



## Analisis Pengaruh Lebar Potongan Strip terhadap Fabrikasi Filamen dan Karakterisasi Mekanis Hasil Cetak 3D Printing

### *Analysis of the Influence of Strip Width on Filament Fabrication and Mechanical Characterization of 3D Printed Products*

M. Alfian Syahrezi<sup>1,a)</sup>, Rahmat Doni Widodo<sup>1</sup>, Muhammad Irfan Nuryanta<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Teknik Mesin, Universitas Negeri Semarang

<sup>a)</sup>Corresponding author: m\_alfiansyahrezi@students.unnes.ac.id

#### Abstrak

Pemanfaatan limbah *Polyethylene Terephthalate* (PET) dari kemasan sekali pakai merupakan solusi prospektif untuk ekonomi sirkular, namun kualitas produk daur ulangnya sangat bergantung pada parameter reparasi bahan baku. Penelitian ini bertujuan menginvestigasi pengaruh variasi lebar potongan strip dari limbah galon dan botol PET terhadap sifat fisik dan mekanik produk cetak akhirnya. Guna mencapai tujuan tersebut, metodologi eksperimental diterapkan dengan memfabrikasi empat variasi filamen yang kemudian dicetak menjadi spesimen uji. Karakterisasi properti meliputi pengujian densitas, kekasaran permukaan ( $R_a$ ), kekuatan dampak Izod, dan kekuatan lentur, dengan menggunakan filamen PETG komersial sebagai pembanding. Hasil utama menunjukkan bahwa filamen yang berasal dari material galon memiliki performa mekanis yang lebih unggul. Variasi V1 (Galon 4mm) menunjukkan kekuatan lentur (57,51 MPa) dan kekerasan (61,2 SHD) tertinggi, sementara variasi V2 (Galon 3mm) unggul dalam ketangguhan dampak (0,00356 J/mm<sup>2</sup>) dan kehalusan permukaan ( $R_a$  10,06  $\mu$ m). Dengan demikian, disimpulkan bahwa geometri strip bahan baku merupakan faktor penentu yang berdampak langsung pada struktur internal dan performa akhir filamen daur ulang, yang terbukti kompetitif terhadap standar komersial.

**Kata Kunci:** 3d printing; filamen; karakterisasi mekanis; lebar strip; pet

#### Abstract

*The utilization of Polyethylene Terephthalate (PET) waste for 3D printing Filaments presents a prospective solution for the circular economy, but its quality is highly dependent on raw material preparation. This study aims to investigate the effect of strip width variations from PET gallon and bottle waste on the final physical and mechanical properties of the printed product. An experimental methodology was employed by creating four Filament variations from PET waste strips, which were then printed into test specimens. Characterization included density, surface roughness ( $R_a$ ), Izod Impact strength, and bending strength tests, with commercial PETG Filament used as a benchmark. The results indicated that the V1 variation (4mm Gallon) exhibited the best mechanical performance, with the highest density (1.60 g/cm<sup>3</sup>), Impact strength (0.054 J/mm<sup>2</sup>), and bending strength (98.92 MPa). In contrast, the V2 variation (3mm Gallon) produced the smoothest surface ( $R_a$  10.06  $\mu$ m). It is concluded that the raw material strip geometry is a determining factor for Filament quality, where strips from gallons yielded a material with a denser internal structure and mechanical properties competitive with commercial standards.*

**Keywords:** 3d printing; filament; mechanical characterization; pet; strip width

#### PENDAHULUAN

Sampah plastik merupakan permasalahan lingkungan global yang semakin kompleks, terutama di Indonesia yang merupakan negara kepulauan dengan populasi besar [1]. Data Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional (SIPSN) pada tahun 2023 mencatat timbunan sampah

nasional dapat mencapai 64,6 juta ton, dengan komposisi sampah plastik diproyeksikan akan terus meningkat jika tidak ada upaya penanganan yang luar biasa [2]. Untuk mengatasi tantangan ini, praktik ekonomi sirkular melalui daur ulang serta pencarian material alternatif yang lebih ramah lingkungan menjadi solusi yang mendesak [3], [4]. Solusi ini didukung oleh potensi teknologi manufaktur

aditif atau pencetakan 3D (*3D printing*) yang mampu memanfaatkan plastik daur ulang secara fleksibel dan terdesentralisasi [5], [6]. Salah satu jenis plastik yang paling dominan dan memiliki potensi daur ulang yang besar adalah *Polietilena Tereftalat* (PET), yang dikenal karena sifatnya yang ringan, kuat, dan memiliki rentang suhu leleh yang memungkinkan untuk diproses ulang [7], [8], [9]. Meskipun daur ulang PET menjadi filamen telah banyak diteliti, optimasi parameter proses untuk filamen yang berasal dari sumber pasca-konsumsi spesifik seperti limbah galon sekali pakai masih menjadi area yang perlu dieksplorasi lebih dalam [10].

Proses fabrikasi filamen *recycled* PET (rPET) dalam skala kecil menghadapi tantangan inheren, seperti variabilitas dimensi akibat proses pemotongan manual dan potensi kontaminasi dari sumber limbah yang tidak terkontrol [11], [12]. Berbagai studi telah menunjukkan bahwa parameter pencetakan seperti tinggi lapisan dan densitas *infill* berpengaruh besar terhadap sifat mekanik akhir produk rPET [13], [14]. Penelitian oleh Nuryanta, dkk. menemukan bahwa variasi pada temperatur *nozzle* dan kerapatan *infill* secara langsung berdampak pada kekuatan tarik dari material polimer hasil cetak 3D. Ditemukan bahwa spesimen rPET dapat mencapai *Ultimate Tensile Strength* (UTS) hingga 43 MPa dengan optimasi parameter [15], sebuah nilai yang kompetitif bahkan jika dibandingkan dengan beberapa material filamen *virgin*. Namun, penelitian yang secara sistematis menginvestigasi pengaruh parameter preparasi awal, seperti lebar potongan strip dari sumber limbah spesifik, terhadap gabungan sifat mekanis masih terbatas.

Menjawab celah tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kelayakan daur ulang limbah galon dan botol PET merek Le Minerale menjadi filamen fungsional [16], dengan fokus utama pada investigasi pengaruh variasi lebar potongan strip terhadap fabrikasi filamen dan karakterisasi mekanis produk cetaknya. Kebaruan penelitian terletak pada penggunaan limbah galon PET sekali pakai sebagai bahan baku utama, sebuah sumber daya yang melimpah namun belum banyak dimanfaatkan untuk aplikasi filamen 3D [17]. Penelitian ini secara kuantitatif mengkarakterisasi sifat mekanis meliputi uji impak, *bending*, kekerasan, dan kekasaran permukaan dari spesimen hasil cetak [18], kemudian membandingkan performanya dengan filamen PET Glikol (PETG) komersial sebagai tolok ukur [19]. Diharapkan penelitian ini dapat menyajikan kumpulan data dasar (*baseline dataset*) yang bermanfaat bagi pengembangan material daur ulang untuk aplikasi manufaktur aditif yang lebih ekonomis dan berwawasan lingkungan.

## METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental laboratorium dengan rancangan uji coba kuantitatif [20]. Penelitian ini dilakukan dengan metodologi eksperimental yang mencakup beberapa tahapan utama: persiapan bahan baku, fabrikasi filamen, pencetakan spesimen, dan pengujian fisik-mekanis [21]. Proses fabrikasi dilakukan di Laboratorium Teknik Mesin, Universitas Negeri Semarang, sedangkan pengujian mekanis dilakukan di laboratorium yang ditunjuk untuk uji kekuatan impak, *bending*, kekerasan, massa jenis, dan kekasaran permukaan. Tujuan utama dari metode ini adalah untuk menguji pengaruh variasi lebar strip PET terhadap kualitas filamen hasil ekstrusi dan karakteristik mekanik spesimen cetak 3D.

## Material

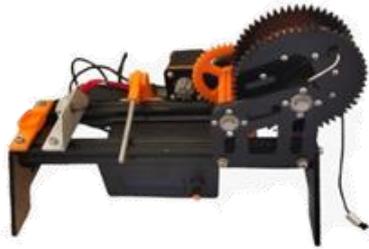
Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah limbah pasca konsumsi berupa galon dan botol PET merek Le Minerale. Bahan baku utama yang digunakan adalah galon Le Minerale 15 liter dan botol Le Minerale 1500 ml, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. (a) dan (b). Limbah ini dipilih karena karakteristik materialnya yang seragam serta kandungan aditif yang minimal. Selain itu, digunakan juga filamen PETG komersial merek SUNLU sebagai pembandingan [7]. Untuk keperluan pembersihan, digunakan isopropil alkohol (99%).



