

KARAKTERISTIK FISIS DAN MEKANIS KOMPOSIT HIBRIDA POLIURETAN BERPENGISI PARTIKEL AMPAS TEBU DAN SEKAM

Irfan Nur¹, Indra Mawardi^{2*}, Bukhari²

¹Mahasiswa Program Studi Teknologi Rekayasa Manufaktur
Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Lhokseumawe

²Dosen Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Lhokseumawe
Jl. Medan – Banda Aceh Km. 280 Buketrata

*Penulis Koresponden: indratm@pnl.ac.id

Abstrak

Pengembangan material komposit berbasis poliuretan (PU) terus dilakukan untuk meningkatkan performa mekanik dan ketahanan terhadap lingkungan, khususnya terhadap penetrasi air. Salah satu pendekatan yang banyak digunakan adalah penambahan filler, namun variasi jenis dan fraksi filler dapat memberikan pengaruh yang berbeda terhadap karakteristik material. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi jenis dan fraksi filler terhadap sifat mekanik dan fisis komposit poliuretan, meliputi kuat tekan, densitas, dan daya serap air. Spesimen yang diuji terdiri dari poliuretan murni serta komposit poliuretan dengan filler tipe ampas tebu, sekam padi, dan gabungan kedua filler pada beberapa fraksi. Hasil uji kuat tekan menunjukkan bahwa poliuretan murni memiliki nilai tertinggi sebesar 1,14 MPa, sedangkan penambahan filler pada fraksi tinggi menyebabkan penurunan kuat tekan, dengan nilai terendah sebesar 0,39 MPa pada komposit A15. Di antara komposit, filler tipe H pada fraksi 5% menunjukkan performa mekanik terbaik dengan kuat tekan mencapai 1,02 MPa. Hasil uji densitas menunjukkan bahwa densitas material meningkat seiring bertambahnya fraksi filler, dari 65,35 g/cm³ pada PU murni hingga 150,19 g/cm³ pada komposit H15. Sementara itu, hasil uji daya serap air menunjukkan peningkatan signifikan seiring bertambahnya waktu perendaman dan fraksi filler, dengan nilai tertinggi mencapai lebih dari 500% pada komposit A15, sedangkan PU murni menunjukkan daya serap terendah. Berdasarkan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa jenis dan fraksi filler sangat memengaruhi sifat mekanik dan fisis komposit poliuretan. Filler tipe H pada fraksi rendah hingga menengah memberikan keseimbangan optimal antara kekuatan mekanik, kerapatan struktur, dan ketahanan terhadap penyerapan air

Kata Kunci: Komposit, Poliuretan, Filler, Uji Tekan, Uji Fisis

1 Pendahuluan

1.1 Latar belakang

Kebutuhan terhadap material yang kuat, ringan, dan ramah lingkungan terus meningkat seiring perkembangan industri modern. Salah satu material polimer yang banyak digunakan untuk berbagai aplikasi struktural maupun nonstruktural adalah *polyurethane* (PU). Material ini memiliki sifat mekanik yang baik, ringan, mudah dibentuk, serta dapat disesuaikan densitas dan elastisitasnya dengan variasi komposisi polioliol dan isosianat. PU banyak diaplikasikan pada industri otomotif, konstruksi, perabotan, hingga isolasi termal dan akustik [1].

Namun demikian, bahan baku utama PU berasal dari sumber daya *petrochemical*, yang bersifat tidak terbarukan dan berdampak negatif terhadap lingkungan. Selain itu, limbah hasil produksi maupun produk PU setelah masa pakainya sulit terurai secara alami. Permasalahan ini mendorong penelitian ke arah pengembangan material komposit *polyurethane* berbasis sumber daya alam atau biofiller untuk meningkatkan

keberlanjutan sekaligus menurunkan biaya produksi [2], [3].

Di sisi lain, Indonesia sebagai negara agraris menghasilkan limbah pertanian dalam jumlah besar setiap tahunnya. Dua di antaranya adalah ampas tebu (*sugarcane bagasse*) dan sekam padi (*rice husk*). Ampas tebu merupakan residu padat dari proses ekstraksi tebu dalam industri gula, yang umumnya hanya digunakan sebagai bahan bakar boiler atau bahkan di buang begitu saja. Sedangkan sekam padi merupakan limbah kulit padi yang sering dibakar di area persawahan, menghasilkan polusi udara dan emisi karbon dioksida [4]. Padahal, kedua jenis limbah ini memiliki potensi besar untuk dimanfaatkan sebagai pengisi alami (*natural filler*) dalam material komposit karena kandungan selulosa, hemiselulosa, lignin, dan silika yang cukup tinggi [5], [6].

Komponen-komponen tersebut dapat memperkuat ikatan antarmuka dengan matriks polimer jika dilakukan perlakuan yang tepat. Ampas tebu memiliki kadar selulosa sekitar 40-50% dan *lignin* sekitar 20%,

sedangkan sekam padi mengandung hingga 15-20% silika, yang dapat meningkatkan sifat ketahanan panas material [7]. Oleh karena itu, pemanfaatan kedua limbah ini sebagai filler berpotensi menghasilkan komposit polyurethane yang tidak hanya lebih ekonomis, tetapi juga memiliki karakteristik mekanik dan termal yang kompetitif.

