

Karakteristik Kekuatan Tarik dan Kekerasan Komposit Epoxy Yang Diperkuat Serat Kaca dan Bio-Filler Tulang Sapi

Nurdin^{1*}, Indra Mawardi¹, Hanif¹, Saifuddin¹, Syamsuar¹, Rahmat Maulana¹

¹ Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Lhokseumawe
Jln. B.Aceh Medan Km.280 Buketrata 24301 INDONESIA

^{1*}nurdin@pnl.ac.id

Abstrak—Komposit berbasis polimer termoset seperti epoxy semakin banyak dikembangkan untuk berbagai aplikasi teknik karena memiliki kekuatan spesifik tinggi, ketahanan kimia yang baik, serta kemudahan dalam proses fabrikasi. Namun demikian, sifat mekanik epoxy murni masih dapat ditingkatkan atau disesuaikan melalui penambahan penguat, baik berupa serat sintesis maupun filler alami. Penelitian ini berfokus pada pemanfaatan bio-filler tulang sapi yang kaya kalsium fosfat sebagai bahan penguat tambahan dalam komposit epoxy yang telah diperkuat dengan serat kaca. Pemanfaatan tulang sapi tidak hanya bertujuan meningkatkan performa mekanik tertentu, tetapi juga menawarkan pendekatan ramah lingkungan melalui pemanfaatan limbah biomaterial. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh variasi kandungan bio-filler tulang sapi (0%, 5%, 10%, dan 15% berat) terhadap sifat mekanik komposit, khususnya kekuatan tarik dan kekerasan Shore-D. Pengujian tarik dilakukan untuk memperoleh kurva tegangan–regangan, sedangkan pengujian kekerasan menggunakan metode Shore-D untuk mengevaluasi resistansi material terhadap penetrasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan bio-filler tulang sapi cenderung menurunkan kekuatan tarik komposit. Epoxy murni memiliki kekuatan tarik tertinggi (~30 MPa), sedangkan komposit dengan filler 15% mengalami penurunan signifikan. Hal ini disebabkan oleh ketidakserasian antar-fase dan potensi terbentuknya area lemah pada interaksi filler–matriks. Sebaliknya, nilai kekerasan Shore-D mengalami peningkatan hampir linear seiring bertambahnya kadar filler, dari 63,40 pada epoxy murni menjadi 64,94 pada komposit dengan 15% filler. Peningkatan ini berkaitan dengan sifat kaku tulang sapi yang mampu memperkuat ketahanan permukaan terhadap penetrasi. Secara umum, hasil penelitian ini menegaskan adanya trade-off sifat mekanik: kekuatan tarik menurun, sedangkan kekerasan meningkat dengan penambahan bio-filler. Kontribusi penelitian ini terletak pada pembuktian potensi tulang sapi sebagai bio-filler alternatif dalam komposit epoxy, terutama untuk aplikasi yang lebih menekankan pada kekerasan dan ketahanan aus dibandingkan kekuatan tarik.

Kata kunci— komposit epoxy, serat kaca, bio-filler tulang sapi, kekuatan tarik, kekerasan Shore-D.