Gambar 1. Bahan Baku (a) Galon 15 liter; (b) Botol Le Minerale 1500ml

Proses pemotongan strip PET dilakukan menggunakan alat bantu pemotong berbasis cetak 3D [12]. Proses ekstrusi filamen menggunakan mesin *ekstruder* dengan *nozzle* berdiameter 1,75 mm dan kemampuan suhu hingga 230 °C, seperti yang terlihat pada Gambar 2. (a) [22]. Spesimen dicetak menggunakan 3D printer *Creativity Ender 3 V3 KE* yang ditunjukkan pada Gambar 2. (b). Alat pengujian yang digunakan meliputi mesin uji impak GOTECH GT-7045-MD, *Universal Testing Machine* (UTM) GOTECH TCS-2000-U untuk uji lentur, durometer skala *Shore D* untuk uji kekerasan, *profilometer Surfcoorder* SE500 untuk pengujian

kekasaran permukaan, serta timbangan digital dan alat ukur densitas untuk pengujian massa jenis [18].



(a)



(b)

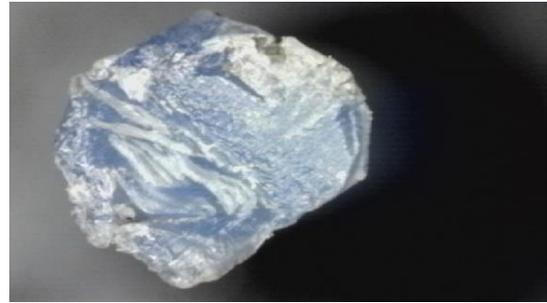
**Gambar 2.** (a) Mesin Ekstruder Filamen; (b) 3D Printer Creality Ender 3 V3 KE

### Prosedur Penelitian

Penelitian ini dilakukan melalui empat tahap utama, yaitu: persiapan bahan, ekstrusi filamen, pencetakan spesimen, dan pengujian mekanik. Limbah PET terlebih dahulu dibersihkan menggunakan isopropil alkohol, dikeringkan, kemudian diratakan menggunakan pemanasan terkontrol di atas permukaan logam untuk menghilangkan kelengkungan alami dari botol dan galon [11]. Material yang telah diratakan kemudian dipotong menjadi strip dengan empat variasi lebar, yaitu V1 (4 mm dari galon), V2 (3 mm dari galon), V3 (8 mm dari botol), dan V4 (10 mm dari botol). Penentuan ukuran strip ini berdasarkan pendekatan teoretis untuk mencapai luas penampang  $\pm 2,4 \text{ mm}^2$  yang sesuai dengan spesifikasi diameter filamen 1,75 mm.

Setelah persiapan selesai, strip PET diproses melalui ekstruder dengan suhu awal  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  untuk penjalaran dan suhu operasi  $190\text{--}230 \text{ }^\circ\text{C}$  untuk bahan galon serta  $180\text{--}215 \text{ }^\circ\text{C}$  untuk bahan botol [23]. Filamen yang dihasilkan diperiksa diameter dan keutuhannya secara visual dan menggunakan penggaris digital. Setelah ekstrusi, ditemukan adanya kekurangan material yang nyata pada beberapa variasi. Serupa dengan temuan Pires et al. (2025) [19], yang juga menghadapi isu dengan filamen daur ulang, ditemukan bahwa filamen yang diproduksi dari material botol yang lebih tipis cenderung membentuk inti berongga

di bagian tengahnya. Hasil potongan filamen V1 (galon 4mm) terlihat tidak berlubang dan rapat pada Gambar 3. (a). Filamen V2 (galon 3mm) tidak sepenuhnya menutup membentuk silinder sempurna dapat dilihat pada Gambar 3. (b). Filamen V3 (botol 8mm) menutup silinder namun bagian tengahnya membentuk lubang atau rongga seperti sedotan, dapat dilihat pada Gambar 3. (c), dan pada filamen V4 (botol 10mm) di bagian tengahnya yang berongga terdapat sisa strip yang menggulung ke bagian dalam rongga, dapat dilihat pada Gambar 3. (d).



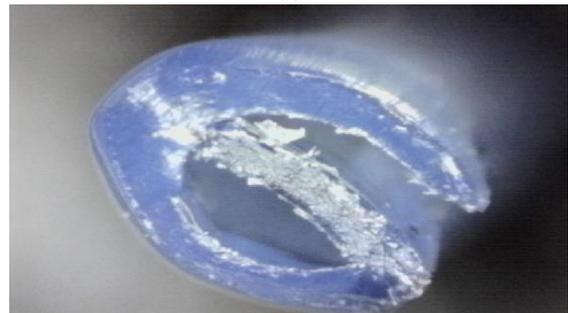
(a)



(b)



(c)



(d)

**Gambar 3.** Perbandingan Struktur Internal Filamen (a) Galon 4mm; (b) Galon 3mm; (c) Botol 8mm; (d) Botol 10mm

Filamen yang cacat atau tidak memenuhi standar diameter langsung dieliminasi dan diproses ulang. Filamen yang lolos seleksi digunakan untuk mencetak spesimen uji menggunakan *printer* 3D *Creativity Ender 3 V3 KE* dengan parameter standar yang dirinci pada **Tabel 1**.

**Tabel 1.** Parameter Cetak 3D

Parameter	Nilai
Suhu <i>Nozzle</i>	260 °C
Suhu Alas Cetak	80 °C
<i>Printing Speed</i>	60 mm/s
<i>Layer Height</i>	0.2 mm
<i>Infill Density</i>	100%
<i>Infill Pattern</i>	Grid
<i>Cooling Fan Speed</i>	100%

### Teknik Pengujian

#### 1. Pengujian Densitas

Pengujian massa jenis dilakukan menggunakan prinsip Archimedes, di mana spesimen ditimbang dalam keadaan kering dan terendam air [24]. Pengukuran densitas dilakukan menggunakan densitometer Fujitsu FSR-B, seperti yang diilustrasikan pada **Gambar 4**.



**Gambar 4.** Pengukuran densitas menggunakan alat Fujitsu FSR-B

Densitas spesimen ditentukan dengan mengetahui nilai Spesifik Gravitasi (SG) terlebih dahulu. SG adalah rasio tak berdimensi dari densitas material terhadap densitas air, dihitung dengan membagi massa di udara ( $M_k$ ) dengan selisih massa saat terendam di air ( $M_b$ ), seperti pada Persamaan (1). Setelah nilai SG diketahui, densitas spesimen dihitung dengan mengalikan nilai SG dengan massa jenis air ( $\rho_L$ ), seperti pada Persamaan (2) [24].

$$SG = \frac{M_k}{M_k - M_b} \quad (1)$$

$$\text{Densitas spesimen} = SG \times \rho_L \quad (2)$$

Di mana,

- $M_k$  = massa kering (g)
- $M_b$  = massa basah (g)
- SG = *Specific gravity*
- $\rho_L$  = Densitas air (1 g/cm<sup>3</sup>)

#### 2. Pengujian Kekasaran

Kekasaran permukaan adalah karakteristik penting dari komponen manufaktur karena mengukur ketidakteraturan skala halus pada permukaan, yang dapat mempengaruhi sifat fungsional seperti gesekan, keausan, dan estetika [25]. Dalam *Fused Filament Fabrication* (FFF), kualitas permukaan sangat bergantung pada sifat material dan parameter proses [10]. Penelitian ini mengevaluasi kekasaran permukaan untuk mengkarakterisasi kualitas spesimen yang dicetak dari filamen rPET yang dikembangkan.

Untuk mendapatkan nilai yang representatif untuk setiap spesimen, pengukuran dilakukan di enam lokasi: tiga di permukaan atas dan tiga di permukaan bawah (dua di dekat ujung dan satu di tengah). Nilai Ra akhir untuk setiap spesimen kemudian dilaporkan sebagai rata-rata aritmatika dari keenam pengukuran ini [25]. Dalam penelitian ini, pengukuran kekasaran permukaan dilakukan menggunakan *profilometer Surfscorder SE500*, seperti diilustrasikan pada **Gambar 5**.

