



Pengaruh Variasi Pola *Honeycomb* terhadap Kekuatan Impak Spesimen 3D Printing Berbahan Botol Plastik Daur Ulang

The Effects of Honeycomb Pattern Variation on the Impact Strength of 3D-Printing Specimens produced from Recycled Plastic Bottles

Muhammad Latif Usman^{1,a)}, Rahmat Doni Widodo¹, Muhammad Irfan Nuryanta¹

¹Teknik Mesin, Universitas Negeri Semarang

^{a)}Corresponding author: latifusman386@students.unnes.ac.id

Abstrak

Limbah botol plastik *Polyethylene Terephthalate* (PET) pasca konsumsi merupakan permasalahan lingkungan yang memerlukan solusi berkelanjutan. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh variasi pola *honeycomb* terhadap kekuatan impak spesimen 3D printing berbahan filamen *Recycled Polyethylene Terephthalate* (rPET) dari botol plastik daur ulang. Filamen rPET dibuat melalui proses daur ulang mekanik dan dicetak menggunakan metode *Fused Deposition Modeling* (FDM) dengan parameter pencetakan yang dikontrol konstan, sedangkan variasi pola *honeycomb* digunakan sebagai variabel bebas. Pengujian impak dilakukan menggunakan metode *Izod* sesuai standar ASTM D256 serta dilengkapi dengan pengamatan struktur makro permukaan patahan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi pola *honeycomb* berpengaruh terhadap kekuatan impak spesimen rPET. Pola *honeycomb* 1 menghasilkan nilai kekuatan impak cenderung lebih tinggi sebesar 0,00382 J/mm², diikuti pola 4 sebesar 0,00375 J/mm². Pola dengan distribusi sel yang lebih seragam menunjukkan kemampuan serap energi yang lebih baik dan mekanisme patahan yang cenderung ulet.

Kata Kunci: rPET; 3D printing; honeycomb; uji impak

Abstract

Post-consumer *Polyethylene Terephthalate* (PET) plastic bottle waste is an environmental problem that requires sustainable solutions. This study aims to analyze the influence of honeycomb pattern variations on the impact strength of 3D-printed specimens made from *Recycled Polyethylene Terephthalate* (rPET) filament from recycled plastic bottles. rPET filaments were made thru a mechanical recycling process and printed using the *Fused Deposition Modeling* (FDM) method with constant printing parameters, while variations in the honeycomb pattern were used as the independent variable. Impact testing was conducted using the *Izod* method according to ASTM D256 standards, and was supplemented by observation of the fracture surface macrostructure. The research results indicate that variations in the honeycomb pattern affect the impact strength of rPET specimens. Honeycomb pattern 1 yielded a comparatively higher impact strength value of 0.00382 J/mm², followed by pattern 4 at 0.00375 J/mm². Patterns with a more uniform cell distribution showed better energy absorption capabilities and a more ductile fracture mechanism.

Keywords: rPET; 3D printing; honeycomb; impact test

PENDAHULUAN

Permasalahan lingkungan akibat meningkatnya limbah plastik, khususnya botol *Polyethylene Terephthalate* (PET) sekali pakai, masih menjadi isu global yang mendesak karena volume konsumsi yang tinggi dan laju degradasi alami yang sangat lambat. Di Indonesia, peningkatan konsumsi minuman kemasan berbanding terbalik dengan tingkat daur ulang yang efektif, sehingga limbah PET

berpotensi menimbulkan pencemaran tanah dan perairan dalam jangka panjang [1], [2], [3]. Selain upaya peningkatan proses daur ulang, berbagai penelitian material juga diarahkan pada pengembangan komposit ramah lingkungan yang menggabungkan serat alam dan serat sintesis sebagai solusi berkelanjutan terhadap masalah limbah polimer [4], [5].

Salah satu pendekatan untuk mengurangi dampak lingkungan tersebut adalah dengan mengolah limbah PET

menjadi material bernilai tambah melalui proses daur ulang mekanik menjadi *Recycled Polyethylene Terephthalate* (*rPET*). Pemanfaatan *rPET* sebagai filamen pada teknologi *additive manufacturing*, khususnya *Fused Deposition Modeling* (FDM), dinilai relevan dengan prinsip ekonomi sirkular dan manufaktur berkelanjutan [6], [7], [8].