Abstract—Polymer matrix composites based on thermoset epoxy are increasingly developed for various engineering applications due to their high specific strength, excellent chemical resistance, and ease of fabrication. However, the mechanical properties of neat epoxy can still be tailored or improved through the addition of reinforcements, including both synthetic fibers and natural fillers. This study focuses on the utilization of bovine bone bio-filler, which is rich in calcium phosphate, as an additional reinforcement in glass fiber–reinforced epoxy composites. The use of bovine bone not only aims to enhance specific mechanical performances but also provides an environmentally friendly approach by valorizing biowaste materials. The objective of this research is to investigate the effect of different bovine bone bio-filler loadings (0%, 5%, 10%, and 15% by weight) on the mechanical properties of the composites, particularly tensile strength and Shore-D hardness. Tensile tests were conducted to obtain stress–strain behavior, while hardness tests were performed using the Shore-D method to evaluate the material's resistance to indentation. The results reveal that the incorporation of bovine bone bio-filler tends to reduce the tensile strength of the composites. Neat epoxy exhibited the highest tensile strength (~30 MPa), while composites containing 15% filler showed a significant reduction. This behavior is attributed to interfacial incompatibility and the formation of weak regions within the filler–matrix interaction. Conversely, Shore-D hardness values increased almost linearly with higher filler contents, ranging from 63.40 for neat epoxy to 64.94 for composites with 15% filler. The improvement is associated with the rigid nature of bone particles, which restricts local deformation and enhances surface resistance to penetration. Overall, the study demonstrates a trade-off in mechanical performance: tensile strength decreases whereas hardness increases with the addition of bovine bone filler. The main contribution of this work lies in highlighting the potential of bovine bone as a sustainable bio-filler in epoxy composites, particularly for applications where surface hardness and wear resistance are more critical than tensile performance.

Keywords— epoxy composites, glass fiber, bovine bone bio-filler, tensile strength, Shore-D hardness.

I. PENDAHULUAN

Komposit berbasis polimer telah menjadi salah satu material rekayasa yang paling banyak diteliti dan diaplikasikan dalam dekade terakhir karena kombinasi keunggulan sifat mekanik, kemampuan fabrikasi yang fleksibel, serta biaya produksi yang relatif rendah. Epoxy resin sebagai salah satu matriks polimer termoset menawarkan sifat adhesi yang tinggi, kekuatan mekanik yang baik, ketahanan terhadap lingkungan, serta kestabilan dimensi yang menjadikannya kandidat utama pada pembuatan komposit struktural. Resin epoxy secara luas

digunakan dalam aplikasi kedirgantaraan, otomotif, kelautan, hingga konstruksi karena kemampuannya mengikat serat penguat maupun partikel pengisi dengan kuat, serta kemudahan proses curing yang dapat disesuaikan [1].

Penguatan matriks epoxy dengan serat telah terbukti mampu meningkatkan performa mekanik secara signifikan. Di antara berbagai jenis serat, serat kaca (glass fiber) menjadi salah satu yang paling banyak digunakan karena memiliki kekuatan tarik tinggi, modulus elastisitas yang memadai,

ketahanan kimia yang baik, serta harga yang relatif lebih rendah dibandingkan serat karbon atau aramid. Komposit epoxy-serat kaca mampu menunjukkan perilaku mekanik unggul dalam hal kekuatan tarik, kekakuan, serta ketahanan terhadap kerusakan, sehingga banyak digunakan pada struktur ringan dengan beban menengah seperti panel kendaraan, komponen kapal, dan peralatan olahraga [2], [3]. Akan tetapi, meskipun komposit epoxy-serat kaca memiliki sifat mekanik yang baik, ketahanan aus dan kekerasan permukaan sering kali masih perlu ditingkatkan, terutama untuk aplikasi yang membutuhkan resistansi gores maupun gesekan.

Untuk menjawab kebutuhan peningkatan sifat tertentu, penambahan partikel pengisi (filler) ke dalam matriks epoxy telah banyak dieksplorasi. Filler anorganik, seperti silika, alumina, atau karbon hitam, secara tradisional digunakan untuk meningkatkan kekerasan, ketahanan aus, dan sifat tribologis. Namun, penggunaan filler berbasis sumber daya tidak terbarukan menimbulkan isu keberlanjutan dan dampak lingkungan. Oleh karena itu, penelitian terkini mulai mengarah pada pemanfaatan bio-filler yang berasal dari limbah biomaterial, baik organik maupun biomineral, sebagai alternatif penguat yang lebih ramah lingkungan [4], [5].

