STUDI KOMPARATIF SIFAT MEKANIK LIMBAH PLASTIK *HIGH DENSITY POLYETHYLENE* (HDPE) DAN KAYU MAHONI MELALUI PENGUJIAN TARIK, BENDING, DAN TEKAN

Sukroni[1*], Emin Haris[2], Yusup Nur Rohmat[3],Systi Adi Rachmawati[4], M Iqbal Saputra[5]

[1,2,3,4,5]Prodi Teknik Mesin , Jurusan Teknik, Politkenik Negeri Indramayu
Jl. Raya Lohbener Lama No.08, Legok, Kec. Lohbener, Kabupaten Indramayu, Jawa barat, Indonesia
*Corresponding author: sukroni1990@polindra.ac.id

Abstract

Recycled High-Density Polyethylene (HDPE) is often proposed as a substitute for wood, yet direct comparisons with a commonly used timber under identical specimen geometry and test standards remain limited, because previous studies mostly addressed virgin or additively manufactured HDPE and HDPE-based composites. This study compares the tensile, flexural, and compressive behaviour of 100% recycled HDPE, processed by shredding and hot pressing at 180 °C, with solid mahogany wood (Swietenia macrophylla) cut with the grain parallel to the specimen length. To ensure comparable geometry, both materials were tested with the same plastics standards: ASTM D638 Type I (tension), ASTM D790-02 (three-point bending), and ASTM D695 (compression), using three specimens per material for each test (18 specimens in total). Results are reported as mean ± standard deviation and compared with Welch's t-test (α = 0.05). Mahogany had a significantly higher tensile strength than recycled HDPE (23.97 ± 0.19 vs. 12.24 ± 0.82 MPa; p = 0.001), whereas HDPE showed a significantly higher elongation (60.73 ± 3.25% vs. 14.86 ± 0.24%; p = 0.002), indicating a more ductile failure. The maximum compressive stress of mahogany (1.693 ± 0.017 MPa) was also significantly higher than that of HDPE (1.315 ± 0.013 MPa; p < 0.001). In bending, the maximum loads of HDPE and mahogany (197.48 ± 1.73 N and 199.16 ± 0.46 N) did not differ significantly (p = 0.231) and coincided with the 200 N load setting of the machine, so the true flexural strength could not be determined. Recycled HDPE therefore does not yet match the strength of mahogany, but its larger deformation capacity makes it a candidate for low-load, non-structural products once design stresses are verified against the measured strength.

***Keywords*: recycled High-Density Polyethylene, mahogany wood, tensile test, bending test, compressive test**

Abstrak

Limbah plastik *High Density Polyethylene* (HDPE) daur ulang sering diusulkan sebagai pengganti kayu, tetapi perbandingan langsung dengan kayu yang umum digunakan pada geometri spesimen dan standar uji yang sama masih terbatas, karena penelitian terdahulu umumnya mengkaji HDPE murni, HDPE hasil *additive manufacturing*, atau komposit berbasis HDPE. Penelitian ini membandingkan perilaku tarik, lentur, dan tekan HDPE daur ulang 100%, yang diolah melalui pencacahan dan pengepresan panas pada suhu 180 °C, dengan kayu mahoni (*Swietenia macrophylla*) solid dengan arah serat sejajar panjang spesimen. Agar geometrinya setara, kedua material diuji dengan standar plastik yang sama, yaitu ASTM D638 Tipe I (tarik), ASTM D790-02 (*three-point bending*), dan ASTM D695 (tekan), dengan tiga spesimen per material untuk setiap pengujian (total 18 spesimen). Hasil dinyatakan sebagai rata-rata ± simpangan baku dan dibandingkan dengan uji-t Welch (α = 0,05). Kekuatan tarik kayu mahoni lebih tinggi secara signifikan dibandingkan HDPE daur ulang (23,97 ± 0,19 vs. 12,24 ± 0,82 MPa; p = 0,001), sedangkan elongasi HDPE lebih tinggi secara signifikan (60,73 ± 3,25% vs. 14,86 ± 0,24%; p = 0,002) sehingga kegagalannya lebih ulet. Tegangan tekan maksimum kayu mahoni (1,693 ± 0,017 MPa) juga lebih tinggi secara signifikan dibandingkan HDPE (1,315 ± 0,013 MPa; p < 0,001). Pada uji bending, beban maksimum HDPE dan kayu mahoni (197,48 ± 1,73 N dan 199,16 ± 0,46 N) tidak berbeda signifikan (p = 0,231) dan berimpit dengan pengaturan beban mesin 200 N, sehingga kekuatan lentur sesungguhnya belum dapat ditentukan. Dengan demikian, HDPE daur ulang belum menyamai kekuatan kayu mahoni, tetapi kapasitas deformasinya yang lebih besar membuatnya berpotensi untuk produk non-struktural berbeban rendah setelah tegangan rencana diverifikasi terhadap kekuatan terukur.

Kata kunci: *High Density Polyethylene* daur ulang, kayu mahoni, uji tarik, uji bending, uji tekan

DOI: https://doi.org/10.24127/trb.v15i2.5590
Received 16 September 2026; Received in revised form 21 October 2026; Accepted 27 October 2026
Available online 1 November 2026

1. Pendahuluan

Kebutuhan kayu untuk konstruksi ringan, furnitur, pagar, dan peralatan rumah tangga terus meningkat, sementara penebangan hutan secara liar masih terjadi dan berdampak pada kerusakan ekosistem, berkurangnya sumber daya alam, serta meningkatnya risiko banjir [1]. Di sisi lain, Indonesia menghadapi timbulan sampah plastik yang besar: berdasarkan data Asosiasi Industri Plastik Indonesia dan Badan Pusat Statistik tahun 2018, sampah plastik mencapai 64 juta ton per tahun dan sekitar 3,2 juta ton di antaranya terbuang ke laut [2]. Pemanfaatan limbah plastik sebagai material pengganti kayu berpotensi menekan kedua permasalahan tersebut sekaligus, dengan syarat sifat mekaniknya memadai untuk aplikasi yang dituju.