Dalam manufaktur aditif, sifat mekanik produk cetak 3D tidak hanya ditentukan oleh jenis material, tetapi juga sangat dipengaruhi oleh parameter pencetakan dan desain struktur internal [9], [10]. Variasi pola *infill* diketahui berperan penting dalam menentukan kekuatan, kekakuan, dan kemampuan serap energi pada material termoplastik cetak 3D [11], [12].

Pola *honeycomb* merupakan salah satu desain *infill* yang banyak digunakan karena memiliki rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi serta efisiensi distribusi beban yang baik. Struktur ini mampu meningkatkan ketahanan mekanik sekaligus mengurangi penggunaan material, sehingga cocok untuk aplikasi struktural ringan [2]. Beberapa studi menunjukkan bahwa variasi ukuran sel dan kerapatan pola *honeycomb* mampu meningkatkan kekuatan impact, tekan, dan bending pada material polimer cetak 3D, terutama pada material polimer konvensional seperti PLA dan ABS [9], [13].

Penelitian-penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa sebagian besar penelitian terkait pengaruh pola *honeycomb* terhadap sifat mekanik masih berfokus pada material polimer murni, sementara kajian terhadap material *rPET* hasil daur ulang masih relatif terbatas [11], [13]. Penelitian internasional mengenai *rPET* umumnya menitikberatkan pada karakterisasi material, optimasi proses ekstrusi filamen, atau penggunaan aditif untuk meningkatkan sifat mekanik, tanpa membahas secara spesifik pengaruh variasi pola *honeycomb* terhadap kekuatan impact [13].

Penelitian mengenai pemanfaatan limbah botol PET sebagai filamen 3D *printing* telah banyak dilakukan, terutama pada aspek pembuatan filamen, karakteristik dimensi, dan optimasi parameter pencetakan dasar [6], [14], [15]. Namun demikian, kajian yang secara khusus mengevaluasi hubungan antara variasi desain struktur internal *honeycomb* dan kekuatan impact spesimen cetak 3D berbahan *rPET* masih sangat terbatas [16], [17], sehingga menunjukkan adanya celah penelitian yang perlu dikaji lebih lanjut.

Kebaruhan (*novelty*) penelitian ini terletak pada evaluasi sistematis pengaruh variasi pola *honeycomb* terhadap kekuatan impact dan karakteristik patahan makro spesimen 3D *printing* berbahan filamen *rPET* yang berasal dari botol air minum pascakonsumsi, yang hingga saat ini belum banyak dilaporkan baik dalam literatur nasional maupun internasional, khususnya pada konteks material lokal Indonesia [1], [2].

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi pola *honeycomb* terhadap kekuatan impact dan karakteristik struktur makro filamen *rPET* dari botol plastik daur ulang. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dan teknis dalam pengembangan filamen *rPET* serta optimalisasi desain struktur internal pada aplikasi manufaktur aditif yang berkelanjutan [6], [16].

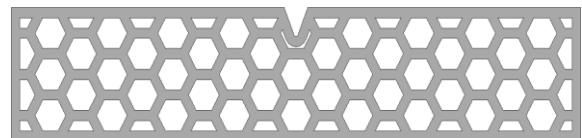
METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental kuantitatif untuk mengevaluasi pengaruh variasi pola *honeycomb* terhadap kekuatan impact filamen *rPET*. Pendekatan eksperimental dipilih karena mampu menunjukkan hubungan sebab akibat antara desain struktur internal dan respons mekanik material cetak 3D.

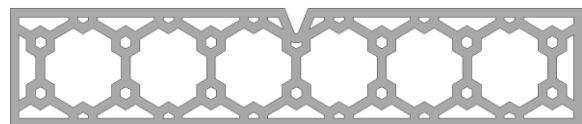
Bahan penelitian berupa limbah botol PET ukuran 1,5 liter yang telah melalui proses pembersihan, pemanasan untuk menghilangkan lekukan, pembuatan strip, dan ekstrusi menjadi filamen *rPET* menggunakan Filamini.

Spesimen uji dicetak menggunakan 3D Printer Creality Ender 3 V3 KE dengan parameter pencetakan yang dikontrol konstan, sedangkan variasi pola *honeycomb* dijadikan sebagai variabel bebas.

