

# Studi Komparatif Karakteristik Filamen 3D Printing Berbasis Polypropylene (PP) dan High-Density Polyethylene (HDPE) melalui Proses Ekstrusi

**Annisa Maulidia Damayanti<sup>1</sup>, Katiko Imamul Muttaqin<sup>2</sup>, Hanifa Shofia Balqis<sup>3</sup>**  
e-mail: [annisamd@poliban.ac.id](mailto:annisamd@poliban.ac.id), [katikoim@poliban.ac.id](mailto:katikoim@poliban.ac.id), [hanifashofia3@gmail.com](mailto:hanifashofia3@gmail.com)

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Banjarmasin, Banjarmasin 70123, Indonesia

<sup>2</sup>Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Banjarmasin, Banjarmasin 70123, Indonesia

<sup>3</sup>Jurusan Teknik Elektro, Universitas Islam Balitar, Blitar 66131, Indonesia

## Informasi Artikel

### Riwayat Artikel

Diterima 5 Agustus 2025

Direvisi 20 September 2025

Diterbitkan 30 September 2025

### Kata kunci:

Ekstrusi

Filamen 3D printing

Pelet polimer daur ulang

### Keywords:

Extrusion

3D printing filament

Recycled polymer pellets

## ABSTRAK

Perkembangan teknologi manufaktur aditif mendorong pemanfaatan material berbasis limbah plastik, seperti Polypropylene (PP) dan High-Density Polyethylene (HDPE), dalam bentuk pelet sebagai bahan baku filamen 3D printing. Namun, studi yang secara langsung membandingkan karakteristik filamen dari kedua material pada kondisi proses yang serupa masih terbatas. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara komparatif karakteristik filamen berbasis PP dan HDPE melalui proses ekstrusi. Metode yang digunakan adalah pendekatan eksperimental dengan variasi suhu dan kecepatan motor, serta pengukuran diameter, homogenitas, kekuatan, dan laju ekstrusi filamen. Hasil menunjukkan bahwa sistem bekerja stabil pada  $\geq 50$  PWM dengan deviasi suhu  $\pm 2^\circ\text{C}$ . PP menghasilkan diameter 1,15–1,75 mm dengan nilai optimal 1,75 mm pada  $160^\circ\text{C}$  dan 60 PWM serta laju ekstrusi lebih tinggi. HDPE menghasilkan diameter 1,10–2,05 mm dengan nilai optimal 1,77 mm pada  $170$ – $175^\circ\text{C}$  dan 70 PWM serta menunjukkan ketahanan yang baik. Perbedaan ini dipengaruhi oleh viskositas dan perilaku aliran material. PP lebih sesuai untuk kestabilan dimensi, sedangkan HDPE untuk kebutuhan kekuatan material.

## ABSTRACT

*The development of additive manufacturing has encouraged the use of alternative materials derived from plastic waste, such as Polypropylene (PP) and High-Density Polyethylene (HDPE) in pellet form, as raw materials for 3D printing filament. However, studies directly comparing the filament characteristics of these materials under similar processing conditions remain limited. This study aims to comparatively analyze the characteristics of filaments produced from PP and HDPE through an extrusion process. An experimental method was employed by varying extrusion temperature and motor speed, followed by measurements of filament diameter, homogeneity, strength, and extrusion rate. The results show that the system operates stably at  $\geq 50$  PWM with a temperature deviation of  $\pm 2^\circ\text{C}$ . PP produces a diameter range of 1.15–1.75 mm with an optimal value of 1.75 mm at  $160^\circ\text{C}$  and 60 PWM, along with a higher extrusion rate. HDPE produces a diameter range of 1.10–2.05 mm with an optimal value of 1.77 mm at  $170$ – $175^\circ\text{C}$  and 70 PWM and shows good durability. These differences are influenced by material viscosity and flow behavior. PP is more suitable for dimensional stability, while*



*HDPE is better suited for applications requiring material strength.*

**Penulis Korespondensi:**

Annisa Maulidia Damayanti,  
Jurusan Teknik Elektro,  
Politeknik Negeri Banjarmasin,  
Banjarmasin, Indonesia, 70123.  
Email: [annisamd@poliban.ac.id](mailto:annisamd@poliban.ac.id)  
Nomor HP/WA aktif: +62 85259924883