High Density Polyethylene (HDPE) merupakan limbah plastik yang banyak dijumpai karena digunakan pada botol susu, galon air minum, botol deterjen, jeriken, dan kursi lipat [3]. HDPE adalah polimer termoplastik dengan rantai lurus yang sedikit bercabang sehingga rantai utamanya dapat tersusun rapat; kondisi ini meningkatkan kristalinitas, densitas, dan kekuatannya [4]. Sebagai material viskoelastis, HDPE memperlihatkan perilaku elastis seperti padatan sekaligus aliran seperti cairan, sehingga sifat mekaniknya dipengaruhi oleh riwayat pemrosesan dan laju pembebanan [5]. HDPE murni memiliki kekuatan tarik luluh 22,5–28,0 MPa, dan daur ulang mekanik berulang melalui *additive manufacturing* dilaporkan masih mampu mempertahankan, bahkan meningkatkan, kekuatan tarik hingga siklus kelima [6]. Sifat fisik HDPE ditunjukkan pada Tabel 1.

Kayu mahoni (*Swietenia macrophylla* King) banyak digunakan sebagai bahan furnitur dan komponen konstruksi ringan [7]. Sebagai material alami, sifat mekanik kayu dipengaruhi oleh jenis pohon, umur, kondisi pertumbuhan, kadar air, dan arah serat terhadap arah beban [8], [9]. Oleh karena itu, kesetaraan HDPE daur ulang sebagai pengganti kayu tidak dapat diasumsikan dan perlu dibuktikan melalui pengujian mekanik yang terukur.

Penelitian terdahulu yang dirujuk umumnya mengkaji HDPE murni atau HDPE hasil *additive manufacturing* [5], [6], komposit bermatriks HDPE [4], atau komposit berpenguat serat kayu mahoni [7]. Kajian tersebut belum memberikan perbandingan langsung antara HDPE daur ulang 100% yang diolah dengan proses sederhana, yaitu pencacahan dan pengepresan panas yang dapat diterapkan di bank sampah atau industri kecil, dengan kayu solid yang selama ini digunakan pada produk sejenis. Perbandingan tersebut perlu dilakukan pada geometri spesimen, standar uji, dan kondisi pengujian yang identik untuk tiga moda pembebanan utama, yaitu tarik, lentur, dan tekan, agar perbedaan yang diperoleh benar-benar mencerminkan perbedaan material.

Tabel 1. Sifat Fisik Polimer HDPE [6]

Properti	Satuan	Nilai
Titik lebur	°C	127-134
Kepadatan	g/cm^3	0,954-0,962
Suhu Defleksi Panas	°C	65-76
Konduktivitas Termal	W/mK	0,34-0,48
Kekerasan	Shore D	54-66

Kebaruan penelitian ini terletak pada perbandingan langsung HDPE daur ulang 100% hasil pengepresan panas dengan kayu mahoni solid melalui uji tarik, bending, dan tekan menggunakan geometri dan standar yang sama, disertai analisis statistik untuk menguji signifikansi perbedaannya. Penelitian ini bertujuan untuk (1) menentukan kekuatan tarik, elongasi, perilaku lentur, dan tegangan tekan maksimum HDPE daur ulang dan kayu mahoni; (2) menguji signifikansi perbedaan sifat mekanik kedua material; dan (3) menjelaskan perbedaan tersebut berdasarkan struktur material dan mekanisme kegagalannya. Hasil penelitian

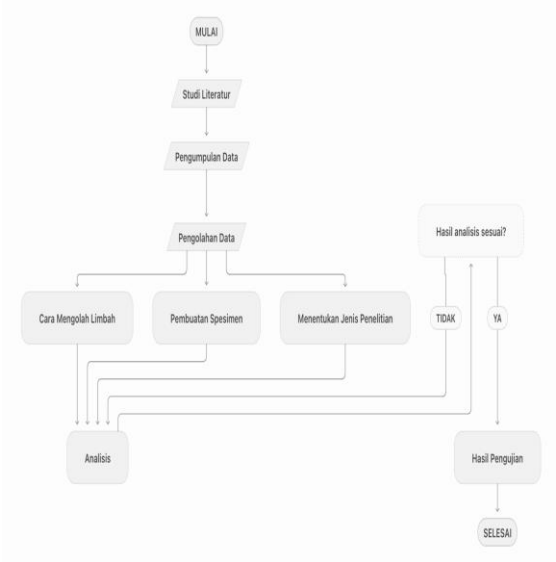
diharapkan menjadi data dasar bagi pengelola limbah plastik dan perancang produk dalam menilai kelayakan HDPE daur ulang sebagai pengganti kayu pada aplikasi non-struktural.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental komparatif dengan satu faktor, yaitu jenis material (HDPE daur ulang 100% dan kayu mahoni). Setiap material diuji tarik, bending, dan tekan, masing-masing menggunakan tiga spesimen (n = 3), sehingga total terdapat 18 spesimen. Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Teknik Mesin Politeknik Negeri Indramayu dan Bank Sampah Wiralodra (mitra binaan Pertamina) pada bulan Maret hingga Juli 2026.

2.1 Diagram Alir Penelitian

Tahapan penelitian ditunjukkan pada Gambar 1, dimulai dari studi literatur, pengumpulan dan pengolahan data, penentuan cara pengolahan limbah, pembuatan spesimen, dan penentuan jenis pengujian. Data hasil pengujian kemudian dianalisis; apabila hasilnya belum sesuai, analisis diulang sebelum hasil pengujian ditetapkan dan kesimpulan ditarik.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

2.2 Variabel Penelitian

Definisi operasional variabel penelitian ditunjukkan pada Tabel 2. Variabel bebas hanya jenis material. Suhu pelelehan 80–180 °C (Tabel 3) merupakan uji pendahuluan untuk menentukan suhu proses, sehingga pada pengujian utama suhu 180 °C ditetapkan sebagai variabel kontrol.