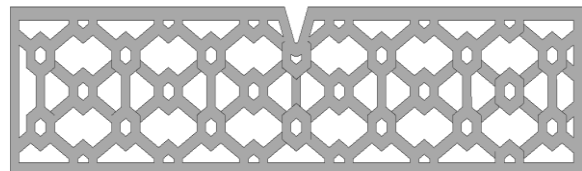
Untuk memperjelas perbedaan desain struktur internal yang digunakan dalam penelitian ini, visualisasi masing-masing variasi pola *honeycomb* disajikan dalam bentuk gambar. Pola *honeycomb* dibedakan berdasarkan ukuran sel dan tingkat kerapatan, yang selanjutnya diberi kode sebagai pola *honeycomb* 1, pola *honeycomb* 2, pola *honeycomb* 3 dan pola 4.



Gambar 1. Pola Honeycomb 1



Gambar 2. Pola Honeycomb 2



Gambar 3. Pola Honeycomb 3



Gambar 4. Pola 4

Tabel 1. Parameter Geometri Variasi Pola *Honeycomb* pada Spesimen *rPET*

Variasi pola	Ukuran Sel(mm)	Ketebalan Dinding Sel(mm)	Infil Density(%)	Keterangan
Pola 1	3	1	100	Honeycomp rapat
Pola 2	1	1	100	Honeycomp renggang
Pola 3	1	1	100	Honeycomp Sedang
Pola 4	-	-	100	Struktur Padat

Keempat pola seperti pada [Gambar 1](#), [Gambar 2](#), [Gambar 3](#), [Gambar 4](#), dan [Tabel 1](#) tersebut digunakan sebagai variabel bebas untuk mengevaluasi pengaruh desain struktur internal terhadap kekuatan uji impak dan karakteristik struktur makro filamen *rPET*. Pengendalian parameter proses dilakukan untuk meminimalkan pengaruh variabel luar terhadap hasil pengujian.

Pengujian impak dilakukan sesuai standar ASTM D256 untuk memperoleh nilai energi serap dan kekuatan impak. Data hasil pengujian dianalisis secara deskriptif dan komparatif untuk mengidentifikasi pengaruh variasi pola *honeycomb* terhadap kekuatan mekanik filamen *rPET*.

Alat dan Bahan

Alat

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

1. Kompor Portable
2. *FilaCutter*
3. Filamini
4. 3D Printer *Creality Ender 3 V3 KE*
5. *Pendulum Impact Tester* (GT-7045-MD)

Bahan

Bahan penelitian ini adalah limbah botol PET ukuran 1,5 liter, seperti yang ditunjukkan pada [Gambar 5](#). Limbah ini dipilih karena melimpahnya ketersediaannya di lingkungan dan potensinya untuk daur ulang menjadi bahan baku bernilai tambah, mendukung ekonomi sirkuler dan pengurangan limbah plastik. Botol PET mudah dipilah dan didaur ulang secara mekanik maupun kimia, serta memiliki komposisi mono-material yang memungkinkan pengolahan ulang menjadi produk baru. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa strategi daur ulang PET dapat memperkuat keberlanjutan dan efisiensi sumber daya dalam manajemen limbah plastik [18], [19].



Gambar 5. Botol PET 1,5 Liter

Proses Penelitian

Pembuatan Filamen *rPET*

Botol PET ukuran 1,5 liter seperti [Gambar 5](#) dikumpulkan lalu dibersihkan kotoran serta labelnya. Kemudian botol di isi sedikit air lalu dipanaskan menggunakan Kompor Portable untuk menghilangkan lekukan yang ada pada botol seperti pada [Gambar 6](#).



Gambar 6. Kompor Portable

Setelah itu dibuat strip dengan lebar 10 mm menggunakan alat *Fila Cutter* seperti pada [Gambar 7](#). Strip yang sudah jadi dimasukkan ke Filamini dengan suhu *nozzle* 215°C dan dicetak menjadi filamen berdiameter 1,75 mm. Filamen hasil ekstrusi digulung secara otomatis menggunakan Filamini dengan kecepatan gulungan 4 seperti pada [Gambar 8](#) dan [Gambar 9](#).



