

Mesin Ekstrusi Filamen 3D *Printer* Sederhana Sebagai Alternatif Daur Ulang Limbah Botol Plastik dengan Kendali PID

Al Barra Harahap¹, Vera Khoirunisa², Septia Eka Marsha Putra³, Ica Deni Anggraeni⁴, Sella Purnani⁵,
Setiya Esra Haloho⁶, Lidya Natalia⁷

Program Studi Teknik Fisika, Institut Teknologi Sumatera
Jl. Terusan Ryacudu, Desa Way Hui, Kecamatan Jatiagung, Lampung Selatan

¹albarra.harahap@tf.itera.ac.id

²vera.khoirunisa@tf.itera.ac.id

³septia.marsha@tf.itera.ac.id

Intisari — Limbah plastik yang sulit terurai secara alami menimbulkan ancaman serius bagi lingkungan. Sebagai solusi, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan mesin ekstrusi filamen 3D *printer* guna mengolah limbah botol plastik menjadi material yang dapat digunakan kembali. Sistem ini dirancang untuk berkontribusi dalam pengurangan limbah plastik melalui pemanfaatan teknologi. Metode penelitian melibatkan desain struktur mesin ekstrusi, termasuk mekanisme pendorong, pemanasan dan pendinginan dengan kendali PID serta penggulungan filamen. Hasil penelitian menunjukkan bahwa mesin ekstrusi berhasil mengonversi limbah plastik menjadi filamen dengan diameter rata-rata 1,6 mm, pada kecepatan pendorong 10 rpm, suhu pemanas 186°C, suhu pendingin 7°C, dan kecepatan penggulung 5 rpm. Uji tarik terhadap tiga sampel filamen menghasilkan tegangan maksimum masing-masing sebesar 6,11 MPa, 5,94 MPa, dan 4,64 MPa, membuktikan bahwa filamen yang dihasilkan memiliki karakteristik mekanik yang dapat digunakan dalam aplikasi pencetakan 3D.

Kata kunci — Filamen 3D *printer*, Mesin ekstrusi, Limbah plastik, Daur ulang, Kendali, PID

Abstract — Plastic waste, which is difficult to decompose naturally, poses a serious environmental threat. As a solution, this study aims to develop a filament extrusion machine for 3D printing to process plastic bottle waste into reusable material. The system is designed to contribute to plastic waste reduction through technological utilization. The research methodology involves designing the extrusion machine structure, including the pushing mechanism, heating and cooling with PID control, and filament winding. Experimental results indicate that the extrusion machine successfully converts plastic waste into filament with an average diameter of 1.6 mm, at a pushing speed of 10 rpm, a heating temperature of 186°C, a cooling temperature of 7°C, and a winding speed of 5 rpm. Tensile tests conducted on three filament samples revealed maximum stress values of 6.11 MPa, 5.94 MPa, and 4.64 MPa, demonstrating that the produced filament possesses mechanical properties suitable for 3D printing applications.

Keywords— 3D Printer Filament, Extruder, Plastik waste, Recycling, Control, PID

I. PENDAHULUAN

Plastik, terutama *polyethylene terephthalate* (PET), memiliki peran penting dalam kehidupan sehari-hari, terutama sebagai bahan kemasan makanan dan minuman karena sifatnya yang kuat, ringan, dan praktis [1]. Keunggulan PET yang dapat didaur ulang menjadi berbagai produk seperti filamen, mainan, dan furnitur telah meningkatkan penggunaannya secara signifikan. Namun, akumulasi limbah PET yang sulit terurai menyebabkan pencemaran lingkungan, sehingga diperlukan upaya pengelolaan yang efektif melalui metode

3R—*Reduce, Reuse, dan Recycle* [2]. Daur ulang menjadi pendekatan utama untuk mengolah limbah PET menjadi produk bernilai guna.

Menurut data dari Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan [3], limbah plastik menyumbang 21,14% dari total sampah di Provinsi Lampung pada tahun 2021, menjadikannya jenis limbah terbesar kedua setelah sisa makanan. Menanggapi kondisi ini, Institut Teknologi Sumatera telah mengeluarkan kebijakan untuk meningkatkan penanganan limbah plastik guna mengurangi dampak lingkungan [4]. Salah satu pendekatan inovatif adalah

memanfaatkan limbah PET sebagai bahan dasar filamen *3D printer*, yang digunakan dalam teknologi manufaktur aditif [5].