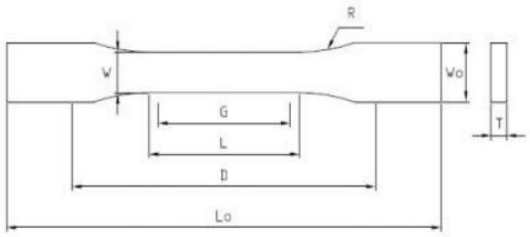
Tabel 2. Definisi Operasional Variabel Penelitian

Variabel	Definisi operasional	Satuan
Variabel bebas		
Jenis material	HDPE daur ulang 100% hasil pengepresan panas dan kayu mahoni solid	2 level
Variabel terikat		
Kekuatan tarik (σ_t)	F_{maks}/A_0 pada uji tarik ASTM D638, Persamaan (1)	MPa
Elongasi (e)	Pertambahan panjang terhadap panjang awal L_0 hingga beban maksimum, Persamaan (2)	%
Beban lentur maksimum (P_{maks})	Beban tertinggi pada uji *three-point bending* ASTM D790-02	N
Tegangan lentur (σ_f)	$3PL/(2bd^2)$ pada beban maksimum, Persamaan (3)	MPa
Regangan lentur (ε_f)	Keluaran mesin pada beban maksimum	%
Tegangan tekan maksimum (σ_c)	F_{maks}/A pada uji tekan ASTM D695, Persamaan (4)	MPa
Variabel kontrol		
Geometri spesimen	ASTM D638 Tipe I, ASTM D790-02, dan ASTM D695	mm
Proses HDPE	Suhu pengepresan 180 °C; pendinginan 15–30 menit	°C; menit
Kondisi uji	Mesin, laboratorium, dan kecepatan uji yang sama untuk kedua material	mm/menit
Jumlah spesimen	Tiga spesimen per material untuk setiap pengujian	buah

2.3 Desain Spesimen Uji

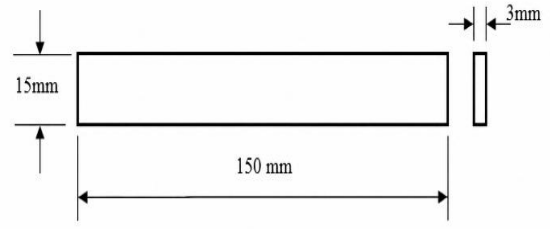
Geometri spesimen mengikuti standar ASTM yang sama untuk kedua material agar hasilnya dapat dibandingkan secara langsung. Spesimen uji tarik mengikuti ASTM D638 Tipe I (Gambar 2) dengan W = 13 mm, L = 57 mm, W0 = 19 mm, L0 = 165 mm, G = 50 mm, D = 115 mm, R = 76 mm, dan T = 3,2 mm; seluruh dimensi tersebut sesuai dengan spesimen Tipe I untuk tebal ≤ 7 mm [10], [11]. Spesimen uji bending (Gambar 3) berukuran 150 × 15 × 3 mm dan diuji dengan metode *three-point bending* berdasarkan ASTM D790-02 [12];

lebarnya sedikit lebih besar daripada spesimen yang direkomendasikan standar (127 × 12,7 × 3,2 mm). Spesimen uji tekan (Gambar 4) berbentuk prisma 12,7 × 12,7 × 25,4 mm sesuai spesimen standar ASTM D695 untuk pengukuran kekuatan tekan [13]. Standar khusus kayu, yaitu ASTM D143 [14], tidak digunakan karena geometrinya berbeda dengan spesimen plastik sehingga kedua material tidak dapat diuji pada geometri yang sama; konsekuensi pemilihan ini dibahas sebagai keterbatasan penelitian.



Gambar 2. Desain spesimen uji tarik (ASTM D638 Tipe I)

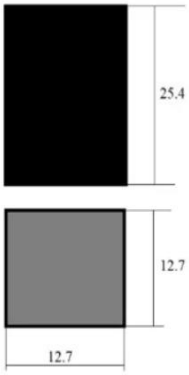
Berdasarkan data ukuran yang diperoleh, spesimen memiliki lebar awal (W) sebesar 13 mm dan panjang awal (L) sebesar 57 mm. Lebar bagian ukur (W_o) adalah 19 mm, sedangkan panjang ukur awal (L_o) sebesar 165 mm. Jarak antarbagian ukur (G) adalah 50 mm, dengan diameter (D) sebesar 115 mm. Jari-jari (R) spesimen sebesar 76 mm dan ketebalan (T) sebesar 3,2 mm. Seluruh dimensi tersebut merupakan parameter ukuran spesimen yang digunakan sebagai acuan dalam proses pengujian dan analisis selanjutnya.



Gambar 3. Desain Spesimen Uji Bending (ASTM D790-02)

Keterangan :

panjang (L) sebesar 150 mm, lebar (W) sebesar 15 mm, dan ketebalan (T) sebesar 3 mm.



Gambar 4. Desain Spesimen Uji Tekan (ASTM D695)

Berdasarkan data ukuran yang diperoleh, spesimen memiliki tinggi (H) sebesar 25,4 mm, lebar (W) sebesar 12,7 mm, dan ketebalan (T) sebesar 12,7 mm. Dimensi tersebut merupakan parameter geometris spesimen yang digunakan sebagai acuan dalam proses pengujian dan analisis

2.4 Pembuatan dan Persiapan Spesimen

Spesimen HDPE dibuat dari limbah kemasan HDPE, seperti botol deterjen, jeriken, pipa, dan kemasan sejenis, yang dipilah berdasarkan kode resin 2. Limbah dicuci untuk menghilangkan kotoran, label, dan minyak, dipotong kecil, lalu dicacah menggunakan mesin *shredder* menjadi serpihan. Serpihan dimasukkan ke mesin *hot press* hidrolik dan dilelehkan sekaligus dipadatkan pada suhu 180 °C, yaitu suhu yang menghasilkan lelehan sempurna tanpa cacat pada uji pendahuluan (Tabel 3), dengan tekanan 5 MPa selama 15 menit. Lembaran hasil pengepresan didiamkan selama 15–30 menit hingga dingin, dipotong sesuai dimensi spesimen menggunakan gerinda potong, lalu permukaannya dihaluskan dengan gerinda poles.

