



Pengaruh *Infill Patern* dan *Layer Layerthickness* terhadap Kekuatan *Impact*, *Bending*, dan Densitas menggunakan Filamen dari Botol Plastik Bekas

Influence of Infill Pattern and Layer Layerthickness on Impact Strength, Flexural Strength, and Density of Filaments Made from Recycled Plastic Bottles

Damas Pasuryan Muhammad^{1,a)}, Rahmat Doni Widodo¹⁾, Muhammad Irfan Nuryanta¹⁾.

¹⁾Teknik Mesin, Universitas Negeri Semarang

^{a)}Corresponding author: damaspangestu8@students.unnes.ac.id

Abstrak

Limbah plastik mendorong inovasi bahan alternatif, seperti kunyit, untuk filamen 3D. Penelitian ini menguji kekuatan filamen botol plastik dibanding filamen biasa melalui tes massa jenis, benturan dan lentur, dengan variasi pola *infill* dan ketebalan lapisan. Hasilnya, filamen botol plastik menunjukkan daya tahan benturan sangat baik, terutama pada pola *Gyroid* 0,25 mm dan 0,3 mm, bahkan kadang melebihi filamen komersial. Dari sisi berat, filamen botol plastik lebih ringan. Meski daya lenturnya belum menyamai standar industri, peningkatan signifikan terlihat pada variasi tertentu. Secara keseluruhan, filamen botol plastik menjanjikan sebagai solusi *3D printing* yang ramah lingkungan dan berkelanjutan, meski masih perlu pengembangan lebih lanjut.

Kata Kunci: filamen daur ulang; *infill pattern*; *layer layerthickness*; *impact*; *bending*

Abstract

Plastic waste has driven innovation in alternative materials, such as turmeric, for 3D printing filament. This study examines the strength of turmeric-based filament compared to commercial filament through impact, density, and Bending tests, using variations in infill patterns and layer layerthickness. The results show that turmeric filament demonstrates excellent impact resistance, especially in the Gyroid pattern at 0.25 mm and 0.3 mm layerthickness, sometimes even outperforming commercial filaments. In terms of weight, turmeric filament is lighter. Although its Bending strength has not yet matched industrial standards, significant improvements are observed in certain configurations. Overall, turmeric filament shows promise as a sustainable and eco-friendly 3D printing material, although further development is still needed.

Keywords: recycled filament; *infill pattern*; *layer layerthickness*; *impact*; *flexural*

PENDAHULUAN

Jurnal perkembangan teknologi manufaktur aditif atau *additive manufacturing* telah mengalami kemajuan pesat dalam beberapa dekade terakhir. Salah satu bentuk paling populer dari teknologi ini adalah *3D printing* atau pencetakan tiga dimensi, yang kini banyak digunakan dalam berbagai bidang seperti industri manufaktur, arsitektur, kesehatan, pendidikan, hingga riset dan pengembangan produk[1][2]. Keunggulan utama dari teknologi ini terletak pada fleksibilitas desain, efisiensi penggunaan bahan, serta kemampuannya dalam mencetak objek dengan kompleksitas geometris tinggi secara cepat dan presisi[3]. Teknologi ini juga memberikan peluang besar dalam mendukung prinsip-prinsip *sustainability*,

terutama jika divariasikan dengan penggunaan bahan baku yang ramah lingkungan dan dapat didaur ulang[4].

Seiring dengan meningkatnya kesadaran global terhadap isu lingkungan, terutama mengenai akumulasi limbah[5], muncul kebutuhan untuk mengembangkan solusi inovatif dalam memanfaatkan kembali limbah khususnya limbah plastik sebagai bahan baku baru[6]. Salah satu bentuk aplikasi dari pendekatan ini adalah dengan mengolah botol plastik bekas, khususnya yang berbahan dasar *polyethylene terephthalate* (PET), menjadi filamen untuk pencetakan 3D[7]. Inisiatif ini tidak hanya mendukung konsep *circular economy*, namun juga membuka peluang untuk menciptakan produk dengan nilai tambah dari material yang sebelumnya tidak lagi bernilai ekonomis.

Penggunaan filamen daur ulang dari botol plastik bekas menghadirkan tantangan dan peluang tersendiri. Di satu sisi, filamen ini berpotensi menggantikan filamen komersial seperti PLA atau PETG dalam berbagai aplikasi non-struktural[8]. Di sisi lain, perlu dilakukan serangkaian evaluasi terhadap karakteristik mekanik dan fisiknya untuk memastikan bahwa material tersebut memiliki kinerja yang dapat diterima dalam proses pencetakan dan dalam hasil cetaknya. Salah satu pendekatan inovatif dalam penelitian ini adalah menambahkan pewarna alami berbasis kunyit pada proses ekstrusi filamen daur ulang. Selain berfungsi sebagai agen pewarna ramah lingkungan, kunyit berpotensi mempengaruhi sifat fisik dan kimia dari filamen yang dihasilkan[9].

Dalam konteks pencetakan 3D, terdapat sejumlah parameter teknis yang secara signifikan memengaruhi kualitas produk akhir. Dua di antaranya yang paling berpengaruh adalah pola isian (*infill pattern*) dan ketebalan lapisan (*layer layerthickness*)[10]. Pola isian seperti *honeycomb* dan *Gyroid* tidak hanya berdampak pada kekuatan mekanis produk, tetapi juga pada efisiensi penggunaan material serta waktu pencetakan. Sementara itu, *layer layerthickness* berpengaruh terhadap kehalusan permukaan, waktu cetak, serta kekuatan struktural antar-lapisan[11]. Variasi optimal dari kedua parameter ini sangat penting untuk mencapai hasil cetakan yang kuat, ringan, dan efisien.