Gambar 7. Fila Cutter



Gambar 8. Filamini



Gambar 9. Filamen rPET

Pencetakan Spesimen Uji Impak

Spesimen uji impact dicetak menggunakan 3D Printer *Crealty Ender 3 V3 KE* seperti pada Gambar 10, dengan parameter sebagai berikut:

- Layer Height: 0,2 mm
- Ukuran Nozzle: 0,4 mm
- Suhu Nozzle: 260°C
- Suhu Bed: 90°C
- Print Speed: 100 mm/s

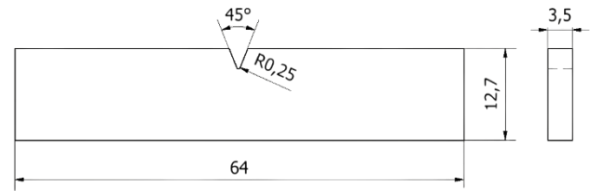


Gambar 10. 3D Printer Crealty Ender 3 V3 KE

Prosedur Pengujian

Uji Impak (ASTM D256)

Pengujian impact dilakukan dengan metode *Izod Pendulum Test* sesuai standar ASTM D256. Spesimen diuji menggunakan *Pendulum Impact Tester* (GT-7045-MD) dengan cara menjatuhkan beban dari ketinggian tertentu untuk memukul spesimen yang telah diberi takik (Gambar 11).



(a)



(b)

Gambar 11. (a) Sketsa Gambar Spesimen Uji Impak dan (b) Pendulum Impact Tester (GT-7045-MD)

Energi yang diserap selama proses patahan spesimen uji tercatat dalam satuan Joule. *Impact Strength* dihitung menggunakan persamaan (1) [19].

Rumus:

$$\text{Impact Strength} = \frac{E}{b \cdot d} \quad (1)$$

Keterangan:

- E = Energi Serap (Joule)
- b = Lebar Spesimen (mm)
- d = Tebal Spesimen (mm)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian Impact

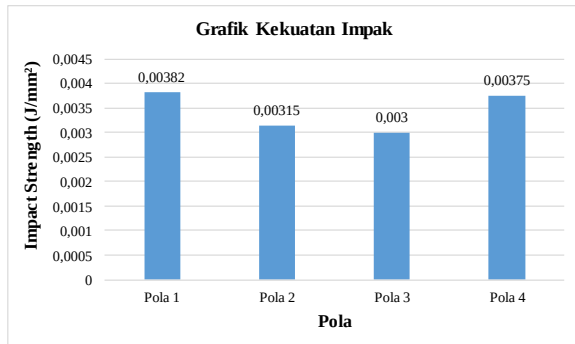
Energi serap impact dicatat dari perbedaan energi pendulum sebelum dan sesudah spesimen mengalami patah. Nilai kekuatan impact dihitung dengan membagi energi serap terhadap luas penampang spesimen. Setiap variasi pola *honeycomb* diuji tiga spesimen untuk memperoleh nilai rata-rata [20].

Pengolahan Data Uji Impact

Data hasil pengujian impact disajikan dalam bentuk tabel dan grafik untuk memudahkan analisis perbandingan antar variasi pola *honeycomb*. Nilai yang dianalisis yaitu kekuatan impact rata-rata. Analisis numerik dilakukan untuk mengidentifikasi kecenderungan pengaruh ukuran sel dan orientasi pola terhadap performa mekanik filamen *rPET*.

Tabel 2. Hasil Kekuatan Impak Rata-rata

Pola	Impact Strength J/mm ²
Pola 1	0,00382
Pola 2	0,00315
Pola 3	0,003
Pola 4	0,00375



Gambar 12. Grafik Kekuatan Impak Rata-rata

Hasil pengujian impak disajikan pada Tabel 2 yang menunjukkan nilai kekuatan impak rata-rata untuk setiap variasi pola *honeycomb*. Berdasarkan data tersebut, terlihat bahwa spesimen dengan pola *honeycomb* 1 memiliki nilai kekuatan impak tertinggi. Grafik hubungan antara variasi pola *honeycomb* dan kekuatan impak ditunjukkan pada Gambar 12.

