



## Eksplorasi Pewarna Alami Kunyit pada Filamen PETG Berbasis Limbah Botol: Pengaruh Pola *Infill* dan Ketebalan Lapisan terhadap Densitas, Impak, dan Kekuatan *Bending* Hasil Cetak 3D

### *Exploration of Natural Turmeric Dye in Bottle-Waste-Based PETG Filament: The Effect of Infill Pattern and Layer Thickness on the Density, Impact Strength, and Bending Strength of 3D-Printed Products*

Dede Hermawansyah<sup>1,a)</sup>, Rahmat Doni Widodo<sup>1)</sup>, Muhammad Irfan Nuryanta<sup>1)</sup>

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

<sup>a)</sup>*Corresponding author:* dedehermawansyah83@students.unnes.ac.id

#### Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi penggunaan pewarna alami kunyit pada filamen PETG berbasis limbah botol plastik. Variasi parameter cetak yang digunakan meliputi pola *infill* (*grid* dan *triangles*) serta ketebalan lapisan (0,2 mm, 0,25 mm, dan 0,3 mm). Pengujian meliputi uji densitas, impak (*Charpy*), dan lentur (*three-point Bending*) untuk menilai pengaruh pewarna alami terhadap sifat fisik dan mekanik hasil cetakan 3D. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan kunyit berpengaruh terhadap performa mekanik filamen. Meskipun nilai impak dan lentur filamen kunyit umumnya lebih rendah dari PETG murni, kombinasi pola *triangles* dan ketebalan 0,3 mm memberikan hasil yang cukup kompetitif. Dengan melihat bagaimana pola *infill* dan ketebalan lapisan mempengaruhi sifat mekanik hasil cetak, penelitian ini membantu mengembangkan filamen 3D ramah lingkungan dari limbah botol plastik PET dan pewarna kunyit alami. Penelitian ini mendukung pengembangan material daur ulang yang berkelanjutan dan berguna.

**Kata kunci:** kunyit; filamen PETG; limbah botol; *infill*; cetak 3D

#### Abstract

*This study aims to explore the use of natural turmeric dye in PETG Filaments based on plastic bottle waste. The printing parameters used include infill patterns (grid and triangles) and layer thickness (0.2 mm, 0.25 mm, and 0.3 mm). The testing includes density tests, impact tests (Charpy), and flexural tests (three-point Bending) to assess the effect of natural dye on the physical and mechanical properties of the 3D printed parts. The results showed that the addition of turmeric affected the mechanical performance of the Filament. Although the impact and flexural strength values of the turmeric Filament were generally lower than those of pure PETG, the combination of the triangle pattern and 0.3 mm layer thickness yielded sufficiently competitive results. By examining how infill patterns and layer thickness affect the mechanical properties of printed products, this study contributes to the development of environmentally friendly 3D Filaments made from PET plastic bottle waste and natural turmeric dye. This research supports the development of sustainable and useful recycled materials.*

**Keywords:** turmeric; PETG filament; bottle waste; *Infill*; 3D printing

#### PENDAHULUAN

Dunia saat ini menghadapi tantangan signifikan dalam menangani limbah plastik, terutama botol PETG (*Pholyethylene Terephthalate Glycol*) yang memerlukan waktu hingga 450 tahun untuk terurai secara alami. Sebaliknya, kemajuan teknologi pencetakan 3D telah berkembang pesat dengan berbagai penerapan dalam industri dan konsumen [1]. Berdasarkan penelitian,

penggunaan plastik yang tidak memenuhi standar dapat menyebabkan berbagai masalah kesehatan, karena dapat memicu kanker dan merusak jaringan tubuh manusia (karsinogenik). Selain itu, umumnya plastik sulit untuk terdegradasi (dipecah) oleh mikroorganisme [2]. Studi terbaru mengindikasikan bahwa PET dari botol plastik dapat diolah menjadi filamen untuk 3D *printing* melalui proses ekstrusi, memberikan solusi daur ulang yang kreatif [3],[4].

Pewarnaan filamen dalam pencetakan 3D secara tradisional menggunakan pewarna buatan yang sering kali mengandung bahan kimia berbahaya, dapat mencemari lingkungan dan merusak ekosistem yang ada [5]. Kunyit (*Curcuma longa*) sebagai bahan pewarna alami mengandung *kurkuminoid* yang menghasilkan warna kuning alami dan memiliki fitur anti mikroba [6]. Jurnal tersebut menjelaskan bahwa bahan alami kunyit sangat bagus sebagai pewarna alami yang tidak merusak lingkungan. Kombinasi antara penggunaan kembali PET dan pemanfaatan pewarna alami menghasilkan metode yang berkelanjutan dalam pembuatan aditif [7].

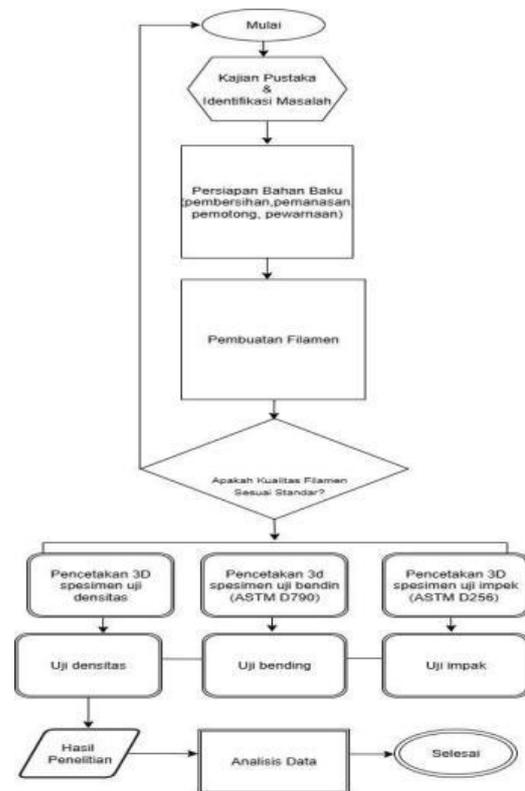
Pola *infill* sebagai struktur internal pada objek cetak 3D memiliki peran krusial dalam menentukan karakteristik mekanik produk yang dihasilkan [8]. Pola *grid* dan *triangel* dalam pencetakan 3D memiliki peran krusial dalam menentukan kekuatan struktural dan penampilan produk akhir [9].

