

Potensi Limbah Tutup Botol Kemasan sebagai Media 3D Printing Ramah Lingkungan

Elviana*, Supardianningsih, Dimas Bayu Pinandoyo

Politeknik Negeri Media Kreatif, Indonesia

Email: elviana@polimedia.ac.id, supardianningsih@polimedia.ac.id,
dimas.pinandoyo@polimedia.ac.id

Abstrak

Article Info:

Submitted:

28-04-2025

Final Revised:

17-05-2025

Accepted:

19-05-2025

Published:

23-05-2025

Indonesia adalah salah satu konsumen plastik terbesar, khususnya untuk kemasan minuman, yang berkontribusi signifikan terhadap pencemaran lingkungan. Tutup botol, yang terbuat dari High Density Polyethylene (HDPE), sering dibuang dan kurang dimanfaatkan dalam upaya daur ulang. Penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi potensi tutup botol HDPE daur ulang sebagai bahan baku filamen cetak 3D yang ramah lingkungan. Penelitian ini dilakukan secara eksperimental selama enam bulan di Politeknik Negeri Media Kreatif. Tutup botol HDPE disortir, disterilkan, digiling, dan dikombinasikan dengan resin HDPE dalam empat formulasi (tutup botol 25%, 50%, 75%, dan 100%). Bahan tersebut diproses melalui ekstrusi dan diuji karakteristik termal menggunakan metode DSC dan TGA. Filamen yang dihasilkan diukur untuk konsistensi diameter dan diuji melalui uji coba pencetakan 3D yang sebenarnya. Formulasi tutup botol 75% menunjukkan karakteristik yang paling optimal, menghasilkan filamen dengan diameter dan panjang yang konsisten (1,75–2,5 mm), memenuhi standar industri. Uji termal menunjukkan peningkatan titik leleh dan penyerapan energi yang lebih tinggi karena peningkatan kristalinitas. Meskipun kebutuhan energi lebih tinggi, filamen yang dihasilkan terbukti layak untuk aplikasi pencetakan 3D. Studi ini menegaskan bahwa tutup botol HDPE memiliki potensi yang kuat sebagai bahan alternatif untuk filamen pencetakan 3D, mempromosikan praktik ekonomi sirkular. Penelitian di masa depan harus fokus pada pengoptimalan efisiensi energi, pengujian sifat mekanik, dan produksi yang dapat diskalakan untuk aplikasi industri yang lebih luas.

Kata kunci: Limbah tutup botol kemasan, 3D printing, Potensi limbah

Abstract

Indonesia is one of the largest plastic consumers, particularly for beverage packaging, contributing significantly to environmental pollution. Bottle caps, made from High Density Polyethylene (HDPE), are often discarded and underutilized in recycling efforts. This study aims to explore the potential of recycled HDPE bottle caps as a raw material for environmentally friendly 3D printing filaments. The research was conducted experimentally over six months at Politeknik Negeri Media Kreatif. HDPE bottle caps were sorted, sterilized, ground, and combined with HDPE resin in four formulations (25%, 50%, 75%, and 100% bottle caps). The materials were processed through extrusion and tested for thermal characteristics using DSC and TGA methods. The resulting filaments were measured for diameter consistency and tested through actual 3D printing trials. The 75% bottle cap formulation demonstrated

the most optimal characteristics, producing filaments with consistent diameter (1.75–2.5 mm) and length, meeting industry standards. Thermal tests showed an increased melting point and higher energy absorption due to increased crystallinity. Despite higher energy requirements, the resulting filament proved feasible for 3D printing applications. The study confirms that HDPE bottle caps have strong potential as an alternative material for 3D printing filaments, promoting circular economy practices. Future research should focus on energy efficiency optimization, mechanical property testing, and scalable production for broader industrial application.