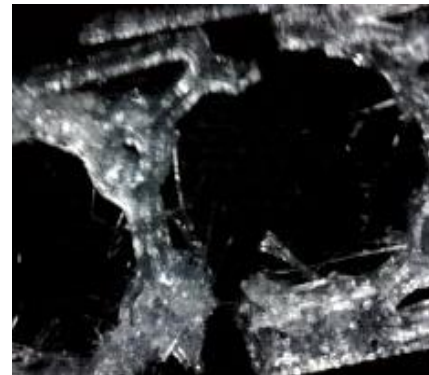
Analisis Struktur Makro

Pengamatan struktur makro dilakukan pada permukaan patahan spesimen setelah uji impak. Pada Gambar 13 (pola *honeycomb* 1), permukaan patahan menunjukkan sel yang relatif seragam dengan dinding sel masih terlihat utuh. Retak cenderung berkembang mengikuti jalur antar sel, menandakan distribusi tegangan yang lebih merata dan kemampuan struktur internal dalam menyerap energi impak sebelum kegagalan total. Karakteristik ini mengindikasikan mekanisme patahan yang lebih ulet.



Gambar 13. Permukaan Patahan Makro Filamen rPET Pola *Honeycomb* 1

Berbeda dengan itu, Gambar 14 (pola *honeycomb* 2) memperlihatkan permukaan patahan yang lebih tidak beraturan dengan adanya rongga yang lebih besar dan dinding sel yang terputus secara tidak seragam. Kondisi ini mengindikasikan terjadinya konsentrasi tegangan pada area tertentu, sehingga retak berkembang lebih cepat tanpa deformasi plastis yang signifikan. Fenomena ini menunjukkan penurunan kemampuan struktur *honeycomb* dalam menyerap energi impak secara efektif.



Gambar 14. Permukaan Patahan Makro Filamen rPET Pola *Honeycomb* 2

Pada Gambar 15 (pola *honeycomb* 3), permukaan patahan tampak lebih kasar dengan banyak rongga kecil dan dinding sel yang mengalami robekan tidak merata. Tekstur patahan yang lebih kasar mengindikasikan terjadinya mekanisme patahan campuran antara getas dan ulet. Hal ini menunjukkan bahwa sebagian energi impak diserap melalui deformasi lokal, namun distribusi beban yang kurang optimal menyebabkan kegagalan terjadi pada beberapa titik kritis dalam struktur internal.



Gambar 15. Permukaan Patahan Makro Filamen rPET Pola *Honeycomb* 3

Sementara itu, Gambar 16 (pola 4) menunjukkan permukaan patahan yang relatif lebih rata dan bersih dengan garis retak utama yang jelas. Karakteristik ini mengindikasikan mekanisme patahan yang cenderung getas, di mana retak berkembang secara cepat tanpa deformasi plastis yang signifikan. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa konfigurasi pola 4 pada spesimen ini

kurang efektif dalam mendistribusikan beban impact, sehingga kemampuan serap energi menjadi lebih rendah.



Gambar 16. Permukaan Patahan Makro Filamen rPET dengan Pola

Secara keseluruhan, hasil analisis struktur makro menunjukkan bahwa variasi pola *honeycomb* memberikan pengaruh yang nyata terhadap mekanisme patahan spesimen *rPET* hasil cetak 3D. Pola *honeycomb* dengan distribusi sel yang lebih seragam dan dinding sel yang relatif kontinu cenderung menghasilkan patahan yang lebih ulet dan kemampuan serap energi impact yang lebih baik. Sebaliknya, pola dengan ketidakteraturan sel atau konsentrasi rongga yang tinggi menunjukkan kecenderungan patahan getas dan penurunan kekuatan impact. Temuan ini menguatkan bahwa optimasi desain struktur internal merupakan faktor penting dalam meningkatkan performa mekanik filamen *rPET* pada aplikasi manufaktur aditif.

Ucapan Terima Kasih

Puji dan syukur ke hadirat Allah SWT atas rahmat dan karunia-Nya sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dan berjalan dengan lancar. Penulis mengucapkan terima kasih kepada Jurusan Teknik Mesin Universitas Negeri Semarang atas fasilitas laboratorium dan sarana pendukung yang diberikan. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada dosen pembimbing atas bimbingan, arahan, dan masukan yang sangat berharga selama pelaksanaan penelitian, serta seluruh pihak yang telah membantu dan berkontribusi dalam pelaksanaan penelitian ini.