Penelitian tentang integrasi *Filament* PET daur ulang, pewarna kunyit, dan variasi pola *infill* serta ketebalan layer masih kurang, sehingga studi ini bertujuan tak lain untuk mempercepat pengelolaan sampah plastik yang sulit terurai dengan mencampurkan kunyit sebagai bahan pewarna agar menjadi bahan yang bernilai tinggi. Studi sebelumnya mengindikasikan bahwa pola *grid* dan *triangel* merupakan yang paling sering diterapkan, dengan karakteristik yang bervariasi [10], [11], [12]. Ketebalan lapisan adalah parameter penting yang memengaruhi kekuatan produk serta durasi pencetakan dan mempengaruhi pada hasil akhir spesimen 3D [13].

## METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Semarang. Sebanyak tujuh puluh dua spesimen dicetak menggunakan material PETG dengan memvariasikan pola *infill*, tinggi lapisan, dan kepadatan *infill*.

Filamen Botol Plastik PET dengan Pewarna Alami Kunyit yang dibuat menggunakan Pola *Infill grid* dan *triangles* serta ketebalan lapisan (0,2 mm, 0,25 mm, 0,3 mm) [14]. Proses pembuatan spesimen dan pencampuran warna ini digambarkan dengan diagram alir pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Prosedur Penelitian

Penelitian ini menggunakan dua jenis filamen. Terdapat filamen hasil buatan sendiri dan filamen otentik, filamen otentik ini digunakan sebagai bahan perbandingan dengan hasil penelitian ini. Untuk mendukung penelitian ini, digunakan berbagai peralatan yang sesuai dengan standar pengujian material termoplastik hasil cetak 3D. Peralatan ini digunakan untuk proses pencetakan spesimen, pengujian sifat mekanik, dan analisis densitas.

### 1. *Filament* PET Botol plastik

*Polyethylene terephthalate* (PET) dikenal memiliki kekuatan tarik dan modulus tinggi, ketahanan terhadap abrasi, sinar ultraviolet (UV), panas, serta kinerja anti-penuaan yang unggul [15]. *Filament* yang terbuat dari jenis plastik PET sebelum di daur ulang akan melewati beberapa proses, diantara-Nya: pemilahan, pembersihan, penghalusan permukaan, pemotongan, pencampuran warna kunyit, pembuatan filamen, pembuatan spesimen, uji.

Keuntungan filamen eksperimen adalah lebih hemat biaya salah satu alasan utama kenapa orang bikin filamen sendiri adalah karena bisa jauh lebih murah dibanding beli filamen pabrikan apalagi kalau bahan bakunya dari limbah plastik, botol plastik, atau sisa cetakan sebelumnya, mendukung daur ulang dan ramah lingkungan kalau pakai plastik bekas atau limbah lain, otomatis kita

ikut berkontribusi buat mengurangi sampah plastik. Ini jadi nilai tambah terutama buat yang peduli lingkungan atau ingin bikin proyek yang lebih “hijau”.(Gambar 2)



**Gambar 2.** Filament PET Botol Bekas

## 2. Filamen PETG

Filamen buatan pabrik merupakan jenis filamen yang banyak dijual di pasaran dan telah diproduksi secara massal oleh perusahaan-perusahaan besar. Filamen ini diproduksi menggunakan mesin-mesin canggih, dan prosesnya dikontrol dengan sangat ketat untuk memastikan kualitasnya tetap stabil.

Keuntungan menggunakan filamen buatan pabrik adalah kita tidak perlu khawatir dengan kualitasnya. Hasil cetaknya biasanya lebih halus, minim kesalahan, dan cocok untuk proyek-proyek yang membutuhkan ketelitian. Namun, karena proses produksinya profesional, harganya pun bisa jadi lebih mahal dibanding filamen yang diproduksi sendiri (eksperimen).(Gambar 3)



**Gambar 3.** Filamen PETG buatan Pabrik

Proses pembuatan filamen dilakukan dengan Pemilahan botol Le mineral ukuran 1.500 ml jenis PET yang akan diolah menjadi strip menggunakan alat pemotong. Untuk proses awal yaitu pembersihan botol dilakukan untuk menghapus kotoran dan label, serta menghaluskan permukaan agar mendapatkan hasil *Filament* yang maksimal, kemudian botol dipotong menggunakan alat yang telah di desain semudah mungkin

tujuannya agar strip tetap stabil dengan lebar yang seragam (8.5 mm).

### a. Perataan Botol Plastik PET

Bahan utama dalam pembuatan filamen ini yaitu menggunakan botol plastik PET dengan ukuran besar 1.5 L. Botol akan dihaluskan dengan pengisian air putih sebesar 30% lalu dipanaskan diatas kompor *portable* yang bertujuan untuk menghaluskan permukaan agar hasil filamen lebih maksimal (halus).(Gambar 4)



**Gambar 4.** Botol Plastik PET

### b. Alat Pemotongan Botol menjadi Strip

Alat pemotong botol yang sudah diberi ukuran dengan 8,5 mm dapat membantu proses percepatan pembuatan *Filament*. Dengan alat ini strip dapat menstabilkan ukurannya sesuai keinginan.(Gambar 5)



**Gambar 5.** Alat Pemotong Botol PET

### c. Pewarnaan Strip

Melalui proses pemotongan pada strip akan diwarnai menggunakan air yang direbus dengan kunyit pada suhu

80°C. Pada proses ini hanya memerlukan waktu 2-3 menit untuk merubah agar strip berwarna kuning tanpa merusak permukaannya. (Gambar 6)



**Gambar 6.** Pewarnaan Strip dengan Air Kunyit

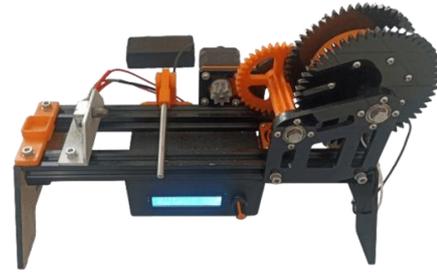
Strip yang telah diberi warna tidak langsung dimasukkan ke dalam mesin filamen, karena air kunyit masih menempel pada bagian strip yang bisa mengakibatkan tidak stabilnya panas pada mesin filamen, maka dari itu kita perlu untuk mengeringkan terlebih dahulu.

#### d. Pembuatan Filamen

Pembuatan filamen mini berfungsi dengan mengubah botol plastik bekas, khususnya yang terbuat dari PET (seperti botol plastik), menjadi filamen yang dapat digunakan untuk printer 3D. Proses ini sederhana tetapi sangat efektif.

Pertama, potongan plastik yang telah kita beri warna dimasukkan ke dalam alat melalui corong masuk (*hopper*). Di dalam alat, plastik akan dipanaskan hingga meleleh. Suhu yang digunakan strip PET yang dipanaskan pada suhu 220°C diekstrusi menjadi filamen dengan diameter 1,75 mm.