Penelitian ini secara khusus memfokuskan diri pada tiga karakteristik utama dari hasil cetakan, yaitu kekuatan *Bending*, kekuatan *impact*, dan densitas. Ketiganya merupakan indikator penting dalam menilai kualitas material dan produk cetak 3D secara keseluruhan[12]. Pengujian *Bending* memberikan gambaran mengenai ketahanan material terhadap beban lentur, sedangkan uji *impact* mengukur seberapa besar energi yang dapat diserap sebelum terjadi kerusakan akibat beban mendadak. Sementara itu, pengujian densitas, yang dalam penelitian ini dilakukan melalui metode Archimedes, berguna untuk mengevaluasi kepadatan internal serta kemungkinan adanya rongga mikro yang dapat menurunkan performa mekanik material[13].

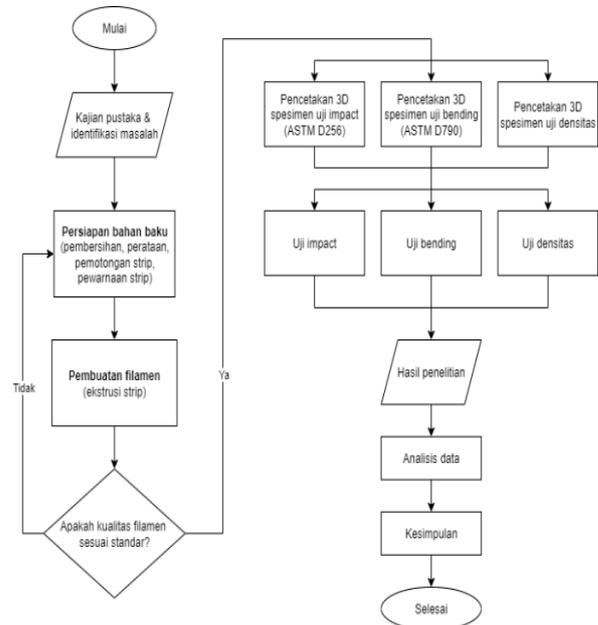
Melalui pendekatan eksperimental, penelitian ini akan membandingkan performa filamen daur ulang dengan penambahan kunyit terhadap filamen PETG komersial dalam berbagai variasi *infill pattern* dan *layer layerthickness*. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya memberikan data empiris mengenai potensi penggunaan filamen daur ulang dalam aplikasi pencetakan 3D, tetapi juga memberikan kontribusi terhadap literatur ilmiah dalam hal pengaruh parameter proses pencetakan terhadap kualitas mekanis dan fisik hasil cetakan. Hasil yang diperoleh diharapkan dapat menjadi pijakan awal bagi pengembangan material alternatif yang

berkelanjutan, efisien, dan kompetitif secara teknis untuk kebutuhan pencetakan 3D di masa mendatang.

METODE PENELITIAN

Jenis dan Pendekatan Penelitian

Isi Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif eksperimental [14], dengan desain faktorial untuk mengamati pengaruh dua variabel bebas, yaitu *infill pattern* (*honeycomb* dan *Gyroid*) serta *layer layerthickness* (0,2 mm; 0,25 mm; 0,3 mm), terhadap tiga variabel terikat, yaitu kekuatan *impact*, kekuatan *Bending*, dan densitas material. Alur kerja keseluruhan penelitian ini diilustrasikan dalam diagram alir pada Gambar 1. Tujuan utama pendekatan ini adalah untuk mengevaluasi performa filamen hasil daur ulang botol plastik PET yang diberi pewarna alami dari kunyit dibandingkan dengan filamen PETG komersial dalam konteks pencetakan 3D berbasis Fused Deposition Modeling (FDM).



Gambar 1. Diagram Alir Prosedur Penelitian

Bahan dan Alat Penelitian

Bahan Penelitian

Penelitian ini menggunakan dua jenis bahan filamen sebagai variabel kontrol:

1. Filamen PET daur ulang

Terbuat dari botol plastik PET bekas yang dicuci, dikeringkan, dipotong strip memanjang dengan tebal strip 10mm kemudian dilelehkan melalui proses ekstrusi untuk membentuk filamen berdiameter $\pm 1,75$ mm. Ditambahkan ekstrak kunyit alami sebagai pewarna berbasis tumbuhan sebelum potongan strip itu masuk ke tahap ekstrusi menjadi filamen 3D printer seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. Filamen PET Daur Ulang

2. Filamen PETG komersial

Sebagai bahan pembanding, digunakan filamen PETG produksi pabrikan yang memiliki karakteristik stabil dan homogen seperti pada [Gambar 3](#).



Gambar 3. Filamen Komersial Pembanding PETG

Alat Penelitian

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

1. Mesin pembuat filamen printer 3D
2. Mesin printer 3D Creality Ender 3 V3 KE
3. Mesin uji *Impact Izod* (mengacu pada ASTM D256)
4. Mesin uji *Bending* (three-point *Bending test*, sesuai ASTM D790)
5. Neraca digital presisi tinggi ($\pm 0,01$ g)

Proses Penelitian

Pembuatan Filamen

Botol plastik PET bekas ([Gambar 4](#)) dikumpulkan dan dibersihkan dari label serta kotoran. Setelah dikeringkan, botol diluruskan dari lekukan-lekukan yang ada pada permukaan botol dan dipotong membentuk strip panjang dengan lebar strip 10 mm menggunakan alat potong khusus. Potongan strip plastik kemudian dimasukkan ke dalam air bersuhu 80°C yang berisi kunyit halus selama satu menit dan sudah ditumbuk sebelumnya.



(a)



(b)

Gambar 4. (a) botol bekas setelah diluruskan lekukannya. (b) hasil potongan strip sebelum dan setelah diwarnai kunyit

Setelah potongan strip itu berubah warna lalu dimasukkan ke mesin pembuat filamen printer 3D ([Gambar 7](#)), nozel pada alat tersebut bersuhu tinggi ($\pm 200^{\circ}\text{C}$) dan dicetak menjadi filamen berdiameter $\pm 1,75$ mm. Filamen hasil ekstrusi kemudian digulung secara otomatis menggunakan alat pembuat filamen dan dibiarkan dingin pada suhu ruang sebelum digunakan untuk pencetakan ([Gambar 5](#)).



