.

Penambahan partikel PKS dalam matriks epoxy bersama serat sisal secara signifikan meningkatkan kekerasan (Brinell hardness) serta mencapai kekuatan tarik maksimum sekitar 28,8 MPa pada komposisi optimum (Ojo et al., 2024). Namun, integrasi PKS ke dalam matriks epoksi sangat bergantung pada fraksi massanya; penambahan yang tepat dapat meningkatkan ketahanan beban lentur, namun penambahan hingga 24 wt.% justru berisiko menurunkan sifat mekanis akibat munculnya porositas dan penurunan ikatan antarmuka (Damaru et al., 2021). Hal ini sejalan dengan teori dasar bahwa distribusi penguat yang tidak merata pada konsentrasi tinggi dapat melemahkan integritas struktural komposit (Gay, 2022).

Meskipun potensi PKS sebagai penguat telah dilaporkan mampu meningkatkan kekerasan hingga mencapai kekuatan tarik tertentu pada komposisi optimum, interaksi antarmuka antara PKS yang bersifat hidrofilik dengan matriks epoksi yang hidrofobik tetap menjadi tantangan teknis. Tanpa modifikasi permukaan, aglomerasi partikel pada fraksi massa tinggi dapat memicu terbentuknya *void* yang menurunkan integritas struktural. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh variasi fraksi massa serbuk PKS (12%, 20%, dan 24% wt) guna menemukan titik keseimbangan antara peningkatan kekerasan permukaan dan kekuatan lentur pada komposit hibrid *fiberglass*-epoksi untuk aplikasi bilah turbin angin.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh penambahan serat cangkang kelapa sawit dengan variasi 12 wt.%, 20 wt.%, dan 24 wt.% terhadap sifat mekanis, khususnya kekuatan lentur dan kekerasan, pada komposit hibrid *fiberglass*. Dengan demikian diharapkan dapat mendukung secara garis besar penelitian tentang alternatif material komposit ramah lingkungan yang memiliki potensi digunakan sebagai material bilah turbin angin dengan sifat mekanis yang sesuai standar kinerja.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Tahapan pelaksanaan penelitian ini secara sistematis, mulai dari tahap persiapan bahan, pembuatan spesimen, hingga tahap pengujian dan analisis data, dirangkum dalam diagram alir yang disajikan pada Gambar 1 berikut.

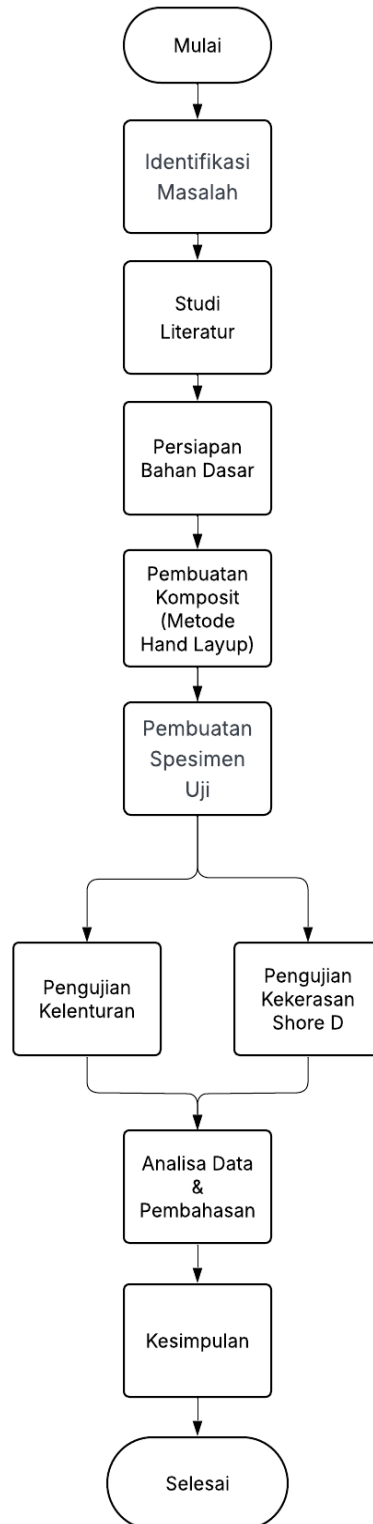
2.1 Alat dan Bahan

Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah resin epoksi sebagai matriks dengan hardener (rasio pencampuran 2:1), serat gelas tipe E-glass sebagai penguat utama, dan serbuk cangkang kelapa sawit (PKS) sebagai penguat tambahan (*filler*). Sebagai *baseline study* untuk menjaga efisiensi biaya, serbuk PKS digunakan dalam kondisi alami tanpa perlakuan kimia awal. Serbuk PKS diperoleh melalui proses penggilingan dan pengayakan menggunakan ayakan standar laboratorium untuk mencapai homogenitas ukuran butir. Alat pendukung lainnya meliputi cetakan kayu, timbangan digital, mesin pemotong, serta peralatan pelindung diri (APD).