*Melt* plastik kemudian didorong keluar melalui lubang kecil (*nozzle*), membentuk benang panjang yang dikenal sebagai filamen. Agar filamen tidak lembek, ia langsung didinginkan menggunakan kipas yang ada pada mesin. Setelah dingin, filamen ditarik dengan roller untuk tetap menjaga ukuran yang seragam, lalu digulung ke spool agar terlihat rapi dan siap digunakan. (Gambar 7)



**Gambar 7.** Mesin Filamen Mini

Secara keseluruhan, alat ini terdiri dari beberapa komponen penting: corong masuk, elemen pemanas, penggerak sekrup, *nozzle*, kipas pendingin, alat penarik, dan penggulung.

Dengan alat ini, kita dapat mendaur ulang botol plastik menjadi sesuatu yang lebih berguna, sekaligus menghemat biaya untuk keperluan 3D *printing* filamen siap untuk diproduksi sebagai spesimen. (Gambar 8)

e. Proses Pembuatan spesimen menggunakan 3D *Creality Ender 3 V3 KE* dengan *infill grid* dan *triangles*.



**Gambar 8.** *Infill Grid* dan *Infill Triangles*

Parameter pencetakan 3D ditetapkan konstan untuk semua spesimen agar perbandingan sifat mekanis valid. Parameter pencetakan yang digunakan adalah suhu nosel 260°C, tinggi lapisan (*layer height*) 0.2 mm, 0.25 mm, 0.3 mm kecepatan cetak (*print speed*) 30 mm/s, ukuran *nozzle* 0.4 mm suhu *bed* 80°C, dan kerapatan isi (*infill density*) 100% (*full infill*) Spesimen uji dicetak sesuai dengan standar pengujian mekanis yang akan dilakukan (19). Untuk memastikan keamanan selama proses pembuatan filamen dan pencetakan 3D, alat pelindung diri (APD) seperti sepatu keselamatan, kacamata pengaman, sarung tangan, dan masker.

Printer 3D *Creality Ender 3 V3 KE* adalah mesin material *extrusion* (MEX) yang membentuk objek lapis demi lapis dari filamen [16] [20]. Parameter pencetakan yang digunakan seperti suhu nosel yang tinggi (260°C) dapat memengaruhi viskositas lelehan dan adhesi antar lapisan, meskipun suhu ini cukup tinggi untuk PET yang suhu lelehnya sekitar 250-255°C dan berpotensi menyebabkan degradasi material. Tinggi lapisan 0.2 mm merupakan nilai umum yang digunakan dalam penelitian

3D *printing*. Kecepatan cetak 30 mm/s juga berada dalam rentang yang umum dilaporkan. Penggunaan full *infill* (100%) bertujuan untuk meminimalkan keberadaan rongga internal yang disebabkan oleh pola *infill* dan memaksimalkan kepadatan spesimen, mendekati sifat material solid. meminimalkan keberadaan rongga internal yang disebabkan oleh pola *infill* dan memaksimalkan kepadatan spesimen, mendekati sifat material solid.

Proses pembuatan spesimen menggunakan printer 3D *Creality Ender 3 V3 KE*, dengan tata parameter sebagai berikut: Ukuran Setiap spesimen tunduk pada prosedur uji sesuai standarnya masing-masing, layer thickness 0.2 mm; 0.25 mm; dan 0.3 mm, *infill pattern grid* dan *triangles*, ukuran nozzle 0.4 mm, suhu nozzle: 260°C, suhu bed 80°C. Setelah sepesimen melalui beberapa proses, spesimen akan di uji oleh peneliti untuk mendapatkan data melalui pengujian: densitas, *impack*, *Bending*.(Gambar 9)



**Gambar 9.** 3D *Creality Ender 3 V3 KE*

1. Uji Densitas (ASTM D790-Metode Archimedes)

Spesimen diuji dengan prinsip Archimedes, menggunakan air sebagai media. Spesimen yang diuji ditimbang dalam keadaan kering dan juga saat berada di dalam air. Berat spesimen diukur dalam kondisi kering ( $W_{kering}$ ) dan kondisi didalam air ( $W_{air}$ ) Densitas =

$$\frac{W_{kering}}{W_{kering}-W_{air}} \dots\dots\dots(1)$$

Spesimen diuji tiga kali dan untuk masing-masing parameter dan hasilnya diratakan, pengujian ini dilakukan untuk mengukur kerapatan material yang berhubungan langsung dengan struktur internal karena perbedaan dalam infil dan *layer thickness*. Dengan mengukur densitas, kita dapat menentukan apakah filamen yang dibuat dari bahan daur ulang, seperti botol plastik, memiliki kualitas yang

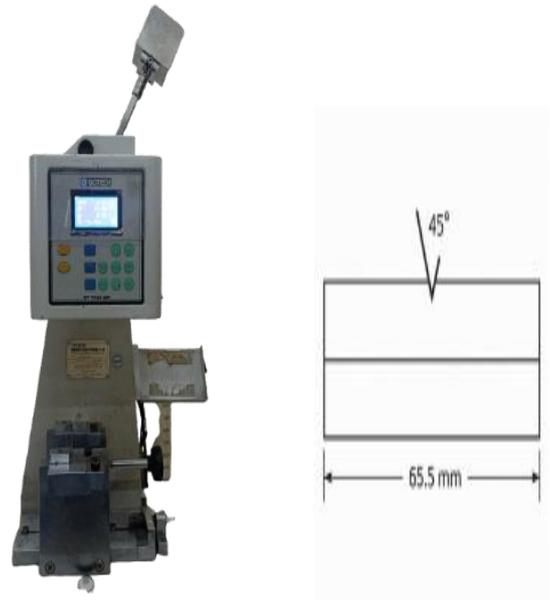
memadai atau tidak. Jika densitasnya sangat rendah, hal ini mungkin menunjukkan adanya rongga udara di dalam filamen atau bahwa filamen tersebut kurang padat, yang pada akhirnya dapat menyebabkan cetakan menjadi rapuh atau tidak presisi.(Gambar 10)



**Gambar 10.** Alat Uji Densitas

2. Uji Impak (ASTM D256)

Pengujian Impak menggunakan metode Izod yang mengikuti standar ASTM D256 bertujuan untuk menilai ketahanan terhadap benturan atau kekuatan impak dari bahan plastik, termasuk contoh cetakan 3D seperti filamen PETG. Alat yang digunakan dalam tes ini adalah pendulum yang memukul contoh berlekuk (*bernotch*) yang dipasang secara vertikal dan dipegang pada salah satu ujungnya.(Gambar 11)