(a)



(b)

Gambar 5. (a) mesin pembuat filamen. (b) filamen hasil dari botol bekas

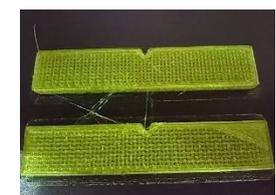
Pencetakan Spesimen

Spesimen dicetak menggunakan printer 3D FDM, dengan variasi parameter sebagai berikut:

- a. Dimensi spesimen mengikuti standar uji masing-masing ([Gambar 6](#))
- b. *Infill pattern*: *Honeycomb* dan *Gyroid*



(a)



(b)

Gambar 6. (a) pola pengisian *honeycomb*. (b) pola pengisian *Gyroid*

- c. *Layer layerthickness*: 0,2 mm; 0,25 mm; dan 0,3 mm
- d. Ukuran nozzle: 0,4 mm
- e. Suhu nozzle: 260°C
- f. Suhu bed: 80°C

Spesimen dicetak berdasarkan dimensi uji yang sesuai dengan standar ASTM D256 (*impact*), ASTM D790 (*Bending*), dan ASTM D790 (densitas). Jumlah total spesimen untuk setiap jenis filamen adalah 36 spesimen dan menggunakan filamen PETG PETG, sehingga keseluruhan mencapai 72 spesimen.



Gambar 7. Mesin Printer 3D Creality Ender 3 V3 KE

Prosedur Pengujian

Uji Densitas (Metode Archimedes)

Densitas diuji dengan prinsip *archimedes* menggunakan air sebagai media, spesimen uji ditimbang (**Gambar 8**) dalam keadaan kering dan ditimbang saat terendam air [15].



Gambar 8. Alat uji densitas

Berat spesimen diukur (dalam kondisi kering (M_{kering}) dan saat direndam dalam air (M_{air})

$$\text{Densitas} = \frac{M_{kering}}{M_{kering} - M_{air}} \quad (1)$$

Keterangan :

Densitas : densitas benda (g/cm^3)

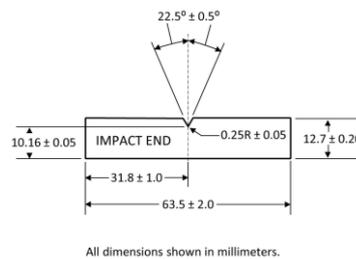
M_{kering} : massa spesimen di udara saat kering (g)

M_{air} : massa spesimen di dalam air (g)

Spesimen diuji tiga kali untuk masing-masing parameter, dan hasilnya dirata-ratakan. Pengujian ini bertujuan mengetahui kerapatan material yang berhubungan langsung dengan struktur internal akibat perbedaan *infill* dan *layer layerthickness*.

Uji Impact (ASTM D256)

Pengujian dilakukan dengan metode Izod Pendulum *Test* sesuai standar ASTM D256[16]. Spesimen diuji dengan menjatuhkan beban dari ketinggian tertentu untuk memukul sampel yang telah diberi takik pada salah satu sisi (**Gambar 9**).



(a)

(b)



(c)

Gambar 9. (a) sketsa gambar spesimen uji *impact*. (b) spesimen uji *impact* ASTM D256. (c) alat uji *impact*

Energi yang diserap selama proses patahnya sampel dicatat dalam satuan Joule. Nilai kekuatan *impact* dihitung menggunakan rumus:

$$\text{Impact strength} = \frac{E}{b.d} \quad (2)$$

dengan:

E = energi serapan (Joule)

b = lebar spesimen (mm)

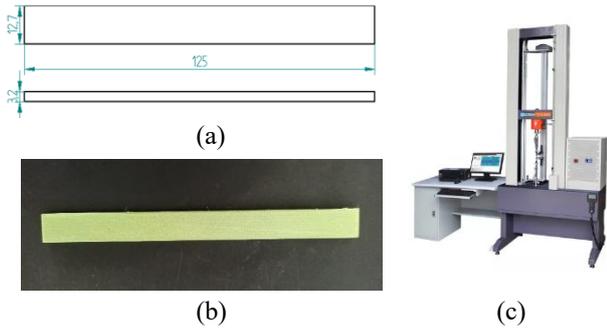
d = tebal spesimen (mm)

Setiap variasi pengujian diulang sebanyak tiga kali untuk memperoleh nilai rata-rata yang representatif.

Uji Bending (ASTM D790)

Pengujian *Bending* (**Gambar 10**) dilakukan menggunakan metode pengujian mekanik yang digunakan untuk mengetahui kemampuan suatu material dengan

pembebanan pada tiga titik sesuai dengan standar ASTM D790 menahan beban lentur sebelum mengalami kerusakan atau patah [17].



Sumber: GOTECH Testing Machines Inc.

Gambar 10. (a) sketsa gambar spesimen uji *Bending*. (b) spesimen uji *Bending* ASTM D790. (c) alat uji *Bending*.

Dalam pengujian ini, spesimen dikenai beban di tengah-tengahnya, sementara kedua ujungnya ditopang, sehingga menghasilkan gaya lentur. Hasil dari uji *Bending* biasanya dinyatakan dalam satuan *Megapascal* (MPa), yang secara teknis ekuivalen dengan N/mm^2 (Newton per milimeter persegi). Nilai kekuatan lentur (*flexural strength*) dihitung menggunakan rumus:

$$\sigma = \frac{3FL}{2bd^2} \text{ (Three-Point Test)} \quad (3)$$

Dengan

σ = kekuatan lentur (MPa)

F = gaya maksimum saat patah (N)

L = panjang bentang/penumpu (mm)

b = lebar spesimen (mm)

d = tebal spesimen (mm)

Jika gaya yang diperoleh dari alat uji masih dalam satuan kilogram, maka perlu dikonversi terlebih dahulu ke satuan Newton dengan mengalikan nilai kilogram dengan percepatan gravitasi ($9,81 \text{ m/s}^2$). Hasil akhir pengujian ini menunjukkan seberapa besar tekanan yang dapat ditahan oleh material sebelum patah akibat pembebanan lentur. Semakin tinggi nilai MPa yang diperoleh, semakin kuat material tersebut dalam menahan gaya lentur.