Salah satu limbah biomineral yang menarik untuk diteliti adalah tulang sapi (bovine bone). Tulang sapi secara alami tersusun atas matriks organik (kolagen) dan fase mineral utama berupa kalsium fosfat dalam bentuk hidroksiapatit ($\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$). Setelah melalui perlakuan termal (kalsinasi pada 800–1000 °C), komponen organik terbakar habis, menyisakan serbuk hidroksiapatit dengan kemurnian tinggi. Hidroksiapatit diketahui memiliki kekerasan yang cukup tinggi, bioaktivitas, serta kestabilan termal, sehingga potensial dimanfaatkan sebagai filler pada matriks polimer [6]. Beberapa studi melaporkan bahwa penambahan serbuk tulang sapi atau hidroksiapatit ke dalam epoxy mampu meningkatkan kekerasan dan ketahanan aus, meskipun efeknya terhadap kekuatan tarik sering kali bervariasi tergantung ukuran partikel, fraksi massa, dan kualitas dispersi filler [4].

Kombinasi serat kaca sebagai penguat utama dan bio-filler tulang sapi sebagai pengisi dalam matriks epoxy berpotensi menghasilkan material hibrida dengan sifat mekanik yang seimbang. Serat kaca berfungsi memberikan kekuatan tarik dan kekakuan, sementara bio-filler tulang sapi diharapkan meningkatkan kekerasan dan ketahanan aus permukaan. Pendekatan hibridisasi ini sejalan dengan tren penelitian terkini pada material komposit yang menekankan pada *multi-scale reinforcement*, yaitu mengombinasikan penguat pada skala makro (serat kontinu/semi-kontinu) dengan partikel mikro/nano untuk mencapai peningkatan sifat yang lebih menyeluruh [7].

Namun demikian, terdapat sejumlah tantangan yang perlu diperhatikan dalam penerapan bio-filler tulang sapi pada komposit epoxy-serat kaca. Pertama, partikel tulang sapi yang tidak terdispersi homogen dapat menyebabkan aglomerasi yang memicu konsentrasi tegangan lokal, sehingga menurunkan kekuatan tarik material. Kedua, sifat hidrofilik dari partikel kalsium fosfat dapat menyebabkan lemahnya ikatan antarmuka dengan matriks epoxy yang bersifat hidrofobik. Hal ini

berpotensi menghasilkan rongga (void) atau debonding pada saat pembebanan, yang justru memperlemah performa mekanik [2], [8]. Oleh karena itu, strategi seperti modifikasi permukaan partikel (misalnya dengan silanisasi) atau optimisasi fraksi massa filler perlu diteliti secara lebih lanjut.

Beberapa penelitian terdahulu telah mengkaji pemanfaatan limbah tulang sebagai filler pada polimer. Misalnya, [4] melaporkan bahwa penambahan serbuk tulang sapi hingga 15% ke dalam epoxy meningkatkan kekerasan dan ketahanan aus secara signifikan, meskipun kekuatan tarik mengalami sedikit penurunan. Di sisi lain, penelitian oleh [2] menunjukkan bahwa komposit epoxy-serat kaca memiliki peningkatan kekerasan setelah ditambahkan nanopartikel anorganik, tetapi belum banyak studi yang mengombinasikan filler bio-mineral dengan penguatan serat kaca. Beberapa kajian lain juga menunjukkan bahwa hidroksiapatit hasil kalsinasi tulang dapat berfungsi sebagai filler yang efektif dalam memperbaiki sifat tribologis epoxy, tetapi masih minim laporan yang menghubungkannya secara sistematis dengan sifat tarik dan kekerasan sekaligus [7], [9].

Masih terbatasnya studi yang secara khusus membandingkan pengaruh fraksi massa bio-filler tulang sapi terhadap dua sifat mekanik kunci sekaligus, yakni kekuatan tarik dan kekerasan, pada komposit epoxy yang diperkuat serat kaca. Berdasarkan gap tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki karakteristik kekuatan tarik dan kekerasan komposit epoxy-serat kaca dengan penambahan bio-filler tulang sapi pada berbagai fraksi massa. Pendekatan yang digunakan meliputi pembuatan komposit dengan metode hand lay-up/laminasi, variasi konsentrasi filler 5, 10, dan 15 wt%, serta pengujian mekanik sesuai standar ASTM untuk tarik dan kekerasan.