Berbagai penelitian telah dilakukan untuk mengkaji pemanfaatan limbah pertanian sebagai *filler* dalam sistem *polyurethane*. Penelitian ini menunjukkan bahwa penggunaan partikel ampas tebu sebagai pengisi dalam *rigid polyurethane foam* mampu meningkatkan kekuatan tekan hingga 15% pada fraksi 10% berat *filler* [8]. Sementara itu, komposit polyurethane yang diperkuat dengan limbah tanaman sereal seperti sekam padi dapat meningkatkan sifat isolasi akustik serta menurunkan konduktivitas termal material [9].

Lebih lanjut, penelitian pada *bio-based polyurethane foam* menunjukkan bahwa penggantian sebagian polioliol dengan polioliol berbasis limbah pertanian tidak hanya menurunkan biaya material, tetapi juga meningkatkan stabilitas termal dan kompatibilitas antarfase [10]. Penelitian di Indonesia juga menguatkan hasil tersebut dengan temuan bahwa penambahan serat ampas tebu meningkatkan kekuatan lentur komposit polyurethane hingga 18% dibanding PU murni [11].

Meskipun demikian, sebagian besar penelitian tersebut masih berfokus pada penggunaan satu jenis *filler* saja baik ampas tebu maupun sekam padi tanpa mengkaji kemungkinan kombinasi keduanya. Padahal, kombinasi dua jenis *filler* alami berpotensi menciptakan efek sinergis. Ampas tebu yang kaya selulosa dapat memberikan kekuatan mekanik, sementara sekam padi yang mengandung silika dapat meningkatkan stabilitas termal. Dengan demikian, kombinasi keduanya berpotensi menghasilkan komposit dengan sifat mekanik dan termal yang lebih seimbang [12].

Selain itu, masih terdapat beberapa kesenjangan penelitian (*research gap*) yang perlu dijematani. Pertama, sebagian besar penelitian belum mengkaji pengaruh variasi ukuran partikel dan perlakuan permukaan *filler* terhadap ikatan antarfase antara matriks *polyurethane* dan *filler* alami. Kedua, belum ada banyak kajian yang mengkombinasikan ampas tebu dan sekam padi secara bersamaan dalam sistem *polyurethane* untuk mengevaluasi perbandingan kinerja masing-masing serta efek sinerginya terhadap sifat akhir komposit.

Selain kesenjangan tersebut, penting juga untuk menilai aspek keberlanjutan dan ekonomi dari penggunaan limbah pertanian ini. Penggunaan filler alami dapat menurunkan konsumsi bahan kimia sintetis, memanfaatkan limbah yang melimpah, serta menekan biaya material hingga 20-30% tergantung rasio *filler*. Dari sisi lingkungan, juga menunjukkan bahwa pemanfaatan *bagasse* sebagai pengisi polyurethane dapat menurunkan emisi CO₂ hingga 18% dibanding produksi PU konvensional [13].

Beranjak dari literatur yang ada maka, penelitian tentang Manufaktur dan Karakteristik Komposit Hibrida Poliuretan dengan Pengisi Partikel Ampas Tebu dan Sekam menjadi penting untuk dilakukan. Penelitian ini tidak hanya menjawab tantangan teknis (bagaimana interaksi matriks-*filler* memengaruhi sifat mekanik dan termal), tetapi juga berkontribusi pada pembangunan berkelanjutan melalui pemanfaatan limbah biomassa. Diharapkan hasil penelitian ini dapat menjadi dasar pengembangan material ringan, ramah lingkungan, dan berbiaya rendah untuk aplikasi insulasi, panel bangunan, atau komponen non-struktural lainnya.

2 Metode Penelitian

2.1 Alat

Proses penelitian dapat memberikan waktu yang efisien, jika penyiapan alat yang dibutuhkan telah terpenuhi, berikut alat yang dibutuhkan dalam proses penelitian ini: mesin penggiling, ayakan (mesh 40), oven, *moistur meter*, timbangan digital, mistar/jangka sorong, mesin bor, gelas ukur, skrap, *cutter*, lakban, kuas, *universal testing machine*, alarm/jam, *clamp f*, dan cetakan komposit.

2.2 Bahan

Bahan-bahan yang menunjang dalam proses manufaktur komposit hibrida poliuretan, diantaranya: ampas tebu, sekam, poliuretan (polioliol dan isosianat), NaOH, dan *miracle gloss*.

2.3 Metode Fraksi Volume

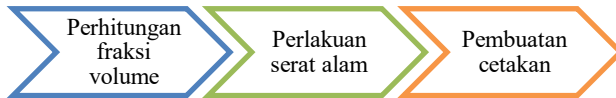
Komposit poliuretan dibuat berdasarkan dengan fraksi sesuai dengan yang tertera di Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi proporsi filler dan matriks PU

No.	Spesimen	Filler	Matrik (Poliuretan)
1.	Poliuretan	100%	50% Polioliol + 50% Isosianat
2.	Ampas tebu (A)	5% 10% 15%	95% 90% 85%
3.	Sekam (S)	5% 10% 15%	95% 90% 85%
4.	Hibrid (H) (Sekam dan ampas tebu)	5% 10% 15%	95% 90% 85%

2.4 Proses Manufaktur Komposit

Proses manufaktur komposit poliuretan PU melibatkan serangkaian tahapan yang sistematis dan terintegrasi untuk mencapai kualitas material yang optimal. Berikut tahapan urutan proses pengerjaan komposit PU mencakup beberapa tahapan.