Keywords: Waste bottle cap packaging, 3D printing, Potential waste

Corresponding: Elviana

E-mail: elviana@polimedia.ac.id



PENDAHULUAN

Konsumsi plastik di Indonesia menempati urutan kelima sektor usaha penyumbang output manufaktur (Danareksa Research Institute, 2023). Menurut riset yang dilakukan oleh Danareksa Research Institute (2023), sebagian besar penggunaan plastic di Indonesia digunakan untuk kemasan (34.88%), dan digunakan untuk kemasan air mineral. Penggunaan plastik sebagai kemasan masih menjadi primadona karena materialnya ringan, tahan lama, dan ekonomis. Besarnya konsumsi plastik, berbanding lurus dengan permasalahan lingkungan (Eni et al., 2020). Limbah plastik yang tidak terolah dengan baik dapat mencemari lingkungan, berbahaya bagi kesehatan manusia dan mengganggu ekosistem lingkungan (Marfufah dan Ngazizah, 2024).

Polyethylene Terephthalate (PET) merupakan material yang banyak digunakan untuk badan kemasan air mineral karena bahannya ringan dan tahan lama (Benyathiar et al., 2022; Nisticò, 2020). Oleh karena sifat materialnya, limbah tersebut sulit terurai di alam. Namun, berbagai upaya telah dilakukan untuk mendaur ulang material tersebut sehingga memiliki nilai tambah. Bagian kemasan air mineral yang sering terlupakan adalah tutup botol. Umumnya, tutup botol kemasan air mineral terbuat dari material High Density Polyethylene (HDPE) bersifat keras, ringan, dan tahan panas. Tutup botol seringkali dibuang begitu saja, padahal berpotensi untuk menjadi produk kreatif yang memiliki nilai tambah (Marfufah dan Ngazizah, 2024).

Salah satu daur ulang plastik yang dapat dilakukan adalah mengubahnya menjadi 3D printing. Teknologi 3D printing memungkinkan perusahaan membuat purwarupa tanpa menghabiskan banyak bahan baku atau material (Rahman et al., 2019). Selain itu, limbah yang dihasilkan dari 3D printing bukanlah permasalahan besar, dan teknologi ini dapat digunakan untuk tetap bersaing seiring dengan perkembangan zaman (Cruz Sanchez et al., 2017).

Filamen 3D printing merupakan bahan termoplastik berbentuk gulungan yang umumnya tersedia dalam dua ukuran standar, yaitu 1.75 mm dan 2.85 mm. Acrylonitrile butadiene styrene (ABS) dan Polylactic acid (PLA) adalah jenis termoplastik yang paling umum digunakan dalam 3D printing. Penggunaan material daur ulang dari tutup botol, baik secara keseluruhan maupun dengan mencampurkannya dengan termoplastik yang sudah umum digunakan, diharapkan dapat menjadi alternatif media cetak ramah lingkungan. Selain membantu mengurangi limbah, penggunaan material daur ulang ini

juga bertujuan untuk mengurangi ketergantungan pada plastik baru dalam produksi 3D printing.

Secara keseluruhan, pembuatan filamen dari plastik bekas telah berkontribusi dalam mengurangi pencemaran sekaligus meningkatkan nilai ekonomi limbah plastik (Mikula et al., 2021). Proses ini memerlukan tambahan panas agar lebih mudah diolah. Untuk memahami perubahan suhu dan kecepatan perpindahan panas dalam suatu material, perlu diketahui konduktivitas termalnya. Konduktivitas termal sendiri merujuk pada kemampuan suatu bahan dalam menghantarkan panas dari satu titik ke titik lainnya.

Pembuatan filamen 3D printing dilakukan dengan metode ekstrusi. Salah satu keunggulan metode ini adalah lebih ramah lingkungan, hemat biaya, dan memungkinkan pembuatan produk yang dapat disesuaikan dengan kebutuhan (Dries Vaes et al., 2020). Teknologi ekstrusi sendiri merupakan proses pembentukan material dengan cara memanaskannya hingga mencapai titik leleh, lalu mendorongnya ke dalam cetakan menggunakan screw untuk menghasilkan material berbentuk silinder sesuai dengan lubang cetakan (die) (Marthana et al., 2020).