## 1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi manufaktur aditif telah membawa perubahan signifikan dalam proses produksi modern yang menuntut fleksibilitas, efisiensi, dan pengurangan limbah. Salah satu metode yang paling banyak digunakan adalah pencetakan 3D berbasis ekstrusi filamen, yang umumnya memanfaatkan material termoplastik seperti polylactic acid dan acrylonitrile butadiene styrene [1], [2]. Seiring dengan meningkatnya penggunaan material tersebut, permasalahan limbah plastik juga semakin menjadi perhatian, sehingga diperlukan alternatif bahan yang lebih berkelanjutan dan dapat dimanfaatkan kembali.

Salah satu pendekatan yang mulai banyak dikembangkan adalah penggunaan material plastik daur ulang dalam bentuk pelet sebagai bahan baku filamen. Polypropylene (PP) dan High-Density Polyethylene (HDPE) merupakan jenis plastik yang banyak ditemukan dalam limbah dan memiliki potensi untuk digunakan kembali dalam proses manufaktur aditif [3], [4]. Kedua material ini dikenal memiliki karakteristik yang berbeda, baik dari sisi sifat termal maupun mekanik, yang secara langsung mempengaruhi proses ekstrusi serta kualitas filamen yang dihasilkan.

Berbagai penelitian telah dilakukan untuk mengkaji penggunaan material PP dan HDPE dalam pencetakan 3D. Beberapa studi menyoroti pengaruh parameter proses terhadap kualitas filamen, seperti suhu dan kecepatan ekstrusi, yang berperan penting dalam menentukan stabilitas diameter dan kekuatan mekanik [8], [12]. Selain itu, penelitian lain menunjukkan bahwa material HDPE daur ulang memiliki potensi yang baik untuk digunakan sebagai bahan filamen dengan karakteristik yang cukup kuat dan stabil [11]. Pengembangan sistem ekstruder berbasis pelet juga telah dilakukan untuk meningkatkan efisiensi proses produksi filamen [6], [7]. Meskipun demikian, sebagian besar penelitian tersebut masih berfokus pada optimasi parameter proses atau karakteristik material secara terpisah. Pendekatan yang secara langsung membandingkan karakteristik filamen dari material PP dan HDPE, khususnya yang berasal dari pelet plastik daur ulang dalam kondisi proses yang serupa, masih terbatas. Padahal, pemahaman komparatif terhadap kedua material ini sangat penting untuk menentukan kesesuaian penggunaannya dalam berbagai kebutuhan manufaktur aditif.

Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis secara komparatif karakteristik filamen 3D printing berbasis Polypropylene (PP) dan High-Density Polyethylene (HDPE) yang diproduksi dari pelet polimer daur ulang melalui proses ekstrusi. Analisis dilakukan dengan mempertimbangkan parameter suhu dan kecepatan motor ekstruder, serta mengevaluasi hasil berdasarkan diameter, homogenitas, dan kekuatan filamen.

## 2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental untuk menganalisis secara komparatif karakteristik filamen 3D printing berbasis Polypropylene (PP) dan High-Density Polyethylene (HDPE) yang berasal dari pelet polimer daur ulang. Metode penelitian dilakukan secara bertahap, mulai dari perancangan sistem, pelaksanaan proses ekstrusi, hingga pengambilan dan analisis data.

### 2.1 Perancangan Sistem Ekstruder

Sistem ekstruder yang digunakan dalam penelitian ini merupakan integrasi antara sistem mekanik dan sistem kontrol berbasis mikrokontroler. Sistem mekanik terdiri dari hopper sebagai tempat masuknya pelet plastik,



tabung ekstrusi dengan screw sebagai pendorong material, heater sebagai elemen pemanas, serta nozzle sebagai pembentuk filamen. Sistem ini digerakkan oleh motor DC yang dikontrol kecepatan putarnya.