Gambar 1. Tahapan manufaktur komposit PU

Gambar 1. mengilustrasikan tahapan awal manufaktur komposit poliuretan, yang meliputi perhitungan fraksi volume, perlakuan serat alam (ampas tebu dan sekam padi), serta pembuatan cetakan. Rangkaian proses ini diikuti dengan pencetakan komposit yang disesuaikan dengan standar pengujian yang berlaku.

Penelitian ini berfokus pada pengembangan komposit hibrida berbasis poliuretan yang direncanakan untuk diaplikasikan sebagai material atap bangunan hunian. Pemilihan komposit hibrida poliuretan didasarkan pada karakteristik materialnya yang ringan, fleksibel dalam desain, serta memiliki potensi sifat mekanik dan fungsional yang dapat disesuaikan melalui variasi komposisi penyusunnya

2.5 Karakterisasi Spesimen Komposit

Penelitian ini menerapkan serangkaian pengujian untuk mengevaluasi kinerja material yang dihasilkan. Pengujian yang dilakukan meliputi pengujian mekanik berupa uji tekan untuk mengetahui kemampuan komposit dalam menahan beban, serta pengujian fisis yang mencakup pengukuran densitas dan daya serap air.

Pengujian tekan dilakukan merujuk pada standar ASTM D1621. Spesimen uji yang digunakan berbentuk persegi dengan dimensi 60×60×30 mm. Adapun jumlah spesimen yang disiapkan dalam penelitian ini adalah 3 (tiga) sampel untuk setiap variasi fraksi.

Pengujian fisis, yang mencakup densitas dan daya serap air, dilakukan untuk mengevaluasi karakteristik komposit PU. Spesimen uji dipreparasi dalam bentuk kubus dengan ukuran 20×20×20 mm. adapun persamaan dalam menghitung kedua pengujian fisis tersebut, yaitu:

1. Persamaan uji densitas

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (1)$$

2. Persamaan uji daya serap air

$$\text{Water Absorption (\%)} = \frac{W_2 - W_1}{W_1} \times 100 \quad (2)$$

Hasil dari pengujian ini diharapkan dapat memberikan gambaran komprehensif mengenai kesesuaian komposit hibrida poliuretan sebagai material atap yang tidak hanya kuat secara struktural, tetapi juga memiliki sifat fisis yang mendukung ketahanan dan performa jangka panjang.

3 Hasil dan Pembahasan

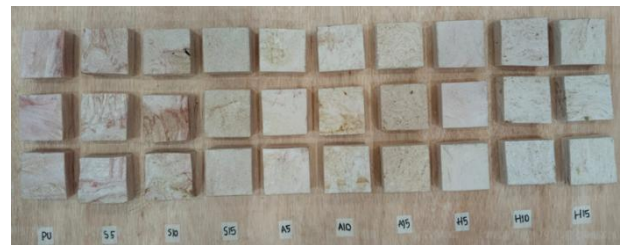
3.1 Komposit Hibrida Poliuretan

Pengujian yang dilakukan pada komposit poliuretan ini meliputi uji tekan, uji densitas, dan daya

serap air. Pengujian tersebut di dukung dengan pembuatan spesimen uji terlebih dulu. Gambar 2. menunjukkan hasil cetakan spesimen komposit poliuretan, spesimen ini nantinya akan di potong menggunakan *cutter/* pisau sesuai dengan dimensi standar tiap pengujianya.



Gambar 2. Spesimen komposit PU



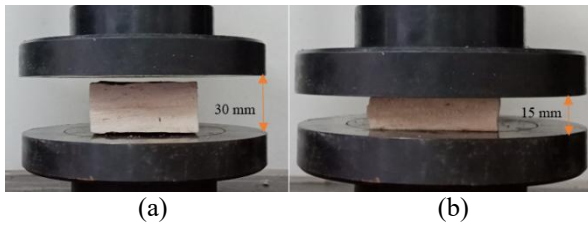
Gambar 3. Spesimen uji tekan

Pemeriksaan spesimen merupakan tahapan penting guna untuk mengetahui dan mengevaluasi kelayakan spesimen uji untuk dapat dilanjutkan ketahapan selanjutnya, Gambar 3 terlihat hasil potongan spesimen uji dengan dimensi 60×60×30 merujuk pada standar ASTM D1621. Pemotongan spesimen uji dapat dikerjakan satu hari setelah hasil cetakan di lepas, tujuannya untuk mengetahui ada atau tidak terjadinya penyusutan yang dapat mempengaruhi hasil ukuran yang direncanakan pada pembuatan komposit poliuretan ini.