**Gambar 11.** Alat Uji *Impack*

Energi yang dikumpulkan dari proses pengujian impak dicatat dalam satuan joule. Untuk menghitung nilai ketentuan *impack*, digunakan rumus:

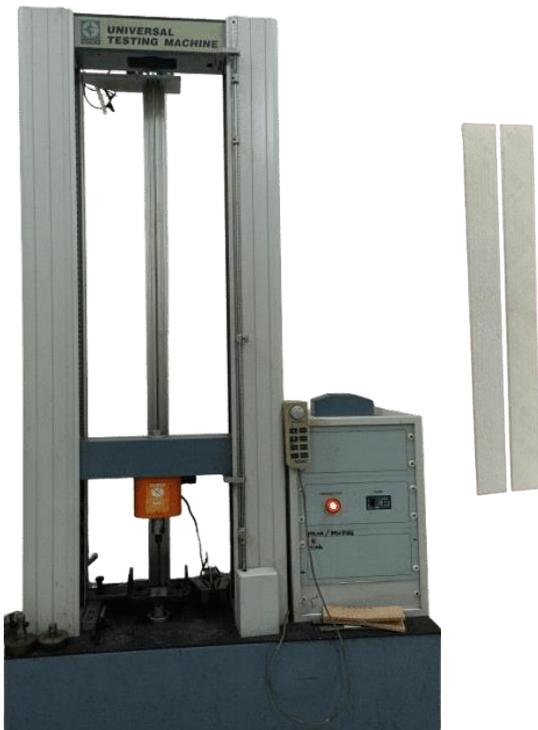
$$\text{Impact strength} = \frac{E}{b.d} \dots \dots \dots (2)$$

E = Energi serapan (joule)  
 b = Lebar spesimen (mm)  
 d = Tebal spesimen (mm)

setiap pengujian dihitung sebanyak tiga kali untuk mendapatkan hasil rata-rata dari spesimen.

3. Uji *Bending* (ASTM D790)

Pengujian lentur atau uji *Bending* menurut standar ASTM D790 merupakan metode mekanika yang digunakan untuk menentukan kekuatan lentur dan modulus lentur dari suatu bahan, termasuk plastik seperti PETG yang dihasilkan melalui pencetakan 3D. (Gambar 12)



**Gambar 12.** Alat Uji *Bending* dan Spesimen Uji *Bending* 1.

Dalam pengujian ini spesimen dikenai beban ditengah-tengahnya, sementara kedua ujungnya ditopang sehingga mampu menahan. Hasil dari uji banding biasanya dinyatakan dengan satuan Megapascal (Mpa) yang secara teknik *ckuivalen* dengan N/mm<sup>2</sup>. Nilai kekuatan lentur dihitung dengan rumus:

$$\text{kekuatan lentur} = \frac{3FL}{3bd^2} \dots \dots \dots (3)$$

kekuatan lentur (MPa)

**Tabel 1.** Hasil Pengujian Densitas

F = gaya maksimum saat patah (N)  
 L = panjang batang atau penumpu (mm)  
 b = lebar penumpu (mm)  
 d = tebal spesimen (mm)

Hasil akhir pengujian ini menunjukkan seberapa besar tekanan yang ditahan oleh spesimen sebelum patah akibat pembebanan lentur. Semakin tinggi nilai MPa nya maka semakin kuat spesimen tersebut.

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

a. Uji Densitas

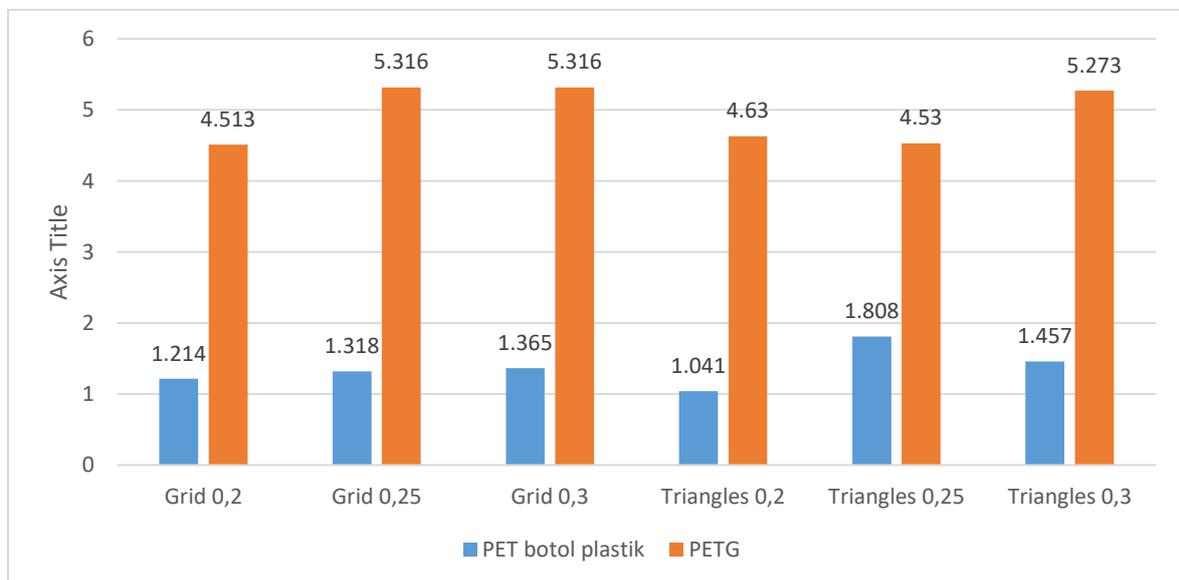
Tujuan dari pengujian densitas ini adalah untuk mengetahui seberapa padat atau seberapa "terisi" sebuah bahan, dalam hal ini filamen 3D. Densitas sangat penting karena dapat memengaruhi sifat mekanik filamen, seperti kekuatan tarik, kekuatan lentur, ketahanan panas, dan kelebihan lainnya saat pencetakan bahan tersebut. Dengan mengetahui nilai densitas, kita dapat: Mengevaluasi kualitas filamen yang diperoleh dari daur ulang (seperti yang terbuat dari botol plastik PET), Membandingkan hasil yang dihasilkan sendiri dengan filamen dari pabrikan, Mengidentifikasi adanya gelembung udara atau pori-pori dalam filamen yang dapat mengurangi kualitas hasil cetakan, Menjadi referensi untuk pengujian sifat lainnya, seperti kekuatan lentur atau tarik, agar perbandingan yang dihasilkan menjadi lebih adil (karena densitas dapat memengaruhi kinerja mekanik).