Sistem control dirancang menggunakan mikrokontroler Arduino yang berfungsi untuk mengatur suhu dan kecepatan motor secara terintegrasi. Pengukuran suhu dilakukan menggunakan sensor thermocouple yang ditempatkan pada area pemanas untuk memastikan kestabilan temperatur selama proses berlangsung[13]. Sementara itu, pengaturan kecepatan motor DC dilakukan menggunakan driver motor berbasis sinyal Pulse Width Modulation (PWM), sehingga kecepatan putar screw dapat disesuaikan dengan kebutuhan ekstrusi. Integrasi antara sistem mekanik dan sistem kontrol ini memungkinkan pengaturan parameter proses secara lebih presisi, sehingga diharapkan mampu menghasilkan filamen berbahan Polypropylene (PP) dan High-Density Polyethylene (HDPE) dengan diameter yang mendekati standar serta memiliki homogenitas dan kekuatan mekanik yang baik. Dengan demikian, sistem yang dirancang tidak hanya mampu bekerja secara stabil, tetapi juga mendukung analisis komparatif karakteristik filamen dari kedua jenis material tersebut.

## 2.2 Implementasi Alat Ekstruder

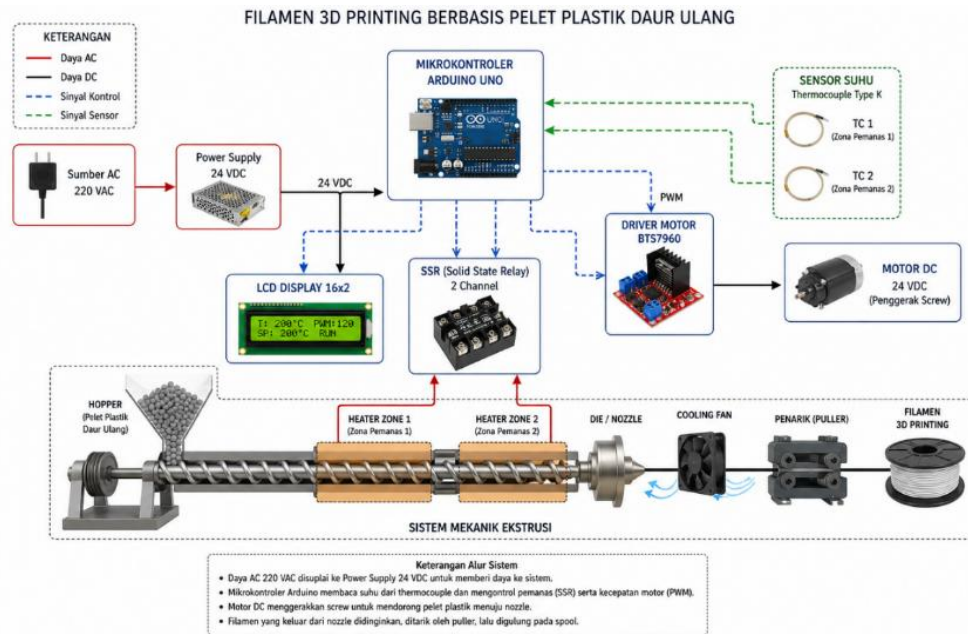


Gambar 1. Implementasi sistem ekstruder filamen berbasis pelet plastik daur ulang

Implementasi sistem ekstruder pada penelitian ini dilakukan melalui realisasi desain mekanik dan sistem kontrol menjadi sebuah prototipe yang terintegrasi. Berdasarkan Gambar 1, sistem terdiri atas beberapa komponen utama, yaitu hopper, barrel yang dilengkapi screw, elemen pemanas (heater band), motor penggerak yang terhubung dengan sistem kontrol. Selain itu, terdapat panel kontrol yang digunakan untuk mengatur suhu dan kecepatan motor selama proses ekstrusi berlangsung.

## 2.3 Diagram Sistem Ekstruder





Gambar 2. Diagram sistem ekstruder filamen 3D printing berbasis pelet plastik daur ulang

Pada Gambar 2, sistem dimulai dari sumber daya listrik yang dikonversi menjadi tegangan DC untuk menyuplai mikrokontroler dan komponen lainnya. Mikrokontroler menerima input dari sensor suhu yang ditempatkan pada zona pemanas, kemudian mengolah data tersebut untuk mengontrol heater melalui relay serta mengatur kecepatan motor melalui driver motor.