Filamen *3D printer*, yang umumnya memiliki diameter 1,75 mm hingga 3 mm, merupakan material termoplastik yang kuat dan mudah dibentuk [6]. PET menjadi pilihan utama karena sifatnya yang elastis dan mudah meleleh, sehingga cocok digunakan sebagai bahan baku pencetakan objek 3D. Untuk memproduksi filamen ini, digunakan proses ekstrusi, di mana plastik dilebur dan dibentuk ulang menggunakan mesin ekstrusi [7]. Mesin ekstrusi berperan dalam mengubah cacahan plastik menjadi filamen dengan melalui tahap pemanasan, pendinginan, dan penggulangan.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membangun mesin ekstrusi pengolah limbah plastik guna menghasilkan filamen *3D printer* yang lebih ekonomis dan berkelanjutan. Dengan inovasi ini, diharapkan limbah botol plastik dapat dimanfaatkan lebih baik sebagai bahan baku pencetakan 3D sekaligus mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan.

II. METODE PENELITIAN

A. Perancangan dan Kendali Pendorong

Proses perancangan dimulai dengan pembuatan desain 3D menggunakan Inventor 2023, mencakup komponen utama seperti screw, barrel, hopper, dan extruder base. Tahap awal melibatkan penentuan dimensi masing-masing komponen sebelum direalisasikan dalam model digital.

- 1) *Screw*: tipe mata bor kayu dengan spiral yang seragam, berdiameter 16 mm dan panjang 300 mm. Material yang dipilih adalah baja karbon merk OPT JIS, yang memiliki ketahanan panas sesuai dengan kebutuhan ekstrusi.
- 2) *Barrel*: berfungsi sebagai penghantar panas dan tempat pelelehan serta pengadukan limbah plastik. Desainnya memungkinkan pemasangan elemen pemanas dan *nozzle*. Material yang digunakan adalah *stainless steel* dengan diameter dalam 17,5 mm dan diameter luar 19,5 mm, serta panjang 150 mm. Kelonggaran antara *barrel* dan *screw*

ditetapkan sebesar 1,5 mm untuk memastikan kelancaran proses ekstrusi.

- 3) *Hopper*: terdiri dari dua bagian utama: base hopper yang menghubungkan *extruder base* dengan *hopper* utama, serta *hopper* utama sebagai wadah penyimpanan plastik cacahan. Dimensi *base hopper* adalah 91 mm × 91 mm dengan diameter bagian lingkaran 85 mm, sementara *hopper* utama memiliki diameter lingkaran kecil 73 mm dan lingkaran besar 160 mm.
- 4) *Extruder Base*: dirancang sebagai rumah bagi *screw*, berbentuk persegi panjang dengan dimensi panjang 176 mm dan lebar 93 mm. Struktur ini memiliki dua ruang: ruang pertama sebagai jalur masuk *screw* dan ruang kedua sebagai tempat penampungan plastik kering, masing-masing berukuran 76,5 mm × 78,5 mm. Selain itu, terdapat tiga lubang sebagai jalur masuk dan penyangga *screw*.
- 5) *Nozzle*: berfungsi untuk mencetak plastik menjadi bentuk filamen, menggunakan baut plug drat luar berukuran ½ inci dari material *stainless steel*. Pada bagian tengah baut, dibuat lubang berdiameter 1,75 mm untuk menghasilkan filamen dengan ukuran yang sesuai untuk aplikasi pencetakan 3D.