2.2 Prosedur Pembuatan Spesimen

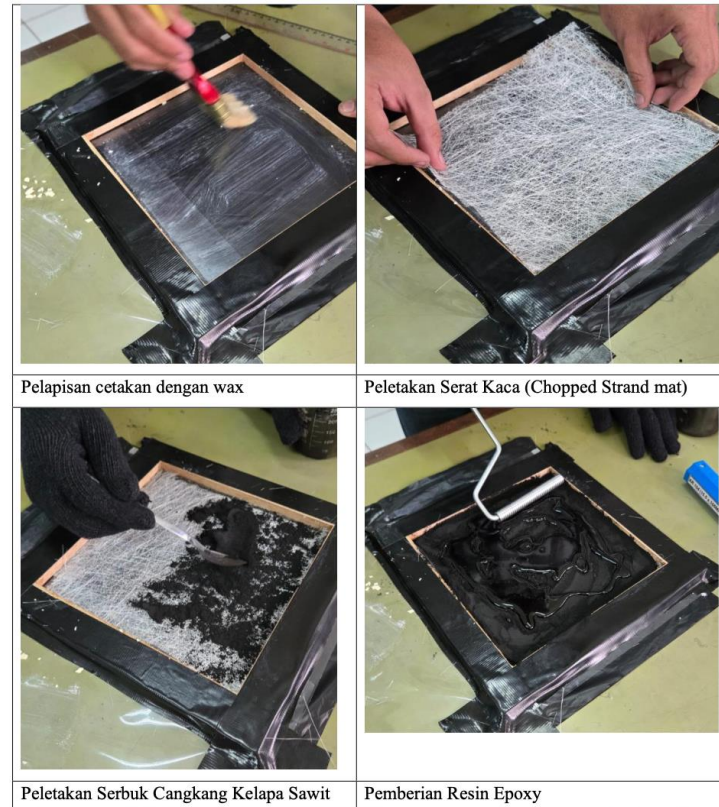
Pembuatan komposit hibrid dilakukan dengan menggunakan metode hand lay-up yang umum digunakan untuk pembuatan komposit berlapis karena sederhana, ekonomis, dan cocok untuk penelitian skala laboratorium (*Materials Science and Engineering An Introduction by William D. Callister, Jr., David G. Rethwisch (z-Lib.Org)*, 2020). Proses

diawali dengan mengoleskan zat pelepas atau pelapis cetakan pada permukaan cetakan untuk memudahkan pengambilan spesimen. Selanjutnya, lapisan serat kaca diletakkan di dalam cetakan. Proses penuangan serbuk PKS dilakukan secara bertahap menggunakan metode manual dispersion seperti pada Gambar 2. Secara teknis, teknik penuangan terkontrol ini bertujuan untuk meminimalkan pembentukan *void* (rongga udara) dan memastikan partikel PKS berukuran 100 mesh dapat terdistribusi secara homogen di sela-sela anyaman *fiberglass* (Ojo et al., 2024).



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Selanjutnya, matriks epoksi dan hardener dicampur secara merata dan diaduk manual secara perlahan selama 5 menit untuk memastikan homogenitas distribusi partikel. Kemudian dituangkan campuran resin ke atas fiberglas dan PKS serta ditekan menggunakan rol untuk meminimalisir terjebakannya udara (void). Spesimen dibiarkan mengalami proses pengerasan (curing) pada suhu ruang selama 24 jam sebelum dilepaskan dari cetakan. Proses pembuatan komposit dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Proses pembuatan komposit hybrid

2.3 Pengujian Mekanis

Spesimen yang telah mengeras dipotong menggunakan mesin potong sesuai dengan dimensi standar pengujian internasional. Pengujian yang dilakukan meliputi:

1. Uji Lentur (*Flexural Test*): Dilakukan menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM) dengan metode *three-point bending* mengacu pada standar ASTM D790 (*Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials*, 2017). Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan komposit dalam menahan beban bending hingga terjadi kegagalan. Dimensi spesimen uji lentur dipersiapkan dengan presisi mengikuti Standar ASTM D790, yaitu menggunakan spesimen berbentuk batang persegi panjang dengan dimensi 127 mm × 12,7 mm × 3,2 mm (Gambar 3). Secara teknis, dimensi ini dipilih untuk memastikan rasio *span-to-depth* sebesar 16:1, yang merupakan parameter kritis untuk memperoleh data modulus lentur dan kekuatan lentur yang akurat tanpa dipengaruhi oleh tegangan geser berlebih pada tumpuan.
2. Uji Kekerasan Shore D: Dilakukan menggunakan alat *Durometer Shore D* yang mengacu pada standar ASTM D2240 (*Test Method for Rubber Property Durometer Hardness*, 2021). Pengujian dilakukan pada lima titik berbeda pada permukaan spesimen untuk mendapatkan nilai rata-rata kekerasan yang representatif.



Gambar 3. Spesimen uji flexural

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil Pengujian Kekuatan Lentur

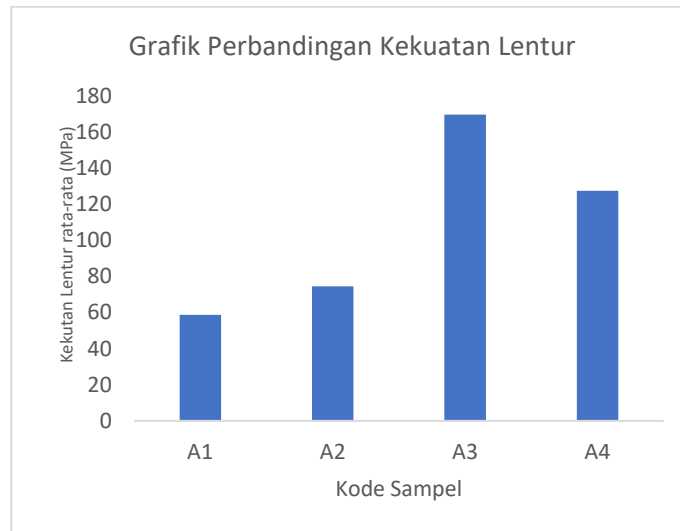
Pengujian kekuatan lentur dilakukan untuk menilai pengaruh variasi komposisi fiberglass dan serbuk cangkang kelapa sawit terhadap performa mekanik komposit berbasis resin epoksi. Pengujian dilakukan menggunakan metode tiga titik lentur (three-point bending) mengacu pada standar ASTM D790. Hasil pengujian kekuatan lentur rata-rata ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi Material dan Hasil Pengujian Kelenturan (*Flexural Test*)

Kode Sampel	Massa Epoxy (%)	Massa Fiberglass (%)	Massa PKS (%)	Kekuatan Lentur (MPa)
A1	60	16	24	58,74
A2	60	20	20	74,53
A3	60	28	12	169,67
A4	50	30	20	127,39

Dari hasil pengujian, terlihat bahwa Sampel A3 menunjukkan nilai kekuatan lentur tertinggi, yaitu 169,67 MPa. Komposisi ini memiliki proporsi *fiberglass* paling tinggi (28%) dan PKS paling rendah (12%) dalam matriks (60%) Epoxy. Sebaliknya, sampel A1, yang memiliki proporsi PKS tertinggi (24%) memberikan nilai kekuatan lentur terendah, yakni 58,7 MPa. Tren ini mengindikasikan dominasi *fiberglass* dalam memberikan kekuatan dan peran sensitif serbuk PKS terhadap integritas structural. Untuk visualisasi yang lebih jelas, hasil kekuatan lentur rata-rata ini disajikan dalam bentuk diagram batang, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.

Rendahnya nilai kekuatan lentur yang signifikan pada spesimen dengan fraksi massa PKS tinggi (A1 dan A2) mengindikasikan adanya fenomena *particle clustering* atau aglomerasi. Secara teknis, partikel PKS berukuran 100 mesh memiliki luas permukaan yang besar; pada fraksi massa tinggi, resin epoksi mengalami kesulitan untuk membasahi (*wetting*) seluruh permukaan partikel secara sempurna. Hal ini menyebabkan terbentuknya area "miskin resin" yang bertindak sebagai titik konsentrasi tegangan (*stress concentration sites*). Fenomena ini didukung oleh penelitian yang menyatakan bahwa tanpa modifikasi kimia pada permukaan penguat alami, ikatan antarmuka (*interfacial bonding*) antara PKS yang hidrofilik dan epoksi yang hidrofobik cenderung lemah, sehingga memudahkan terjadinya *crack propagation* di sepanjang batas partikel-matriks saat menerima beban (Lamidi et al., 2025).