Hasil penelitian ini diharapkan tidak hanya memperkaya literatur mengenai komposit berbasis epoxy dengan penguat hibrida, tetapi juga memberikan kontribusi praktis dalam pengembangan material struktural ringan dengan kekuatan tarik yang tetap memadai dan kekerasan permukaan yang lebih tinggi. Aplikasi potensial meliputi panel otomotif, komponen peralatan industri, serta material konstruksi ringan yang memerlukan kombinasi sifat mekanik tersebut.

II. METODOLOGI PENELITIAN

A. Material dan Peralatan

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain :

- Resin *epoxy* dan hardener, sebagai matriks. Resin *epoxy* yang digunakan adalah merek *Eposchon* yaitu *type bisphenol* buatan Jerman.
- Tulang sapi kering yang dihaluskan
- Serat E-glass jenis CSM
- Mirror glass
- Amplas

Peralatan untuk proses pembentukan komposit: mesin diskmill, ayakan mesh no 40, cetakan komposit, mesin gerinda tangan, timbangan, mixer, jangka sorong, dan

beberapa peralatan pendukung lainnya. Sedangkan peralatan untuk pengujian komposit *universal machine testing*, dan alat uji kekerasan shore-D.

B. Pembentukan Komposit

Proses pembuatan komposit dilakukan secara *hand lay up*. Langkah awal dimulai dengan mempersiapkan cetakan dari kaca. Cetakan diolesi dengan *mirror glass* untuk memudahkan pelepasan komposit nantinya. Komposit dibentuk dengan fraksi volume tulang sebesar 5%, 10%, dan 15%. Langkah selanjutnya adalah menuangkan resin *epoxy type A* ke dalam wadah sesuai dengan fraksi volume. Kemudian masukkan partikel tulang sapi yang telah dioven sebelumnya dengan kekeringan <10% ke dalam resin. Aduk kedua material tersebut hingga rata menggunakan mixer. Setelah rata, masukan *epoxy type B (hardener)* dan kembali dimixer hingga rata. Setelah campuran resin dan partikel tulang sapi sudah tercampur dengan baik, maka campuran akan dituangkan ke dalam cetakan komposit secara bertahap. Serat E-glass sebanyak 1 lapis diletakan di tengah-tengah cetakan. Setelah proses pencetakan selesai, komposit dibiarkan pada suhu kamar untuk proses pengerasannya. Setelah 1x24 jam material komposit yang sudah dicetak dapat dikeluarkan dari cetakan untuk kemudian dilakukan proses pembentukan spesimen menggunakan bantuan gerinda tangan.

C. Karakterisasi Komposit

Pengujian tarik digunakan untuk mengevaluasi sifat mekanik komposit polimer, khususnya kekuatan tarik, regangan saat putus, dan modulus elastisitasnya. Dalam uji ini, spesimen akan ditarik secara perlahan sampai mengalami deformasi plastik atau patah. Spesimen pengujian tarik disesuaikan dengan standar ASTM D3039: Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials. Gambar 1 memperlihatkan proses pengujian tarik.



Gambar 1. Pengujian tarik

Kekerasan Shore D dari komposit diukur menggunakan durometer mengacu standar ASTM D2240 pada suhu ruangan. Untuk proses evaluasi, jarum durometer dibuat menembus ke

dalam komposit dengan memberikan beban pada tuas tangan. Hasil pembacaan pada penunjuk durometer saat jarum menembus seluruhnya ke dalam sampel komposit diambil sebagai angka kekerasan Shore dari sampel yang bersangkutan. Kekerasan setiap sampel ditemukan dengan mengambil rata-rata lima hasil pembacaan pada setiap sisi sampel.