Filamen yang terbuat dari botol plastik menunjukkan variasi dalam densitas yang dipengaruhi oleh ketebalan lapisan, semakin tebal lapisannya, semakin besar kemungkinan densitasnya meningkat.

Filamen PETG menunjukkan angka densitas yang tetap, yaitu 1 g/cm<sup>3</sup>, di semua pengaturan yang digunakan. Hal ini menunjukkan tingkat konsistensi yang tinggi serta kestabilan sifat fisik material tersebut. Filamen yang terbuat dari botol plastik menunjukkan variasi dalam densitas yang dipengaruhi oleh:

Ketebalan lapisan: semakin tebal lapisannya, semakin besar kemungkinan densitasnya meningkat. Pola *infill*: pola *Triangles* menghasilkan densitas yang biasanya lebih tinggi, terutama pada ketebalan lapisan 0.25 dan 0.3 (bisa mencapai 1.82 g/cm<sup>3</sup>). Nilai: sekitar 1.82 g/cm<sup>3</sup> kepadatan ini jauh melebihi yang terdapat pada PETG, sehingga dari segi potensial material, botol plastik bisa memiliki kekuatan struktur yang lebih baik dalam pengaturan tertentu.

<i>Infill</i> Pattern	Layer Thickness	Spesimen	Berat Kering (g)	Berat dalam Air (g)	Densitas (g/cm <sup>3</sup> )	Berat Kering (g)	Berat dalam Air (g)	Densitas (g/cm <sup>3</sup> )
<i>Grid</i>	0.2	1	4.22	0.76	1.214	4.45	0.00	4.513
		2	4.42	0.70		4.54	0.00	
		3	4.10	0.78		4.55	0.00	
<i>Grid</i>	0.25	1	4.48	1.01	1.318	5.32	0.00	5.316
		2	4.55	1.24		5.34	0.00	
		3	4.53	1.02		5.29	0.00	
<i>Grid</i>	0.3	1	4.18	1.17	1.365	4.64	0.00	5.316
		2	4.34	1.12		4.61	0.00	
		3	4.39	1.16		4.64	0.00	
<i>Triangels</i>	0.2	1	3.56	0.13	1.041	4.55	0.00	4.63
		2	3.77	0.16		4.50	0.00	
		3	3.60	0.15		4.54	0.00	
<i>Triangels</i>	0.25	1	3.60	1.59	1.808	5.31	0.00	4.53
		2	3.65	1.65		5.28	0.00	
		3	3.58	1.60		5.23	0.00	
<i>Triangels</i>	0.3	1	4.82	1.42	1.457	6.05	0.00	5.273
		2	4.70	1.44		6.08	0.00	
		3	4.10	1.39		6.01	0.00	



**Gambar 13.** Grafik Perbandingan Nilai Rata-Rata Pengujian Densita

Berdasarkan **Tabel 1** dan **Gambar 13** Secara keseluruhan, filamen yang berasal dari daur ulang botol plastik (filamen kunyit) menunjukkan nilai densitas yang cukup baik, dan dalam beberapa kombinasi bisa lebih tinggi dibandingkan dengan filamen PETG. Pola pengisian serta ketebalan lapisan memiliki dampak yang signifikan terhadap hasil densitas akhir.

Kombinasi *Triangels* dengan ketebalan 0.25 mm menjadi yang paling padat, menunjukkan bahwa strukturnya benar-benar kompak. Hal ini menunjukkan potensi yang sangat besar bahwa filamen daur ulang dapat digunakan untuk pencetakan 3D, khususnya untuk bagian non-struktural atau prototipe yang berfungsi [17]. Penelitian ini mengkaji dampak berbagai jenis *infill* pada

daya tarik spesimen PLA. Hasilnya menunjukkan bahwa bentuk *infill* yang lebih rumit, seperti honeycomb, dapat memperkuat kekuatan tarik, yang mengindikasikan bahwa struktur internal yang lebih teratur dan padat dapat meningkatkan densitas serta kekuatan material cetak 3D.

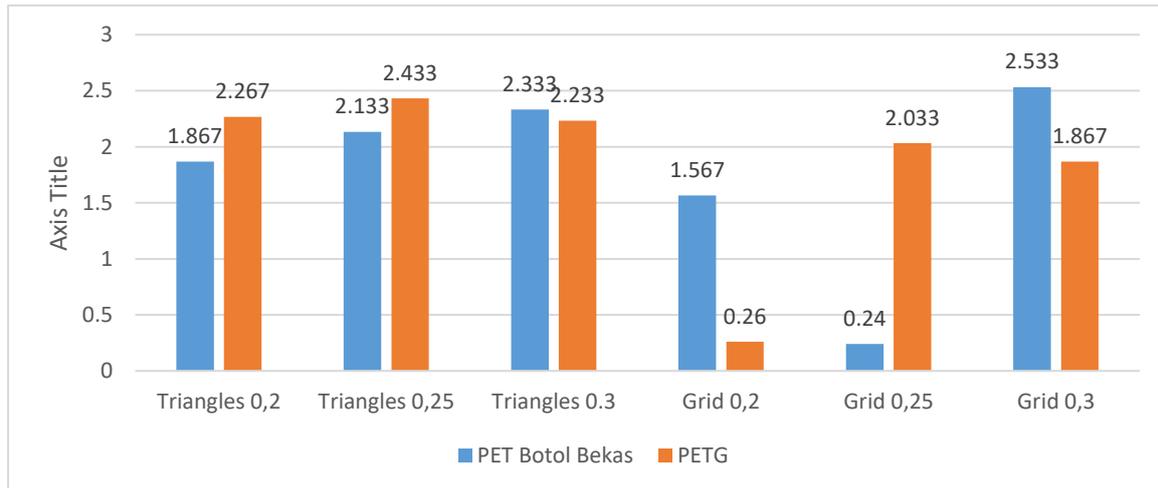
b. Uji *Impact*

Pengujian *impact* dilakukan untuk mengukur seberapa kuat suatu bahan dapat bertahan terhadap tekanan

mendadak atau tabrakan. Dalam penelitian mengenai filamen yang dihasilkan dari pencetakan 3D, terutama yang terbuat dari bahan daur ulang seperti botol plastik atau bahan komersial seperti PETG, pengujian dampak ini digunakan untuk menilai daya serap energi bahan ketika mengalami benturan sampai menyebabkan kerusakan atau patahan, hasilnya dapat dilihat pada [Tabel 2](#) dan [Gambar 14](#).