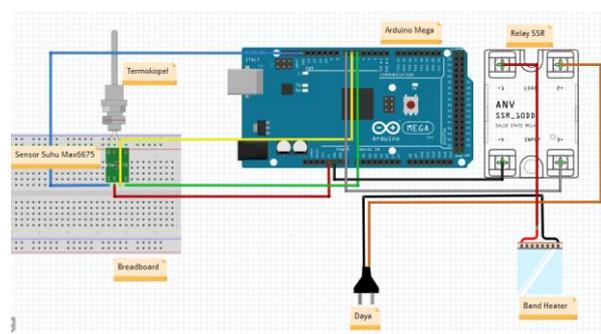
Sistem pendorong pada mesin ini dikendalikan melalui mikrokontroler yang mengatur *set point* dan meneruskannya ke *motor driver* sebagai pengontrol kecepatan putar. *Motor stepper* NEMA 23 berfungsi sebagai penggerak utama, memutar *screw* untuk mendorong potongan botol plastik menuju *nozzle* sesuai kecepatan yang telah ditetapkan.

Motor driver TB6600 dihubungkan ke power supply 12V melalui pin GND ke V- dan pin VCC ke V+ untuk menyediakan tegangan yang dibutuhkan bagi sistem.

B. Perancangan dan Kendali Pemanas

Sistem pemanas pada mesin ini menggunakan *band heater* berdiameter 30 mm × 25 mm, berbahan *stainless steel*, dengan tegangan 220V dan daya 100W. *Band heater* mampu menghasilkan panas

maksimum 500°C, dengan diameter dalam yang disesuaikan dengan *barrel ekstruder* untuk memastikan transfer panas yang efektif.



Gbr 1 Sistem kendali pemanas

Sistem kendali pemanas seperti pada gambar 1 menggunakan Arduino Mega sebagai mikrokontroler, dengan kontrol PID untuk mengatur suhu *band heater* agar tetap stabil sesuai dengan nilai *set point* yang ditentukan dalam program. Kendali ini melibatkan penggunaan *relay SSR* yang berfungsi sebagai pengontrol daya untuk mengaktifkan dan menonaktifkan pemanas guna menghindari pemanasan berlebihan. Sensor suhu MAX6675 digunakan untuk membaca suhu pemanas dan memberikan umpan balik (*feedback*) yang dibandingkan dengan *set point* untuk memastikan kestabilan suhu.

Kalibrasi Sensor Suhu Pengujian sensor suhu dilakukan dengan membandingkan pembacaan antara *thermocouple* MAX6675 dan *thermogun* sebagai sensor pembanding (*validasi*), dengan sumber panas berupa solder uap. Pengambilan data dilakukan dalam rentang 100°C hingga 300°C, menggunakan 11 variasi suhu: 100°C, 120°C, 140°C, 160°C, 180°C, 200°C, 220°C, 240°C, 260°C, 280°C, dan 300°C. Dari hasil kalibrasi diperoleh persamaan regresi linear $y=1,01031 x-7,09065$.

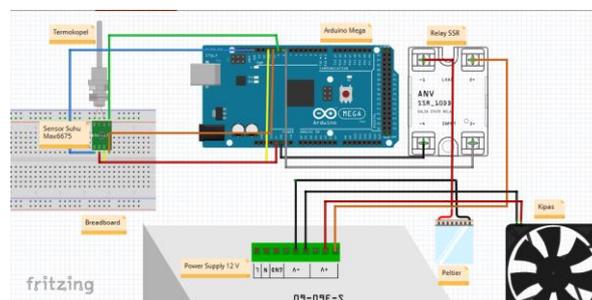
C. Perancangan dan kendali pendingin

Sistem pendingin pada mesin ini dirancang berbentuk kotak berbahan akrilik dengan ketebalan 5 mm. Kotak ini berfungsi sebagai wadah bagi rangkaian pendingin *peltier* dan *heatsink*. Dimensi kotak pendingin adalah 12 cm × 10 cm × 12 cm.

Kotak pendingin memiliki lubang berbentuk setengah lingkaran 0,5 cm di bagian atas sebagai jalur keluarnya filamen setelah proses pendinginan, serta lubang berbentuk lingkaran berdiameter 1 cm untuk peletakan sensor suhu.

Pengendalian suhu dilakukan menggunakan mikrokontroler Arduino Mega, dengan kontrol PID untuk menjaga kestabilan suhu *peltier* sesuai dengan *set point* yang telah ditentukan. Relay SSR digunakan untuk mengontrol daya yang diberikan kepada *peltier* dan menghindari pemanasan berlebihan. Sensor MAX6675 membaca suhu pendingin, memberikan umpan balik (*feedback*), dan membandingkan hasil pembacaan dengan *set point* untuk menjaga kestabilan sistem.