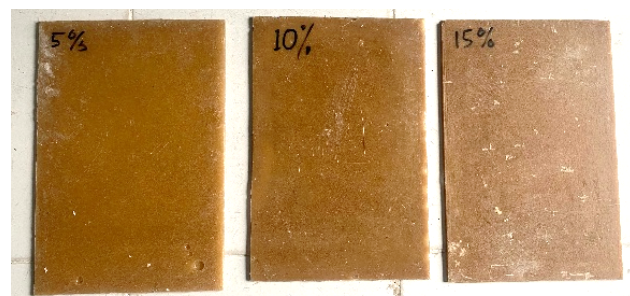


Gambar 2. Proses pengujian kekerasan

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

D. Komposit Binderless

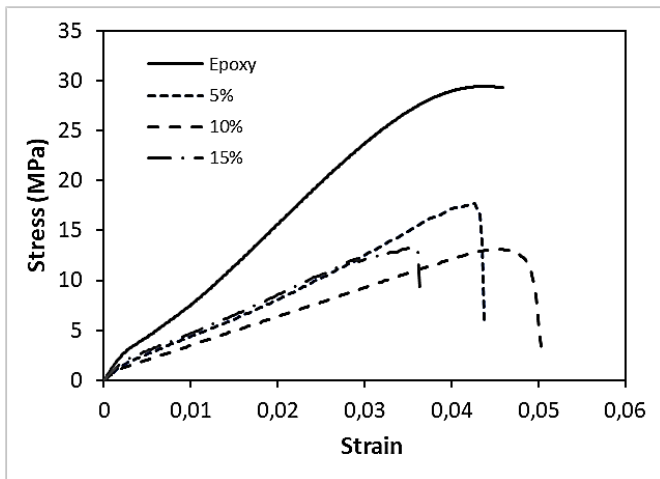
Gambar 3 memperlihatkan panel komposit epoxy dengan filler tulang sapi dan E-glass yang telah diproduksi. Selanjutnya panel komposit tersebut dipotong menjadi beberapa spesimen uji mekanis tarik dan kekerasan.



Gambar 3. Komposit epoxy dengan filler tulang sapi dan E-glass

E. Perilaku Kekuatan Tarik

Gambar 4 memperlihatkan grafik tipikal dari stress vs strain hasil pengujian lentur komposit dengan filler tulang sapi dan E-glass. Kurva tegangan-regangan menunjukkan tren yang konsisten: sampel epoxy murni memiliki perilaku lebih duktile dengan tegangan puncak tertinggi (~30 MPa) dan regangan patah terbesar (~0,045-0,05), sedangkan penambahan bio-filler tulang sapi menyebabkan penurunan tegangan maksimum dan regangan patah secara progresif. Sampel dengan 5% filler masih mempertahankan sebagian kemampuan deformasi namun sudah menunjukkan penurunan UTS yang signifikan (~17-18 MPa). Pada fraksi 10% dan 15% terlihat penurunan lebih lanjut (kira-kira 13-14 MPa dan ~11 MPa), serta kegagalan pada regangan yang lebih rendah.



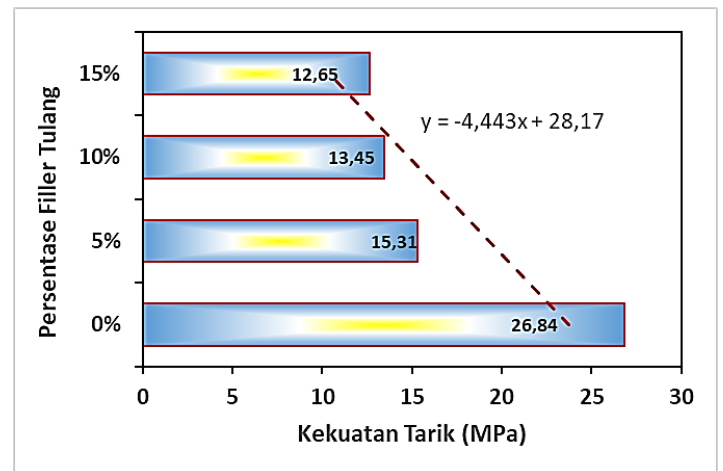
Gambar 4. Tipikal tegangan regangan kekuatan tarik