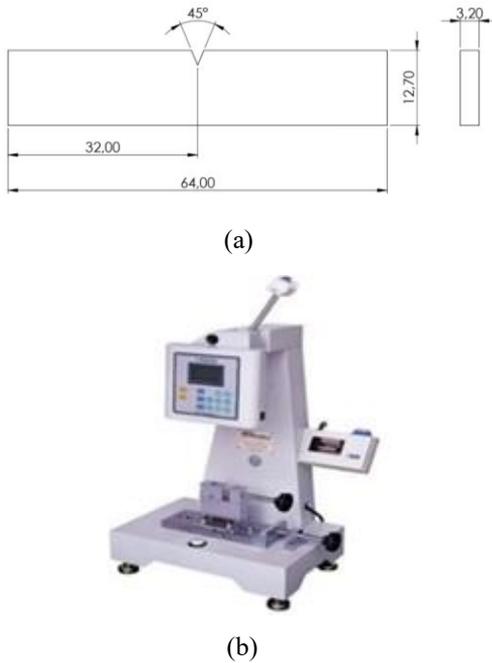


**Gambar 5.** Penguji kekasaran permukaan *profilometer Surfscorder SE500*

#### 3. Pengujian *Impact Izod* (ASTM D256)

Kekuatan impact, sebagai ukuran ketangguhan material, ditentukan menggunakan metode Izod sesuai standar ASTM D256, sebuah praktik yang diterima secara luas untuk karakterisasi polimer dan komposit. Geometri spesimen standar untuk pengujian ini adalah balok persegi panjang (64 mm x 12,7 mm x 3,2 mm) dengan takik-V 45° [26]. Penelitian ini secara sengaja menganalisis spesimen dengan dua ketebalan berbeda. Geometri pertama adalah spesimen dengan ketebalan non-standar 6,4 mm, yang diadaptasi dari repositori publik untuk menguji performa dalam kondisi cetak yang lebih tebal. Geometri kedua adalah spesimen dengan ketebalan standar 3,2 mm sesuai

acuan ASTM D256, yang digunakan sebagai data validasi dan pembanding. Dengan menganalisis kedua set data ini, penelitian ini bertujuan untuk memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai respons material rPET terhadap pembebanan kejut pada skala yang berbeda. Geometri detail dari spesimen hasil cetak yang digunakan dalam pengujian ini ditunjukkan pada Gambar 6. (a). Pengujian dilakukan menggunakan mesin uji impak GOTECH GT-7045-MD, dapat dilihat pada Gambar 6. (b).



**Gambar 6.** (a) Sketsa 2D spesimen uji *Impact* standar ASTM D256; (b) Mesin Uji *Impact* GOTECH GT-7045-MD

Energi yang diserap oleh material selama uji impak, yang biasa disebut sebagai energi impak ( $E$ ), pada dasarnya ditentukan oleh prinsip kekekalan energi. Energi ini dihitung dengan mengukur perbedaan energi potensial pendulum sebelum dilepaskan dan setelah mematahkan spesimen dan mencapai ketinggian maksimumnya. Ketahanan material terhadap patahan di bawah beban tiba-tiba, yang dikenal sebagai kekuatan impak ( $KI$ ), ditentukan. Sifat ini menormalisasi energi yang diserap terhadap area kegagalan. Dihitung dengan membagi total energi impak yang diserap ( $E$ ) dengan luas penampang ( $A$ ) spesimen pada takik. Perhitungan ini ditunjukkan pada Persamaan (3) [26].

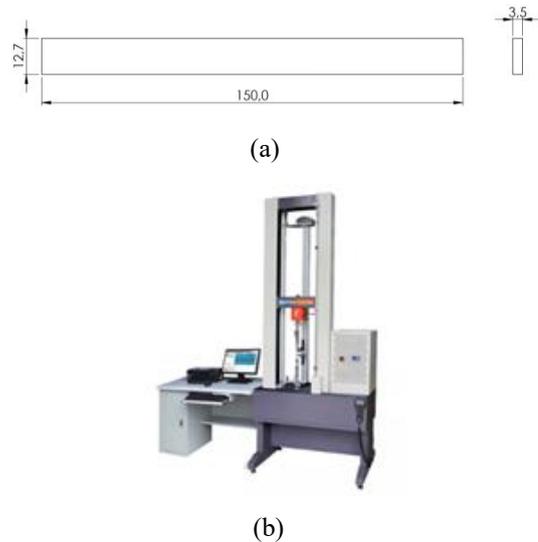
$$KI = \frac{E}{A} \quad (3)$$

Di mana,

- $KI$  = Energi serap ( $J/mm^2$ )
- $E$  = Energi serap (J)
- $A$  = Luas penampang ( $mm^2$ )

#### 4. Pengujian *Bending* (ASTM D790)

Pengujian kekuatan lentur dilakukan menggunakan metode pembebanan tiga titik (*three-point bending*) sesuai dengan standar ASTM D790 [27], dipilih karena merupakan pendekatan yang umum dan telah tervalidasi untuk mengkarakterisasi sifat lentur komposit polimer, konsisten dengan penerapannya pada penelitian sebelumnya yang berfokus pada komposit hibrida [28]. Spesimen uji yang digunakan memiliki dimensi standar dengan panjang 150 mm, lebar 12,7 mm, dan ketebalan 3,5 mm, di mana sketsa geometrinya ditunjukkan Gambar 7. (a). Selama pengujian, spesimen diletakkan di atas dua titik tumpu dan dibebani di tengah hingga patah. Pengujian ini dilakukan menggunakan Universal Testing Machine (UTM) GOTECH TCS-2000-U, seperti yang terlihat pada Gambar 7. (b).



**Gambar 7.** (a) Sketsa 2D spesimen uji *bending* standar ASTM D790; (b) Mesin UTM GOTECH'S TCS-2000-U

Penentuan sifat *bending* material dilakukan sesuai dengan standar ASTM D790 menggunakan konfigurasi uji *three-point bending*. Kekuatan *bending* ( $\sigma$ ), yang mewakili tegangan maksimum yang dapat ditahan material sebelum luluh, dihitung dari data uji. Untuk penampang persegi panjang dalam uji tiga titik, rumusnya diturunkan dari prinsip momen lentur dan momen inersia, disederhanakan seperti yang ditunjukkan pada Persamaan (4) [27].

$$\sigma = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (4)$$

Regangan maksimum ( $\epsilon$ ) pada permukaan luar spesimen di tengah rentang ditentukan oleh perpindahan maksimum yang tercatat selama pengujian, seperti yang ditunjukkan pada Persamaan (5) [27].

$$\epsilon = \frac{6Dd}{L^2} \quad (5)$$

Dari nilai tegangan dan regangan, modulus elastisitas (E), atau Modulus Young, dapat dihitung. Ini didefinisikan sebagai rasio tegangan terhadap regangan di daerah elastis. Untuk uji lentur tiga titik, modulus dihitung menggunakan Persamaan (6) [27].

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} = \frac{PL^3}{4bd^3D} \quad (6)$$

Dimana:

- $\sigma$  = Kekuatan *bending* (MPa)
- $\epsilon$  = Regangan *bending* (%)
- $P$  = Beban maksimal (N)
- $L$  = Panjang span (mm)
- $b$  = Lebar spesimen (mm)
- $d$  = Tebal spesimen (mm)
- $D$  = *Displacement* (mm)

#### 5. Pengujian Kekerasan (ASTM D2240)

Kekerasan permukaan spesimen ditentukan sesuai dengan standar ASTM D2240 menggunakan durometer pada skala Shore D, dapat dilihat pada **Gambar 8**. [25]. Untuk mendapatkan nilai yang representatif, lima titik indentasi diukur pada tiap spesimen dengan jarak antar titik sekitar 6 mm. Nilai kekerasan akhir adalah rata-rata dari kelima pengukuran tersebut.



**Gambar 8.** Penguji Kekerasan Durometer Shore D

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan data kuantitatif dari serangkaian pengujian fisik dan mekanik yang telah dilakukan. Hasil pengujian disajikan terlebih dahulu secara objektif dalam bentuk tabel-tabel, diikuti dengan analisis dan pembahasan mendalam yang didukung oleh visualisasi grafik untuk setiap jenis pengujian.

### Hasil Pengujian Sifat Fisik

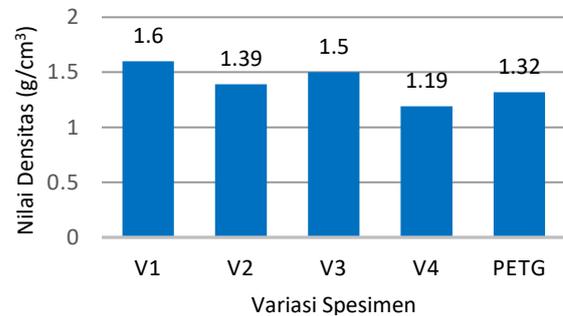
#### 1. Hasil Pengujian Densitas

Pengujian massa jenis dilakukan untuk mengetahui kerapatan relatif material hasil cetak dari tiap variasi lebar strip PET. Pengujian ini menggunakan prinsip Archimedes.

Hasil pengujian lengkap, termasuk perhitungan untuk setiap spesimen, disajikan pada **Tabel 2**.