Pada perangkat pendingin, elemen *peltier* memiliki dua sisi dengan perbedaan suhu: satu sisi menghasilkan panas, sementara sisi lainnya menghasilkan suhu dingin. Integrasi komponen dalam sistem pendingin ditunjukkan gambar 2, di mana sensor suhu MAX6675 dihubungkan ke Arduino Mega.



Gbr 2 Sistem Pendingin

Kalibrasi Sensor Suhu Kalibrasi sensor dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan MAX6675 dengan Humidity Meter UNI-T UT333, dalam satuan °C. Hasil grafik kalibrasi dapat menghasilkan persamaan regresi linear $y=0,87099 x- 3,03214$ dengan nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0.99.

D. Perancangan dan Kendali Penggulung

Dudukan penggulung berfungsi sebagai alas bagi sistem penggulung filamen. Dudukan dibuat dari akrilik dengan ketebalan 5 mm, berukuran 115 mm × 250 mm dan

dicetak dalam dua lapisan untuk meningkatkan kekokohan. Dudukan ini memiliki lubang 185 mm × 5 mm dan 60 mm × 5 mm sebagai tempat penyangga *spooler*.

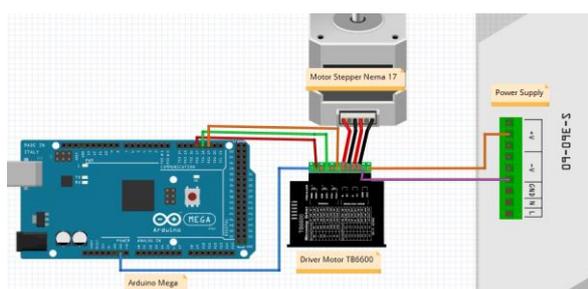
Penyangga *spooler* dirancang untuk menopang *spooler* dengan jumlah dua unit di sisi kanan dan kiri. Penyangga ini memiliki ukuran 80 mm × 179 mm untuk desain pertama dan 223 mm × 179 mm untuk desain kedua. Keduanya dibuat dari akrilik 5 mm dengan penyangga bawah 10 mm agar dapat terpasang dengan kokoh pada dudukan penggulung.

Selongsong *spooler* dirancang sebagai penghubung antara *spooler* dengan penyangga dan memiliki tutup untuk memudahkan penggantian *spooler*. Selongsong ini berbentuk tabung dengan diameter luar 65 mm, diameter dalam 50 mm, dan panjang 82 mm, dicetak menggunakan 3D printer.

Gear penggerak *spooler* dibuat untuk mengontrol motor menggunakan Arduino Mega dan *driver* TB6600. Terdapat 2 buah gear yang digunakan:

- 1) Gear *spooler* berdiameter 160 mm, diameter dalam 55 mm, dan memiliki 60 gerigi.
- 2) Gear motor berdiameter 35 mm, diameter dalam 5 mm, dan memiliki 10 gerigi.

Kedua gear dicetak menggunakan akrilik dengan ketebalan 5 mm. Filamen *guide* berfungsi sebagai jalur filamen yang digulung. *Guide* ini didesain dengan ukuran lingkaran besar diameter luar 15.8 mm, diameter dalam 11 mm, dan panjang 21 mm serta lingkaran kecil diameter 9.3 mm dengan panjang 126.7 mm. Filamen *guide* dicetak menggunakan 3D printer.



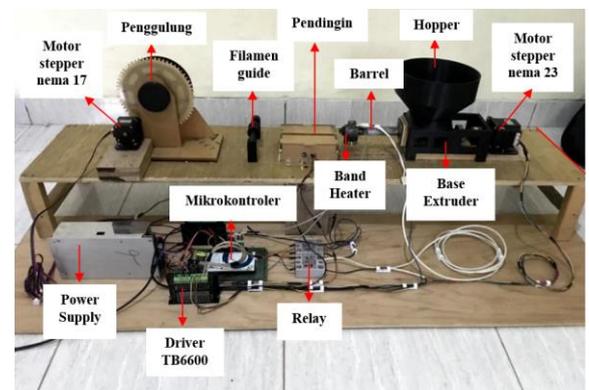
Gbr 3 Sistem Penggulung

Sistem kendali penggulung menggunakan motor stepper Nema 17, dikontrol oleh Arduino Mega melalui driver TB6600 seperti pada gambar 3.