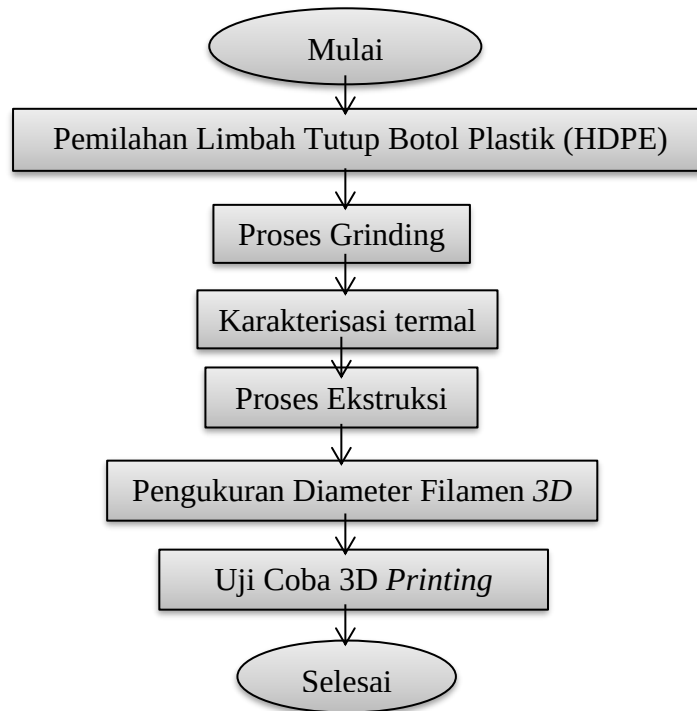
Karakteristik termal, terutama titik leleh, berperan penting dalam proses ekstrusi. Titik leleh HDPE berkisar 200oC-280oC sehingga suhu nozzle diatur pada range tersebut. Penentuan karakteristik termal ini digunakan untuk memastikan hasil lelehan mesin ekstrusi lebih efisien dalam menghasilkan filamen 3D printing. Suryadi et al. (2022) menyatakan bahwa titik leleh (*melting point*) menjadi acuan utama dalam pengaturan suhu selama proses ekstrusi bahan menjadi filamen 3D printing.

Filamen 3D printing yang berbahan dasar limbah plastik menjadi salah satu solusi bagi industri manufaktur dalam mengurangi jumlah sampah plastik yang semakin meningkat (Chandra et al., 2022). Oleh karena itu, penelitian ini berfokus pada potensi daur ulang limbah tutup botol, karakterisasi termal, serta ujicoba filamen menjadi produk 3D. Diharapkan penelitian ini dapat membantu mengatasi permasalahan limbah plastik saat ini.

Penelitian ini menghadirkan kebaruan dengan memanfaatkan tutup botol kemasan air mineral berbahan HDPE sebagai bahan baku utama filamen 3D printing, yang sebelumnya belum banyak diteliti secara spesifik. Penelitian terdahulu seperti oleh Elviana et al. (2022) lebih memfokuskan pada limbah masker sekali pakai sebagai bahan baku filamen 3D, sedangkan Subramani et al. (2024) menekankan penggunaan bahan biodegradable yang memerlukan teknologi dan biaya tinggi dalam pengolahannya. Sebaliknya, penelitian ini tidak hanya memanfaatkan limbah plastik yang lebih mudah dijangkau dan murah, tetapi juga menguji karakteristik termal (*melting point* dan energi pelelehan) secara rinci, serta keberhasilan pencetakan filamen dalam mesin 3D printer standar. Dengan menghasilkan formulasi optimal (75% tutup botol + 25% resin HDPE) yang memiliki diameter dan panjang filamen konsisten, penelitian ini menawarkan solusi daur ulang yang layak secara teknis dan ekonomis, sekaligus memberikan kontribusi pada pengurangan limbah plastik.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan di Politeknik Negeri Media Kreatif selama 6 bulan menggunakan metode eksperimen. Berikut adalah tahapan dalam penelitian ini:



1. Pemilahan Limbah Tutup Botol Plastik (HDPE)

Pengumpulan limbah botol bekas dan tutupnya dilakukan di lingkungan kampus dengan mengajak seluruh civitas kampus untuk mengumpulkan botol bekas beserta tutupnya. Selain itu melakukan Kerjasama dengan pengepul sampah di sekitar kampus. Proses strelisasi pada botol dilakukan dengan cara dicuci dengan sabun dan dibilas dengan aquades, kemudian di potong-potong dicuci kembali dengan aquades kemudian dipanaskan dalam oven selama tiga menit pada suhu 30oC (Okatama, 2017).