**Tabel 2.** Parameter Cetak 3D

Kode No	Massa Kering (g)	Massa Basah (g)	Massa Jenis Air (g/cm <sup>3</sup> )	Densitas Rata-rata (g/cm <sup>3</sup> )
V1	1	5,90	2,16	1,58
	2	5,82	2,25	1,63
	3	5,83	2,13	1,58
V2	1	5,25	1,47	1,39
	2	5,42	1,36	1,33
	3	5,35	1,65	1,45
V3	1	5,10	2,10	1,70
	2	5,13	1,50	1,41
	3	4,56	1,26	1,38
V4	1	4,88	0,49	1,11
	2	4,83	0,76	1,19
	3	4,96	1,03	1,26
PETG	1	6,65	1,91	1,40
	2	6,60	1,65	1,21
	3	6,37	1,25	1,24



**Gambar 9.** Grafik Perbandingan Nilai Densitas Rata-rata

Pengujian massa jenis dilakukan untuk mengetahui tingkat kepadatan atau massa jenis dari setiap variasi filamen yang dihasilkan. Berdasarkan data hasil pengujian pada **Tabel 2**. dan divisualisasikan pada **Gambar 9**., ditemukan adanya perbedaan nilai densitas yang terukur antar variasi spesimen. Nilai densitas rata-rata tertinggi diperoleh spesimen V1 (Galon 4mm) dengan nilai 1,60 g/cm<sup>3</sup>, sementara nilai terendah dari filamen daur ulang diperoleh spesimen V4 (Botol 10mm) dengan rata-rata 1,19 g/cm<sup>3</sup>.

Analisis perbandingan menunjukkan bahwa densitas spesimen V1 lebih tinggi 13,2% dibandingkan V2 (1,41 g/cm<sup>3</sup>), lebih tinggi 6,25% dibandingkan V3 (1,39 g/cm<sup>3</sup>), dan lebih tinggi 17,5% dibandingkan filamen PETG komersial (1,32 g/cm<sup>3</sup>). Penurunan densitas yang paling besar terlihat saat membandingkan V1 dengan V4, di mana terdapat selisih sebesar 25,6%.

Perbedaan densitas ini dapat distribusikan pada kualitas struktur internal filamen yang terbentuk selama proses ekstrusi. Diduga, strip yang lebih tebal dan kaku dari bahan galon (V1 dan V2) mampu menghasilkan aliran lelehan

yang lebih stabil, sehingga menciptakan filamen dengan struktur internal yang lebih padat dan lebih sedikit rongga (*voids*). Keberadaan rongga dalam material komposit diketahui menjadi titik konsentrasi tegangan yang dapat menurunkan performa mekanik [24]. Oleh karena itu, densitas yang lebih tinggi pada spesimen V1 dan V3 dapat diartikan sebagai indikator kualitas fabrikasi filamen yang lebih baik.

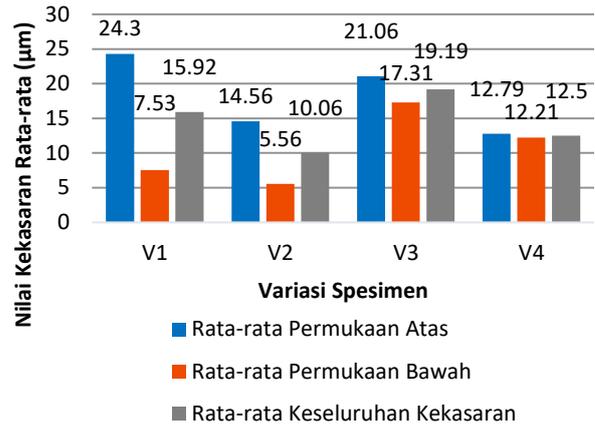
Hasil ini juga konsisten dengan penelitian sebelumnya yang berfokus pada daur ulang PET. Sebagai contoh, Pepek & Hanan [7] melaporkan bahwa densitas standar untuk PET *virgin* adalah sekitar 1,36 g/cm<sup>3</sup> dan untuk PETG komersial adalah 1,29 g/cm<sup>3</sup>. Nilai yang diperoleh dalam penelitian ini berada dalam rentang yang wajar, dengan beberapa variasi (V1, V2, V3) bahkan menunjukkan densitas yang lebih tinggi dari standar komersial, yang menguatkan argumen bahwa proses daur ulang yang terkontrol mampu menghasilkan filamen yang padat. Selain itu, pendekatan metodologis untuk memproduksi filamen rPET dari limbah botol dan membandingkannya dengan bahan komersial juga telah divalidasi oleh studi lain, seperti yang dilakukan oleh Pires, dkk. [19], yang menunjukkan bahwa rPET dapat menjadi alternatif yang layak untuk filamen komersial.

2. Hasil Pengujian Kekasaran Permukaan

Kekasaran permukaan merupakan parameter penting yang berpengaruh terhadap estetika dan sifat fungsional permukaan. Hasil pengujian kekasaran permukaan (*Ra*) disajikan pada Tabel 3.

**Tabel 3.** Nilai Kekasaran Permukaan (*Ra*) Tiap Spesimen

Ko de	Sisi	Titik Pengujian			Rata- rata sisi ( $\mu\text{m}$ )	Rata- rata Kesel- uruhan ( $\mu\text{m}$ )
		1	2	3		
V1	Atas	26,4 66	25, 890	20,5 54	24,30	15,92
	Bawah	9,69 0	7,1 22	5,78 4	7,53	
V2	Atas	12,4 18	11, 473	19,7 83	14,56	10,06
	Bawah	5,42 7	5,4 39	5,80 9	5,56	
V3	Atas	20,9 97	22, 616	19,5 53	21,06	19,19
	Bawah	20,0 37	17, 474	14,4 33	17,31	
V4	Atas	13,7 31	13, 675	10,9 59	12,79	12,50
	Bawah	13,0 70	10, 930	12,6 19	12,21	



**Gambar 10.** Grafik Perbandingan Nilai Kekasaran Permukaan Rata-rata

Berdasarkan data yang disajikan pada Tabel 3 dan divisualisasikan pada Gambar 10., terlihat bahwa variasi lebar strip bahan baku memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kekasaran permukaan akhir dari spesimen cetak 3D. Nilai kekasaran permukaan terendah (permukaan paling halus) dicapai oleh spesimen V2 (Galon 3mm) dengan nilai *Ra* rata-rata 10,06  $\mu\text{m}$ . Sementara itu, nilai kekasaran tertinggi (permukaan paling kasar) ditunjukkan oleh spesimen V3 (Botol 8mm) dengan nilai *Ra* rata-rata 19,19  $\mu\text{m}$ .

Analisis komparatif menunjukkan bahwa spesimen V2 secara konsisten menghasilkan permukaan yang lebih halus dibandingkan variasi lainnya. Permukaan V2 tercatat 10,4% lebih halus dari V1 (11,23  $\mu\text{m}$ ), 47,6% lebih halus dari V3, dan 18,4% lebih halus dari filamen PETG komersial (12,33  $\mu\text{m}$ ). Di sisi lain, spesimen V3 menunjukkan performa terburuk, dengan permukaan 41,5% lebih kasar dari V1 dan bahkan 35,8% lebih kasar dari PETG komersial.

Perbedaan hasil kekasaran ini dapat distribusikan pada stabilitas aliran lelehan (*melt flow*) selama proses ekstrusi filamen. Variasi V2, yang berasal dari strip galon dengan lebar 3mm, tampaknya memberikan keseimbangan terbaik antara kekakuan material dan laju pasokan ke dalam *nozzle*, sehingga menghasilkan aliran lelehan yang paling konsisten. Aliran yang stabil ini kemudian menciptakan filamen dengan variasi diameter yang minimal, yang pada gilirannya memungkinkan proses pencetakan 3D yang lebih presisi dengan deposisi material yang seragam. Temuan ini sejalan dengan penelitian oleh Kónya, dkk. [25], yang menyatakan bahwa karakteristik aliran material secara langsung mempengaruhi kualitas lapisan yang direposisi dan pada akhirnya menentukan kehalusan permukaan. Sebaliknya, kekasaran tinggi pada V3 kemungkinan disebabkan oleh aliran yang tidak stabil; strip yang lebar (8mm) dari bahan botol yang tipis berpotensi

melipat atau tersendat saat ditarik ke dalam ekstruder. Fenomena ini dapat menyebabkan inkonsistensi diameter filamen, yang mengakibatkan *under-extrusion* atau *over-extrusion sporadis* selama pencetakan dan berkontribusi langsung pada meningkatnya kekasaran permukaan.