E. Perakitan Komponen Mesin

Mesin Ekstrusi disusun di atas meja berbahan triplek dengan ketebalan 12 mm, panjang 120 cm, dan lebar 25 cm seperti gambar 4. Meja ini memiliki dua bagian utama:

- Bagian atas digunakan untuk meletakkan sistem pendorong, pemanas, pendingin, dan penggulung.
- Bagian bawah berfungsi sebagai tempat mikrokontroler dan komponen pengendali lainnya.



Gbr 4 Penyusunan mesin ekstruksi

Tujuan utama penggunaan meja adalah untuk memberikan stabilitas dan dukungan struktural bagi keseluruhan sistem ekstrusi. Setelah perakitan selesai, dilakukan percobaan operasional untuk memastikan seluruh komponen berfungsi dengan baik. Berikut adalah tahapan pengoperasian mesin:

- 1) Menghidupkan pengendali PID. Mengatur suhu pada panel pengendali PID.
- 2) Menunggu hingga *barrel* dan pendingin mencapai suhu yang diinginkan.
- 3) Menghidupkan *motor stepper*. Memasukkan potongan botol plastik ke dalam *hopper*.
- 4) Menunggu sampai filamen keluar dari nozzle.

F. Pengaturan Komponen Mesin

Untuk memastikan ukuran optimal bahan plastik yang digunakan dalam *ekstruder*,

dilakukan pengaturan ukuran material sebelum proses pelelehan. Berdasarkan hasil pengujian, material berukuran 2-3 mm terbukti lebih efisien dibandingkan ukuran 3-6 mm, dengan waktu pelelehan yang lebih singkat, yakni 2 menit dibandingkan 5 menit pada suhu 186°C. Selain itu, plastik berukuran lebih besar cenderung menumpuk dalam *barrel*, menghambat pergerakan *screw*, sedangkan ukuran lebih kecil memungkinkan aliran material yang lebih lancar, sehingga meningkatkan efektivitas proses ekstrusi.

Selanjutnya, dilakukan pengaturan kecepatan pendorong menggunakan *motor stepper* Nema 23, dengan variasi 5 rpm, 10 rpm, dan 15 rpm. Hasil menunjukkan bahwa kecepatan 10 rpm memberikan hasil paling optimal, menghasilkan filamen dengan diameter mendekati standar 1.75 mm, dengan galat -0.15%. Pada kecepatan 5 rpm, filamen yang keluar mengalami pelelehan berlebih sehingga menjadi lebih cair dari yang diharapkan, sedangkan pada 15 rpm, filamen yang dihasilkan memiliki diameter lebih besar akibat ekstrusi yang terlalu cepat.

Untuk menentukan suhu pemanasan yang paling ideal, dilakukan variasi suhu 165°C, 186°C, dan 206°C. Berdasarkan pengujian, suhu 186°C memberikan hasil terbaik dengan diameter filamen 1.6 mm dan galat -0.15%. Pada suhu 165°C, material tidak melebur sepenuhnya sehingga menghambat pergerakan *screw*, sementara suhu 206°C menyebabkan filamen terlalu cair, sehingga menyulitkan proses pendinginan dan penggulangan filamen.

Selain pengaturan suhu pemanas, dilakukan pengujian suhu pendingin dengan variasi 7°C, 11°C, dan 15°C. Pendinginan pada suhu 7°C menghasilkan filamen dengan diameter mendekati standar (1.6 mm, galat -0.15%), sedangkan suhu 11°C dan 15°C menghasilkan diameter lebih kecil (1.4 mm dan 1.2 mm) akibat efek peregangan yang terjadi karena pendinginan yang kurang optimal. Dari hasil ini dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi suhu pendingin, semakin kecil diameter filamen yang dihasilkan.