Gambar 1 Proses pengumpulan limbah tutup kemasan air mineral

2. Proses Grinding

Tutup Botol plastik kemudian digiling menggunakan crusher hingga menjadi potongan kecil berukuran sekitar 10-20 mm. Potongan kecil tutup botol plastik kemudian dicampurkan resin HDPE. Komposisi campuran bahan dimasukkan ke dalam twin-screw extruder menghasilkan bijih plastik berbentuk granul, kemudian dicetak dengan metode injection moulding dengan pemanasan 5 zona ($120^{\circ}\text{C} - 200^{\circ}\text{C}$). Prototipe filamen dibuat berupa benang dengan diameter 1.75 mm menggunakan filament extruder.



Gambar 2. Proses grinding

2. Karakteristik Termal

Karakterisasi termal dilakukan melalui pengujian Thermogravimetric Analysis (TGA). Teknik ini menganalisis massa suatu zat dibandingkan dengan factor suhu dan waktu. Hasil dari pengujian ini berupa grafik yang menunjukkan perubahan berat sampel terhadap peningkatan suhu. Ketika suhu meningkat, massa material berkurang karena perubahan suhu sehingga Sebagian material terdekomposisi (Escalante et al., 2022). Berat sample mulai dari 1 sampai 150 mg. Berat cuplikan yang biasa digunakan adalah 25 mg, tetapi hasilnya akan sempurna ketika sample yang digunakan sebesar 1 mg. Range suhu yang digunakan pada analisis adalah 25°C sampai 1500°C . Analisis TGA digunakan untuk menentukan panas atau kestabilan bahan oksidatif serta sifat komposisi. Pengujian ini dilakukan terutama untuk mempelajari bahan polimer, termasuk termoplastik, termoset, elastomer, komposit, film, serat, pelapis dan cat.

3. Proses Ekstruksi

Fused Deposition Modelling (FDM) merupakan salah satu teknik yang digunakan dalam 3D Printing (He et al., 2016; Kristiawan et al., 2021; Mwema & Akinlabi, 2020; Sain & Gupta, 2022; Wasti & Adhikari, 2020). Teknik ini bekerja berdasarkan prinsip manufaktur aditif. Manufaktur aditif adalah proses pembuatan produk 3D dengan menambahkan banyak lapisan dari berbagai material (Mohammed et al., 2021; Noorani, 2017). Umumnya, filamen plastik yang digunakan dalam FDM adalah acrylonitrile butadiene styrene (ABS), polylactic acid (PLA), polycarbonate (PC), polyamide (PA),

polystyrene (PS), dan lain-lain. Filamen yang digunakan dalam produksi 3D Print memiliki harga yang tinggi dan umumnya tidak diproduksi secara local (lebih sering diimpor). Mesin ekstruder dikembangkan untuk menekan biaya produksi dan menghasilkan filamen yang berdiameter 1.75 mm (Nassar et al., 2019).



Gambar 3. Proses ekstrusi filamen

4. Pengukuran Diameter Filamen 3D Printing

Filamen 3D printing komersial yang digunakan saat ini berdiameter 1.75 –2.85 mm (Mikula et al., 2021). Beberapa filamen juga filamen berdiameter 0.5-3.0 mm. Tetapi, umumnya mesin 3D printing yang ada di pasaran mengakomodir filamen berdiameter 1.75 – 2.85 mm. Pengukuran diameter filamen menggunakan caliper.



Gambar 4. Pengukuran diameter filamen menggunakan caliper

5. Uji Coba 3D Printing

Mekanisme kerja mesin 3D Printing terbagi menjadi:

1. Pembuatan Model Objek 3D

Model objek 3D dibuat menggunakan software khusus untuk model desain 3D yang didukung oleh perangkat printer seperti solidwork, catia, autocad dan delcam.