Gambar 4. Grafik Perbandingan Kekuatan Lentur Komposit

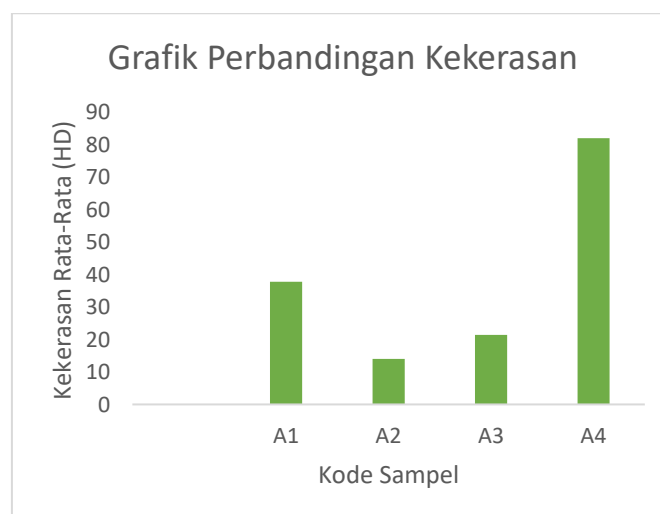
3.2. Hasil Pengujian Kekerasan Shore D

Karakterisasi mekanik permukaan spesimen dilakukan melalui uji kekerasan Shore D sesuai standar ASTM D2240. Pengujian menggunakan durometer digital dengan indenter kerucut baja 30°. Pengukuran diambil pada lima titik berbeda untuk setiap sampel guna memastikan homogenitas data, dengan waktu kontak (*dwel time*) selama 15 detik sebelum nilai akhir dicatat. Hasil pengujian dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Komposisi Material dan Hasil Pengujian Kekerasan Shore D

Kode Sampel	Massa Epoxy (%)	Massa Fiberglass (%)	Massa PKS (%)	Rata-rata Kekerasan (HD)
A1	60	16	24	37,8
A2	60	20	20	14,0
A3	60	28	12	21,4
A4	50	30	20	82,0

Untuk visualisasi yang lebih jelas, hasil kekerasan rata-rata ini disajikan dalam bentuk diagram batang, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Grafik Perbandingan Kekerasan Komposit

Berdasarkan data hasil pengujian, nilai kekerasan Shore D menunjukkan variasi yang signifikan, dengan nilai tertinggi dicapai oleh spesimen A4 sebesar 82,0 HD. Peningkatan drastis pada spesimen A4 ini dapat dijelaskan melalui rasio fraksi volume antara matriks dan penguat; A4 memiliki kandungan epoksi terendah (50%) dengan total penguat (Fiberglass dan PKS) mencapai 50%. Rendahnya volume matriks menciptakan *packing density* (kepadatan pengemasan) yang lebih tinggi, sehingga beban tekan dari indenter Shore D diterima langsung oleh fase penguat yang memiliki rigiditas lebih tinggi daripada fase polimer. Fenomena ini sesuai dengan teori Hull dan Clyne [10], yang menyatakan bahwa pada komposit dengan penguat partikulat atau hibrid, kekerasan permukaan akan meningkat secara signifikan seiring dengan berkurangnya jarak antar partikel penguat akibat minimalisasi fase matriks.

Di sisi lain, terdapat tren unik di mana spesimen A1 (24% PKS) memiliki nilai kekerasan yang lebih tinggi (37,8 HD) dibandingkan spesimen A3 (21,4 HD), meskipun A3 memiliki kandungan fiberglass yang lebih banyak. Hal ini mengindikasikan bahwa serbuk PKS berfungsi sebagai *particulate filler* yang efektif dalam mengisi celah-celah kosong (*interstitial sites*) pada matriks epoksi di permukaan, sehingga memberikan resistensi lebih baik terhadap penetrasi lokal. Menurut Ojo et al. [8], penggunaan partikel cangkang kelapa sawit sebagai penguat tambahan dapat meningkatkan kekakuan permukaan komposit karena karakteristik partikelnya yang keras dan getas.