**Hasil Pengujian Sifat Mekanik**

1. Hasil Pengujian Kekuatan Impak

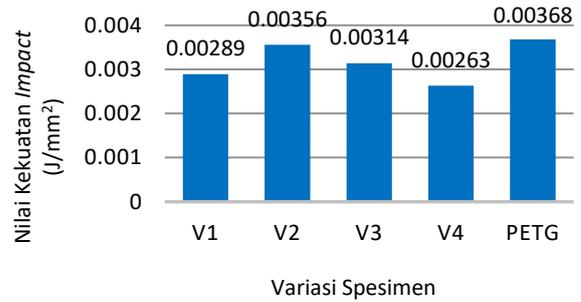
Uji Impak Izod dilakukan untuk mengetahui ketangguhan material, yaitu kemampuannya menyerap energi sebelum patah. Energi serap disajikan pada Tabel 4. dan kekuatan impact yang dihitung disajikan pada Tabel 5.

**Tabel 4.** Hasil Uji Impak Izod 6,4 mm

Kode	No	Lebar (mm)	Tebal (mm)	Luas Penampang (mm <sup>2</sup> )	Energi Serap (J)	Rata-rata
V1	1	12,7	6,35	80,645	0,25	0,233
	2	12,7	6,35	80,645	0,21	
	3	12,7	6,35	80,645	0,24	
V2	1	12,7	6,30	80,01	0,31	0,286
	2	12,7	6,35	80,645	0,31	
	3	12,7	6,35	80,645	0,24	
V3	1	12,7	6,38	81,026	0,26	0,253
	2	12,7	6,35	80,645	0,24	
	3	12,7	6,35	80,645	0,26	
V4	1	12,7	7,00	88,9	0,21	0,226
	2	12,7	7,00	88,9	0,25	
	3	12,7	6,36	80,772	0,22	
PETG	1	12,7	7,08	89,916	0,33	0,33
	2	12,7	7,10	90,17	0,31	
	3	12,7	7,00	88,9	0,35	

**Tabel 5.** Nilai Kekuatan Impact 6,4 mm

Kode	Kekuatan Impact			Rata-rata
	Spesimen 1	Spesimen 2	Spesimen 3	
V1	0,00310	0,00260	0,00298	0,00289
V2	0,00387	0,00384	0,00298	0,00356
V3	0,00321	0,00298	0,00322	0,00314
V4	0,00236	0,00281	0,00272	0,00263
PETG	0,00367	0,00344	0,00394	0,00368



**Gambar 11.** Grafik Perbandingan Nilai Kekuatan Impact Rata-rata

Analisis perbandingan pada Gambar 11. menunjukkan bahwa kekuatan impact spesimen V1 jauh lebih superior. Nilainya tercatat 42,6% lebih tinggi dari V2 (0.031 J/mm<sup>2</sup>), 29,6% lebih tinggi dari V3 (0.038 J/mm<sup>2</sup>), 20,4% lebih tinggi dari V4 (0.043 J/mm<sup>2</sup>), dan 37,0% lebih tinggi dari filamen PETG komersial (0.034 J/mm<sup>2</sup>). Di antara variasi lainnya, V3 dan V4 menunjukkan ketangguhan yang lebih baik daripada V2, dan bahkan sedikit mengungguli PETG komersial, di mana V3 memiliki kekuatan impact 11,8% lebih tinggi dari PETG.

Performa impact yang superior pada V1 sangat sejalan dengan hasil pengujian densitas sebelumnya. Dapat disimpulkan bahwa struktur internal filamen yang padat dan minim porositas adalah faktor kunci yang menentukan ketangguhan material. Filamen V1, yang diproduksi dari strip galon yang tebal dan kaku, memiliki struktur internal paling solid. Ketiadaan rongga atau cacat internal (*voids*) membuat material lebih mampu menyerap dan mendisipasikan energi impact secara merata sebelum terjadi patahan. Sebaliknya, filamen dengan densitas lebih rendah (seperti V2) cenderung memiliki porositas internal yang bertindak sebagai titik konsentrasi tegangan (*stress concentrators*). Ketika beban impact diberikan, retakan akan lebih mudah berpropagasi dari titik-titik lemah ini, sehingga energi yang mampu diserap material sebelum patah menjadi jauh lebih rendah. Temuan ini didukung oleh penelitian Roberson dkk. [26], yang menyatakan bahwa cacat struktural seperti *raster sparsity* atau rongga dalam spesimen cetak 3D secara signifikan menurunkan ketahanan impactnya. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa lebar strip 4mm dari bahan galon merupakan parameter preparasi yang paling optimal untuk menghasilkan filamen rPET dengan ketangguhan tertinggi.

Analisis Perbandingan dengan Spesimen Standar ASTM D256 (3,2 mm)

Untuk menjawab validitas perbandingan antar penelitian dan mengevaluasi pengaruh ketebalan, serangkaian pengujian impact tambahan dilakukan pada

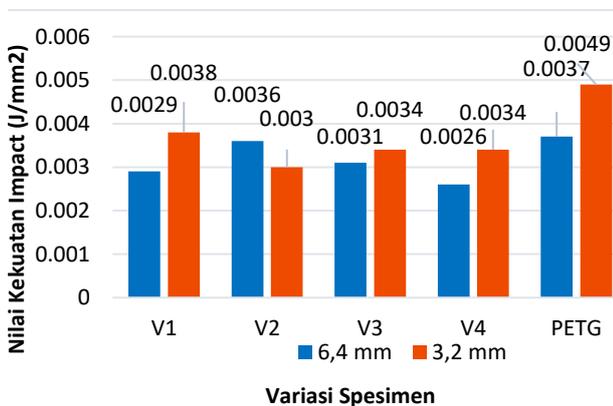
spesimen dengan ketebalan standar 3,2 mm. Hasil pengujian disajikan pada Tabel 6., kekuatan impact yang dihitung disajikan pada Tabel 7. dan divisualisasikan pada Gambar 12.

Tabel 6. Hasil Uji Impact Izod 3,2 mm

Kode No	Lebar b (mm)	Tebal d (mm)	Luas Penampang	Energi Serap (J)	Rata-rata
V1	1	12,7	6,35	40.64	0.14
	2	12,7	6,35	40.64	0.14
	3	12,7	6,35	40.64	0,19
V2	1	12,7	6,30	40.64	0,13
	2	12,7	6,35	40.64	0,13
	3	12,7	6,35	39.37	0,10
V3	1	12,7	6,38	41.91	0,16
	2	12,7	6,35	40.64	0,13
	3	12,7	6,35	40.64	0,14
V4	1	12,7	7,00	40.64	0,15
	2	12,7	7,00	40.64	0,14
	3	12,7	6,36	40.64	0,13
PETG	1	12,7	7,08	43.18	0,23
	2	12,7	7,10	43.18	0,23
	3	12,7	7,00	43.18	0,18

Tabel 7. Nilai Kekuatan Impact 3,2 mm

Kode	Kekuatan Impact			Rata-rata
	Spesimen 1	Spesimen 2	Spesimen 3	
V1	0,0034	0,0034	0,0047	0,0038
V2	0,0032	0,0032	0,0025	0,0030
V3	0,0037	0,0032	0,0034	0,0034
V4	0,0037	0,0034	0,0032	0,0034
PETG	0,0053	0,0053	0,0042	0,0049



Gambar 12. Grafik Perbandingan Nilai Kekuatan Impact Rata-rata 6,4 mm vs 3,2 mm

Dari hasil uji validasi, terlihat bahwa spesimen dengan ketebalan standar 3,2 mm menunjukkan nilai kekuatan impact yang berbeda secara terukur. Pada variasi V1, spesimen standar 3,2 mm menunjukkan kekuatan impact 33,6% lebih tinggi dibandingkan spesimen 6,4 mm. Sebaliknya, pada variasi V2, spesimen 3,2 mm justru

menunjukkan penurunan kekuatan sebesar 17,7%. Perbedaan ini menegaskan bahwa geometri spesimen, terutama ketebalan, memiliki pengaruh langsung pada modulus kegagalan dan hasil kekuatan impact, bahkan setelah dinormalisasi terhadap luas penampang.

Temuan ini mengkonfirmasi adanya "efek ukuran" (*size effect*) pada material cetak 3D, di mana geometri spesimen memengaruhi respons mekanisnya terhadap pembebanan. Hal ini konsisten dengan hasil penelitian Tezel dkk. [29] yang melaporkan bahwa parameter geometris seperti tebal lapisan (*layer thickness*) berdampak pada nilai kekuatan impact polimer hasil cetak 3D, termasuk PETG. Secara teoretis, fenomena yang teramati dalam penelitian ini dapat dihubungkan dengan analisis oleh Tvergaard & Needleman [30], yang menyatakan bahwa perubahan ketebalan spesimen pada uji Izod dapat mengubah kondisi tegangan dari plane strain (pada spesimen tebal) menjadi plane stress (pada spesimen tipis), yang pada gilirannya akan memengaruhi mekanisme patahan dan energi serap yang terukur. Dengan menyajikan kedua set data ini, penelitian ini tidak hanya memberikan perbandingan internal yang valid antar variasi filamen rPET, tetapi juga menyediakan data pembandingan yang sesuai dengan standar ASTM D256 untuk rujukan penelitian selanjutnya.