2. Proses Printing

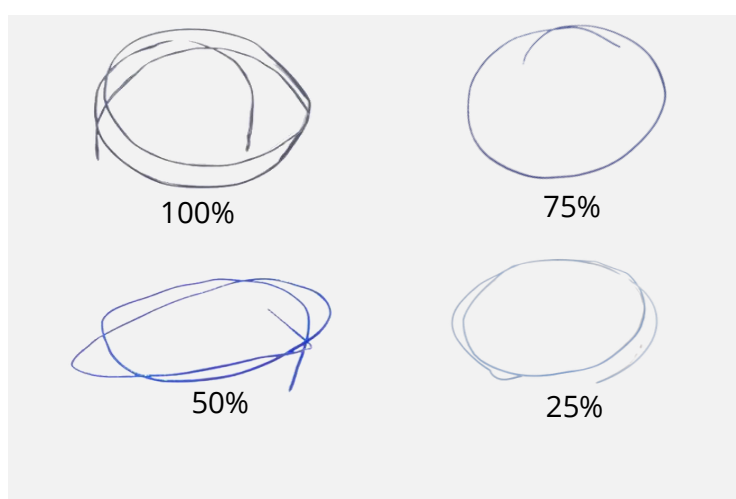
Setelah pembuatan desain 3D, proses printing dapat langsung dilakukan pada mesin printer 3D. Proses pencetakan ini tergantung dari besar dan ukuran model.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Material yang digunakan merupakan tutup kemasan air mineral berbahan HDPE. Setelah dilakukan proses grinding, material dibagi menjadi 4 formulasi. Formulasi tersebut bertujuan menghasilkan filamen dengan seifat mekanik yang optimal (Gregor-Svetec et al., 2020).

Tabel 1. Formulasi sample filamen

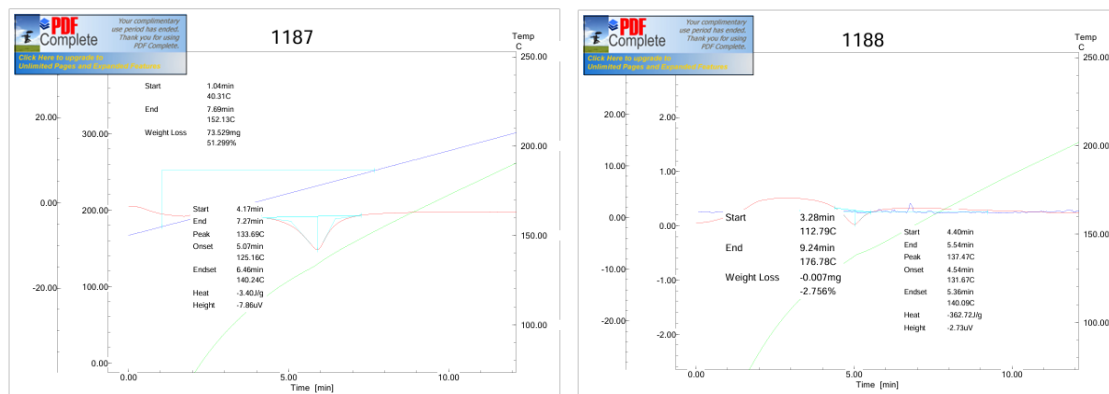
Sample	Formulasi
1	25 % tutup kemasan air mineral + 75% Resin HDPE
2	50 % tutup kemasan air mineral + 50% Resin HDPE
3	75 % tutup kemasan air mineral + 25% Resin HDPE
4	100 % tutup kemasan air mineral