Spesimen kayu mahoni dibuat dari kayu solid yang dipilih dalam kondisi baik, tidak lapuk, dan tidak rapuh. Kayu diukur,

dipotong, dan dibentuk sesuai dimensi ASTM menggunakan mesin *router*, kemudian permukaan dan sudutnya dihaluskan dengan amplas listrik orbital lalu dibersihkan. Sumbu panjang spesimen dibuat sejajar arah serat kayu, dan kadar air kayu saat pengujian sebesar 12 % (diukur dengan *moisture* meter). Dimensi akhir setiap spesimen HDPE dan kayu diperiksa menggunakan jangka sorong sebelum pengujian.

2.5 Prosedur Pengujian

Setiap pengujian dilakukan pada tiga spesimen untuk masing-masing material. Prosedur dan persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut.

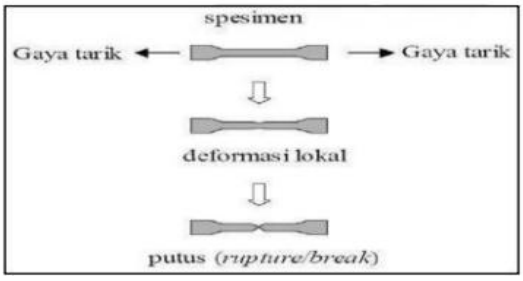
1. Uji Tarik

Uji tarik dilakukan dengan menjepit kedua ujung spesimen pada *grip* mesin, kemudian spesimen ditarik secara kontinu hingga putus atau hingga beban maksimum tercapai [15]. Pengujian menggunakan pengaturan beban 1.000 N dengan kecepatan 5 mm/menit. Kekuatan tarik dan elongasi dihitung dengan Persamaan (1) dan (2) [16].

$$\sigma_t = F_{maks} / A_0 \quad (1)$$

$$e = (\Delta L / L_0) \times 100\% \quad (2)$$

dengan F_{maks} adalah gaya tarik maksimum (N), A_0 luas penampang awal daerah *gauge* (13 × 3,2 = 41,6 mm^2), ΔL pertambahan panjang (mm), dan L_0 panjang awal spesimen (165 mm).



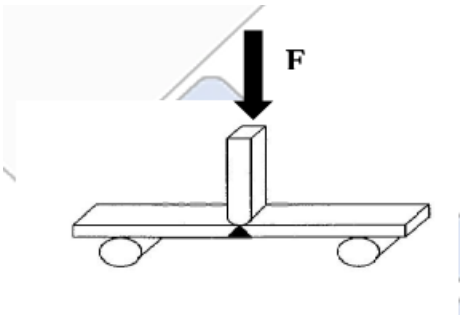
Gambar 5. Uji Tarik

2. Uji Bending

Uji bending dilakukan dengan metode *three-point bending*: spesimen diletakkan di atas dua tumpuan dan dibebani di tengah bentang hingga patah atau hingga batas beban tercapai [12]. Pengujian menggunakan pengaturan beban 200 N dan kecepatan 5 mm/menit dengan jarak tumpuan L = 150 mm. Tegangan lentur pada beban maksimum dihitung dengan Persamaan (3) [12].

$$\sigma_f = 3PL / (2bd^2) \quad (3)$$

dengan P adalah beban maksimum (N), L jarak tumpuan (mm), b lebar spesimen (15 mm), dan d tebal spesimen (3 mm). Regangan lentur dicatat dari keluaran mesin pada beban maksimum.



Gambar 6. Uji Bending

3. Uji Tekan

Uji tekan dilakukan dengan menempatkan spesimen prisma di antara dua pelat penekan, kemudian beban tekan aksial diberikan secara bertahap dengan kecepatan 1,3 mm/menit sesuai ASTM D695 hingga spesimen runtuh atau batas perpindahan yang diatur pada mesin tercapai [13]. Tegangan tekan maksimum dihitung dengan Persamaan (4) [16].

$$\sigma_c = F_{maks} / A \quad (4)$$

dengan F_{maks} adalah beban tekan maksimum (N) dan A luas penampang spesimen (12,7 × 12,7 = 161,29 mm^2). Nilai beban dalam newton diperoleh dari keluaran mesin (kgf) dikalikan 9,81.



Gambar 7. Uji Tekan

2.6 Alat Pengujian

Uji tarik dilakukan menggunakan mesin UTC-220 dengan perangkat lunak Tension PC (Gambar 8), sedangkan uji bending dan tekan menggunakan *Universal Testing Machine* (U.T.M) dengan perangkat lunak U.T.M Testing Program). Kapasitas sel beban mesin 200 kN



Gambar 8. Mesin UTC-220 dan Mesin U.T.M

2.7 Analisis Data

Data hasil pengujian diolah menggunakan Microsoft Excel dan dinyatakan sebagai rata-rata ± simpangan baku (SD) dari tiga spesimen, disertai koefisien variasi (CV = SD/rata-rata × 100%). Perbedaan setiap sifat mekanik antara HDPE daur ulang dan kayu mahoni diuji dengan uji-t Welch dua sisi pada taraf signifikansi $\alpha = 0,05$, karena jumlah spesimen kecil dan varians kedua kelompok tidak diasumsikan sama. Perbedaan dinyatakan signifikan apabila $p < 0,05$.

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil dan pembahasan pada penelitian ini dijabarkan sebagai berikut :

3.1 Perbandingan Suhu Leleh HDPE

Tabel 3. Perbandingan Suhu Leleh HDPE

No	Suhu (°C)	Hasil
1	80 °C	Tidak meleleh
2	120 °C	Meleleh tidak merata (hanya bagian bawah)
3	160 °C	Meleleh hampir sempurna, terdapat cacat dan lubang kecil
4	180 °C	Meleleh sempurna tanpa cacat

Serpihan HDPE belum meleleh pada 80 °C, meleleh tidak merata pada 120 °C, dan masih menyisakan cacat berupa lubang-lubang kecil pada 160 °C. Lelehan yang sempurna tanpa cacat baru diperoleh pada 180 °C, sehingga suhu ini digunakan untuk membuat seluruh spesimen HDPE. Suhu tersebut berada di atas titik lebur HDPE (127–134 °C; Tabel 1) karena serpihan memerlukan viskositas lelehan yang cukup rendah agar dapat menyatu dan memadat di dalam mesin *press*.