## 2. Hasil Pengujian Kekuatan Bending

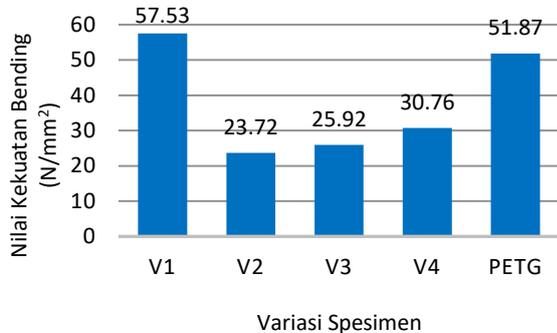
Pengujian kekuatan *Bending* dilakukan dengan metode pembebanan tiga titik disajikan pada Tabel 8. Hasil perhitungan disajikan pada Tabel 9., Tabel 10., dan Tabel 11.

Tabel 8. Hasil Pengujian *Bending* pembebanan tiga titik

Kode No		Lebar b (mm)	Tebal d (mm)	Span L (mm)	Beban Maks Displacement	
					P (N)	D (mm)
V1	1	12,6	3,4	54,4	118,70	32,4
	2	12,55	3,4	54,4	115,76	30,0
	3	12,5	3,4	54,4	72,59	33,3
V2	1	12,43	3,4	54,4	40,22	42,0
	2	12,25	3,4	54,4	41,20	42,3
	3	12,4	3,4	54,4	43,16	38,7
V3	1	12,5	3,4	54,4	46,11	42,6
	2	12,45	3,4	54,4	47,09	39,0
	3	12,45	3,4	54,4	44,15	35,4
V4	1	12,4	3,45	55,2	52,00	36,3
	2	12,4	3,4	54,4	54,94	38,7
	3	12,4	3,4	54,4	55,92	44,1
PETG	1	13,15	3,85	61,6	105,95	32,1
	2	13,25	3,8	60,8	106,93	32,4
	3	12,25	3,85	61,6	106,93	31,8

**Tabel 9.** Hasil Kekuatan *Bending* ( $\sigma$ )

Kode	Kekuatan <i>Bending</i>			Rata-rata
	Spesimen	Spesimen	Spesimen	
	1	2	3	
V1	66,50	65,11	40,99	57,53
V2	22,84	23,74	24,57	23,72
V3	26,04	26,70	25,03	25,92
V4	29,17	31,28	31,83	30,76
PETG	50,23	50,97	54,41	51,87



**Gambar 13.** Grafik Perbandingan Rata-rata Kekuatan *Bending*

Berdasarkan data yang divisualisasikan pada **Gambar 13**, uji kekuatan lentur, teramati adanya hierarki performa yang jelas antar spesimen hasil rekayasa strip (V1–V4) jika dibandingkan dengan material referensi PETG komersial. Spesimen V1 menunjukkan ketahanan lentur tertinggi dengan nilai mencapai 57,53 MPa. Sebaliknya, varian V2 mencatatkan kekuatan paling rendah, yaitu 23,72 MPa, yang merepresentasikan disparitas kekuatan sebesar 58,75% terhadap V1. Kesenjangan performa ini dapat diatribusikan pada variasi dimensional potongan strip yang diperkirakan memengaruhi tingkat kepadatan dan homogenitas ikatan antar lapisan selama proses ekstrusi dan pencetakan.

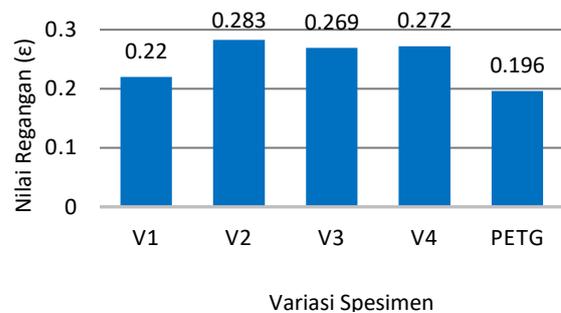
Perbandingan V1 terhadap V3 dan V4 juga mengonfirmasi adanya penurunan kekuatan yang terukur, masing-masing tercatat lebih rendah 54,95% dan 46,52%. Hal ini menggarisbawahi bahwa konsistensi geometri strip bahan baku menjadi faktor penentu integritas mekanik produk akhir. Ketika disandingkan dengan bahan komersial, kinerja V1 terbukti amat kompetitif, dengan kekuatan lentur yang hanya 9,83% di bawah PETG. Namun, performa V2, V3, dan V4 menunjukkan deviasi yang lebih besar; kekuatan lentur PETG tercatat 118,73% lebih tinggi dibandingkan V2, yang menegaskan bahwa pemilihan dimensi strip yang tidak optimal dapat menurunkan ketahanan mekanik material hingga separuhnya dibandingkan standar komersial.

Korelasi positif antara densitas tinggi dan kekuatan lentur yang tinggi ini sangat jelas. Spesimen V1, yang memiliki densitas tertinggi, mampu menahan beban lentur

terbesar sebelum mengalami kegagalan. Hal ini menegaskan kembali bahwa struktur internal filamen yang padat dan homogen berperan krusial dalam mendistribusikan tegangan lentur secara efektif ke seluruh penampang spesimen. Rongga atau cacat internal, yang lebih mungkin ada pada spesimen berdensitas lebih rendah seperti V2 dan V4, akan bertindak sebagai titik awal retakan, yang mempercepat kegagalan material di bawah beban lentur. Temuan ini didukung oleh prinsip-prinsip dasar yang dijelaskan dalam penelitian dos Santos dkk. [27], yang meneliti efek struktur internal pada perilaku lentur material cetak 3D. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa kualitas fabrikasi filamen yang superior pada V1 secara langsung berkontribusi pada kekuatan lenturnya yang unggul.

**Tabel 10.** Hasil Regangan *Bending* ( $\epsilon$ )

Kode	Regangan <i>Bending</i>			Rata-rata
	Spesimen	Spesime	Spesime	
	1	n 2	n 3	
V1	0,223	0,207	0,230	0,220
V2	0,290	0,292	0,267	0,283
V3	0,294	0,269	0,244	0,269
V4	0,247	0,267	0,304	0,272
PETG	0,195	0,200	0,194	0,196



**Gambar 14.** Grafik Perbandingan Rata-rata Regangan *Bending*

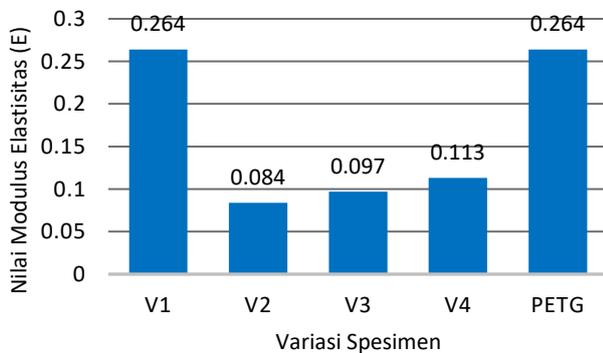
Grafik regangan lentur pada **Gambar 14**, memberikan wawasan mengenai fleksibilitas atau kegetasan relatif dari setiap variasi spesimen. Nilai rata-rata *flexural strain* menunjukkan bahwa spesimen V1 (0,21990) memiliki regangan lebih tinggi dibanding PETG (0,19628), dengan selisih 10,76%, namun lebih rendah dari V2, V3, dan V4 yang masing-masing meningkat sebesar 28,52%, 22,27%, dan 23,88% terhadap V1. Perbandingan antar variasi juga menunjukkan bahwa V2 lebih lentur dari V3 (4,88% lebih tinggi), sementara V3 dan V4 masih menunjukkan deformabilitas yang relatif tinggi dibanding PETG, masing-masing 26,99% dan 27,10% lebih besar.

Peningkatan regangan pada V2–V4 mengindikasikan bahwa spesimen dengan struktur internal kurang padat *cEnderung* mengalami deformasi lebih besar meskipun tidak selalu diiringi oleh kekuatan mekanik yang tinggi. Sebaliknya, nilai *strain* V1 yang mendekati PETG

menunjukkan keseimbangan antara kekakuan dan kelenturan, yang menandakan struktur internal yang lebih solid dan terkontrol selama proses fabrikasi. Hal ini mungkin disebabkan oleh struktur internal V1 yang lebih padat dan bebas cacat, yang memungkinkannya untuk mengalami deformasi plastis yang lebih besar sebelum patah. Filamen dengan porositas internal (seperti yang diduga pada V2) cenderung lebih getas karena retakan dapat berpropagasi dengan lebih mudah melalui rongga-rongga tersebut.