Motor DC berfungsi untuk memutar screw sehingga mendorong pelet plastik menuju zona pemanas hingga meleleh dan keluar melalui nozzle dalam bentuk filamen. Filamen yang keluar kemudian didinginkan dan ditarik untuk menjaga bentuk dan diameter yang diinginkan. Diagram ini menunjukkan bahwa kestabilan suhu dan kecepatan motor merupakan faktor utama dalam proses pembentukan filamen.

## 2.4 Prosedur Eksperimen

Proses eksperimen dalam penelitian ini dilakukan dengan menggunakan dua jenis material, yaitu Polypropylene (PP) dan High-Density Polyethylene (HDPE) dalam bentuk pelet plastik daur ulang. Tahapan eksperimen diawali dengan persiapan material, kemudian dilanjutkan dengan pengaturan parameter proses berupa suhu ekstrusi dan kecepatan motor. Setelah parameter ditentukan, proses ekstrusi dijalankan hingga material meleleh dan membentuk filamen yang keluar melalui nozzle. Filamen yang dihasilkan kemudian dikumpulkan sebagai sampel untuk setiap variasi parameter yang diterapkan.

Pengujian dilakukan dalam dua kondisi, yaitu tanpa beban untuk mengetahui kestabilan sistem ekstruder, serta dengan beban menggunakan pelet plastik untuk mengevaluasi performa sistem dalam kondisi aktual. Pendekatan ini dilakukan untuk memastikan bahwa sistem tidak hanya stabil secara operasional, tetapi juga mampu menghasilkan filamen dengan kualitas yang baik pada kondisi nyata.

## 2.5 Parameter Pengujian dan Teknik Analisis Data

Parameter yang diamati dalam penelitian ini meliputi suhu ekstrusi, kecepatan motor, diameter filamen, homogenitas, serta kekuatan mekanik filamen yang dihasilkan. Suhu ekstrusi dan kecepatan motor dikontrol selama proses berlangsung untuk melihat pengaruhnya terhadap karakteristik filamen pada masing-masing material. Diameter filamen diukur menggunakan alat ukur digital untuk mengetahui tingkat kesesuaian dengan standar filamen 3D printing, sedangkan homogenitas diamati untuk menilai keseragaman bentuk dan struktur filamen sepanjang hasil ekstrusi. Kekuatan mekanik filamen dianalisis secara komparatif berdasarkan kondisi fisik filamen yang dihasilkan.



Data hasil pengujian kemudian dianalisis menggunakan pendekatan komparatif antara material Polypropylene (PP) dan High-Density Polyethylene (HDPE). Analisis dilakukan dengan membandingkan hasil pengujian pada setiap parameter untuk mengidentifikasi perbedaan karakteristik filamen yang dihasilkan oleh masing-masing material. Proses analisis diawali dengan pengelompokan data berdasarkan jenis material dan kondisi pengujian, kemudian dilanjutkan dengan interpretasi hasil untuk melihat kecenderungan performa masing-masing material terhadap variasi suhu dan kecepatan motor. Hasil analisis selanjutnya disajikan dalam bentuk tabel dan grafik untuk mempermudah interpretasi serta memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai perbedaan karakteristik filamen antara kedua material.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengujian pada sistem ekstruder menunjukkan performa yang berbeda antara material Polypropylene (PP) dan High-Density Polyethylene (HDPE) dalam proses pembentukan filamen. Pengujian dilakukan pada kondisi tanpa beban dan dengan beban untuk mengevaluasi kestabilan sistem serta karakteristik filamen yang dihasilkan.