Gambar 5. Formulasi sample

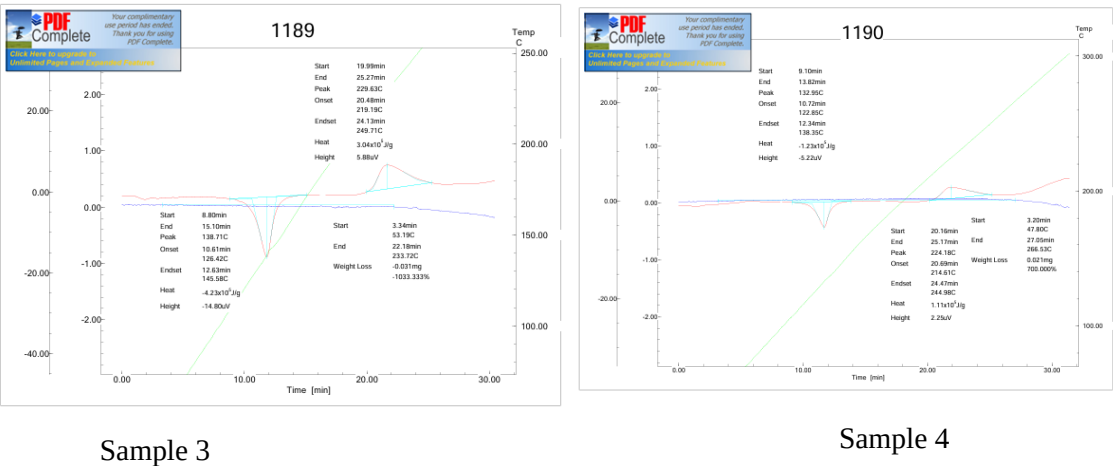
Karakteristik Termal

Pengujian Thermogravimetric Analysis (TGA) dilakukan untuk mengetahui karakteristik termal setiap sampel. Hasil pengujian TGA terhadap berbagai sampel ditunjukkan pada gambar berikut.



Sample 1

Sample 2



Gambar 6. Hasil Analisis DSC

Analisis differential scanning calorimetry (DSC) dilakukan untuk mengevaluasi perubahan termal dari berbagai material. Berdasarkan analisis DSC, titik leleh sample 1 berada pada suhu 133.69oC dengan rentang 125.16oC-140.24oC. Sample 1 mengalami degradasi termal pada suhu 256.25oC. Energi pelelehan yang dibutuhkan pada sample 1 sebesar -3.40 J/g. Titik leleh sample 2 berada pada suhu 137.47oC dengan rentang suhu 131.67oC-140.09oC. Energi yang dibutuhkan untuk pelelehan pada sample 2 sebesar -362.72 J/g. Apabila dibandingkan dengan sample 1, energi pelelehan yang dibutuhkan sample 2 lebih besar. Hal tersebut menunjukkan bahwa energi panas yang dibutuhkan untuk memutuskan struktur kristalin lebih besar, material bersifat kuat. Titik leleh pada sample 3 berada pada suhu 138.71°C dengan rentang 126.42–145.58°C. Energi yang dibutuhkan pada proses pelelehan sample 3 sebesar -423186.69 J/g. Proses pelelehan pada sample 4 berada pada suhu 132.95°C (rentang 122.85–138.35°C). Energi yang dibutuhkan pada proses pelelehan sample 3 sebesar -122640.00J/g. Berdasarkan hasil DSC diketahui bahwa penambahan resin ke dalam formulasi tutup botol mempengaruhi titik leleh dari sample. Semakin banyak tutup kemasan air mineral, titik leleh sample semakin tinggi. Tetapi cenderung menunjukkan ketidakstabilan termal. Menurut Mejia et al. (2020), titik leleh HDPE berkisar 130oC. Sejalan dengan hasil pengujian DSC semua sample formulasi. Energi yang dibutuhkan untuk proses pelelehan juga dipengaruhi oleh formulasi sample. Semakin banyak material pengisi, semakin tinggi derajat kristainitas, yang menunjukkan bahwa stabilitas filamen meningkat (Ayane, 2023; Tolcha & Woldemichael, 2023)

Pengukuran Diameter

Pengukuran diameter filamen dilakukan menggunakan caliper. Berdasarkan hasil pengukuran diketahui bahwa filamen dengan formulasi 75% tutup kemasan air mineral ditambah 25% resin HDPE memiliki diameter yang sesuai dengan diameter filamen yang ada di pasaran sebesar 1.75 mm. Konsistensi Panjang filamen yang dihasilkan dengan diameter yang seragam juga didapatkan pada formulasi tersebut.