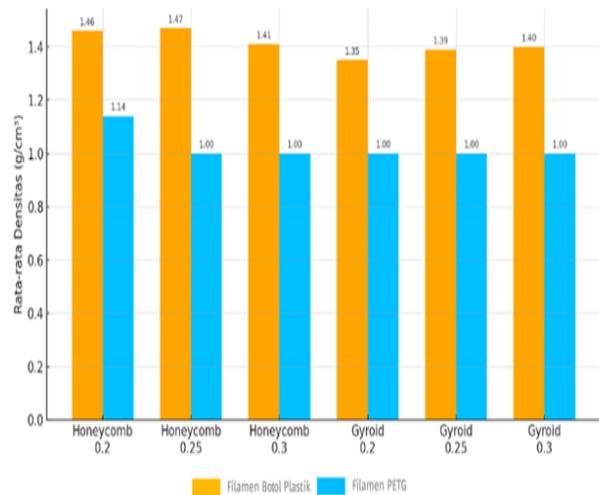
HASIL DAN PEMBAHASAN

Uji densitas

Uji densitas merupakan salah satu parameter penting dalam mengevaluasi karakteristik fisik dari spesimen cetak 3D, karena densitas berpengaruh langsung terhadap kekuatan mekanik, ketahanan beban, dan efisiensi material [18]. Pengujian ini dilakukan dengan mengukur massa spesimen dalam kondisi kering dan saat dicelupkan dalam air untuk kemudian dihitung massa jenisnya berdasarkan prinsip Archimedes. Hasil pengujian densitas untuk filamen botol plastik dan filamen PETG disajikan secara lengkap dalam [Tabel 1](#).

Tabel 1. Hasil Pengujian Massa Jenis Tiap Variasi

Infill Pattern	Layer Thickness	Spesimen	Hasil Filamen botol plastik			Hasil Filamen PETG		
			Kering (g)	Dalam Air (g)	Density (g/cm ³)	Kering (g)	Dalam Air (g)	Density (g/cm ³)
Honeycomb	0,2	1	4,77	1,45		7,11	0,91	
		2	4,55	1,48	1,458	7,13	0,90	1,144
		3	4,74	1,48		7,14	0,88	
Honeycomb	0,25	1	4,53	1,45		7,19	0	
		2	4,50	1,46	1,466	7,17	0	1
		3	4,85	1,50		7,17	0	
Honeycomb	0,3	1	5,32	1,56		7,52	0	
		2	5,18	1,49	1,409	7,54	0	1
		3	5,25	1,52		7,46	0	
Gyroid	0,2	1	4,71	1,20		6,76	0	
		2	4,83	1,28	1,352	6,77	0	1
		3	4,82	1,26		6,76	0	
Gyroid	0,25	1	5,55	1,52		6,65	0	
		2	5,57	1,42	1,394	6,66	0	1
		3	4,74	1,50		6,65	0	
Gyroid	0,3	1	5,19	1,56		7,04	0	
		2	5,45	1,35	1,372	7,02	0	1
		3	5,51	1,45		7,01	0	



Gambar 11. Grafik perbandingan nilai rata-rata pengujian densitas

Berdasarkan [Gambar 11](#) perubahan densitas rata-rata, filamen botol plastik menunjukkan variasi yang tidak signifikan. Peningkatan ketebalan lapisan dari Honeycomb 0,2 mm ke 0,25 mm menghasilkan kenaikan densitas sebesar 0,68%, mencerminkan kestabilan struktural material. Namun, pada variasi Honeycomb 0,3 mm, terjadi penurunan densitas sebesar 3,42%. Tren penurunan ini berlanjut saat pola diubah menjadi *Gyroid* 0,2 mm, dengan penurunan mencapai 7,53% dibandingkan nilai awal. Meskipun demikian, terjadi sedikit peningkatan pada variasi *Gyroid* 0,25 mm, di mana penurunan densitas hanya sebesar 4,79%. Selanjutnya, pada *Gyroid* 0,3 mm, penurunan ini semakin berkurang menjadi 4,11% dari nilai awal. Pola ini mengindikasikan bahwa meskipun terdapat fluktuasi, densitas filamen botol plastik tetap berada dalam kisaran yang relatif stabil dan tidak mengalami perubahan yang ekstrem.

Laporan ini didukung oleh hasil penelitian sebelumnya yang menguji densitas PET hasil cetak menggunakan metode Archimedes dan helium pycnometry. Dalam penelitian tersebut, densitas teoritis PET mencapai 1,4315 g/cm³, sedangkan densitas aktual hasil cetakan hanya 1,3995 g/cm³, menghasilkan porositas internal sebesar 2,23%. Penurunan ini disebabkan oleh terbentuknya pori-pori akibat sintering yang tidak sempurna, terutama karena keterbatasan suhu pada mesin HSS yang tidak mencapai suhu ideal proses PET (~230 °C). Meskipun begitu, nilai porositas tersebut tetap rendah, dan menunjukkan bahwa PET mampu dicetak menjadi bagian semi-kristalin dengan kestabilan struktural tinggi[19].

Sebaliknya, filamen PETG menunjukkan penurunan densitas yang konsisten sebesar 12,28% pada seluruh variasi bila dibandingkan dengan titik awal Honeycomb 0,2 mm. Baik variasi ketebalan lapisan maupun perubahan pola *infill* tidak memberikan pengaruh lebih lanjut terhadap densitas—nilai tetap berada pada angka 1 g/cm³ di seluruh variasi selain yang pertama. Hal ini mengindikasikan bahwa filamen PETG cenderung mencapai batas densitas tertentu, yang tidak banyak dipengaruhi oleh parameter proses seperti ketebalan lapisan atau pola *infill*.