Kecenderungan ini mengindikasikan bahwa kehadiran partikel filler kaku mengurangi kontinuitas dan kemampuan deformasi matriks epoxy, sehingga material menjadi lebih getas. Penurunan UTS yang bergantung pada fraksi filler kemungkinan besar disebabkan oleh (1) aglomerasi partikel pada fraksi lebih tinggi yang menciptakan konsentrator tegangan, (2) adhesi antarmuka filler–matriks yang kurang optimal sehingga terjadi debonding dan pull-out partikel saat pembebanan, serta (3) berkurangnya volume matriks efektif untuk mendistribusikan beban. Regangan patah yang lebih kecil pada sampel berfiller mencerminkan berkurangnya kemampuannya menahan deformasi plastis sebelum inisiasi retak.

Secara praktis, grafik ini menggambarkan trade-off klasik antara kekuatan tarik dan penambahan filler kaku: filler meningkatkan kekakuan/kekerasan permukaan (diantisipasi dari sifat filler hidroksiapatit) namun cenderung menurunkan ketahanan tarik jika dispersi dan antarmuka tidak teroptimalkan. Oleh karena itu, untuk aplikasi yang menuntut kombinasi tarik tinggi dan kekerasan, perlu strategi optimisasi—mis. menurunkan fraksi filler, memperbaiki dispersibilitas (mikro/nano ukuran) atau melakukan modifikasi permukaan filler agar adhesi antarmuka membaik. *binderless* ampas tebu. Dari tipikal curva yang terbentuk memperlihatkan bahwa komposit *binderless* ampas tebu memiliki regangan yang lebih panjang.

Selanjutnya Gambar 5 memperlihatkan hasil pengujian tarik dari komposit dengan bio filler tulang sapi dengan variasi bio filler 5%, 10% dan 15%. Dari hasil pengujian (Gambar IV.9), komposit serat E-glass dengan bio filler tulang sapi menghasilkan kekuatan tarik dengan kisaran 12,65-15,31 MPa. Komposit dengan 5% bio filler tulang sapi memiliki Kekuatan tarik tertinggi sebesar 15,31 MPa, diikuti oleh komposit dengan bio filler 10% dan 15%, dengan nilai masing-masing 13,45 dan 12,65 MPa. Dibandingkan dengan komposit epoksi murni, nilai kekuatan tarik serat E-glass dengan bio filler tulang lebih rendah. Secara umum, hasil pengujian menunjukkan tren penurunan kekuatan tarik secara bertahap seiring dengan

meningkatnya persentase bio filler tulang sapi di dalam komposit epoxy. Bio filler tulang sapi telah memberi kontribusi negatif terhadap kekuatan tarik.

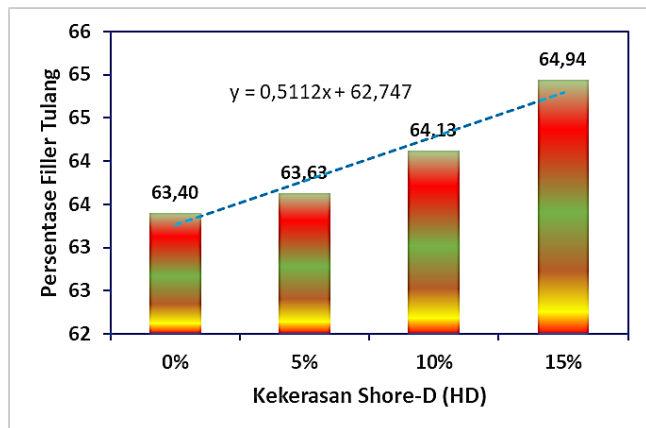


Gambar 5 Kekuatan tarik komposit epoxy berpenguat E-glass dan bio filler tulang sapi