#### 3.1 Pengujian Sistem Tanpa Beban

Tabel 1. Hasil Pengujian Motor Tanpa Beban

No	PWM	Waktu Operasi (menit)	Stabilitas
1	10	10	Tidak stabil
2	20	10	Tidak stabil
3	30	10	Tidak stabil
4	40	10	Tidak stabil
5	50	10	Stabil
6	60	10	Stabil
7	70	10	Stabil

Tabel 2. Hasil Pengujian Sistem Pemanas

No	Setpoint (°C)	Waktu Pemanasan (menit)	Suhu Aktual (°C)
1	110	15	112
2	120	20	122
3	130	25	131
4	140	30	142
5	150	35	152
6	160	40	162
7	170	45	171

Berdasarkan Tabel 1, hasil pengujian motor tanpa beban menunjukkan bahwa kestabilan motor mulai tercapai pada PWM  $\geq 50$ , sedangkan pada rentang PWM 10 hingga 40, motor masih menunjukkan ketidakstabilan selama waktu pengoperasian 10 menit. Pada Tabel 2, hasil pengujian sistem pemanas tanpa beban menunjukkan bahwa suhu aktual yang dicapai memiliki selisih relatif kecil terhadap setpoint. Waktu yang dibutuhkan untuk mencapai suhu setpoint seiring dengan kenaikan nilai temperature yang diatur, yang menunjukkan karakteristik pemanasan yang normal. Stabilitas suhu ini mengindikasikan bahwa sistem kontrol berbasis mikrokontroler dan sensor thermocouple mampu bekerja dengan baik dalam mempertahankan temperature sesuai yang digunakan.

Secara keseluruhan, hasil pengujian tanpa beban ini menunjukkan bahwa sistem penggerak motor dan sistem pemanas telah beroperasi secara optimal sebelum digunakan pada kondisi berbeban. Kestabilan kecepatan motor dan akurasi pengendalian suhu menjadi faktor penting yang mendukung keberhasilan proses ekstrusi, terutama dalam menjaga konsistensi aliran material dan kualitas filamen yang dihasilkan.

#### 3.2 Pengujian Ekstrusi Material



Tabel 3. Hasil Ekstrusi Material PP

Suhu (°C)	Laju Ekstrusi (cm/menit)	Keterangan
130	0	Tidak terbentuk
140	0	Tidak terbentuk
150	0	Tidak terbentuk
160	29	Terbentuk
170	0	Tidak optimal

Tabel 4. Hasil Ekstrusi Material HDPE

Suhu (°C)	Laju Ekstrusi (cm/menit)	Keterangan
150	0	Tidak terbentuk
160	7	Terbentuk
170	12,5	Terbentuk
180	13,5	Terbentuk
190	0	Tidak optimal

Hasil pengujian pada Tabel 3 menunjukkan bahwa material Polypropylene (PP) mulai membentuk filamen pada suhu 160°C dengan laju ekstrusi sebesar 29 cm/menit. Pada suhu di bawah nilai tersebut, material belum mencair secara optimal sehingga filamen tidak terbentuk. Sementara itu, pada suhu 170°C, kualitas filamen menurun karena material menjadi terlalu cair sehingga aliran tidak stabil.

Pada tabel 4, material High-Density Polyethylene (HDPE) mulai menghasilkan filamen pada suhu 160°C dan mengalami peningkatan laju ekstrusi hingga 13,5 cm/menit pada suhu 180°C. Namun, pada suhu 190°C, filamen tidak terbentuk secara optimal akibat suhu yang terlalu tinggi. Secara umum, PP memiliki suhu optimal pada 160°C, sedangkan HDPE berada pada rentang 160–180°C, yang menunjukkan perbedaan karakteristik termal kedua material dalam proses ekstrusi.