Hasil ini konsisten dengan penelitian terdahulu yang menunjukkan bahwa densitas PETG cetak mengalami penurunan signifikan dibandingkan material aslinya (1,26–1,28 g/cm³). Pada suhu cetak 240 °C, densitas menurun menjadi 1,03 g/cm³ (porositas 19%), sedangkan pada 250 °C, meningkat sedikit menjadi 1,07 g/cm³ (porositas 16%). Penurunan ini terjadi akibat terbentuknya porositas internal selama proses pencetakan FDM, seperti celah antar-filamen dan ketidakterisian lapisan, yang tidak mudah dihilangkan hanya dengan mengubah parameter cetak permukaan seperti *infill* atau *layer height*. Selain itu, analisis mikrofotografi dan SEM menunjukkan bahwa porositas terdistribusi tidak merata, dengan struktur pori besar (hingga 1,44 mm) yang dominan di arah vertikal cetak[20].

Secara keseluruhan, filamen botol plastik menunjukkan respons yang lebih fleksibel terhadap variasi dalam proses pencetakan, ditandai oleh fluktuasi densitas yang ringan. Di sisi lain, filamen PETG memperlihatkan kecenderungan menurun secara drastis di awal dan tetap konstan selanjutnya, mencerminkan sifat material yang lebih kaku terhadap perubahan parameter teknis.

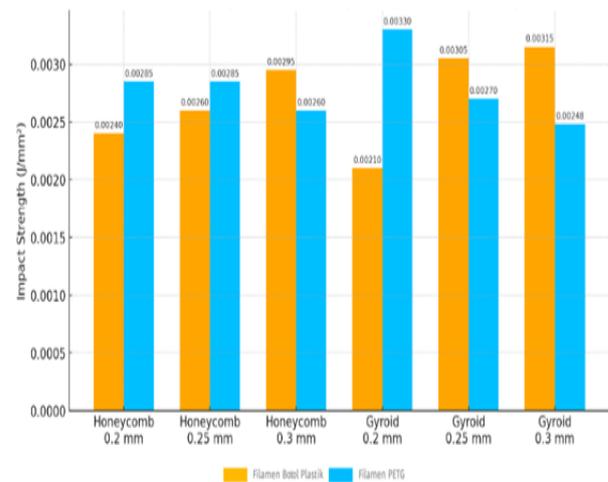
Uji impact

Pengujian *impact* bertujuan untuk mengetahui sejauh mana ketahanan spesimen terhadap beban kejut atau benturan mendadak, yang merupakan indikator penting dalam menilai ketangguhan material hasil cetak 3D [21]. Pengujian dilakukan terhadap dua jenis filamen, yakni

filamen berbahan dasar kunyit sebagai inovasi material daur ulang dan filamen PETG (komersial), dengan variasi parameter *infill pattern* (Honeycomb dan *Gyroid*) serta *layer layerthickness* (0,2 mm; 0,25 mm; dan 0,3 mm). Hasil lengkap dari pengujian ini disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Pengujian Impact Izod

Infill Pattern	Layer Thickness	Spesimen	Hasil Pengujian Filamen			
			Kunyt Energi serapan (J)	Rata-Rata (J/mm ²)	Pembanding Energi serapan (J)	Rata-Rata (J/mm ²)
Honeycomb	0,2	1	0,20	0,00239	0,21	0,00285
		2	0,20		0,23	
		3	0,18		0,25	
Honeycomb	0,25	1	0,22	0,00260	0,24	0,00285
		2	0,24		0,23	
		3	0,17		0,22	
Honeycomb	0,3	1	0,23	0,00294	0,20	0,00260
		2	0,24		0,22	
		3	0,24		0,21	
Gyroid	0,2	1	0,16	0,00207	0,28	0,00331
		2	0,16		0,28	
		3	0,18		0,24	
Gyroid	0,25	1	0,26	0,00306	0,23	0,00269
		2	0,17		0,20	
		3	0,31		0,22	
Gyroid	0,3	1	0,25	0,00314	0,20	0,00248
		2	0,27		0,20	
		3	0,24		0,20	



Gambar 12. Grafik perbandingan nilai rata-rata pengujian *impact*

Secara umum, grafik yang disajikan pada Gambar 12 memperlihatkan perbandingan kekuatan bentur antara filamen dari botol plastik dan filamen PETG dalam berbagai variasi *infill* dan ketebalan lapisan. Untuk filamen botol plastik, peningkatan dari *Honeycomb* 0,2 mm ke 0,25 mm menghasilkan kenaikan sebesar 8,33%, dan melonjak menjadi 22,92% pada ketebalan 0,3 mm, mengindikasikan bahwa peningkatan lapisan berdampak positif terhadap kekuatan bentur. Namun, saat *infill* diubah ke *Gyroid* 0,2 mm, terjadi penurunan 12,5%. Meskipun demikian, variasi *Gyroid* 0,25 mm menjadi yang paling optimal dengan peningkatan hingga 27,08% dari variasi awal.

Filamen PETG menunjukkan kestabilan awal, dengan tidak adanya perubahan pada Honeycomb 0,25 mm. Akan tetapi, pada 0,3 mm, kekuatannya menurun sebesar 8,77%. Sebaliknya, saat digunakan pola *Gyroid* 0,2 mm, terjadi kenaikan 15,79%, namun tren kembali menurun sebesar 5,26% pada ketebalan 0,25 mm.

Laporan ini sejalan dengan hasil penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa meskipun nilai *impact strength* PETG secara umum mirip dengan PLA, PETG menunjukkan defleksi yang lebih tinggi, menandakan karakteristik yang lebih elastis. Dalam uji mereka, PETG dengan ketebalan 10 mm mampu mencapai defleksi rata-rata 0,842 mm dibandingkan 0,678 mm untuk PLA, meskipun gaya impak maksimumnya lebih rendah. Hal ini menunjukkan bahwa PETG lebih mampu menyerap energi melalui deformasi plastis, namun bisa jadi lebih sensitif terhadap variasi proses seperti ketebalan lapisan atau pola *infill* yang ekstrem[22].