3.2 Data Hasil Uji Tarik

a. Hasil Pengujian Tarik HDPE

Hasil uji tarik HDPE daur ulang ditunjukkan pada Tabel 4. Kekuatan tarik rata-rata HDPE sebesar 12,24 ± 0,82 MPa (CV 6,73%) dengan elongasi 60,73 ± 3,25%. Seluruh spesimen HDPE putus pada daerah *gauge* setelah mengalami penyempitan penampang (*necking*) (Gambar 13a).

Tabel 4. Hasil Uji Tarik *High Density Polyethylene*

Spesimen	A_0 (mm^2)	L_0 (mm)	F_{maks} (N)	σ_t (MPa)	Elongasi (%)
1	41,6	165	489,43	11,77	63,70
2	41,6	165	548,76	13,19	57,26

Spesimen	A_0 (mm²)	L_0 (mm)	F_{maks} (N)	σ_t (MPa)	Elongasi (%)
3	41,6	165	489,43	11,77	61,24
Rata-rata			**509,21**	**12,24**	**60,73**
SD			34,25	0,82	3,25

b. Hasil Pengujian Tarik Kayu Mahoni

Hasil uji tarik kayu mahoni ditunjukkan pada Tabel 5. Kekuatan tarik rata-rata kayu mahoni sebesar 23,97 ± 0,19 MPa (CV 0,78%) dengan elongasi 14,86 ± 0,24%. Beban maksimum ketiga spesimen kayu (992,29–1.005,87 N) berada di sekitar pengaturan beban mesin 1.000 N dan spesimen kayu tidak terlihat putus setelah pengujian (Gambar 13d), sehingga kekuatan tarik kayu pada penelitian ini merupakan batas bawah dari kekuatan tarik sebenarnya.

Tabel 5. Hasil Uji Tarik Kayu Mahoni

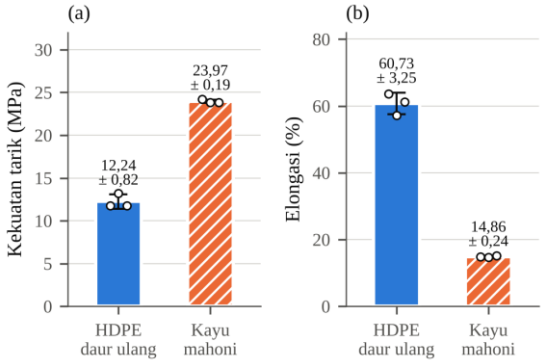
Spesimen	A_0 (mm²)	L_0 (mm)	F_{maks} (N)	σ_t (MPa)	Elongasi (%)
1	41,6	165	1.005,87	24,18	14,78
2	41,6	165	992,68	23,86	14,66
3	41,6	165	992,29	23,85	15,13
Rata-rata			**996,95**	**23,97**	**14,86**
SD			7,73	0,19	0,24

c. Hasil Rata-Rata Pengujian Tarik

Tabel 6. Hasil Rata-Rata Pengujian Tarik

Material	Kekuatan tarik (MPa)	Elongasi (%)
HDPE daur ulang	12,24 ± 0,82	60,73 ± 3,25
Kayu mahoni	23,97 ± 0,19	14,86 ± 0,24
p (uji-t Welch)	0,001	0,002

Perbandingan rata-rata hasil uji tarik beserta data setiap spesimen ditunjukkan pada Gambar 10.



Gambar 10. Rata-rata (a) kekuatan tarik dan (b) elongasi; batang galat = SD, titik = data tiap spesimen

Kekuatan tarik kayu mahoni 1,96 kali kekuatan tarik HDPE daur ulang, dan perbedaan ini signifikan secara statistik ($t = -24,06$; $df = 2,20$; $p = 0,001$). Sebaliknya, elongasi HDPE 4,09 kali elongasi kayu mahoni ($t = 24,38$; $df = 2,02$; $p = 0,002$). Elongasi yang tinggi menunjukkan bahwa HDPE mampu berdeformasi plastis lebih besar sebelum gagal (lebih ulet), tetapi tidak berarti HDPE lebih fleksibel, karena fleksibilitas atau kekakuan ditentukan oleh modulus elastisitas yang tidak diukur pada penelitian ini [16]. Elongasi kayu (sekitar 15%) juga jauh lebih besar daripada regangan putus kayu yang umumnya kecil [9], karena pertambahan panjang dihitung terhadap panjang total spesimen (L_0 = 165 mm) tanpa ekstensometer sehingga turut mencakup slip pada *grip* dan deformasi sistem mesin. Oleh karena itu, nilai elongasi pada penelitian ini digunakan untuk perbandingan relatif antarmaterial.

3.3 Data Hasil Uji Bending

a. Hasil Pengujian Bending *High Density Polyethylene*

Hasil uji bending HDPE daur ulang (L = 150 mm, b = 15 mm, d = 3 mm) ditunjukkan pada Tabel 7. Beban lentur maksimum rata-rata HDPE sebesar 197,48 ± 1,73 N dengan regangan lentur 1,25 ± 0,04%. Seluruh spesimen HDPE melengkung secara permanen tanpa retak atau patah (Gambar 13b).

Tabel 7. Hasil Uji Bending *High Density Polyethylene*

Spesimen	P_{maks} (N)	σ_f (MPa)	ε_f (%)
1	198,24	330,41	1,231
2	198,70	331,17	1,230
3	195,50	325,84	1,296
Rata-rata	**197,48**	**329,14**	**1,252**
SD	1,73	2,88	0,037

b. Hasil pengujian bending kayu mahoni

Hasil uji bending kayu mahoni ditunjukkan pada Tabel 8. Beban lentur maksimum rata-rata kayu mahoni sebesar 199,16 ± 0,46 N dengan regangan lentur 1,17 ± 0,06%. Berbeda dengan HDPE, spesimen kayu retak dan seratnya terlepas (*splintering*) pada sisi bawah spesimen yang mengalami tarik (Gambar 13e).