### 3.3 Pengujian Ekstrusi Material

Tabel 5. Perbandingan Karakteristik Filamen PP dan HDPE

Waktu (menit)	Material	PWM	Suhu (°C)	Diameter (mm)	Homogenitas	Kekuatan
1	PP	60	160	1,75	Cukup	Cukup
1	HDPE	70	170	2,05	Kurang	Baik
2	PP	60	160	1,25	Baik	Cukup
2	HDPE	70	175	1,77	Cukup	Baik
3	PP	60	160	1,35	Cukup	Kurang
3	HDPE	80	180	1,70	Cukup	Baik
4	PP	60	160	1,15	Cukup	Kurang
4	HDPE	80	190	1,10	Kurang	Cukup

Berdasarkan tabel 5, diameter filamen yang dihasilkan oleh material PP berada pada rentang 1,15 mm hingga 1,75 mm, dengan nilai yang paling mendekati standar diperoleh pada kondisi awal ekstrusi, yaitu sebesar 1,75 mm. Seiring bertambahnya waktu operasi, diameter filamen cenderung mengalami penurunan hingga 1,15 mm. Pola ini menunjukkan adanya perubahan kestabilan aliran material selama proses ekstrusi, yang dapat dipengaruhi oleh kondisi suhu yang konstan namun distribusi panas dan tekanan screw yang tidak merata.

Pada material HDPE, diameter filamen berada pada rentang yang lebih lebar, yaitu antara 1,10 mm hingga 2,05 mm. Diameter terbesar diperoleh pada kondisi awal ekstrusi, kemudian menurun pada suhu dan waktu operasi yang lebih tinggi. Variasi diameter yang lebih besar pada HDPE menunjukkan bahwa material ini memiliki respons yang berbeda terhadap parameter proses, terutama terkait viskositas yang lebih tinggi dibandingkan PP.



Dari sisi homogenitas, filamen PP menunjukkan tingkat keseragaman yang lebih baik pada beberapa kondisi, khususnya pada waktu operasi 2 menit dengan diameter 1,25 mm. Sebaliknya, HDPE menunjukkan tingkat homogenitas yang lebih bervariasi, terutama pada kondisi suhu tinggi. Namun demikian, HDPE secara konsisten menunjukkan nilai kekuatan mekanik yang lebih baik dibandingkan PP, yang mengindikasikan bahwa material ini memiliki struktur yang lebih padat setelah proses ekstrusi.

Perbedaan karakteristik ini menunjukkan bahwa PP lebih unggul dalam kestabilan diameter dan homogenitas, sedangkan HDPE lebih unggul dalam kekuatan mekanik. Hal ini memperlihatkan adanya trade-off antara kestabilan bentuk dan kekuatan material dalam proses pembentukan filamen.

### 3.4 Hasil Filamen



Gambar 3. Hasil filamen PP dan HDPE

Hasil filamen yang diperoleh dari proses ekstrusi menunjukkan adanya perbedaan karakteristik visual yang signifikan antara material Polypropylene (PP) dan High-Density Polyethylene (HDPE). Filamen PP cenderung memiliki bentuk yang lebih stabil dengan susunan yang relatif seragam, khususnya pada kondisi awal ekstrusi. Permukaan filamen terlihat lebih konsisten meskipun masih terdapat sedikit ketidakteraturan. Hal ini sejalan dengan hasil pengukuran diameter yang menunjukkan bahwa PP lebih mampu mendekati standar ukuran filamen.

Sebaliknya, filamen HDPE menunjukkan bentuk yang kurang seragam dengan variasi diameter yang lebih besar. Ketidakteraturan ini semakin terlihat pada kondisi suhu yang lebih tinggi, di mana aliran material menjadi kurang stabil. Namun demikian, secara visual filamen HDPE tampak lebih kaku dan tidak mudah berubah bentuk, yang mengindikasikan struktur material yang lebih kuat.

Perbedaan karakteristik ini memperkuat hasil pengujian sebelumnya, di mana PP menunjukkan keunggulan dalam kestabilan dimensi dan homogenitas, sedangkan HDPE lebih unggul dalam kekuatan mekanik. Dengan demikian, pemilihan material dalam proses ekstrusi filamen perlu disesuaikan dengan kebutuhan aplikasi, apakah lebih menekankan pada kestabilan bentuk atau kekuatan material.