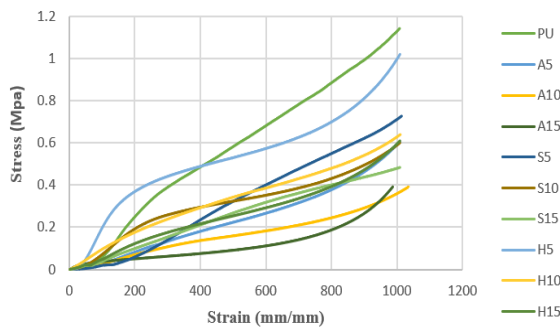
3.2 Kekuatan Tekan

Pengujian tekan dalam penelitian ini dilakukan untuk mengetahui kekuatan tekan yang dihasilkan dari komposit poliuretan, terlihat pada gambar 4 yang menunjukkan tata letak komposit PU saat pengujian, posisi letak spesimen uji berada di tengah antara *jig* dan *fixture*, ukuran tebal awal spesimen uji yaitu 30 mm dan dihentikan saat mencapai ukuran 15 mm karena sudah melewati batas elastisitas dari komposit PU. Pengujian tekan komposit PU ini meliputi spesimen PU murni, fraksi ampas tebu, fraksi sekam, dan fraksi hibrida. Perbandingan setiap fraksinya terdiri dari tiga variasi yaitu, 5%, 10%, dan 15% untuk fillernya, sedangkan perbandingan matriks PU yang diaplikasikan yaitu 95%, 90%, dan 85% dengan jumlah takaran antara PU A dan PU B sama. Setelah data hasil uji tekan diperoleh

dilanjutkan mengolah data dan membuat grafik tegangan vs regangan komposit poliuretan.



Gambar 4. Ilustrasi pengujian tekan (a) posisi awal spesimen uji tekan komposit PU, (b) posisi akhir spesimen uji tekan



Gambar 5. Tipikal kurva stress vs strain uji tekan komposit PU

Gambar 5 menunjukkan respons mekanik material terhadap pembebanan tekan hingga mendekati kondisi kegagalan. Kurva yang dihasilkan merepresentasikan karakteristik elastisitas, kemampuan deformasi, serta ketahanan material terhadap beban tekan untuk PU murni dan material termodifikasi dengan variasi fraksi A, S, dan H.

Secara umum, seluruh material menunjukkan kurva nonlinier, yang merupakan karakteristik khas material berbasis polimer elastomerik seperti poliuretan. Pada tahap awal pembebanan, peningkatan *strain* menghasilkan kenaikan *stress* yang relatif rendah, menunjukkan dominasi deformasi elastis dan *rearrangement* rantai polimer. Seiring bertambahnya *strain*, kurva menunjukkan peningkatan kemiringan yang menandakan terjadinya *strain hardening* hingga mencapai *stress* maksimum.

PU murni memperlihatkan kurva dengan kemiringan paling tinggi dan nilai *stress* maksimum terbesar, yang mengindikasikan modulus tekan dan kemampuan menahan beban yang superior dibandingkan material termodifikasi. PU murni menunjukkan peningkatan *stress* yang stabil dan signifikan hingga mencapai nilai mendekati 1,14 MPa pada *strain* maksimum. Hal ini mencerminkan struktur matriks yang homogen serta transfer beban yang efektif antar rantai polimer.

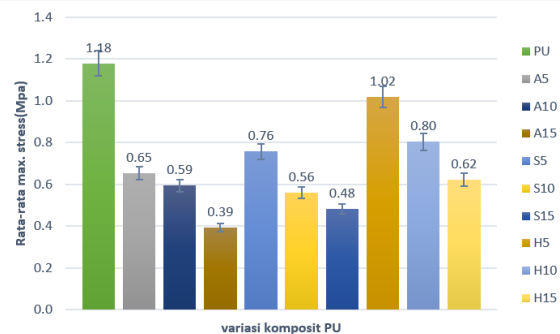
Material dengan fraksi ampas tebu (A5, A10, A15) menunjukkan kurva dengan kemiringan paling rendah. Peningkatan fraksi A menyebabkan penurunan *slope* kurva, khususnya pada A10 dan A15, yang menandakan penurunan kekakuan dan kemampuan menahan deformasi. Kurva A10 dan A15 juga menunjukkan peningkatan *stress* yang relatif lambat pada *strain* tinggi, mengindikasikan lemahnya mekanisme *strain hardening* akibat buruknya *adhesi* antarmuka dan kemungkinan terbentuknya aglomerasi partikel.

Material dengan fraksi sekam (S5, S10, S15) memperlihatkan respons mekanik yang berada di antara fraksi A dan H. Pada S5, kurva menunjukkan peningkatan *stress* yang lebih tajam dibanding A5, menandakan kontribusi penguatan pada fraksi rendah. Namun, pada S10 dan S15, kemiringan kurva menurun, menunjukkan bahwa peningkatan fraksi mengurangi efektivitas distribusi beban akibat terganggunya kontinuitas matriks.

Material dengan fraksi hibrida (H5, H10, H15) menunjukkan kurva paling mendekati PU murni, khususnya pada H5. Kurva H5 memperlihatkan kenaikan *stress* yang cepat sejak *strain* rendah hingga mencapai nilai *stress* mendekati 1,02 MPa, menunjukkan kemampuan transfer beban yang baik dan interaksi antarmuka yang efektif. Pada H10 dan H15, kurva mengalami penurunan kemiringan, namun masih berada di atas fraksi A dan S, yang menegaskan keunggulan fraksi H sebagai penguat PU.