PENUTUP

Simpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa variasi pola *honeycomb* berpengaruh terhadap kekuatan impact spesimen 3D *printing* berbahan filamen *rPET* dari botol plastik daur ulang. Pola *honeycomb* 1 menghasilkan nilai kekuatan impact cenderung lebih tinggi sebesar 0,00382 J/mm², diikuti pola 4 sebesar 0,00375 J/mm², yang menunjukkan kemampuan struktur internal dalam mendistribusikan beban dan menyerap energi impact secara

lebih efektif. Analisis struktur makro permukaan patahan menunjukkan bahwa pola dengan sel yang lebih seragam dan dinding sel yang relatif kontinu cenderung menghasilkan mekanisme patahan yang lebih ulet. Sebaliknya, pola *honeycomb* dengan ketidakteraturan sel atau konsentrasi rongga yang tinggi menunjukkan kecenderungan patahan getas dan nilai kekuatan impact yang lebih rendah. Hasil ini menegaskan bahwa desain struktur internal merupakan faktor penting dalam peningkatan performa mekanik material *rPET* hasil cetak 3D.

Saran

Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengkaji pengaruh variasi parameter pencetakan lainnya, seperti densitas *infill*, orientasi pencetakan, dan ketebalan layer, terhadap sifat mekanik filamen *rPET*. Selain itu, pengamatan struktur mikro menggunakan mikroskop optik atau SEM dapat dilakukan untuk memperoleh pemahaman yang lebih mendalam mengenai mekanisme patahan. Pengujian sifat mekanik lainnya, seperti uji tarik dan uji bending juga perlu dilakukan guna mengevaluasi kelayakan filamen *rPET* untuk aplikasi struktural yang lebih luas.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] W. Putri, P. Sari, A. W. Fathiyaturahma, I. P. Jati, and A. Putra, "Recycle Botol Plastik Polyethylene Terephthalate (PET) Menjadi Serat Nilon sebagai Perwujudan Sustainable Development dengan Prinsip Green Chemistry : A Review," *J. Ilmu Lingkung.*, vol. 23, no. 3, pp. 638–646, 2025, doi: [10.14710/jil.23.3.638-646](https://doi.org/10.14710/jil.23.3.638-646).
- [2] K. Bocz, F. Ronkay, L. Toth, and E. Slez, "Progress in 3D printing of recycled PET," *Mater. Today Sustain. J.*, vol. 26, 2024, doi: [10.1016/j.mtsust.2024.100757](https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2024.100757).
- [3] H. S. 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: <https://doi.org/10.37339/e-komtek.v8i1.1725>.
- [4] 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)*., vol. 14, p. 5138, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/polym14235138>.
- [5] M. I. Nuryanta *et al.*, "The effect of stacking sequence on the properties of hybrid agel / glass fiber reinforced polymer composite laminates 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, p. 012014, 2024, doi: [10.1088/1755-1315/1381/1/012014](https://doi.org/10.1088/1755-1315/1381/1/012014).
- [6] S. M. Mawaddah, M. Chalid, S. A. Maulidina, C. K. Ashanti, and A. F. Nugraha, “Post-Consumer Recycling of Polymers for Sustainable 3D Printing Filament Material,” *J. Sains Mater. Indones.*, vol. 25, no. 1, 2023, doi: [10.55981/jsmi.707](https://doi.org/10.55981/jsmi.707).
- [7] V. Dohan, S. Galatanu, and L. Marsavina, “Mechanical evaluation of recycled PETG filament for 3D printing,” *Frat. ed Integrità Strutt.*, vol. 70, pp. 310–321, 2024, doi: [10.3221/IGF-ESIS.70.18](https://doi.org/10.3221/IGF-ESIS.70.18).
- [8] C. Popa, M. Mărghițaș, S. Galațanu, and L. Marșavina, “Influence of thickness on the IZOD impact strength of FDM printed specimens from PLA and PETG” *Procedia Struct. Integr.*, vol. 41, pp. 557–563, 2022, doi: [10.1016/j.prostr.2022.05.064](https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.05.064).