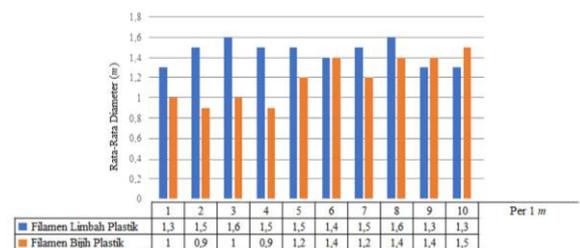
Terakhir, dilakukan pengaturan kecepatan penggulangan, dengan variasi 2 rpm, 5 rpm,

dan 8 rpm. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kecepatan 5 rpm memberikan hasil terbaik dengan diameter filamen 1.6 mm dan galat -0.15%. Pada kecepatan 2 rpm, filamen yang terbentuk memiliki diameter lebih besar (2 mm) akibat gaya tarik yang kurang optimal, sedangkan pada 8 rpm, diameter filamen menjadi lebih kecil (1.1 mm) akibat peregangan berlebihan selama proses penggulangan.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Ekstruksi Limbah Botol Plastik

Untuk mengevaluasi efektivitas ekstruder dalam menghasilkan filamen dari bahan daur ulang, dilakukan perbandingan antara potongan botol plastik dan bijih plastik. Gambar 5 memperlihatkan grafik perbandingan diameter filamen yang dihasilkan dari kedua material. Pengujian dilakukan dengan mengukur filamen sepanjang 10 meter, dengan setiap meter diambil sampel per 25 cm.



Gbr 5 Grafik perbandingan diameter filamen

Dari hasil percobaan, rata-rata diameter keseluruhan filamen dari potongan botol plastik adalah 1,5 mm, dengan persentase galat sebesar 0,13%, yang mendekati standar 1,75 mm berdasarkan referensi yang digunakan. Sebagai pembanding, dilakukan percobaan dengan bijih plastik pada kondisi ekstrusi yang sama (kecepatan pendorong 10 rpm, suhu pemanas 186°C, suhu pendingin 7°C, dan kecepatan penggulangan 5 rpm). Dari hasil ini, rata-rata diameter keseluruhan filamen dari bijih plastik adalah 1,2 mm, dengan persentase galat sebesar 0,30%, yang masih jauh dari ukuran yang diharapkan yaitu 1,75 mm.

B. Hasil Uji Tarik

Filamen hasil ekstruksi limbah botol plastik yang dihasilkan, diuji kekuatan tariknya menggunakan Universal Testing Machine Zwick Roell Z250. Hasil patahan sampel setelah melalui uji tarik dapat dilihat pada tabel 1. Perbandingan Hasil Uji Tarik Dari hasil uji tarik tiga sampel, diperoleh data numerik yang dirangkum dalam Tabel 2, yang mencakup tegangan maksimal, regangan, dan modulus elastisitas:

C. Uji Densitas

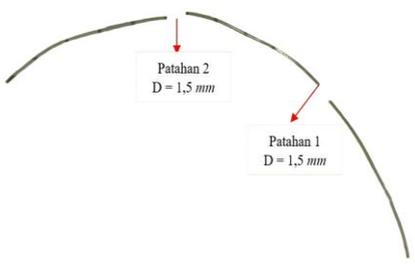
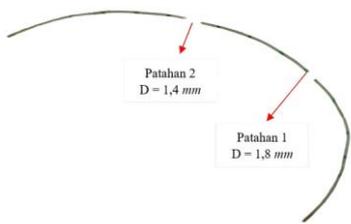
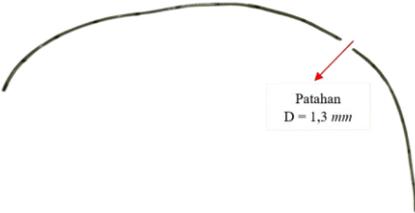
Dalam pengujian densitas filamen, volume sampel yang digunakan dalam perhitungan diambil berdasarkan rumus volume tabung. Oleh karena itu, pengukuran massa jenis diperlukan untuk mendapatkan nilai densitas yang akurat, seperti yang tercantum dalam tabel 3.