Kemiringan awal kurva *stress-strain* dapat dikaitkan dengan modulus tekan material. PU murni dan H5 menunjukkan kemiringan awal tertinggi, menandakan kekakuan tekan yang lebih besar. Sebaliknya, A10 dan A15 memiliki kemiringan awal terendah, yang mengindikasikan material lebih mudah terdeformasi di bawah beban tekan.

Selain itu, seluruh material termodifikasi menunjukkan kemampuan deformasi yang relatif tinggi sebelum mencapai *stress* maksimum, namun dengan nilai *stress* yang lebih rendah dibanding PU murni. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan fraksi cenderung meningkatkan deformabilitas namun mengorbankan kekuatan tekan maksimum, terutama pada fraksi yang tinggi.



Gambar 6. Nilai maksimum tegangan uji tekan komposit PU

Tren pada grafik *stress-strain* ini konsisten dengan hasil max. load dan max. point stress. Material dengan nilai stress maksimum tinggi (PU dan H5) menunjukkan kurva dengan *slope* yang lebih besar dan area di bawah kurva yang lebih luas, yang mengindikasikan ketahanan mekanik yang lebih baik. Sebaliknya, material dengan fraksi A menunjukkan kurva dengan stress maksimum rendah dan area yang lebih kecil, menandakan ketahanan tekan yang *inferior*.

Berdasarkan yang ditunjukkan dalam gambar 6, menunjukkan bahwa hasil pengujian variasi komposisi material berpengaruh signifikan terhadap nilai tegangan maksimum. PU murni memiliki nilai tertinggi sebesar 1,18 MPa, menandakan struktur yang homogen dan kemampuan menahan beban yang baik. Penambahan fraksi A menyebabkan penurunan nilai tegangan secara signifikan, dengan nilai terendah pada A15 sebesar 0,39 MPa, yang mengindikasikan lemahnya interaksi antarmuka dan meningkatnya cacat struktural.

Material dengan fraksi S menunjukkan performa menengah, dengan nilai tegangan maksimum berkisar antara 0,48–0,76 MPa, sedangkan fraksi H memberikan performa terbaik di antara material termodifikasi. Fraksi H5 menunjukkan nilai tegangan sebesar 1,02 MPa, mendekati PU murni, yang mengindikasikan kompatibilitas dan distribusi penguat yang baik dalam matriks.

Secara keseluruhan, grafik menunjukkan bahwa peningkatan fraksi pengisi cenderung menurunkan nilai max. point stress, terlepas dari jenis fraksi yang digunakan. Hal ini menegaskan adanya fraksi optimum pada 5%, khususnya pada fraksi hibrida, yang mampu mempertahankan sifat mekanik mendekati PU murni. Urutan performa berdasarkan nilai tegangan maksimum pada fraksi yang sama adalah $H > S > A$, yang mencerminkan perbedaan kualitas interaksi antarmuka dan kemampuan distribusi tegangan masing-masing fraksi.

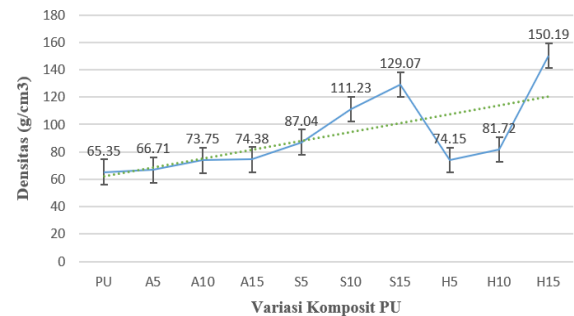
Hasil penelitian menunjukkan bahwa PU murni memiliki kuat tekan tertinggi, sedangkan penambahan filler dalam jumlah besar cenderung menurunkan nilai kuat tekan. Tren ini sejalan dengan temuan literatur sebelumnya yang menyatakan bahwa peningkatan fraksi pengisi dapat menyebabkan ketidakhomogenan struktur dan menurunkan efisiensi transfer tegangan antar fase [14][15].

Penelitian terdahulu juga melaporkan bahwa pada material poliuretan berbasis bio-filler, fraksi optimum berada pada kisaran 5–10%, sedangkan penambahan di atas nilai tersebut menyebabkan penurunan kekuatan akibat aglomerasi partikel dan terbentuknya void mikro [2].

3.3 Uji densitas

Pengujian densitas dilakukan untuk mengetahui pengaruh jenis dan fraksi material tambahan terhadap massa jenis komposit berbasis poliuretan (PU). Seluruh spesimen memiliki dimensi yang sama, yaitu $2 \text{ cm} \times 2$

$\text{cm} \times 2 \text{ cm}$ dengan volume konstan sebesar 8 cm^3 , sehingga variasi densitas secara langsung dipengaruhi oleh perbedaan massa masing-masing spesimen.