Tabel 2. Pengukuran diameter dan konsistensi panjang filamen

Sample	Formulasi	Diameter	Konsistensi Panjang
--------	-----------	----------	---------------------

1	25 % tutup kemasan air mineral + 75% Resin HDPE	1.2 – 1.8 mm	Panjang filamen tidak konsisten
2	50 % tutup kemasan air mineral + 50% Resin HDPE	1.6 – 2.25 mm	Panjang filamen tidak konsisten
3	75 % tutup kemasan air mineral + 25% Resin HDPE	1.75 – 2.5 mm	1m
4	100 % tutup kemasan air mineral	Filamen yang dihasilkan bergelombang	Panjang filamen tidak konsisten

Uji Coba Cetak 3D Printing

Proses mencetak 3D printing dilakukan dengan proses yang sama untuk semua jenis formulasi. Untuk uji coba 3D printing menggunakan sample 3 (75% tutup kemasan air mineral + 25% resin HDPE) dikarenakan panjang filamen yang dihasilkan cukup konsisten sepanjang filamen. Diameter sample 2 sebagian berada di rentang standar industry, namun panjang fileman dengan diameter yang sama tidak konsisten.



Gambar 7. Hasil ujicoba 3D Printing

Potensi 3D Printing Berbahan Limbah terhadap Lingkungan

Berbagai penelitian dilakukan untuk mengolah limbah menjadi material 3D printing ramah lingkungan. Menurut Elviana et al. (2022), filamen berbahan limbah masker dapat menjadi material alternatif 3D Printing sekaligus berpeluang untuk mengurangi potensi pemanasan global. Subramani et al. (2024) menyatakan bahwa filamen berbahan biodegradable plastic berpotensi menjadi filamen 3D Printing lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan limbah plastik pada umumnya. Namun, untuk material baru tersebut juga memiliki tantangan dalam hal biaya dan tingkat kesulitan pengolahan karena penelitian material ini masih terbatas. Oleh karena itu, riset terkait material 3D Printing berbahan limbah perlu dilakukan.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, penambahan tutup kemasan air minum terbukti meningkatkan titik leleh produk dan energi panas yang diserap akibat kristalisasi yang lebih padat. Dari hasil uji coba 3D Printing, sample 3 menunjukkan hasil paling potensial dengan diameter dan panjang filamen yang seragam, meskipun memerlukan energi pelelehan yang cukup besar. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk

mengeksplorasi optimasi komposisi bahan guna menekan kebutuhan energi, melakukan analisis termal dan mekanik secara mendalam, serta menguji skalabilitas produksi massal. Penelitian juga dapat diarahkan pada efisiensi energi yang lebih ramah lingkungan dan pengujian langsung filamen pada pembuatan produk nyata guna menilai kelayakan aplikatifnya di industri.

DAFTAR PUSTKA

- Ayane, D. (2023). Development and Characterization of Short Glass Fiber Reinforced-Waste Plastic Composite Filaments for 3d Printing Applications. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4459139>
- Benyathiar, P., Kumar, P., Carpenter, G., Brace, J., & Mishra, D. K. (2022). Polyethylene Terephthalate (PET) Bottle-to-Bottle Recycling for the Beverage Industry: A Review. In *Polymers* (Vol. 14, Issue 12). <https://doi.org/10.3390/polym14122366>
- Cruz Sanchez, F. A., Boudaoud, H., Hoppe, S., & Camargo, M. (2017). Polymer recycling in an open-source additive manufacturing context: Mechanical issues. *Additive Manufacturing*, 17. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.05.013>
- Eni, S. P., Sudarwani, M. M., & Widati, G. (2020). Pemanfaatan Material Daur Ulang Untuk Pengembangan Karya Seni Dan Kerajinan Di Kelurahan Kebon Pala Kecamatan Makasar Jakarta Tim. *JURNAL ComunitÃ Servizio : Jurnal Terkait Kegiatan Pengabdian Kepada Masyarakat, Terkhusus Bidang Teknologi, Kewirausahaan Dan Sosial Kemasyarakatan*, 2(1). <https://doi.org/10.33541/cs.v2i1.1510>
- Escalante, J., Chen, W. H., Tabatabaei, M., Hoang, A. T., Kwon, E. E., Andrew Lin, K. Y., & Saravanakumar, A. (2022). Pyrolysis of lignocellulosic, algal, plastic, and other biomass wastes for biofuel production and circular bioeconomy: A review of thermogravimetric analysis (TGA) approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 169. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112914>
- Gregor-Svetec, D., Leskovšek, M., Vrabič Brodnjak, U., Stankovič Elesini, U., Muck, D., & Urbas, R. (2020). Characteristics of HDPE/cardboard dust 3D printable composite filaments. *Journal of Materials Processing Technology*, 276. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116379>
- He, D. L., Han, F. G., Wang, Z., & Liu, Q. F. (2016). A review of 3D printing via fused deposition modeling in pharmaceuticals. In *Yaoxue Xuebao* (Vol. 51, Issue 11). <https://doi.org/10.16438/j.0513-4870.2016-0360>
- Kristiawan, R. B., Imaduddin, F., Ariawan, D., Ubaidillah, & Arifin, Z. (2021). A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: Filament processing, materials, and printing parameters. In *Open Engineering* (Vol. 11, Issue 1). <https://doi.org/10.1515/eng-2021-0063>
- Marfufah, M. R., & Ngazizah, N. (2024). Proyek STEAM pemanfaatan limbah tutup botol plastik menjadi kerajinan vas bunga. *Jurnal Pendidikan Dasar*, 5(2), 54–62.
- Mejia, E. B., Al-Maqdi, S., Alkaabi, M., Alhammadi, A., Alkaabi, M., Cherupurakal, N., & Mourad, A. H. I. (2020). Upcycling of HDPE waste using additive manufacturing: Feasibility and challenges. *2020 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences, ASET 2020*. <https://doi.org/10.1109/ASET48392.2020.9118269>