Tabel 2 Uji tarik

Sampel	Tegangan Maksimal (Mpa)	Tegangan (%)	Modulus Elastisitas (N/m ²)
A	6,11	0,11	55,54
B	5,94	0,13	45,69
C	4,64	0,10	46,4

Perbedaan hasil ini mengindikasikan bahwa diameter yang lebih seragam cenderung menghasilkan kekuatan tarik yang lebih akurat. Ketidakteraturan diameter dapat menciptakan titik-titik lemah pada filamen, yang menyebabkan patahan tidak terprediksi dan hasil uji tarik menjadi kurang konsisten. Bagian yang lebih tipis meregang lebih banyak, sehingga berpotensi putus lebih awal, memengaruhi pengukuran perpanjangan filamen hingga putus.

Tabel 1 Patahan sampel setelah uji tarik

No	Sampel	Gambar patahan
1	A	
2	B	
3	C	

Tabel 3 Uji densitas

Sampel	Vol (cm ³)	Massa (g)	ρ (g/cm ³)	ρ -ref (g/cm ³)	Galat ρ (%)
A	0,602	1,0660	1,770	1,24 [8]	0,5
B	0,529	0,7910	1,495		0,2
C	0,529	0,8114	1,533		0,3
Rerata			1,6		
Standar Deviasi			0,15		

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, ditemukan bahwa kecepatan pendorong memiliki hubungan yang sebanding dengan diameter filamen yang dihasilkan. Kecepatan terbaik yang digunakan dalam proses ekstrusi adalah 10 rpm, dikombinasikan dengan suhu pemanas 186°C, suhu pendingin 7°C, dan kecepatan penggulung 5 rpm. Selain itu, suhu pemanas dan pendingin menunjukkan hubungan yang berbanding terbalik dengan diameter filamen yang terbentuk, di mana suhu pemanas 186°C dan suhu pendingin 7°C memberikan hasil filamen yang paling mendekati referensi yang digunakan. Kecepatan penggulung juga berbanding terbalik dengan diameter filamen, dengan kecepatan penggulung 5 rpm menjadi kondisi terbaik untuk memastikan diameter filamen tetap sesuai standar yang diharapkan. Dari seluruh parameter yang diuji, diameter filamen yang dihasilkan dalam penelitian ini adalah 1.6 mm, yang cukup mendekati ukuran referensi 1.75 mm

REFERENSI

- [1] D. P. Sari, "Pembuatan plastik biodegradable menggunakan pati dari umbi keladi," *Diploma thesis*, Politeknik Negeri Sriwijaya, Palembang, Indonesia, 2014.
- [2] (2018) Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. [Online]. Available: https://ppid.menlhk.go.id/siaran_pers/browse/1166
- [3] (2021) Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. [Online]. Available:

- <https://sipsn.menlhk.go.id/sipsn/public/data/komposisi>
- [4] Rudi. (2022) Institut Teknologi Sumatera. [Online]. Available: <https://www.itera.ac.id/rektor-itera-dan-wali-kota-bandar-lampung-bahas-beasiswa-kuliah-hingga-penanganan-sampah/>
- [5] K. R. W. Ajisaputra and P. Ipung, "Rancang bangun mesin filament untuk 3D printing dari limbah plastik PET," *TEDC*, vol. 18, pp. 193-197, 2024.
- [6] M. Taufik, G. S. Lubis, and M. Ivanto, "Rancang bangun mesin pultrusion pembuat filamen 3D printing berbasis limbah plastik botol PET," *Jurnal Teknologi Rekayasa Teknik Mesin*, vol. 4, pp. 1–8, 2023.
- [7] R. W. Hanafi and I. Sujana, "Rancang bangun alat ekstruder dengan pemanfaatan limbah plastik polypropylene dan polyethylene terephthalate untuk menghasilkan filamen 3D printing," *Jurnal Teknologi Rekayasa Teknik Mesin*, vol. 3, pp. 20-26, 2022.
- [8] M. H. Mubarak, A. P. Bayuseno, and R. Ismail, "Pengaruh suhu ekstrusi terhadap densitas dan laju degradasi pada filamen 3D print berbahan PLA, PCL, dan HA," *Jurnal Teknik Mesin S-1*, vol. 10, pp. 53–58, 2022.