**Tabel 2.** Hasil Pengujian *Impact*

Infill Pattern	Layer Thickness	Spesimen	Botol plastik		PETG	
			Kunyit (J)	Rata-Rata (J/mm)	Pembanding (J)	Rata-Rata (J/mm)
Triangles	0.2	1	0.19 J	0.1867	0.22 J	0.2267
		2	0.18 J		0.22 J	
		3	0.19 J		0.24 J	
Triangles	0.25	1	0.23 J	0.2133	0.25 J	0.2433
		2	0.23 J		0.24 J	
		3	0.18 J		0.24 J	
Triangles	0.3	1	0.24 J	0.2333	0.22 J	0.2233
		2	0.24 J		0.22 J	
		3	0.22 J		0.23 J	
Grid	0.2	1	0.15 J	0.1567	0.26 J	0.26
		2	0.15 J		0.27 J	
		3	0.17 J		0.25 J	
Grid	0.25	1	0.28 J	0.24	0.22 J	0.2033
		2	0.18 J		0.19 J	
		3	0.26 J		0.20 J	
Grid	0.3	1	0.24 J	0.2533	0.18 J	0.1867
		2	0.26 J		0.18 J	
		3	0.26 J		0.20 J	



**Gambar 14.** Grafik Perbandingan Nilai Rata-Rata Pengujian *Impact*

Filamen pembanding (PETG) secara terus-menerus memperlihatkan energi impact yang lebih besar ketimbang filamen botol plastik di sebagian besar kombinasi pola *infill* dan ketebalan lapisan [18]. Penelitian ini sejalan dengan apa yang saya teliti dengan botol plastik jenis PETG, pengujian impact, pada spesimen PETG yang dicetak 3D

c. Uji *Bending*

dan telah melalui proses daur ulang. Hasil penelitian menunjukkan bahwa filamen PETG daur ulang memiliki ketahanan terhadap impact yang setara dengan filamen baru, sehingga menjadi pilihan berkelanjutan dalam industri manufaktur aditif.

Uji *Bending* metode pengujian mekanis yang digunakan untuk menentukan kemampuan material dalam menahan beban tekuk hingga mengalami deformasi atau patah. Dalam pengujian ini, spesimen diletakkan di atas

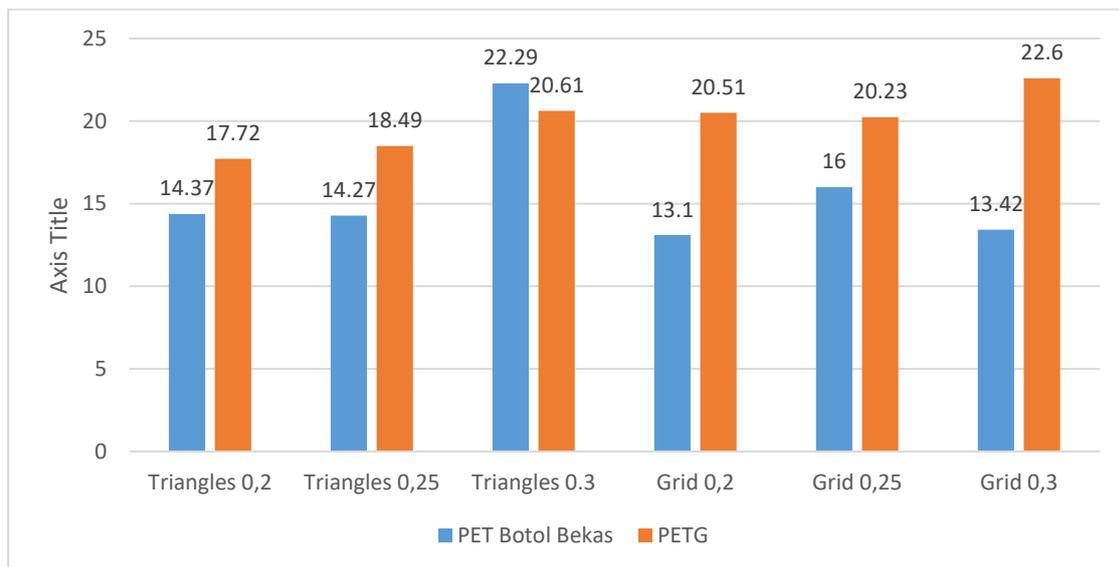
dua tumpuan dan diberi beban di tengah, sambil mengamati bagaimana material tersebut menekuk atau patah akibat beban tersebut.

**Tabel 3.** Hasil pengujian *Bending* filamen botol plastik

Infil Pattern	Layer yhicknes	Specimen	Gaya Maksimum (kg)	Panjang Penumpu (mm)	Lebar Spesimen (mm)	Tebal Spesimen (mm)	Kekuatan Lentur (MPa)	Rata-Rata
<i>Triangels</i>	0.2	1	2.2	52.64	12.15	3.75	9.98	14.37
		2	3.5	52.64	12.15	3.75	15.86	
		3	3.8	52.64	12.15	3.75	17.26	
<i>Triangels</i>	0.25	1	2.8	53.40	12.20	3.53	14.44	14.27
		2	2.6	53.40	12.20	3.53	13.42	
		3	2.9	53.40	12.20	3.53	14.94	
<i>Triangels</i>	0.3	1	3.7	53.38	12.18	3.33	21.49	22.29
		2	3.3	53.38	12.18	3.33	19.19	
		3	4.5	53.38	12.18	3.33	26.19	
<i>Grid</i>	0.2	1	2.6	52.55	12.19	3.70	12.03	13.10
		2	2.7	52.55	12.19	3.70	12.48	
		3	3.2	52.55	12.19	3.70	14.78	
<i>Grid</i>	0.25	1	2.9	53.25	12.21	3.45	15.64	16.00
		2	3.6	52.25	12.21	3.45	19.42	
		3	2.4	52.25	12.21	3.45	12.95	
<i>Grid</i>	0.3	1	2.7	53.40	12.16	3.65	13.10	13.42
		2	2.8	53.40	12.16	3.65	13.58	
		3	2.8	53.40	12.16	3.65	13.58	