Gambar 7. Hubungan densitas vs variasi komposit PU

Grafik uji densitas menunjukkan pengaruh variasi jenis dan fraksi material tambahan terhadap nilai densitas komposit berbasis poliuretan (PU), seperti yang terlihat dalam gambar 7. Karena seluruh spesimen memiliki volume yang sama, yaitu 8 cm^3 , perubahan densitas sepenuhnya dipengaruhi oleh perbedaan massa akibat variasi komposisi material.

Poliuretan murni menunjukkan nilai densitas sebesar $65,35 \text{ g/cm}^3$, yang merupakan nilai terendah dibandingkan seluruh variasi komposit. Nilai ini mencerminkan struktur matriks poliuretan yang relatif ringan dan berpori, tanpa adanya partikel tambahan yang mengisi rongga internal. PU murni berfungsi sebagai acuan untuk menilai efektivitas filler dalam meningkatkan kerapatan material.

Pada komposit dengan filler A, densitas meningkat secara bertahap dari $66,71 \text{ g/cm}^3$ (A5) menjadi $74,38 \text{ g/cm}^3$ (A15). Peningkatan ini menunjukkan bahwa penambahan filler A mampu meningkatkan massa dan kerapatan material, namun dalam tingkat yang relatif moderat. Hal ini mengindikasikan bahwa filler A kemungkinan memiliki densitas intrinsik yang tidak jauh berbeda dari matriks poliuretan atau distribusi partikelnya belum sepenuhnya mengisi rongga mikro secara optimal. Selain itu, kenaikan densitas yang tidak terlalu tajam mengindikasikan masih adanya porositas yang cukup besar di dalam struktur material.

Komposit dengan filler Sekam menunjukkan peningkatan densitas yang lebih signifikan dibandingkan filler A. Nilai densitas meningkat dari $87,04 \text{ g/cm}^3$ (S5) menjadi $129,07 \text{ g/cm}^3$ (S15). Tren ini menunjukkan bahwa filler S memiliki densitas intrinsik yang lebih tinggi dan mampu mengisi rongga-rongga dalam matriks poliuretan secara lebih efektif. Pada fraksi tinggi (S15), peningkatan densitas yang cukup besar mengindikasikan terbentuknya struktur material yang lebih padat, meskipun berpotensi disertai aglomerasi partikel filler jika distribusi tidak homogen.

Filler Hibrida (ampas tebu dan sekam) memberikan pengaruh paling dominan terhadap densitas material. Nilai densitas meningkat tajam dari $74,15 \text{ g/cm}^3$ (H5) menjadi $150,19 \text{ g/cm}^3$ (H15), yang

merupakan nilai tertinggi di antara seluruh variasi. Hal ini menunjukkan bahwa filler H memiliki densitas intrinsik sangat tinggi dan kontribusi massa yang signifikan terhadap material komposit. Pada fraksi tinggi, filler H mampu mengurangi rongga internal secara drastis dan menghasilkan struktur yang sangat rapat. Namun, densitas yang sangat tinggi ini berpotensi berdampak pada penurunan homogenitas dan sifat mekanik jika tidak diimbangi dengan ikatan antarmuka yang baik.

Secara umum, urutan peningkatan densitas akibat penambahan filler dapat disusun sebagai berikut: $H > S > A > PU$. Urutan ini menunjukkan bahwa jenis filler memiliki peran yang lebih dominan dibandingkan fraksi dalam menentukan densitas akhir material. Filler dengan densitas intrinsik tinggi dan kemampuan pengisian rongga yang baik akan menghasilkan material dengan kerapatan lebih tinggi.

Peningkatan densitas berkorelasi erat dengan hasil uji daya serap air dan kuat tekan. Material dengan densitas tinggi umumnya memiliki porositas lebih rendah sehingga menunjukkan daya serap air yang lebih kecil. Namun, pada fraksi filler yang terlalu tinggi, peningkatan densitas tidak selalu berbanding lurus dengan peningkatan sifat mekanik akibat potensi aglomerasi dan lemahnya ikatan filler–matriks.

Hasil pengujian ini menunjukkan bahwa pemilihan jenis dan fraksi filler sangat krusial dalam pengembangan material komposit poliuretan. Filler H pada fraksi rendah–menengah berpotensi menghasilkan material dengan keseimbangan optimal antara densitas, kekuatan, dan ketahanan terhadap air, sedangkan fraksi tinggi lebih sesuai untuk aplikasi yang memerlukan material dengan bobot dan kerapatan tinggi.

Nilai densitas yang bervariasi antar komposisi menunjukkan bahwa struktur internal material sangat dipengaruhi oleh jenis dan fraksi filler. Hal ini sejalan dengan literatur terdahulu yang menyatakan bahwa peningkatan fraksi filler dapat meningkatkan atau menurunkan densitas tergantung pada kemampuan dispersi dan ikatan antarmuka dengan matriks [16], [17].