Tabel 8. Hasil Uji Bending Kayu Mahoni

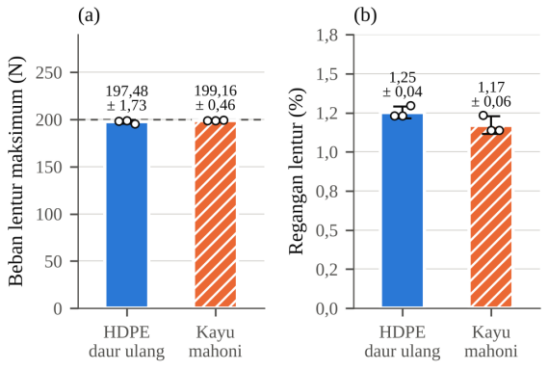
Spesimen	P_{maks} (N)	σ_f (MPa)	ε_f (%)
1	198,70	331,17	1,236
2	199,16	331,93	1,138
3	199,61	332,69	1,137
Rata-rata	**199,16**	**331,93**	**1,170**
SD	0,46	0,76	0,057

c. Hasil Rata-Rata Pengujian Bending

Tabel 9. Hasil Rata-Rata Pengujian Bending

Material	P_{maks} (N)	σ_f (MPa)	ε_f (%)
HDPE daur ulang	197,48 ± 1,73	329,14 ± 2,88	1,25 ± 0,04
Kayu mahoni	199,16 ± 0,46	331,93 ± 0,76	1,17 ± 0,06
p (uji-t Welch)	0,231	0,231	0,115

Perbandingan rata-rata hasil uji bending ditunjukkan pada Gambar 11.



Gambar 11. Rata-rata (a) beban lentur maksimum dan (b) regangan lentur; garis putus-putus = pengaturan beban mesin 200 N, batang galat = SD, titik = data tiap spesimen

Beban lentur maksimum kayu mahoni hanya 0,85% lebih tinggi daripada HDPE, dan perbedaan ini tidak signifikan (t = −1,62; df = 2,28; p = 0,231); regangan lentur kedua material juga tidak berbeda signifikan (p = 0,115). Beban maksimum kedua material berimpit dengan pengaturan beban mesin 200 N dengan koefisien variasi yang sangat kecil (0,23–0,88%), padahal perilaku kegagalannya berbeda: HDPE hanya melengkung, sedangkan kayu retak. Hal ini menunjukkan bahwa pengujian lentur dibatasi oleh pengaturan beban mesin, bukan oleh kegagalan material, sehingga uji bending pada penelitian ini belum dapat membedakan kekuatan lentur kedua material. Tegangan lentur pada Tabel 7–9 dihitung dengan Persamaan (3) dari dimensi spesimen, dan nilainya (sekitar 329–332 MPa) jauh melampaui kekuatan tarik HDPE pada penelitian ini (12,24 MPa) maupun kekuatan tarik luluh HDPE murni (22,5–28,0 MPa) [6]. Oleh karena itu, nilai tersebut tidak dapat diartikan sebagai kekuatan lentur material yang sebenarnya dan perlu diverifikasi melalui pengujian ulang dengan rentang beban yang lebih besar.

3.4 Data Hasil Uji Tekan

a. Hasil pengujian tekan *High Density Polyethylene*

Hasil uji tekan HDPE daur ulang ditunjukkan pada Tabel 10. Beban tekan maksimum rata-rata HDPE sebesar 212,04 ± 2,06 N, sehingga tegangan tekan maksimum rata-ratanya 1,315 ± 0,013 MPa (CV 0,97%). Spesimen HDPE mengalami deformasi plastis berupa pemipihan dan penggembungan sisi (*barreling*) tanpa retak (Gambar 13c).

Tabel 10. Hasil Uji Tekan *High Density Polyethylene*

Spesimen	F_{maks} (N)	A (mm^2)	σ_c (MPa)
1	209,66	161,29	1,300
2	213,26	161,29	1,322
3	213,20	161,29	1,322
Rata-rata	**212,04**		**1,315**
SD	2,06		0,013

b. Hasil Pengujian Tekan Kayu Mahoni

Hasil uji tekan kayu mahoni ditunjukkan pada Tabel 11. Beban tekan maksimum rata-rata kayu mahoni sebesar 273,00 ± 2,71 N dengan tegangan tekan maksimum rata-rata 1,693 ± 0,017 MPa (CV 0,99%). Spesimen kayu gagal melalui penghancuran (*crushing*) serat yang disertai retak dan terbelahnya spesimen searah serat (Gambar 13f).

Tabel 11. Hasil Uji Tekan Kayu Mahoni

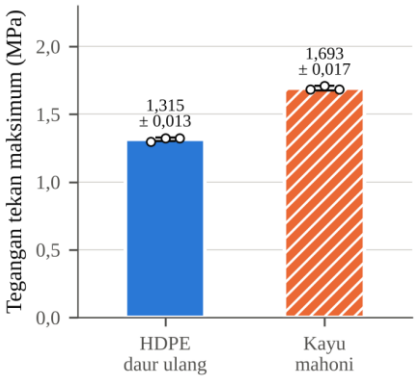
Spesimen	F_{maks} (N)	A (mm^2)	σ_c (MPa)
1	271,41	161,29	1,683
2	276,13	161,29	1,712
3	271,45	161,29	1,683
Rata-rata	**273,00**		**1,693**
SD	2,71		0,017

c. Hasil Rata-Rata Pengujian Tekan

Tabel 12. Hasil Rata-Rata Pengujian Tekan

Material	F_{maks} (N)	σ_c (MPa)
HDPE daur ulang	212,04 ± 2,06	1,315 ± 0,013
Kayu mahoni	273,00 ± 2,71	1,693 ± 0,017
p (uji-t Welch)	< 0,001	< 0,001

Perbandingan rata-rata tegangan tekan maksimum ditunjukkan pada Gambar 12.