- Mikula, K., Skrzypczak, D., Izydorczyk, G., Warchoń, J., Moustakas, K., Chojnacka, K., & Witek-Krowiak, A. (2021). 3D printing filament as a second life of waste plastics—a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(10). <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10657-8>
- Mohammed, A. A., Algahtani, M. S., Ahmad, M. Z., Ahmad, J., & Kotta, S. (2021). 3D Printing in medicine: Technology overview and drug delivery applications. *Annals of 3D Printed Medicine*, 4. <https://doi.org/10.1016/j.stlm.2021.100037>
- Mwema, F. M., & Akinlabi, E. T. (2020). Basics of Fused Deposition Modelling (FDM). In *SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-48259-6_1
- Nassar, M., El Farahaty, M., Ibrahim, S., & Hassan, Y. (2019). Design of 3D filament extruder for Fused Deposition Modeling (FDM) additive manufacturing. *International Design Journal*, 9(4). <https://doi.org/10.21608/idj.1999.82553>
- Nisticò, R. (2020). Polyethylene terephthalate (PET) in the packaging industry. In *Polymer Testing* (Vol. 90). <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106707>
- Noorani, R. (2017). 3D printing: Technology, applications, and selection. In *3D Printing: Technology, Applications, and Selection*. <https://doi.org/10.1201/b21228>
- Okatama, I. (2017). ANALISA PELEBURAN LIMBAH PLASTIK JENIS POLYETHYLENE TERPHTALATE (PET) MENJADI BIJI PLASTIK MELALUI PENGUJIAN ALAT PELEBUR PLASTIK. *Jurnal Teknik Mesin*, 5(3). <https://doi.org/10.22441/jtm.v5i3.1213>
- Sain, M., & Gupta, S. (2022). A Review on 3D Printing using Fused Deposition Modelling. *SKIT Research Journal*, 12(1). <https://doi.org/10.47904/ijskit.12.1.2022.71-76>
- Suryadi, G. S., Mawardi, C., Yakob, F., Grafika, J. T., Negeri, P., Kreatif, M., & Penerbitan, J. (2022). Kajian Potensi Pengembangan Daur Ulang Masker Sebagai Bahan Baku Filamen 3D Printing. *Seminar Nasional Terapan Riset Inovatif (SENTRINOV) Ke-8 ISAS Publishing Series: Engineering and Science*, 8(1).
- Tolcha, D. A., & Woldemichael, D. E. (2023). Development and characterization of short glass fiber reinforced-waste plastic composite filaments for 3D printing applications. *Heliyon*, 9(11). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e22333>
- Wasti, S., & Adhikari, S. (2020). Use of Biomaterials for 3D Printing by Fused Deposition Modeling Technique: A Review. In *Frontiers in Chemistry* (Vol. 8). <https://doi.org/10.3389/fchem.2020.00315>



© 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY SA) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)