**Tabel 11.** Hasil Modulus Elastisitas (E)

Kode	Modulus Elastisitas (GPa)			Rata-rata
	Spesime n 1	Spesime n 2	Spesime n 3	
V1	0,298	0,315	0,179	0,264
V2	0,079	0,081	0,092	0,084
V3	0,089	0,099	0,103	0,097
V4	0,118	0,117	0,105	0,113
PETG	0,257	0,255	0,281	0,264



**Gambar 15.** Grafik Perbandingan Modulus Elastisitas *Bending*

Visualisasi perbandingan pada Gambar 15. hasil pengujian modulus elastisitas menunjukkan bahwa spesimen V1 (0,26372 GPa) memiliki kekakuan paling tinggi di antara variasi rPET dan hanya terpaut tipis (0,25%) dari PETG komersial, menandakan bahwa filamen hasil ekstrusi dari strip galon 4 mm mampu menghasilkan struktur internal yang padat dan responsif terhadap beban lentur. Dibandingkan V1, penurunan modulus pada V2, V3, dan V4 masing-masing mencapai 68,10%, 63,27%, dan 57,00%, mencerminkan degradasi kekakuan akibat kemungkinan rongga internal dan ikatan lapisan yang kurang sempurna. Perbandingan antar variasi lainnya juga menunjukkan bahwa V3 memiliki kekakuan 15,11% lebih tinggi dari V2, sedangkan PETG masih jauh lebih kaku dari keduanya, masing-masing 214,26% dan 172,84% lebih tinggi dari V2 dan V3..

Hubungan kuat antara densitas, kekuatan, dan kekakuan yang diamati dalam penelitian ini konsisten dengan prinsip-prinsip rekayasa material. Kekakuan yang

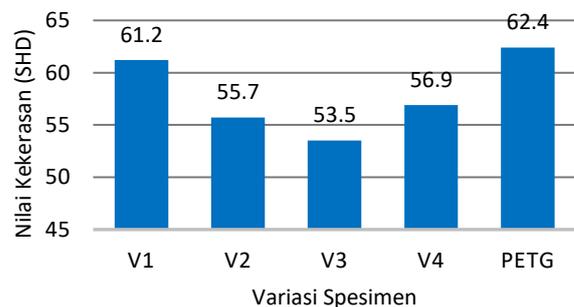
tinggi pada V1 sekali lagi dapat diatribusikan pada struktur internalnya yang padat, yang meminimalkan deformasi elastis di bawah beban. Temuan ini didukung oleh literatur yang luas, termasuk ulasan oleh Bayas, dkk. [10], yang menegaskan bahwa cacat mikrostruktural seperti porositas secara signifikan dapat mengurangi kekakuan efektif dari komponen cetak 3D. Kemampuan V1 untuk mencapai modulus yang setara dengan PETG komersial membuktikan kelayakan penggunaan limbah galon sebagai sumber daya untuk aplikasi rekayasa yang menuntut kekakuan tinggi.

### 3. Hasil Pengujian Kekerasan Permukaan

Uji kekerasan permukaan dilakukan menggunakan durometer Shore D. Hasilnya disajikan pada Tabel 12.

**Tabel 12.** Hasil Pengujian Kekerasan Permukaan

Kode	No	Titik Pengujian					Rata-Rata (SHD)
		1	2	3	4	5	
V1	1	60	60,5	61	62	62,5	61,2
V2	1	57	54,5	55	55,5	56,5	55,7
V3	1	56	55,5	52,5	52	51,5	53,5
V4	1	56,5	57	57,5	56,5	57	56,9
PETG	1	64	66,5	63,5	58,5	59,5	62,4



**Gambar 16.** Grafik Perbandingan Nilai Kekerasan Rata-rata

Analisis perbandingan kuantitatif yang divisualisasikan pada Gambar 16. menunjukkan bahwa kekerasan V1 hanya 1,9% lebih rendah dari PETG komersial, sebuah perbedaan yang sangat kecil. Namun, jika dibandingkan dengan varian rPET lainnya, V1 secara konsisten lebih superior: 9,0% lebih keras dari V2 (55,7 SHD), 12,6% lebih keras dari V3 (53,5 SHD), dan 7,0% lebih keras dari V4 (56,9 SHD). Varian dengan kekerasan terendah adalah V3, yang tercatat 14,3% lebih lunak dibandingkan PETG komersial.

Tren ini menunjukkan korelasi yang kuat antara densitas dan kekerasan permukaan. Spesimen V1, yang

sebelumnya terbukti memiliki densitas tertinggi, juga menunjukkan kekerasan tertinggi di antara material daur ulang. Hal ini logis, karena material dengan struktur internal yang lebih padat dan minim porositas akan memberikan resistansi yang lebih besar terhadap indentasi pada permukaannya. Sebaliknya, spesimen V2 dan V3 yang memiliki densitas lebih rendah juga menunjukkan nilai kekerasan yang lebih rendah. Temuan ini sejalan dengan penelitian oleh Kónya dkk. [25], yang juga menemukan bahwa sifat internal material, yang dipengaruhi oleh komposisi dan proses, secara langsung menentukan kekerasan permukaannya. Kemampuan spesimen V1 untuk mencapai tingkat kekerasan yang hampir setara dengan filamen PETG komersial membuktikan bahwa proses daur ulang dari limbah galon dengan preparasi strip yang optimal mampu menghasilkan material dengan kualitas fisik yang sangat kompetitif.

## PENUTUP

### Simpulan

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis yang telah dilakukan, penelitian ini menyimpulkan bahwa fabrikasi filamen untuk pencetakan 3D dari limbah pasca konsumsi galon dan botol PET merek Le Minerale terbukti dapat dilaksanakan, dengan parameter preparasi bahan baku menjadi faktor penentu yang amat berpengaruh terhadap sifat fisik dan mekanik akhir. Spesimen V1 (Galon 4mm) secara konsisten menunjukkan performa mekanik paling unggul, yang ditunjukkan dengan nilai densitas, kekuatan impak, kekuatan lentur, serta modulus elastisitas tertinggi, bahkan kompetitif terhadap filamen PETG komersial. Ditemukan korelasi yang erat antara densitas material dengan kekuatan mekaniknya; struktur internal yang padat dan minim porositas pada spesimen V1 menjadi faktor utama yang mendukung ketahanannya. Lebih lanjut, teridentifikasi adanya pertukaran sifat (trade-off), di mana spesimen V2 (Galon 3mm) berhasil mencapai tingkat kehalusan permukaan terbaik, meskipun dengan sifat mekanik yang lebih rendah dari V1.

### Saran

Untuk pengembangan penelitian di masa mendatang, disarankan agar investigasi lebih lanjut difokuskan pada optimasi proses ekstrusi untuk strip botol yang lebih tipis guna meminimalkan porositas internal filamen. Selain itu, perlu dilakukan penelitian mengenai pengaruh perlakuan pasca-cetak (*post-processing*), seperti *annealing*, untuk meningkatkan kualitas permukaan dari varian berkekuatan tinggi (V1). Pengujian mekanik juga sebaiknya diperluas dengan menyertakan uji tarik sesuai standar ASTM D638 dan uji ketahanan lelah (*fatigue*) untuk memahami durabilitas material secara lebih komprehensif. Terakhir,