Gambar 12. Rata-rata tegangan tekan maksimum; batang galat = SD, titik = data tiap spesimen

Tegangan tekan maksimum kayu mahoni 28,75% lebih tinggi daripada HDPE daur ulang, dan perbedaan ini signifikan ($t = -30,99$; $df = 3,73$; $p < 0,001$). Nilai regangan tekan yang tercatat pada keluaran mesin (926–2.016%) tidak digunakan dalam analisis karena secara fisik regangan tekan rekayasa tidak mungkin melebihi 100%; nilai tersebut kemungkinan dipengaruhi oleh pengaturan panjang acuan pada perangkat lunak mesin. Selain itu, tegangan tekan kedua material jauh lebih rendah daripada kekuatan tariknya masing-masing pada penelitian ini, padahal spesimen telah mengalami deformasi plastis yang besar (Gambar 13c dan 13f). Oleh karena itu, nilai tegangan tekan pada penelitian ini digunakan untuk perbandingan relatif antarmaterial pada kondisi pengujian yang sama.

3.5 Ringkasan Analisis Statistik

Ringkasan hasil uji-t Welch untuk seluruh sifat mekanik ditunjukkan pada Tabel 13. Variasi antarspesimen tergolong rendah (CV ≤ 6,73%), sehingga rata-rata tiga spesimen cukup konsisten untuk perbandingan. Namun, jumlah tersebut lebih sedikit daripada minimum lima spesimen yang disyaratkan ASTM D638, ASTM D790, dan ASTM D695 [10], [12], [13], sehingga daya uji statistik terbatas dan hasilnya perlu dikonfirmasi dengan jumlah spesimen yang lebih banyak.

Tabel 13. Ringkasan Uji-t Welch HDPE Daur Ulang dan Kayu Mahoni

Sifat mekanik	HDPE (rata-rata ± SD)	Kayu (rata-rata ± SD)	*t* (df)	*p*
Kekuatan tarik (MPa)	12,24 ± 0,82	23,97 ± 0,19	−24,06 (2,20)	0,001[a]
Elongasi (%)	60,73 ± 3,25	14,86 ± 0,24	24,38 (2,02)	0,002[a]
Beban lentur maks. (N)	197,48 ± 1,73	199,16 ± 0,46	−1,62 (2,28)	0,231
Regangan lentur (%)	1,25 ± 0,04	1,17 ± 0,06	2,09 (3,47)	0,115
Tegangan tekan maks. (MPa)	1,315 ± 0,013	1,693 ± 0,017	−30,99 (3,73)	< 0,001[a]

Keterangan: [a] berbeda signifikan pada α = 0,05.

3.6 Hubungan Struktur Material dan Mekanisme Kegagalan



Gambar 13. Spesimen setelah pengujian: (a)–(c) HDPE daur ulang dan (d)–(f) kayu mahoni pada uji tarik, bending, dan tekan

Perbedaan sifat mekanik kedua material berkaitan dengan struktur penyusunnya. HDPE adalah polimer semikristalin yang tersusun atas rantai lurus dengan sedikit percabangan; ketika dibebani tarik, rantai polimer pada daerah amorf dan kristalit dapat mengalami reorientasi sehingga material meluluh, mengalami *necking*, dan memanjang besar sebelum putus [4], [5]. Mekanisme ini sesuai dengan elongasi HDPE yang tinggi dan penampang spesimen yang menyempit sebelum putus (Gambar 13a), serta spesimen bending HDPE yang hanya melengkung permanen tanpa patah (Gambar 13b). Kekuatan tarik HDPE daur ulang (12,24 MPa) hanya sekitar 44–54% kekuatan tarik luluh HDPE murni (22,5–28,0 MPa) [6]. Penurunan ini dapat dijelaskan oleh tiga faktor: (1) bahan baku berasal dari berbagai produk HDPE dengan warna dan *grade* berbeda sehingga lembaran yang dihasilkan tidak homogen (Gambar 13a); (2) pengepresan panas tanpa proses pencampuran membuat ikatan antarserpihan belum sempurna dan berpotensi menyisakan rongga, seperti terlihat pada uji pendahuluan 160 °C (Tabel 3), yang menjadi titik awal retak; dan (3) riwayat pemakaian serta pemanasan ulang dapat memicu degradasi oksidatif berupa pemutusan rantai polimer yang menurunkan kekuatan tarik [17]. Koefisien variasi kekuatan tarik HDPE (6,73%) yang lebih besar daripada kayu (0,78%) juga konsisten dengan ketidakhomogenan tersebut.

Kayu mahoni merupakan material komposit alami yang anisotropik, tersusun atas mikrofibril selulosa yang terorientasi searah serat dan diikat oleh matriks lignin dan hemiselulosa [9]. Struktur ini memberikan kekuatan dan kekakuan yang tinggi searah serat, tetapi kapasitas deformasi plastisnya rendah, sehingga kayu memiliki kekuatan tarik dan tekan yang lebih tinggi tetapi elongasi yang lebih kecil daripada HDPE. Mekanisme kegagalannya juga berbeda. Pada uji bending, kayu gagal akibat putusnya serat di sisi tarik yang disertai serat terlepas (Gambar 13e), sedangkan pada uji tekan kegagalan terjadi melalui penghancuran dan tekuk mikro serat (*fiber buckling*) yang diikuti terbelahnya spesimen searah serat (Gambar 13f) [9]. Sebaliknya, HDPE gagal secara ulet melalui aliran plastis sehingga spesimen tekannya memipih dan menggembung tanpa retak (Gambar 13c).