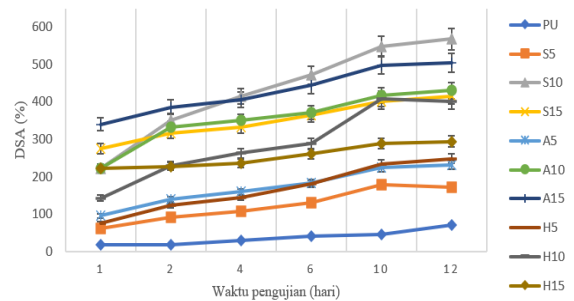
Material dengan densitas lebih tinggi umumnya menunjukkan struktur yang lebih kompak, sedangkan densitas rendah mengindikasikan terbentuknya pori atau rongga mikro dalam matriks poliuretan.

3.4 Uji daya serap air

Pengujian daya serap air dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan material menyerap air sebagai fungsi waktu perendaman, yang dinyatakan pada interval 1 hingga 12. Parameter ini penting karena berkaitan erat dengan struktur pori, sifat hidrofobitas, dan kestabilan dimensi material berbasis poliuretan (PU).

Grafik daya serap air terhadap waktu perendaman menunjukkan kecenderungan peningkatan massa air terserap seiring bertambahnya waktu perendaman untuk seluruh variasi komposit berbasis poliuretan (PU),

terlihat dalam Gambar 8. Pola ini mengindikasikan bahwa mekanisme penyerapan air pada material berlangsung secara difusif hingga mendekati kondisi jenuh.



Gambar 8. Hubungan daya serap air vs lama pengujian komposit PU

Data semua spesimen, nilai % DSA meningkat dari waktu awal hingga waktu akhir pengujian. Peningkatan paling signifikan terjadi pada tahap awal perendaman (1-4), yang menunjukkan bahwa air dengan cepat masuk ke dalam pori-pori material yang masih kosong. Pada waktu perendaman selanjutnya (6-12), laju peningkatan cenderung melambat, mengindikasikan bahwa material mulai mendekati kondisi jenuh.

PU menunjukkan nilai daya serap air paling rendah dibandingkan seluruh variasi, dengan rentang dari 16,38% hingga 71,12%. Nilai ini mencerminkan struktur matriks PU yang relatif rapat dan lebih hidrofobik. Kenaikan yang bertahap menunjukkan bahwa difusi air terjadi secara terbatas, sehingga PU memiliki ketahanan yang baik terhadap penetrasi air.

Komposit dengan filler A menunjukkan peningkatan % DSA yang sangat signifikan seiring peningkatan fraksi filler. Sampel A15 memiliki nilai tertinggi di antara seluruh spesimen, mencapai 504,32% pada waktu pengujian terakhir. Hal ini mengindikasikan bahwa filler A bersifat sangat hidrofilik dan/atau menyebabkan peningkatan porositas yang besar dalam matriks poliuretan. Tren $A5 < A10 < A15$ menunjukkan hubungan positif yang kuat antara fraksi filler dan daya serap air.

Pada komposit dengan filler S, nilai % DSA berada pada tingkat menengah. Sampel S10 menunjukkan nilai daya serap tertinggi pada kelompok ini, yaitu 567,60%, sedangkan S5 menunjukkan nilai yang lebih rendah. Hal ini mengindikasikan bahwa filler S meningkatkan kemampuan serap air, namun masih lebih stabil dibandingkan filler A. Fluktuasi kecil pada S5 (penurunan pada waktu 12) kemungkinan disebabkan oleh ketidakseragaman struktur atau variasi pengujian.

Komposit dengan filler H menunjukkan kenaikan % DSA yang relatif stabil dan lebih terkendali dibandingkan filler A dan S. Nilai tertinggi tercatat pada H15 sebesar 293,87%, yang menunjukkan bahwa filler H memiliki interaksi yang lebih baik dengan matriks poliuretan, sehingga mampu menekan pembentukan pori

terbuka yang berlebihan. Hal ini menjadikan filler H lebih unggul dalam mempertahankan ketahanan terhadap air.

Secara keseluruhan, urutan daya serap air dari tertinggi ke terendah dapat disusun sebagai berikut: A15 > S10 > A10 > S15 > H15 > H10 > A5 > S5 > H5 > PU, Urutan ini menegaskan bahwa jenis dan fraksi filler sangat berpengaruh terhadap sifat penyerapan air, dengan filler A memberikan efek peningkatan paling signifikan. Peningkatan daya serap air berkorelasi dengan meningkatnya porositas dan menurunnya densitas efektif material. Filler dengan distribusi yang kurang homogen atau sifat hidrofilik tinggi menciptakan jalur difusi air yang lebih besar, sehingga mempercepat proses absorpsi.

Peningkatan daya serap air seiring bertambahnya fraksi filler, khususnya pada variasi A dan S, menunjukkan bahwa material menjadi lebih hidrofilik. Fenomena ini konsisten dengan hasil penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa keberadaan gugus hidroksil pada filler alami meningkatkan kemampuan material menyerap air [18].

Sebaliknya, komposit dengan karakter lebih hidrofobik menunjukkan daya serap yang lebih rendah, sebagaimana dalam sistem poliuretan padat berstruktur rapat [15].