Pada Sampel A2, nilai kekerasan Shore (14,0 HD) memiliki nilai yang jauh lebih rendah dibandingkan A1 (37,8 HD), meskipun kandungan PKS pada A2 lebih sedikit. Secara teknis, hal ini tidak mengikuti tren umum di mana penambahan *filler* keras seharusnya meningkatkan kekerasan. Anomali ini diindikasikan terjadi akibat Inhibisi Proses Curing atau ketidakhomogenan campuran pada sampel spesifik tersebut. PKS sebagai material organik memiliki sifat higroskopis; adanya kelembapan residual yang terjebak di dalam serbuk saat proses pencampuran dapat mengganggu reaksi polimerisasi antara resin dan *hardener*. Hal ini menyebabkan terbentuknya fase matriks yang "lunak" atau tidak ter-curing sempurna (*under-cured matrix*). Selain itu, kemungkinan adanya *air trapping* (gelembung udara besar) yang terjebak di bawah permukaan titik uji Shore D pada Sampel A2 berkontribusi pada rendahnya resistensi penetrasi indenter.

3.3. Analisis Sifat Mekanis dan Korelasi Antar-Fase

Hasil pengujian menunjukkan adanya korelasi yang kontras antara kekuatan struktural (lentur) dan ketahanan permukaan (kekerasan). Spesimen A3 mencapai kekuatan lentur tertinggi (169,67 MPa), yang mengindikasikan bahwa komposisi 28% fiberglass dan 12% PKS merupakan titik optimal untuk transfer beban yang efektif. Merujuk pada (*Materials Science and Engineering An Introduction by William D. Callister, Jr., David G. Rethwisch (z-Lib.Org)*, 2020) pada fraksi massa rendah, partikel PKS mampu terdistribusi dengan baik di antara serat kaca tanpa mengganggu kontinuitas matriks epoksi.

Namun, peningkatan fraksi PKS pada spesimen A1 dan A2 menyebabkan penurunan kekuatan mekanis yang signifikan. Secara teoritis, fenomena ini disebabkan oleh tingginya kadar *void* (rongga) dan aglomerasi partikel akibat sifat hidrofilik serat alam yang tidak diberi perlakuan kimia. Sebuah penelitian oleh (Nurazzi et al., 2021) menegaskan bahwa tanpa modifikasi permukaan, ikatan antarmuka (*interfacial bonding*) antara serat dan matriks polimer menjadi lemah, sehingga menciptakan titik konsentrasi tegangan yang memicu kegagalan prematur.

Di sisi lain, lonjakan kekerasan pada spesimen A4 (82,0 HD) terjadi akibat pengurangan fraksi massa matriks menjadi 50%. Sesuai dengan teori pada (D. Hull & T. W. Clyne, 2019), pengurangan volume matriks meningkatkan kepadatan pengemasan

penguat (*packing density*), sehingga permukaan komposit menjadi lebih kaku dan tahan terhadap penetrasi indenter, meskipun hal ini meningkatkan sifat getas (*brittleness*) material secara keseluruhan sebagaimana terlihat pada nilai kekuatan lenturnya yang lebih rendah dibanding A3.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa penambahan serbuk cangkang kelapa sawit (PKS) sebagai penguat hibrid pada komposit fiberglass-epoksi memberikan pengaruh yang signifikan namun pada sifat mekanis material tertentu. Kekuatan lentur optimal sebesar 169,67 MPa dicapai pada spesimen A3 dengan komposisi 12% PKS dan 28% fiberglass. Penambahan PKS melebihi ambang batas tersebut (di atas 12%) justru menurunkan kekuatan lentur secara drastis akibat fenomena aglomerasi dan terbentuknya *void* yang melemahkan ikatan antarmuka antara serat alam dan matriks polimer yang perlu dikonfirmasi lebih lanjut melalui Pengamatan SEM.

Sementara itu, karakteristik kekerasan permukaan menunjukkan tren yang berbeda, di mana spesimen A4 memiliki nilai tertinggi sebesar 82,0 HD. Hal ini membuktikan bahwa pengurangan fraksi massa matriks (menjadi 50%) meningkatkan kepadatan pengemasan penguat, yang efektif dalam meningkatkan resistensi permukaan terhadap deformasi lokal meskipun menurunkan fleksibilitas strukturalnya.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan Terima Kasih Penulis menyampaikan penghargaan dan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Politeknik Negeri Jakarta (PNJ), khususnya Unit Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (P3M), atas dukungan finansial yang telah diberikan. Penelitian ini dapat terselesaikan berkat pendanaan yang diperoleh melalui program Hibah Penelitian Asisten Ahli pada tahun anggaran 2025.