Penurunan kekuatan tarik dipengaruhi oleh melemahnya daya ikat antara matriks terhadap penguat. Penurunan kekuatan tarik mungkin dikarenakan terjadinya aglomerasi akibat filler, yang diakibatkan kemungkinan terjadinya jebakan gelembung udara berukuran makro dari atmosfer menjadi lebih tinggi. Penurunan kekuatan tarik disebabkan oleh aglomerasi yang bertindak sebagai pusat konsentrasi tegangan yang mewakili cacat internal. Aglomerasi bio filler tulang sapi menyebabkan interaksi antarmuka yang buruk antara serat dan pengisi dengan matriks, yang menyebabkan penurunan kekuatan tarik. Selain aglomerasi, komposit memiliki cacat mikro sebagai rongga yang memicu retakan. Temuan ini didukung oleh penelitian sebelumnya yang menyatakan seiring dengan meningkatnya kandungan penambahan nanofiller menyebabkan kekuatan tarik cenderung menurun [10][11].

F. Perilaku Kekerasan Shore-D

Data hasil pengujian menunjukkan bahwa penambahan bio filler tulang sapi pada matriks epoxy memberikan pengaruh positif terhadap peningkatan nilai kekerasan komposit. Gambar 6 memperlihatkan komposit tanpa filler (0%) menghasilkan nilai kekerasan tercatat sebesar 63,40 HD. Penambahan filler sebesar 5% meningkatkan kekerasan menjadi 63,63 HD, kemudian bertambah menjadi 64,13 HD pada komposisi 10%, dan mencapai nilai tertinggi 64,94 HD pada komposisi 15%. Tren ini menunjukkan hubungan yang cenderung linier, di mana semakin tinggi kandungan filler tulang sapi, semakin tinggi pula kekerasan komposit yang dihasilkan.



Gambar 6. Kekerasan komposit epoxy berpenguat E-glass dan bio filler tulang sapi

Peningkatan kekerasan ini dapat dijelaskan oleh sifat mekanik filler tulang sapi yang memiliki kekuatan dan kekakuan relatif tinggi dibandingkan matriks epoxy murni. Partikel tulang sapi yang terdispersi secara merata berfungsi sebagai pendukung penguat, sehingga meningkatkan ketahanan permukaan komposit terhadap penetrasi beban uji. Selain itu, interaksi antarmuka yang baik antara matriks dan filler memfasilitasi transfer tegangan yang lebih efektif, sehingga deformasi plastik pada permukaan dapat diminimalkan.

Hasil ini sejalan dengan temuan penelitian sebelumnya, misalnya oleh [11], yang melaporkan bahwa penambahan filler alumina mampu meningkatkan kekerasan dan sifat mekanik komposit polimer. Mekanisme ini umumnya disebabkan oleh sifat kaku filler, distribusi yang homogen, serta ikatan matriks–filler yang kuat. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa penggunaan filler tulang sapi berpotensi meningkatkan kekerasan komposit epoxy, terutama pada kadar filler hingga 15% seperti pada penelitian ini.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian mengenai komposit epoxy yang diperkuat dengan serat kaca dan bio-filler tulang sapi, dapat disimpulkan bahwa sifat tarik komposit mengalami penurunan seiring dengan penambahan bio-filler tulang sapi. Epoxy murni menunjukkan kekuatan tarik tertinggi (~30 MPa), sedangkan penambahan filler sebesar 5–15% menurunkan kekuatan tarik secara signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa keberadaan partikel filler cenderung mengganggu ikatan antar-molekul epoxy dan distribusi tegangan, sehingga komposit menjadi lebih rapuh pada pembebanan tarik. Sifat kekerasan komposit menunjukkan tren yang berlawanan dengan uji tarik, yaitu meningkat seiring dengan bertambahnya kadar bio-filler tulang sapi. Nilai kekerasan Shore-D meningkat hampir linear dari 63,40 (0% filler) menjadi 64,94 (15% filler). Peningkatan ini disebabkan oleh sifat intrinsik tulang sapi yang keras dan kaku, sehingga memperkuat resistansi material terhadap penetrasi. Secara keseluruhan, terdapat trade-off sifat mekanik pada komposit epoxy dengan penambahan bio-filler tulang sapi. Penambahan filler menurunkan kekuatan tarik, tetapi