**Tabel 4.** Hasil pengujian *Bending* filamen PETG

Infil Pattern	Layer yhicknes	Specimen	Gaya Maksimum (kg)	Panjang Penumpu (mm)	Lebar Spesimen (mm)	Tebal Spesimen (mm)	Kekuatan Lentur (MPa)	Rata-Rata
<i>Triangels</i>	0.2	1	5.5	63.60	12.71	3.50	17.83	17.72
		2	5.5	63.60	12.71	3.50	17.83	
		3	5.4	63.60	12.71	3.50	17.50	
<i>Triangels</i>	0.25	1	5.8	62.86	12.56	3.40	18.38	18.49
		2	5.8	62.86	12.56	3.40	18.38	
		3	5.9	62.86	12.56	3.40	18.70	
<i>Triangels</i>	0.3	1	6.6	63.16	12.58	3.44	20.51	20.61
		2	6.6	63.16	12.58	3.44	20.51	
		3	6.7	63.16	12.58	3.44	20.82	
<i>Grid</i>	0.2	1	5.0	65.80	12.57	3.23	20.23	20.51
		2	5.0	65.80	12.57	3.23	20.23	
		3	5.2	65.80	12.57	3.23	21.06	
<i>Grid</i>	0.25	1	5.8	64.20	13.41	3.20	20.69	20.23
		2	5.7	64.20	13.41	3.20	20.34	
		3	5.5	64.20	13.41	3.20	19.64	
<i>Grid</i>	0.3	1	6.0	65.36	12.64	3.32	21.87	22.60
		2	6.3	65.36	12.64	3.32	22.97	
		3	6.3	65.36	12.64	3.32	22.97	



Gambar 15. Grafik Perbandingan Nilai Rata-Rata Pengujian Bending

Berdasarkan Tabel 3, Tabel 4 dan Gambar 15 di atas yang membandingkan kekuatan lentur antara filamen botol plastik dengan filamen pembanding, yang kemungkinan adalah PETG murni, didapatkan simpulan antara lain sebagai berikut:

Filamen pembanding menunjukkan kekuatan lentur yang lebih tinggi dibandingkan dengan filamen botol plastik pola *infill* dan ketebalan lapisan sangat berpengaruh terhadap kekuatan lentur pada kedua jenis filamen tersebut.

Pada filamen botol plastik *infill triangles*: Ketebalan lapisan 0,3 mm menunjukkan kekuatan lentur maksimum, mencapai sekitar 26,19 MPa. Ketebalan lapisan 0,2 mm dan 0,25 mm menghasilkan daya lentur yang lebih rendah, dengan masing-masing nilai sekitar 9,98 MPa dan 14,94 MPa. (4) *Infill grid* : ketebalan lapisan 0,3 mm juga menunjukkan ketahanan lentur maksimum, sekitar 22,97 MPa. Ketebalan lapisan 0,2 mm dan 0,25 mm menghasilkan daya lentur yang lebih rendah, yaitu masing-masing sekitar 12,03 MPa dan 15,64 MPa [19]. Penelitian ini meneliti pengaruh variasi persentase *infill* terhadap sifat mekanik material PLA+ pada proses 3D *printing* FDM.

## PENUTUP

### Simpulan

Penelitian ini bertujuan untuk menilai dampak dari variasi pola pengisian dan ketebalan lapisan terhadap kekuatan lentur filamen yang dihasilkan dari pencetakan 3D, dengan penekanan pada perbandingan antara filamen yang terbuat dari limbah botol plastik dan filamen PETG yang murni. Berdasarkan hasil pengujian dan analisis data, berikut adalah beberapa kesimpulan yang diperoleh:

Hasilnya menunjukkan bahwa peningkatan persentase *infill* meningkatkan kekuatan tarik material, dengan nilai tertinggi sebesar 27,89 N/mm<sup>2</sup> pada *infill* 100%.

Filamen perbandingan *infill triangles*: ketebalan 0,3 mm pada lapisan menunjukkan kekuatan lentur maksimal, sekitar 20,82 MPa. Ketebalan lapisan 0,2 mm dan 0,25 mm menghasilkan kekuatan lentur yang lebih sedikit, masing-masing sekitar 17,83 MPa dan 18,70 MPa.

*Infill grid*: ketebalan lapisan 0,3 mm menunjukkan kekuatan lentur maksimum, sekitar 22,97 MPa. Ketebalan lapisan 0,2 mm dan 0,25 mm menghasilkan daya lentur yang lebih rendah, yaitu sekitar 20,23 MPa dan 20,69 MPa [20].

Perbandingan data anatara filamen botol plastik:

Dampak Ketebalan Lapisan: Secara umum, penambahan ketebalan lapisan dari 0,2 mm menjadi 0,3 mm cenderung memperkuat kekuatan lentur pada kedua tipe filamen. Dampak Pola *Infill*: Pola *infill grid* menawarkan daya lentur yang lebih besar dibandingkan dengan pola *triangles* pada filamen yang diuji [21].

Perbandingan Kekuatan Lentur: Filamen PETG yang murni menunjukkan kekuatan lentur yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan filamen yang terbuat dari limbah botol plastik pada semua variasi pola pengisian dan ketebalan lapisan yang diuji.

Dampak Pola *Infill* dan Ketebalan Lapisan: Variasi pola pengisian dan ketebalan lapisan memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kekuatan lentur dari spesimen cetak 3D. Pada filamen yang berasal dari limbah botol plastik, kombinasi pola pengisian segitiga dengan ketebalan lapisan 0,3 mm menunjukkan kekuatan lentur

maksimum sebesar 26,19 MPa. Di sisi lain, untuk pola pengisian *grid*, ketebalan lapisan 0,3 mm juga menghasilkan kekuatan lentur tertinggi sebesar 22,97 MPa.

Tren Kekuatan Lentur: Secara keseluruhan, peningkatan ketebalan lapisan dari 0,2 mm menjadi 0,3 mm cenderung meningkatkan kekuatan lentur pada kedua jenis filamen serta pola pengisian yang diuji.

### Saran

Berdasarkan hasil penelitian ini, berikut adalah beberapa rekomendasi untuk pengembangan lebih lanjut optimalisasi parameter cetak untuk aplikasi yang membutuhkan kekuatan lentur yang tinggi, sebaiknya menggunakan kombinasi pola *infill* segitiga dengan ketebalan lapisan 0,3 mm, terutama untuk filamen yang terbuat dari bahan limbah botol plastik. Pengembangan material daur ulang diperlukan penelitian tambahan untuk meningkatkan mutu filamen dari limbah botol plastik, misalnya melalui proses pemurnian bahan atau penambahan aditif yang dapat memperbaiki karakteristik mekaniknya.

Evaluasi parameter lain, penelitian di masa mendatang dapat mengeksplorasi dampak dari parameter lain seperti suhu ekstrusi, kecepatan pencetakan, dan orientasi cetak terhadap kekuatan lentur serta sifat mekanik lainnya dari filamen yang dihasilkan melalui pencetakan 3D.

Standarisasi proses produksi untuk menjamin konsistensi dan kualitas filamen daur ulang, sangat penting untuk merumuskan standar proses produksi yang mencakup pemilihan bahan baku, proses daur ulang, dan parameter pencetakan.

Aplikasi praktis, temuan dari penelitian ini dapat menjadi landasan untuk aplikasi praktis dalam pembuatan produk-produk berbasis filamen daur ulang, seperti komponen non-struktural atau produk yang dikenakan beban mekanik rendah hingga sedang.

### DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Pokhrel, "No TitleEAENH," *Ayan*, vol. 15, no. 1, pp. 37–48, 2024.
- [2] Karuniastuti Nurhenu, "Bahaya Plastik terhadap Kesehatan dan Lingkungan," *Swara Patra Maj. Pusdiklat Migas*, vol. 3, no. 1, pp. 6–14, 2013, [Online]. Available: <http://ejurnal.ppsdmmigas.esdm.go.id/sp/index.php/swarapatra/article/view/43/65>
- [3] "C yang di cetak menggunakan 3d print dengan parameter suhu 250," 2024.
- [4] A. T. Prakoso, S. Davin, N. Y. Mahendra, M. A. A. Saputra, and H. Basri, "Pemanfaatan Limbah Plastik Dalam Pembuatan Filamen 3D Printer Menggunakan Mesin Ekstrusi Pada Lab Konversi Energi Universitas Sriwijaya," *J. Pelita Sriwij.*, vol. 1, no. 2, pp. 043–052, 2022, doi: 10.51630/jps.v1i2.69.
- [5] F. S. Irwansyah, R. Meisani, M. Y. Santika Nugraha, N. Zuhra, R. Aisyah, and I. Suhada, "Pendampingan Penggunaan Zat Aditif Berbasis Eksperimen Untuk Meningkatkan Kesadaran Pola Hidup Sehat Di Jawa Barat," *Al-Khidmat*, vol. 5, no. 1, pp. 39–47, 2022, doi: 10.15575/jak.v5i1.17565.
- [6] D. A. Permata, R. M. Sari, and T. Anggraini, "Produksi Dangke Dengan Koagulan Papain Kasar Dan Sari Kunyit Sebagai Pewarna Alami," *J. Teknol. Pertan. Andalas*, vol. 26, no. 2, p. 254, 2023, doi: 10.25077/jtpa.26.2.254-261.2022.
- [7] M. Iman Mujiarto, ST., "SIFAT DAN KARAKTERISTIK MATERIAL PLASTIK DAN BAHAN ADITIF Iman Mujiarto," *Repository.Uin-Suska.Ac.Id*, 2023, [Online]. Available: [http://repository.uin-suska.ac.id/26740/1/Haki Buku Genealogi Intelektual Melayu Tradisi Pemikiran Islam Abad ke 19 di Kerajaan Riau Lingga.pdf](http://repository.uin-suska.ac.id/26740/1/Haki%20Buku%20Genealogi%20Intelektual%20Melayu%20Tradisi%20Pemikiran%20Islam%20Abad%20ke%2019%20di%20Kerajaan%20Riau%20Lingga.pdf)
- [8] S. V. No, F. Polyethylen, T. Glycol, and H. Printer, "Jurnal Flywheel Analisis Pengaruh Variasi *Infill* Pattern terhadap Kekuatan Tarik pada," vol. 15, no. 2, pp. 6–10, 2024.
- [9] A. P. Agrawal, V. Kumar, J. Kumar, P. Paramasivam, S. Dhanasekaran, and L. Prasad, "An investigation of combined effect of *infill* pattern, density, and layer thickness on mechanical properties of 3D printed ABS by fused *Filament* fabrication," *Heliyon*, vol. 9, no. 6, p. e16531, 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e16531.
- [10] 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.
- [11] Mesah Nur Sejati, Ali Ramadhan, and Tunjung Atmadi, "Pewarna Alami Kunyit Dan Buah Naga Untuk Pengaplikasian Teknik Sablon," *Mister. Publ. Ilmu Seni dan Desain Komun. Vis.*, vol. 1, no. 2, pp. 01–09, 2024, doi: 10.62383/misterius.v1i2.110.
- [12] K. Abbas, L. Hedwig, N. Balc, and S. Bremen, "Advanced FFF of PEEK: *Infill* Strategies and Material Characteristics for Rapid Tooling," *Polymers (Basel)*, vol. 15, no. 21, 2023, doi: 10.3390/polym15214293.

- [13] C. Benwood, A. Anstey, J. Andrzejewski, M. Misra, and A. K. Mohanty, "Improving the Impact Strength and Heat Resistance of 3D Printed Models: Structure, Property, and Processing Correlations during Fused Deposition Modeling (FDM) of Poly(Lactic Acid)," *ACS Omega*, vol. 3, no. 4, pp. 4400–4411, 2018, doi: 10.1021/acsomega.8b00129.
- [14] B. Muharam, R. Yufriзал, and Z. Abadi, "The Influence Of *Infill* Pattern , Layer Height , And *Infill* Density On Tensile Strength Of 3D Printed Polylactic Acid ( PLA ) *Filament*," vol. 8, pp. 41575–41586, 2024.
- [15] R. F. Nugroho *et al.*, "Investigasi Pengaruh Penuaan Termal terhadap Sifat Mekanik Karpas Felt *Polyethylene terephthalate* Laminasi dengan Low-Density Polyethylene untuk Aplikasi Pengembangan Produk Quarter Trim Panel," *J. Rekayasa Mesin*, vol. 20, no. 1, pp. 95–104, 2025, doi: 10.32497/jrm.v20i1.6208.
- [16] H. Agel *et al.*, "The Interconnection of Carbon Active Addition on Mechanical Green Composite," 2023.
- [17] A. Grazebrook, "Rapid prototyping," *Ada user*, vol. 15, no. 2, pp. 151–152, 1994.
- [18] V. Dohan, S. V. Galatanu, and L. Marsavina, "Mechanical evaluation of recycled PETG *Filament* for 3D *printing*," *Frat. ed Integrita Strutt.*, vol. 18, no. 70, pp. 310–321, 2024, doi: 10.3221/IGF-ESIS.70.18.
- [19] R. E. Prasetyaning Utomo, A. F. Hanafi, and A. Finali, "Pengaruh Prosentase *Infill* pada Proses 3D *Printing* FDM terhadap Sifat Mekanik," *J-Proteksion*, vol. 6, no. 1, pp. 1–4, 2021, doi: 10.32528/jp.v6i1.4337.
- [20] G. P. Annanto, I. N. Ardianto, and I. Syafa'at, "Pengaruh *Infill* Pattern Terhadap Kekuatan Hasil Cetak 3d *Printing* Berbahan Poly-Lactic Acid," *J. Ilm. MOMENTUM*, vol. 17, no. 2, p. 103, 2021, doi: 10.36499/jim.v17i2.5520.
- [21] Siregar, "הכיבאמת לנגד קשה לראות את מה ש No הארץ," *העינים*, no. 8.5.2017, pp. 2003–2005, 2022.