Secara keseluruhan, filamen botol plastik menunjukkan performa yang lebih konsisten dan adaptif terhadap variasi cetak. Sebaliknya, filamen PETG bersifat lebih stabil di awal, tetapi cenderung menurun pada variasi lanjutan, mengindikasikan keterbatasan dalam respons terhadap perubahan parameter proses.

Uji Bending

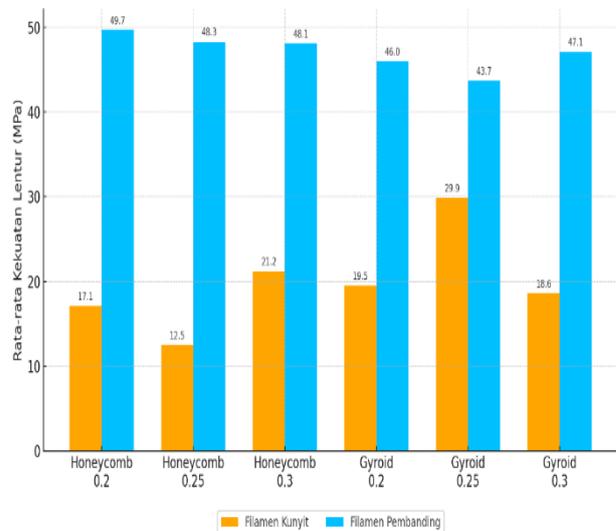
Pengujian *Bending* atau lentur bertujuan untuk mengetahui seberapa besar kekuatan spesimen dalam menahan beban saat dikenai gaya tekan dari atas yang menyebabkan pembengkokan. Parameter ini sangat penting untuk mengevaluasi kekuatan struktural dan daya tahan material dalam menahan deformasi plastis [23]. Dalam pengujian ini, dilakukan pengukuran terhadap spesimen hasil cetak 3D menggunakan dua jenis filamen, filamen botol plastik (berbahan dasar limbah) dan filamen PETG (komersial), dengan variasi *infill pattern* (Honeycomb dan *Gyroid*) serta *layer thickness* (0,2 mm, 0,25 mm, dan 0,3 mm). Hasil pengujian disajikan secara terperinci dalam Tabel 3 dan Tabel 4.

Tabel 3. Hasil Pengujian pada Filamen botol plastik

Infill Pattern	Layer Thickness	Spesimen	gaya maksimum (kg)	panjang penumpu (mm)	lebar spesimen (mm)	tebal spesimen (mm)	kekuatan Lentur (MPa)	Rata-Rata (MPa)
Honeycomb	0,2	1	3,3	53,53	12,47	3,44	17,615	17,081
		2	3,1	53,53	12,47	3,44	16,548	
		3	3,2	53,53	12,47	3,44	17,081	
Honeycomb	0,25	1	2,2	53,43	12,45	3,60	10,720	12,507
		2	2,3	53,43	12,45	3,60	11,207	
		3	3,2	53,43	12,45	3,60	15,593	
Honeycomb	0,3	1	4,5	53,34	12,3	3,64	21,673	21,191
		2	4,3	53,34	12,3	3,64	20,710	
		3	4,4	53,34	12,3	3,64	21,191	
Gyroid	0,2	1	3,7	54,09	12,45	3,58	18,456	19,454
		2	3,8	54,09	12,45	3,58	18,955	
		3	4,2	54,09	12,45	3,58	20,950	
Gyroid	0,25	1	3,5	53,7	12,37	3,60	17,252	29,903
		2	7,3	53,7	12,37	3,60	35,982	
		3	7,4	53,7	12,37	3,60	36,475	
Gyroid	0,3	1	3,8	54	12,47	3,53	19,432	18,580
		2	1,4	54	12,47	3,53	7,159	
		3	5,7	54	12,47	3,53	29,148	

Tabel 4. Hasil Pengujian *Bending* pada Filamen PETG

Infill Pattern	Layer Thickness	Spesimen	gaya maksimum (kg)	panjang penumpu (mm)	lebar spesimen (mm)	tebal spesimen (mm)	kekuatan lentur (MPa)	Rata-Rata (MPa)
Honeycomb	0,2	1	10,8	63,80	12,83	3,98	49,890	49,736
		2	10,7	63,80	12,83	3,98	49,428	
		3	10,8	63,80	12,83	3,98	49,890	
Honeycomb	0,25	1	10,7	64,8	12,88	4,05	48,294	48,294
		2	10,7	64,8	12,88	4,05	48,294	
		3	10,7	64,8	12,88	4,05	48,294	
Honeycomb	0,3	1	11,2	67,68	13,00	4,23	47,953	48,096
		2	11,2	67,68	13,00	4,23	47,953	
		3	11,3	67,68	13,00	4,23	48,381	
Gyroid	0,2	1	10	62,56	12,82	3,91	46,969	46,030
		2	10	62,56	12,82	3,91	46,969	
		3	9,4	62,56	12,82	3,91	44,151	
Gyroid	0,25	1	9,5	63,52	12,86	3,97	43,810	43,656
		2	9,5	63,52	12,86	3,97	43,810	
		3	9,4	63,52	12,86	3,97	43,349	
Gyroid	0,3	1	10,6	64	13,02	4	47,920	47,317
		2	10,4	64	13,02	4	47,016	
		3	10,4	64	13,02	4	47,016	



Gambar 13. Grafik perbandingan nilai rata-rata pengujian *Bending*

Berdasarkan Gambar 13 Perbandingan kekuatan lentur berdasarkan grafik dilakukan dengan menjadikan variasi Honeycomb 0,2 mm sebagai titik referensi. Filamen botol plastik menunjukkan penurunan sebesar 26,90% saat ketebalan dinaikkan ke 0,25 mm, menandakan bahwa peningkatan lapisan tidak selalu berdampak positif. Namun, variasi Honeycomb 0,3 mm justru menunjukkan pemulihan performa dengan peningkatan sebesar 23,98%. Perubahan pola *infill* ke *Gyroid* 0,2 mm menghasilkan kenaikan 14,04%, sementara variasi *Gyroid* 0,25 mm mencatat peningkatan tertinggi sebesar 74,85%. Pada *Gyroid* 0,3 mm, peningkatan masih terjadi meski hanya sebesar 8,77%.