meningkatkan kekerasan permukaan. Oleh karena itu, pemilihan komposisi filler harus disesuaikan dengan kebutuhan. Hasil penelitian ini menegaskan bahwa bio-filler tulang sapi berpotensi sebagai bahan penguat komposit epoxy, khususnya untuk aplikasi yang lebih menekankan pada kekerasan dan ketahanan permukaan dibandingkan kekuatan tarik.

REFERENSI

- [1] Z.-T. Xiao *et al.*, “Glass fiber-reinforced epoxy composites with high thermal conductivity, flame retardancy and mechanical strength,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 194, p. 108905, 2025.
- [2] A. M. Amaro, M. F. Paulino, M. A. Neto, and P. N. B. Reis, “Hardness and Roughness of Glass/Epoxy Composite Laminates Subjected to Different Hostile Solutions: A Comparative Study,” *Polymers (Basel)*, vol. 17, no. 7, p. 993, 2025.
- [3] I. Mawardi and H. Lubis, *Proses Manufaktur Plastik Dan Komposit*. Penerbit Andi.
- [4] M. M. H. Talukder, M. S. Islam, and M. Arifuzzaman, “Agro-Waste to High-Performance Composites: Cow Bone Particles as Renewable Reinforcements for Enhanced Mechanical and Fire Safety,” *Hybrid Adv.*, p. 100504, 2025.
- [5] I. Mawardi, “Effect of fiber fibrillation on impact and flexural strength of coir fiber reinforced epoxy hybrid composites,” in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing, 2018, p. 12079.
- [6] A. F. Owa and P. A. Olubambi, “Development and structural evaluation of dog bone particle-reinforced epoxy composites for biomedical applications,” *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2024, no. 1, p. 2259630, 2024.
- [7] J. J. Fekiač *et al.*, “Comprehensive Review: Optimization of Epoxy Composites, Mechanical Properties, & Technological Trends,” *Polymers (Basel)*, vol. 17, no. 3, p. 271, 2025.
- [8] I. Mawardi, M. N. M. Zubir, J. Bakri, A. Jannifar, and Hanif, “Development of a hybrid coir fiber composites as ballistic material,” in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019. doi: 10.1088/1755-1315/268/1/012130.
- [9] I. Mawardi, N. I. Saharudin, A. Ahmad, H. P. S. A. Khalil, C. K. Abdullah, and E. B. Yahya, “Eco-friendly production and performance evaluation of water-resistant cellulose nanofiber bioaerogels,” *Polym. Eng. Sci.*, 2023.
- [10] I. Mawardi, S. Aprilia, M. Faisal, and S. Rizal, “An investigation of thermal conductivity and sound absorption from binderless panels made of oil palm wood as bio-insulation materials,” *Results Eng.*, p. 100319, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2021.100319>.
- [11] I. Mawardi, H. Razak, Z. Akadir, and R. P. Jaya, “The effect of containing Al2O3 microparticles in different matrix polymers on properties of pineapple fiber-reinforced composites,” *Frat. ed Integrità Strutt.*, vol. 67, pp. 94–107, 2024.