REFERENCES

- D. Hull, & T. W. Clyne. (2019). *An Introduction to Composite Materials* (3rd ed.). Cambridge University Press.
- Damaru, R., Novaringga, A., dan Simparmin Br Ginting, D., Soemantri Bojonegoro No, J., & Lampung, B. (2021). Indonesian Journal of Chemical Science Resin Composite Synthesis Reinforced with Banana Tree Fiber with Carboxylic Silica (SiO₂-COOH) Addition as a Nanofiller. In *J. Chem. Sci* (Vol. 10, Number 1). <http://journal.unnes.ac.id/sju/index.php/ijcs>
- Fauzan, M., Laila Rizki, A., Berninda Pratiwi, D., Yuniar Kartika, N., Maulana Isnan Firmansyah, D., & Junianto, S. (2024). *Analisis Pengaruh Variasi Komposisi Material Komposit Berbahan Limbah Serat Daun Nanas pada Bilah Turbin Arus Laut* (Vol. 26, Number 4).
- Ferdiansyah, S., & Soetanto, M. F. (2024). *Prosiding the 15 th Industrial Research Workshop and Nasional Seminar Bandung*.
- Gay, D. (2022). *Composite Materials*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003195788>
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2023). *Laporan Akhir: Wind Energy Development in Indonesia-Investment Plan*.
- Lamidi, S. B., K.A, A., N.A, R., Isiaka, O., Ajayi, M., Olojo, M. A., T., T. A., & O, E. J. (2025). Formulation and Predicted Properties of Carbonized Palm Kernel Shell, Stone Dust, and Coconut Fiber Hybrid Reinforced Epoxy Composites. *Journal of Materials Science Research and Reviews*, 8(4), 947–959. <https://doi.org/10.9734/jmsrr/2025/v8i4451>

- Marsono, M., Hanifa, S. F., & Akbar, F. (2021). Pembuatan dan Pengujian Panel Honeycomb Sandwich dengan Inti Berbentuk Gelombang Berbahan Komposit Serat Bambu. *Jurnal Rekayasa Hijau*, 5(2), 165–177. <https://doi.org/10.26760/jrh.v5i2.165-177>
- Materials Science and Engineering An Introduction by William D. Callister, Jr., David G. Rethwish (z-lib.org)*. (2020).
- Nurazzi, N. M., Asyraf, M. R. M., Fatimah Athiyah, S., Shazleen, S. S., Rafiqah, S. A., Harussani, M. M., Kamarudin, S. H., Razman, M. R., Rahmah, M., Zainudin, E. S., Ilyas, R. A., Aisyah, H. A., Norrrahim, M. N. F., Abdullah, N., Sapuan, S. M., & Khalina, A. (2021). A review on mechanical performance of hybrid natural fiber polymer composites for structural applications. In *Polymers* (Vol. 13, Number 13). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/polym13132170>
- Nursidik, M. D., Gusniar, I. N., Naubnome, V., & -, O. (2021). Manufaktur Bilah Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT) Tipe Taperless Menggunakan Airfoil S3024 dengan Daya 500 WATT di PT. Lentera Bumi Nusantara. *Infomatek*, 32(2), 79–90. <https://doi.org/10.23969/infomatek.v23i2.4405>
- Ojo, A. A., Awogbemi, O., & Olanipekun, K. A. (2024). Development and characterization of sustainable epoxy resin composites reinforced with palm kernel shell particulate and sisal fiber. *Discover Applied Sciences*, 6(11). <https://doi.org/10.1007/s42452-024-06226-0>
- Renewable Energy Agency, I. (2022). *International Renewable Energy Agency (IRENA)*. www.irena.org
- Samuel, B. O., Sumaila, M., & Dan-Asabe, B. (2022). PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF NATURAL FIBER REINFORCED POLYMER COMPOSITES WITH POTENTIALS FOR WIND TURBINE BLADE APPLICATIONS: A REVIEW. *Jurnal Mekanikal*, 45, 1–14. <https://doi.org/10.11113/jm.v45.450>
- Test Method for Rubber Property Durometer Hardness*. (2021). ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D2240-15R21>
- Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials*. (2017). ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D0790-17>