Sebaliknya, filamen PETG menunjukkan penurunan berturut-turut pada setiap variasi. Ketebalan 0,25 mm dan

0,3 mm menurunkan kekuatan lentur masing-masing sebesar 2,82% dan 3,22%. Pergantian pola ke *Gyroid* 0,2 mm dan 0,25 mm memperparah tren ini, dengan penurunan masing-masing sebesar 7,44% dan 12,07%. Meskipun terjadi sedikit perbaikan pada variasi *Gyroid* 0,3 mm, performa tetap lebih rendah dibanding variasi awal, dengan penurunan sebesar 5,23%.

Secara umum, filamen botol plastik menunjukkan peningkatan signifikan pada variasi tertentu, terutama variasi *Gyroid* 0,25 mm, sementara filamen PETG relatif kurang adaptif terhadap modifikasi struktur, ditunjukkan oleh tren penurunan yang konsisten.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan syukur kepada Allah SWT atas kelancaran penelitian ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Jurusan Teknik Mesin FT UNNES atas fasilitas dan bimbingan yang diberikan, serta kepada dosen pembimbing, laboran, dan rekan-rekan atas dukungan dan kerja samanya.

PENUTUP

Simpulan

Berdasarkan hasil pengujian terhadap filamen berbahan dasar kunyit dan filamen PETG (PETG komersial) yang mencakup uji densitas, *impact*, dan *Bending*. Pada pengujian densitas, filamen botol plastik menunjukkan stabilitas yang relatif baik di berbagai variasi. Nilai tertinggi tercatat pada Honeycomb 0,25 mm sebesar 1,466 g/cm³, sementara nilai terendah ditemukan pada *Gyroid* 0,2 mm yaitu 1,352 g/cm³. Perubahan densitas pada filamen botol plastik tidak terlalu drastis, menunjukkan bahwa struktur internal cukup adaptif terhadap variasi pola dan ketebalan. Di sisi lain, filamen PETG mengalami penurunan densitas yang cukup tajam dari 1,144 g/cm³ menjadi 1 g/cm³, dan nilai ini stagnan di semua variasi selain yang pertama. Hal ini menandakan bahwa filamen PETG memiliki keterbatasan dalam menyesuaikan struktur internal terhadap variasi cetak, berbeda dengan filamen botol plastik yang lebih responsif.

Dari sisi pengujian *impact*, filamen botol plastik menunjukkan performa yang sangat baik, terutama pada variasi *Gyroid* dengan ketebalan 0,25 mm, di mana nilai kekuatan *impact* mencapai 0,00306 J/mm². Nilai ini bahkan melampaui nilai filamen PETG pada variasi yang sama, menunjukkan bahwa struktur internal dari variasi pola *Gyroid* dan ketebalan sedang memberikan ketahanan optimal terhadap benturan mendadak. Sebaliknya, nilai *impact* terendah untuk filamen botol plastik ditemukan pada *Gyroid* 0,2 mm, yaitu sebesar 0,00207 J/mm², kemungkinan disebabkan oleh ketebalan lapisan yang

terlalu tipis sehingga tidak cukup kuat menahan gaya bentur. Secara keseluruhan, dapat disimpulkan bahwa filamen botol plastik mampu bersaing, bahkan dalam beberapa variasi mampu mengungguli filamen komersial dalam uji ketangguhan terhadap benturan.

Pada pengujian *Bending*, hasil menunjukkan bahwa filamen PETG masih jauh lebih unggul dibandingkan filamen botol plastik. Nilai kekuatan lentur tertinggi dicapai oleh filamen PETG pada variasi Honeycomb 0,2 mm, dengan rata-rata 49,736 MPa. Semua variasi filamen PETG menunjukkan nilai di atas 43 MPa, memperlihatkan konsistensi performa mekanik dalam menahan gaya lentur. Sementara itu, filamen botol plastik mencatatkan nilai tertinggi pada variasi *Gyroid* 0,25 mm, yaitu sebesar 29,903 MPa, namun masih terpaut jauh dari performa filamen PETG. Nilai terendah terjadi pada Honeycomb 0,25 mm, hanya 12,507 MPa, yang menunjukkan bahwa struktur dan kekuatan antar-lapisan dari filamen botol plastik masih perlu ditingkatkan agar dapat memenuhi kebutuhan aplikasi struktural.

Secara umum, filamen botol plastik berpotensi sebagai alternatif material cetak 3D yang ramah lingkungan, dengan performa unggul pada pengujian *impact* dan kepadatan ringan yang stabil. Namun, untuk kebutuhan yang menuntut kekuatan mekanik tinggi seperti lentur, filamen PETG masih menjadi pilihan utama. Variasi terbaik bagi filamen botol plastik terdapat pada *Gyroid* 0,25 mm, yang memberikan variasi paling optimal antara kekuatan *impact*, *Bending* yang relatif tinggi, dan densitas yang efisien. Oleh karena itu, penggunaan filamen botol plastik dapat diarahkan untuk aplikasi ringan, fleksibel, dan fungsional yang mengutamakan keberlanjutan bahan.

Saran

Berdasarkan hasil penelitian, disarankan agar penelitian selanjutnya melakukan optimalisasi komposisi bahan, khususnya dalam menyesuaikan rasio campuran bioplastik agar menghasilkan kekuatan mekanik yang lebih baik. Penambahan bahan penguat seperti serat alami atau nanopartikel juga dapat menjadi alternatif untuk meningkatkan kekuatan lentur. Penelitian serupa dapat dikembangkan dengan membandingkan bahan baku dari limbah organik lainnya sebagai upaya menemukan material alternatif yang lebih unggul dan ramah lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Mehrpouya, A. Dehghanghadikolaei, B. Fotovvati, A. Vosooghnia, S. S. Emamian, and A. Gisario, "The potential of *additive manufacturing* in the smart factory industrial 4.0: A review," *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 18, pp. 1–34, 2019, doi: 10.3390/app9183865.