## 4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, sistem ekstruder yang dirancang mampu bekerja dengan baik dalam menghasilkan filamen 3D printing dari material Polypropylene (PP) dan High-Density Polyethylene (HDPE). Pengujian tanpa beban menunjukkan bahwa motor bekerja stabil pada PWM  $\geq 50$  dan sistem pemanas mampu mempertahankan suhu dengan deviasi kecil, sehingga layak digunakan pada proses ekstrusi. Hasil pengujian berbeban menunjukkan bahwa suhu optimal untuk material PP berada pada 160°C, sedangkan HDPE berada pada rentang 160–180°C. Dari sisi karakteristik filamen, PP menghasilkan diameter yang lebih stabil dan mendekati standar, serta memiliki homogenitas yang lebih baik. Sebaliknya, HDPE menunjukkan kekuatan mekanik yang lebih tinggi meskipun memiliki variasi diameter yang lebih besar.



Secara keseluruhan, terdapat perbedaan karakteristik antara kedua material, di mana PP lebih unggul dalam kestabilan dimensi, sedangkan HDPE lebih unggul dalam kekuatan material. Hal ini menunjukkan adanya trade-off dalam pemilihan material, sehingga penggunaannya perlu disesuaikan dengan kebutuhan aplikasi pada proses 3D printing.

## 5. UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Pusat Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (P3M) Politeknik Negeri Banjarmasin yang telah memberikan dukungan dana melalui dana hibah penelitian untuk penelitian ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Prashar, G., Vasudev, H., & Bhuddhi, D. (2023). Additive manufacturing: expanding 3D printing horizon in industry 4.0. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*, 17(5), 2221-2235.
- [2] Rahim, T. N. A. T., Abdullah, A. M., & Md Akil, H. (2019). Recent developments in fused deposition modeling-based 3D printing of polymers and their composites. *Polymer Reviews*, 59(4), 589-624.
- [3] Al Rashid, A., & Koç, M. (2023). *Materials Today Sustainability*.
- [4] Savu, I. D., Savu, S. V., Simion, D., Sirbu, N. A., Ciornei, M., & Ratiu, S. A. (2019). PP in 3D printing—technical and economic aspects. *Mater. Plast*, 56(4), 931.
- [5] Schirmeister, C. G., Hees, T., Licht, E. H., & Mülhaupt, R. (2019). 3D printing of high density polyethylene by fused filament fabrication. *Additive Manufacturing*, 28, 152-159.
- [6] Setiawan, B., Damayanti, A. M., Siradjuddin, I., Widjanarko, W., Permatasari, D. C., & Audiana, V. U. (2021, February). Control plastic pellet feeding double extruders for 3D printing symmetric bilateral. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1073, No. 1, p. 012049). IOP Publishing.
- [7] B. Setiawan et al., "HDPE plastic extruder design and control for 3D printing," IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., vol. 1073, 2021.
- [8] Chong, S., Yang, T. C. K., Lee, K. C., Chen, Y. F., Juan, J. C., Tiong, T. J., ... & Pan, G. T. (2020). Evaluation of the physico-mechanical properties of activated-carbon enhanced recycled polyethylene/polypropylene 3D printing filament. *Sādhanā*, 45(1), 57.
- [9] Romanenko, V., & Nazarenko, O. (2024). Comparative analysis of modern technologies of additive production. *System Research in Energy*, 2 (77), 84-96.
- [10] A. M. Damayanti and K. I. Muttaqin, "Optimization in Extrusion Process for Polypropylene and High-Density Polyethylene Pellets in Additive Manufacturing of 3D Printing Filament", *etj*, vol. 9, no. 11, pp. 5544–5548, Nov. 2024.
- [11] Tipu, J. A. K., Noon, A. A., Arif, M., Naveed, M., Khan, H. A., Suhaib, M. M., & Sharif, A. (2023). Mechanical properties evaluation of recycled high density polyethylene via additive manufacturing. *Journal of Materials and Manufacturing*, 2(2), 1-9.
- [12] Tamir, T. S., Xiong, G., Fang, Q., Dong, X., Shen, Z., & Wang, F. Y. (2022). A feedback-based print quality improving strategy for FDM 3D printing: an optimal design approach. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 120(3), 2777-2791.
- [13] Pambudi, A. A., Wibowo, S. B., & Setiawan, W. (2024). Perancangan Sistem Ekstruder untuk 3D Printer Cokelat. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 19(2), 211-222.