- [9] S. E. Y. Wijayanto, R. Handoko, J. C. Noel, and T. W. Anggawirawan, “Identifikasi Jenis Infill Pattern Pada Proses 3d Printing Yang Menghasilkan Hasil Cetak Dengan Kekuatan Tekan Dan Panjang Filamen Yang Optimal,” *Rekayasa Mesin*, vol. 13, pp. 531–539, 2022, doi: <https://doi.org/10.21776/jrm.v13i2.1097>.
- [10] M. Naik, “Experimental investigation of effect of printing parameters on impact strength of the bio-inspired 3D printed specimen,” *Sādhanā*, vol. 0123456789, 2021, doi: [10.1007/s12046-021-01671-8](https://doi.org/10.1007/s12046-021-01671-8).
- [11] K. Çava and M. Aslan, “Investigating And Mechanical Performance Of 3d Printed Recycled Pet With Pla And Tpu Hybrid Additives Investigating Printability And Mechanical Performance Of 3d Printed Recycled Pet With Pla And,” *Int. J. 3D Print. Tech. Dig. Ind*, vol. 7, no. 2, pp. 252–258, 2023, doi: [10.46519/ij3dptdi.1324777](https://doi.org/10.46519/ij3dptdi.1324777).
- [12] N. Ranjan, M. Hadi, E. Sapana, J. Mohammad, and A. Y. Thiagarajan, “Fused deposition modelling approach using 3D printing and recycled industrial materials for a sustainable environment: a review,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, pp. 2125–2138, 2022, doi: [10.1007/s00170-022-10048-y](https://doi.org/10.1007/s00170-022-10048-y).
- [13] A. Al Rashid and M. Koç, “3D-Printed recycled polyethylene terephthalate (PET) sandwich structures e Influence of in fi ll 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.jlmm.2025.03.001](https://doi.org/10.1016/j.jlmm.2025.03.001).
- [14] A. P. Aulia, A. Syaifudin, and I. Novianto, “Optimasi Produksi Filamen 3D dari Sampah Plastik : Studi Eksperimental Suhu Heater,” *Techné J. Ilm. Elektrotek.*, vol. 23, no. 2, pp. 245–256, 2024.
- [15] 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](https://doi.org/10.35970/infotekmesin.v16i1.2467).
- [16] D. Hermawansyah, R. D. Widodo, and M. I. Nuryanta, “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,” *J-Proteksion J. Kaji. Ilm. dan Teknol. Tek. Mesin*, vol. 10, no. 10, 2025, doi: [10.32528/jp.v10i1.3807](https://doi.org/10.32528/jp.v10i1.3807).
- [17] R. E. P. U, A. F. Hanafi, and A. Finali, “Pengaruh Prosentase Infill pada Proses 3D Printing FDM terhadap Sifat Mekanik,” *J-Proteksion J. Kaji. Ilm. dan Teknol. Tek. Mesin*, vol. 6, no. 1, pp. 4–7, 2021.
- [18] P. Benyathiar, P. Kumar, G. Carpenter, J. Brace, and D. K. Mishra, “Polyethylene Terephthalate (PET) Bottle-to-Bottle Recycling for the Beverage Industry : A Review,” *Polymers (Basel)*, vol. 14, p. 2366, 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/polym14122366>.
- [19] D. P. Muhammad, R. D. Widodo, and M. I. Nuryanta, “Pengaruh Infill Patern dan Layer Layerthickness terhadap Kekuatan Impact, Bending, dan Densitas menggunakan Filamen dari Botol Plastik Bekas Influence,” *J-Proteksion J. Kaji. Ilm. dan Teknol. Tek. Mesin*, vol. 10, no. 1, pp. 91–100, 2025, doi: [10.32528/jp.v10i1.3756](https://doi.org/10.32528/jp.v10i1.3756).
- [20] M. A. Syahrezi, R. D. Widodo, and M. I. Nuryanta, “Analisis Pengaruh Lebar Potongan Strip terhadap Fabrikasi Filamen dan Karakterisasi Mekanis Hasil Cetak 3D Printing,” *J-Proteksion J. Kaji. Ilm. dan Teknol. Tek. Mesin*, vol. 10, no. 1, 2025, doi: [10.32528/jp.v10i1.3729](https://doi.org/10.32528/jp.v10i1.3729).