Dari sisi aplikasi, HDPE daur ulang belum dapat menggantikan kayu mahoni pada komponen yang menerima beban tarik atau tekan tinggi. Pemanfaatannya lebih tepat diarahkan pada produk non-struktural berbeban rendah, dengan syarat tegangan kerja produk yang dirancang, setelah dikalikan faktor keamanan, tetap berada di bawah kekuatan terukur pada penelitian ini. Kesimpulan ini dibatasi oleh jumlah spesimen yang kecil, penggunaan standar plastik untuk kedua material, belum diukurnya modulus elastisitas, serta keterbatasan rentang beban mesin pada uji tarik kayu dan uji bending.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis statistik, dapat disimpulkan hal-hal berikut. (1) Kekuatan tarik kayu mahoni (23,97 ± 0,19 MPa) lebih tinggi secara signifikan dibandingkan HDPE daur ulang (12,24 ± 0,82 MPa; $p = 0,001$), sedangkan elongasi HDPE (60,73 ± 3,25%) lebih tinggi secara signifikan dibandingkan kayu mahoni (14,86 ± 0,24%; $p = 0,002$). Elongasi yang tinggi menunjukkan keuletan HDPE, yaitu kemampuan berdeformasi plastis sebelum gagal, dan bukan fleksibilitas atau kekakuan yang lebih baik. (2) Pada uji bending, beban maksimum kedua material (197,48 ± 1,73 N dan 199,16 ± 0,46 N) tidak berbeda signifikan ($p = 0,231$) dan berimpit dengan pengaturan beban mesin 200 N, sehingga kekuatan lentur kedua material belum dapat dibandingkan. (3) Tegangan tekan maksimum kayu mahoni (1,693 ± 0,017 MPa) lebih tinggi secara signifikan dibandingkan HDPE (1,315 ± 0,013 MPa; $p < 0,001$).

Perbedaan tersebut berkaitan dengan struktur material: serat selulosa kayu yang terorientasi menghasilkan kekuatan tinggi dengan kegagalan berserat yang getas, sedangkan rantai polimer HDPE memungkinkan aliran plastis sehingga kegagalannya ulet. Kekuatan HDPE daur ulang yang lebih rendah daripada HDPE murni dipengaruhi oleh ketidakhomogenan bahan baku dan ikatan antarserpihan yang belum sempurna. HDPE daur ulang belum mampu menyamai kekuatan kayu mahoni. Potensi penggunaannya pada produk non-struktural berbeban rendah harus divalidasi dengan membandingkan tegangan kerja rencana terhadap kekuatan terukur. Penelitian lanjutan disarankan menggunakan minimal lima spesimen per pengujian sesuai ASTM, mesin dengan rentang beban yang memadai, pengukuran modulus elastisitas, serta pengukuran kadar air dan arah serat kayu sesuai ASTM D143.

Ucapan Terima kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Jurusan Teknik Politeknik Negeri Indramayu dalam kegiatan penelitian ini.

Referensi

[1] Darnia, E. M., Rahmawati, W., Alif Nugroho, V., & Aulia Februri, N. (2023). Penyebab maraknya penebangan hutan secara liar di Indonesia. *Jurnal Hukum Progresif*, 6(11).

[2] Meyrena, S. D., & Amelia, R. (2020). Analisis pendayagunaan limbah plastik menjadi ecopaving sebagai upaya pengurangan sampah. *Indonesian Journal of Conservation*, 9(2), 96–100. https://doi.org/10.15294/ijc.v9i2.27549

[3] Masyruroh, A., et al. (2021). Pembuatan recycle plastik HDPE sederhana menjadi asbak. 3(1), 53.

[4] Prasaja, A. (2013). *Analisis kekuatan lentur struktur komposit serat rami dan matriks thermoplastic High Density Polyethylene (HDPE) melalui uji three point bending*.

[5] Akdoğan, E., & Şahbaz, M. (2022). Tensile behavior of compressed high-density polyethylene materials. *Journal of Materials and Manufacturing*, 1(1), 1–6. https://doi.org/10.5281/zenodo.7107328

[6] Ahmed, J., Tipu, K., Aslam Noon, A., Arif, M., Naveed, M., Khan, A., Suhaib, M. M., & Sharif, A. (2023). Mechanical properties evaluation of recycled high density polyethylene via additive manufacturing. *Journal of Materials and Manufacturing*, 2, 1–9. https://doi.org/10.5281/zenodo.10012303

[7] Ghazali, M. (2022). *Pengujian kekuatan tarik komposit serat kayu mahoni tanpa pengaruh alkali*. Fakultas Teknik, Universitas Islam Sumatera Utara.

[8] Yupa, E. S., Agyms, T. A., Fernando, V. E., Sidabutar, Y. F. D., & Suciati, H. (2024). Analisis penggunaan kayu sebagai bahan konstruksi dalam pembangunan: Studi kasus dan observasi lapangan. *Zona Sipil*, 14(1), 1–6. https://doi.org/10.37776/zs.v14i1.1471

[9] Ross, R. J. (Ed.). (2021). *Wood handbook: Wood as an engineering material* (General Technical Report FPL-GTR-282). Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.

[10] ASTM International. (2014). *ASTM D638-14: Standard test method for tensile properties of plastics*. West Conshohocken, PA: ASTM International.

[11] Faidallah, R. F., Hanon, M. M., Vashist, V., Habib, A., Szakál, Z., & Oldal, I. (2023). Effect of different standard geometry shapes on the tensile properties of 3D-printed polymer. *Polymers*, 15(14), 3029. https://doi.org/10.3390/polym15143029

[12] ASTM International. (2002). *ASTM D790-02: Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials*. West Conshohocken, PA: ASTM International.

[13] ASTM International. (2015). *ASTM D695-15: Standard test method for compressive properties of rigid plastics*. West Conshohocken, PA: ASTM International.

[14] ASTM International. (2014). *ASTM D143-14: Standard test methods for small clear specimens of timber*. West Conshohocken, PA: ASTM International.

[15] Thaher, W. (2025). *Material komposit serat eceng gondok & resin polymer untuk material alternatif komponen perahu* [Tugas akhir]. Politeknik Negeri Indramayu.

[16] La One, Sunarno, Y., Manga', J., Palungan, M. B., Hijriah, Buarlele, L., Tangaran, B., Muhsar, M., & Aswad, N. H. (2025). *Mekanika bahan*.

[17] Andrady, A. L., Heikkilä, A. M., Pandey, K. K., Bruckman, L. S., White, C. C., Zhu, M., & Zhu, L. (2023). Effects of UV radiation on natural and synthetic materials. *Photochemical & Photobiological Sciences*, 22(5), 1177–1202. https://doi.org/10.1007/s43630-023-00377-6