- [2] A. D. Nugraha, M. I. Nuryanta, L. Sean, K. Budiman, M. Kusni, and M. A. Muflikhun, "Recent Progress on Natural Fibers Mixed with CFRP and GFRP: Properties, Characteristics, and Failure Behaviour," *Polymers (Basel)*, 2022.
- [3] C. F. Bănică, A. Sover, and D. C. Anghel, "Printing the Future Layer by Layer: A Comprehensive Exploration of Additive Manufacturing in the Era of Industry 4.0," *Appl. Sci.*, vol. 14, no. 21, pp. 1–39, 2024, doi: 10.3390/app14219919.
- [4] M. I. Nuryanta *et al.*, "The Interconnection of Carbon Active Addition on Mechanical Green Composite," *Polymers (Basel)*, 2023.
- [5] Muhammad Gifani Al Qadry, S. D. Dwi, and R. D. Widodo, "Jurnal Inovasi Mesin," *J. Inov. mesin*, vol. 4, 2023.
- [6] D. Nawang and D. Astuti, "Integrasi Aspek Lingkungan dan Ekonomi dalam Evaluasi Kelayakan Penggunaan Green Packaging dalam Masyarakat," *J. Ekon. Dan Bisnis Digit.*, vol. 02, no. 03, pp. 1483–1488, 2025.
- [7] M. Alaghemandi, "Sustainable Solutions Through Innovative Plastic Waste Recycling Technologies," *Sustain.*, vol. 16, no. 23, pp. 1–37, 2024, doi: 10.3390/su162310401.
- [8] R. Wirantara, M. Syamsiro, and J. Mulyanti, "Pemanfaatan Limbah Plastik PET Sebagai Filamen Printer 3D dengan Metode Pultrusi," *Infotekmesin*, vol. 16, no. 01, pp. 166–174, 2025, doi: 10.35970/infotekmesin.v16i1.2467.
- [9] K. Formela, M. Kurańska, and M. Barczewski, "Recent Advances in Development of Waste-Based Polymer Materials: A Review," *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 5, pp. 1–42, 2022, doi: 10.3390/polym14051050.
- [10] Wahyudi, Z. S. Suzen, and Pristiansyah, "Pengaruh Parameter Proses Pencetakan 3D Printing Terhadap Kebulatan Produk Menggunakan Filament PETG," *J. Inov. Teknol. Terap.*, vol. 03, no. 1, pp. 207–213, 2025.
- [11] O. Bouzaglou, O. Golan, and N. Lachman, "Process Design and Parameters Interaction in Material Extrusion 3D Printing: A Review," *Polymers (Basel)*, vol. 15, no. 10, pp. 1–35, 2023, doi: 10.3390/polym15102280.
- [12] M. Darsin, M. R. Efendi, G. Jatisukanto, H. A. Basuki, and H. Sutjahjono, "Kuat Bending Hasil Cetak 3D printing Berbahan PLA-Kuningan," *J-Proteksion J. Kaji. Ilm. dan Teknol. Tek. Mesin*, vol. 4, no. 13, pp. 1–6, 2024, doi: 10.32528/jp.v8i2.1540.
- [13] J. Salakory, G. I. Huka, and N. J. M. Nanulaitta, "Pengaruh Variasi Ketinggian Stick Out Pengelasan Gmaw Dan Variasi Sudut Sambungan Pada Kampuh ½ V Baja Karbon Sedang Terhadap Sifat Mekanis," *J. Mech. Eng.*, vol. 1, no. 3, pp. 144–150, 2023.
- [14] 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
- [15] 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
- [16] 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.
- [17] 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, no. June, p. 105728, 2025, doi: 10.1016/j.euromechsol.2025.105728.
- [18] D. Mardiyana, D. I. Sumarno, M. Ali, S. Yudono, and L. A. Islami, "Kajian Kelayakan Sifat Mekanik Produk 3D Printing FDM Berfilamen eFlex TPU-95A untuk Aplikasi Polisi Tidur," *J. Rekayasa Mesin*, vol. 19, no. 3, pp. 457–468, 2024.
- [19] D. Pezold, M. Wimmer, F. Alfayez, Z. Bashir, and F. Döpfer, "Evaluation of Polyethylene Terephthalate Powder in High Speed Sintering," *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 10, pp. 1–21, 2022, doi: 10.3390/polym14102095.
- [20] S. Guessasma, S. Belhabib, and H. Nouri, "Printability and tensile performance of 3D printed polyethylene terephthalate glycol using fused deposition modelling," *Polymers (Basel)*, vol. 11, no. 7, 2019, doi: 10.3390/polym11071220.
- [21] M. Wawandaru and M. Fitri, "Perancangan Alat Uji Impak Charpy untuk Material Plastik dengan Takik," *Zo. Mesin*, vol. 8, no. 3, pp. 41–48, 2017.
- [22] C. F. Popa, M. P. Marghitas, S. V. Galatanu, and L. Marsavina, "Influence of layer thickness on the IZOD impact strength of FDM printed specimens from PLA and PETG," *Procedia Struct. Integr.*, vol. 41, no. C, pp. 557–563, 2022, doi: 10.1016/j.prostr.2022.05.064.

- [23] H. N. Beliu, Y. M. Pelle, and J. U. Jarson, "Analisa kekuatan tarik dan *Bending* pada komposit widuri - polyester," *J. Lontar*, vol. 03, no. 02, pp. 11–20, 2016. Printed Recycled Pet With Pla and Tpu Hybrid Additives," *Int. J. 3D Print. Technol. Digit. Ind.*, vol. 7, no. 2, pp. 252–258, 2023, doi: 10.46519/ij3dptdi.1324777.
- [24] K. ÇAVA and M. ASLAN, "Investigating Printability and Mechanical Performance of 3D