4 Kesimpulan

1. Komposit poliuretan berhasil dimanufaktur dengan variasi fraksi filler 5%, 10%, dan 15%. Poliuretan murni menunjukkan kuat tekan tertinggi sebesar 1,14 MPa. Penambahan filler menyebabkan penurunan kuat tekan, terutama pada fraksi tinggi. Penurunan terbesar terjadi pada filler fraksi A, sedangkan filler fraksi H 5% masih mampu mempertahankan kuat tekan relatif tinggi sebesar 1,02 MPa, menunjukkan kompatibilitas filler–matriks yang lebih baik.
2. Densitas material meningkat seiring bertambahnya fraksi filler, dari 65,35 g/cm³ pada poliuretan murni menjadi 150,19 g/cm³ pada komposit dengan filler H fraksi 15%. Filler H pada fraksi rendah hingga menengah memberikan keseimbangan optimal antara densitas dan sifat mekanik, sedangkan fraksi tinggi lebih sesuai untuk aplikasi yang membutuhkan material dengan kerapatan tinggi.
3. Daya serap air meningkat dengan bertambahnya waktu perendaman dan fraksi filler. Poliuretan murni memiliki ketahanan air terbaik, sementara filler A fraksi tinggi menunjukkan daya serap air tertinggi. Filler H memberikan performa paling seimbang antara peningkatan daya serap dan stabilitas struktur, sehingga cocok untuk aplikasi yang memerlukan ketahanan terhadap kelembapan.

5 Daftar Pustaka

- [1] A. Hepburn, *Polyurethane Elastomers*, 2nd ed. Springer, 2020.
- [2] M. A. Raza and others, “Sustainable Polyurethanes: Trends and Perspectives,” *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 2, 2022, doi: 10.3390/polym14020245.
- [3] I. Mawardi, S. Aprilia, M. Faisal, Ikramullah, 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.*, vol. 13, no. November 2021, p. 100319, 2022, doi: 10.1016/j.rineng.2021.100319.
- [4] Kementerian Pertanian Republik Indonesia, *Statistik Limbah Pertanian Nasional*. Jakarta, Indonesia: Kementerian Pertanian RI, 2023.
- [5] R. S. Blackburn, *Biodegradable and Sustainable Fibres*. Woodhead Publishing, 2019.
- [6] I. Mawardi *et al.*, “Development of Lightweight Engineered Wood Produced from Derived Sugarcane Bagasse and Coir Fiber: Evaluation of the Bending and Thermal Properties,” *J. Korean Wood Sci. Technol.*, vol. 53, no. 1, pp. 1–13, 2025.
- [7] A. Mohanty, M. Misra, and L. T. Drzal, *Natural Fibers, Biopolymers, and Biocomposites*. CRC Press, 2021.
- [8] H. T. T. Tran, T. L. Nguyen, D. H. Pham, and others, “Production of Rigid Bio-based Polyurethane Foams from Sugarcane Bagasse,” *Ind. Crops Prod.*, vol. 189, p. 115808, 2022, doi: 10.1016/j.indcrop.2022.115808.
- [9] H. Olcay, M. Kaya, and S. Yilmaz, “Rice Plant Waste Reinforced Polyurethane Composites for Acoustic and Thermal Applications,” *Appl. Acoust.*, vol. 179, p. 108059, 2021, doi: 10.1016/j.apacoust.2021.108059.
- [10] J. Paciorek-Sadowska, B. Czupryński, and J. Liszkowska, “Effect of Agricultural Waste Fillers on Polyurethane Composites,” *Polymers (Basel)*, vol. 15, no. 3, 2023, doi: 10.3390/polym15030742.
- [11] M. D. Y. Aditya, A. Prasetyo, and T. Wibowo, “Pengaruh Serat Ampas Tebu Terhadap Kekuatan Tekuk Komposit Polyurethane,” in *Prosiding Seminar Nasional UNIMUS*, Semarang, Indonesia, 2024.
- [12] S. H. Park, D. Y. Kim, and H. J. Choi, “Hybrid Natural Fillers in Polymer Composites: Synergistic Effects,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 244, p. 110187, 2022, doi: 10.1016/j.compositesb.2022.110187.
- [13] T. D. Cuong, H. L. Nguyen, and T. A. Le, “Preparation of Bio-based Porous Material with High Oil Absorption from Sugarcane Bagasse/Polyurethane,” *RSC Adv.*, vol. 14, pp. 9056–9065, 2024, doi: 10.1039/D4RA00865A.
- [14] C. Hepburn, *Polyurethane Elastomers*. London:

- Elsevier Applied Science, 1992.
- [15] M. Szycher, *Szycher's Handbook of Polyurethanes*. Boca Raton: CRC Press, 2012.
- [16] Y. Zhang, J. Li, and X. Wang, "Effect of filler loading on the mechanical and physical properties of polyurethane composites," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 135, no. 15, p. 46123, 2018.
- [17] I. Mawardi, N. Nurdin, F. Fakhriza, A. Jannifar, H. Razak, and R. Putra Jaya, "Performance of blockboard using particle composite bagasse waste as core layer materials," *Compos. Adv. Mater.*, vol. 33, p. 26349833241232996, 2024.
- [18] M. S. Islam, K. L. Pickering, and N. J. Foreman, "Water absorption behavior of natural fiber reinforced polymer composites," *Compos. Part A*, vol. 92, pp. 94–103, 2017.