untuk mengevaluasi kelayakan implementasi yang lebih luas, analisis tekno-ekonomi dan *Life Cycle Assessment* (LCA) sangat dianjurkan untuk mengukur keunggulan ekonomis dan dampak lingkungan dari proses daur ulang ini secara kuantitatif.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. G. C. Nayanathara Thathsarani Pilapitiya and A. S. Ratnayake, "The world of plastic waste: A review," *Clean. Mater.*, vol. 11, no. August 2023, p. 100220, 2024, doi: 10.1016/j.clema.2024.100220.
- [2] "IMPLEMENTASI PERMENHUT P.75/2019, KLHK APRESIASI PRODUSEN DALAM PELAKSANAAN PETA JALAN PENGURANGAN SAMPAH." Accessed: May 09, 2025. [Online]. Available: [https://info3r.menlhk.go.id/berita/detail/berita-35-v\\_berita](https://info3r.menlhk.go.id/berita/detail/berita-35-v_berita)
- [3] M. Oyinlola, S. A. Okoya, T. Whitehead, M. Evans, and A. S. Lowe, "The potential of converting plastic waste to 3D printed products in Sub-Saharan Africa," *Resour. Conserv. Recycl. Adv.*, vol. 17, no. January, p. 200129, 2023, doi: 10.1016/j.rcradv.2023.200129.
- [4] M. I. Nuryanta *et al.*, "The Interconnection of Carbon Active Addition on Mechanical Properties of Hybrid Agel/Glass Fiber-Reinforced Green Composite," *Polym. 2023, Vol. 15, Page 2411*, vol. 15, no. 11, p. 2411, May 2023, doi: 10.3390/POLYM15112411.
- [5] L. Toth, E. Slezák, K. Bocz, and F. Ronkay, "Progress in 3D printing of recycled PET," *Mater. Today Sustain.*, vol. 26, no. January, 2024, doi: 10.1016/j.mtsust.2024.100757.
- [6] K. Kalia, N. Lalwani, A. Ameli, P. Engineering, and M. Lowell, *Recycled Thermoplastics for Material Extrusion Additive Manufacturing*, no. November. Elsevier, 2024. doi: 10.1016/B978-0-323-95486-0.00074-0.
- [7] E. S. Pepek and J. C. Hanan, "3D Printing with Recycled PET as a Sustainable Thermoplastic Alternative Comparing Printed and Filament Material Properties," *Polym. Technol. Mater.*, vol. 00, no. 00, pp. 1–15, 2025, doi: 10.1080/25740881.2025.2501164.
- [8] P. Benyathiar, P. Kumar, G. Carpenter, J. Brace, and D. Mishra, "Reciclaje de botella a botella de Tereftalato de polietileno (PET) para la industria de bebidas: una revisión," *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 12, pp. 1–29, 2022.

- [9] R. F. Nugroho, D. F. Fitriyana, S. Anis, R. D. Widodo, and J. Manalu, "Investigasi Pengaruh Penuaan Termal terhadap Sifat Mekanik Karpas Felt *Polyethylene Terephthalate* Laminasi dengan Low Density *Polyethylene* untuk Aplikasi Pengembangan Produk Quarter Trim Panel," vol. 20, no. 1, pp. 95–104, 2025.
- [10] E. Bayas, P. Kumar, and M. Harne, "Impact of Process Parameters on Mechanical Properties of Fdm 3D-Printed Parts: a Comprehensive Review," *Eur. Chem. Bull.*, vol. 12, no. May, pp. 708–725, 2023, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/370651265>
- [11] G. Morales Méndez, A. del Cerro Pérez, and F. del Cerro Velázquez, "Prototype Pultrusion of Recycled *Polyethylene Terephthalate* Plastic Bottles into Filament for 3D Eco-Printing: Education for a Sustainable Development Project," *Sustain.*, vol. 16, no. 19, 2024, doi: 10.3390/su16198347.
- [12] A. Al Rashid and M. Koç, "3D-Printed recycled *Polyethylene Terephthalate* (PET) sandwich structures – Influence of infill design and density on tensile, dynamic mechanical, and creep response," *Int. J. Light. Mater. Manuf.*, vol. 8, no. 4, pp. 442–452, 2025, doi: 10.1016/j.ijlmm.2025.03.001.
- [13] C. O'Driscoll, O. Owodunni, and U. Asghar, "Optimization of 3D printer settings for recycled PET Filament using analysis of variance (ANOVA)," *Heliyon*, vol. 10, no. 5, p. e26777, 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e26777.
- [14] H. Bakhtiari, M. Aamir, and M. Tolouei-Rad, "Effect of 3D Printing Parameters on the Fatigue Properties of Parts Manufactured by Fused Filament Fabrication: A Review," *Appl. Sci.*, vol. 13, no. 2, 2023, doi: 10.3390/app13020904.
- [15] O. Rashwan *et al.*, "Extrusion and characterization of recycled *Polyethylene Terephthalate* (rPET) Filaments compounded with chain extender and Impact modifiers for material-extrusion additive manufacturing," *Sci. Rep.*, vol. 13, no. 1, pp. 1–16, 2023, doi: 10.1038/s41598-023-41744-8.
- [16] "Galon Le Minerale, BPA Free Lebih Aman Untuk Konsumsi Keluarga." Accessed: Jun. 22, 2025. [Online]. Available: <https://www.leminerale.com/article/detail/GalonLe-Minerale-BPA-Free-Lebih-Aman-Untuk-Konsumsi-Keluarga>
- [17] A. Larasati, "Bahaya Penggunaan Galon Sekali Pakai Terhadap Pencemaran Lingkungan di Jakarta," *J. Perkota.*, vol. 14, no. 2, pp. 1–11, 2024, doi: 10.25170/perkotaan.v14i2.3449.
- [18] S. S. Raj, K. A. Michailovich, K. Subramanian, S. Sathiamoorthy, and K. T. Kandasamy, "Philosophy of selecting ASTM standards for mechanical characterization of polymers and polymer composites," *Mater. Plast.*, vol. 58, no. 3, pp. 247–256, 2021, doi: 10.37358/MP.21.3.5523.
- [19] P. Pires, M. L. de Aguiar, and A. C. Vieira, "Mechanical Performance of rPET Filament Obtained by Thermal Drawing for FFF Additive Manufacturing," *J. Manuf. Mater. Process.*, vol. 9, no. 1, 2025, doi: 10.3390/jmmp9010026.
- [20] L. Judijanto *et al.*, *Metodologi Research and Development (Teori dan Penerapan Metodologi RnD)*, no. June. 2024. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/381290945\\_METODOLOGI\\_RESEARCH\\_AND\\_DEVELOPMENT\\_Teori\\_dan\\_Penerapan\\_Metodologi\\_RnD](https://www.researchgate.net/publication/381290945_METODOLOGI_RESEARCH_AND_DEVELOPMENT_Teori_dan_Penerapan_Metodologi_RnD)
- [21] H. Santosa Budiono and S. J. Purnomo, "Effect of Extrusion Temperature Variations for Manufacturing 3D Printer Filament Based on Used Bottle Waste on Impact Strength," *J. E-Komtek*, vol. 8, no. 1, pp. 168–176, 2024, doi: 10.37339/e-komtek.v8i1.1725.
- [22] T. Hachimi, N. Naboulsi, F. Majid, R. Rhanim, I. Mrani, and H. Rhanim, "Design and Manufacturing of a 3D printer Filaments extruder," *Procedia Struct. Integr.*, vol. 33, no. C, pp. 907–916, 2021, doi: 10.1016/j.prostr.2021.10.101.
- [23] M. Nikam, P. Pawar, A. Patil, A. Patil, K. Mokal, and S. Jadhav, "Sustainable Fabrication of 3D printing Filament from recycled PET plastic," *Mater. Today Proc.*, no. October, 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2023.08.205.
- [24] S. A. Agrawal, "Simplified Measurement of Density of Irregular Shaped Composites Material using Archimedes Principle by Mixing Two Fluids Having Different Densities," *Int. Res. J. Eng. Technol.*, vol. 8, no. 3, pp. 1005–1009, 2021, [Online]. Available: [www.irjet.net](http://www.irjet.net)
- [25] G. Kónya, L. Tóth, P. Gerse, F. Palásti, P. Hansághy, and F. Ronkay, "Cutting tests and performance evaluation of recycled PET in Fused Filament Fabrication," *Mater. Today Sustain.*, vol. 31, no. March, 2025, doi: 10.1016/j.mtsust.2025.101126.
- [26] D. A. Roberson, A. R. Torrado Perez, C. M. Shemelya, A. Rivera, E. MacDonald, and R. B.

Wicker, "Comparison of stress concentrator Fabrication for 3D printed polymeric izod Impact test specimens," *Addit. Manuf.*, vol. 7, pp. 1–11, 2015, doi: 10.1016/j.addma.2015.05.002.

- [27] W. F. dos Santos, A. S. L. Rodrigues, I. A. Rodrigues Lopes, F. M. Andrade Pires, S. P. B. Proença, and Z. C. Silveira, "Size effects in 3D-printed polymeric lattices under *three-point bending*: Manufacturing, testing, and modelling," *Eur. J. Mech. A/Solids*, vol. 114, p. 105728, 2025, doi: 10.1016/j.euromechsol.2025.105728.
- [28] M. I. Nuryanta *et al.*, "The effect of stacking sequence on the properties of hybrid agel/glass fiber reinforced polymer composite laminates," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 1381, no. 1, 2024, doi: 10.1088/1755-1315/1381/1/012014.
- [29] T. Tezel, M. Ozenc, and V. Kovan, "Impact properties of 3D-printed engineering polymers," *Mater. Today Commun.*, vol. 26, no. February, p. 102161, 2021, doi: 10.1016/j.mtcomm.2021.102161.
- [30] V. Tvergaard and A. Needleman, "An analysis of thickness effects in the Izod test," *Int. J. Solids Struct.*, vol. 45, no. 14–15, pp. 3951–3966, 2008, doi: 10.1016/j.ijsolstr.2008.02.024.