

Daur Ulang Limbah PLA Menjadi Filamen 3D Menggunakan Ekstruder Sekrup Tunggal: Kajian Suhu dan Kecepatan dalam Proses Ekstrusi

Nurlia Pramita Sari^{1*}, Seky Bintang Yoga Pratama², Elka Faizal³, Talifatim Machfuroch⁴, Andita Nataria Fitri Ganda⁵

^{1,2,3} Program Studi D4 Teknik Mesin Produksi dan Perawatan, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Malang, Malang

⁴ Program Studi D3 Teknik Mesin, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Malang, Malang

⁵ Program Studi D4 Teknik Mesin, Jurusan Teknik Universitas Negeri Surabaya, Surabaya

*Penulis Korespondensi, email: nurlia_ps@polinema.ac.id

Received: 07/01/2026

Revised: 27/01/2026

Accepted: 21/02/2026

Abstract. Three-dimensional (3D) printing technology has expanded rapidly and is now widely utilized across various sectors. One of the essential elements affecting print quality is the filament material. Polylactic acid (PLA) is among the most commonly used materials due to its ease of printing, mechanical strength, and environmentally friendly characteristics. However, despite being biodegradable, PLA decomposes very slowly, contributing to waste accumulation. Additionally, a weakness of PLA is that its price is still higher than that of other types of plastic. Recycling PLA into reusable filament presents a sustainable solution to this issue. In this study, recycled PLA filament was produced using a single screw plastic extruder. The process involved melting and extruding the material under different extrusion Temperatures and screw rotation speeds. These parameters were identified as critical factors affecting the final mechanical properties of the filament, particularly its Hardness. The study was conducted by varying extrusion Temperatures at 150 °C, 160 °C, and 170 °C, and screw speeds at 20, 30, and 40 rpm. Each parameter combination was tested through four repetitions. Improper Temperature and screw speed settings may alter melt viscosity, influence extrusion rate, and result in air bubble formation, all of which reduce filament integrity. Experimental trials were conducted to analyze the influence of these parameters on the Hardness of the recycled PLA filament. As a result, extrusion Temperature is the most dominant parameter in determining the density and Hardness of PLA, with optimal conditions at 170 °C and 40 rpm that enhance melt flow, reduce porosity, and produce improved densification and mechanical strengthening without any indication of material degradation.

Keywords: 3D print, Recycle PLA filament, Extrusion temperature, Extrusion speed, Hardness

Abstrak. Teknologi pencetakan tiga dimensi (3D printing) telah berkembang pesat dan kini banyak dimanfaatkan di berbagai sektor. Salah satu elemen penting yang memengaruhi kualitas cetak adalah material filamen. *Polylactic acid* (PLA) merupakan salah satu material yang paling banyak digunakan karena kemudahan proses pencetakannya, kekuatan mekanik yang baik, serta karakteristiknya yang ramah lingkungan. Namun, meskipun bersifat *biodegradable*, PLA terurai sangat lambat sehingga tetap berkontribusi terhadap penumpukan limbah. Selain itu, kelemahan PLA adalah harganya yang masih lebih tinggi dari pada jenis plastik lain. Daur ulang PLA menjadi filamen yang dapat digunakan kembali merupakan solusi berkelanjutan untuk permasalahan ini. Dalam penelitian ini, filamen PLA daur ulang diproduksi menggunakan ekstruder plastik sekrup tunggal. Proses ini melibatkan peleburan dan pengestrusian material pada variasi suhu ekstrusi dan kecepatan putar sekrup yang berbeda. Parameter-parameter tersebut diidentifikasi sebagai faktor kritis yang memengaruhi sifat mekanik akhir filamen, khususnya kekerasannya. Penelitian dilakukan dengan memvariasikan suhu ekstrusi pada 150 °C, 160 °C, dan 170 °C, serta kecepatan sekrup pada 20, 30, dan 40 rpm. Setiap kombinasi parameter diuji sebanyak tiga kali pengulangan. Pengaturan suhu dan kecepatan sekrup yang tidak tepat dapat mengubah viskositas lelehan, memengaruhi laju ekstrusi, dan menyebabkan terbentuknya gelembung udara, yang semuanya menurunkan integritas filamen. Uji eksperimental dilakukan untuk menganalisis pengaruh parameter-parameter tersebut terhadap kekerasan filamen PLA daur ulang. Hasilnya, suhu ekstrusi merupakan parameter paling dominan dalam menentukan densitas dan kekerasan PLA, dengan kondisi optimal pada 170 °C dan 40 rpm yang meningkatkan aliran lelehan, menurunkan porositas, serta menghasilkan densifikasi dan penguatan mekanik tanpa indikasi degradasi material. Temuan ini dapat dijadikan acuan pengaturan parameter proses pada unit ekstrusi skala laboratorium untuk menghasilkan

filamen PLA daur ulang yang lebih konsisten kualitasnya dan layak digunakan kembali pada proses 3D printing.

Kata Kunci: 3D printing, Filamen PLA daur ulang, Temperatur ekstrusi, Kecepatan sekrup, Kekerasan

I. PENDAHULUAN

Meningkatnya perhatian terhadap keberlanjutan lingkungan telah mendorong penelitian terhadap polimer yang dapat terurai secara hayati, khususnya dalam bidang pencetakan 3D yang terus berkembang. *Polylactic acid* (PLA) merupakan biopolimer yang berasal dari bahan baku terbarukan seperti pati jagung dan tebu. PLA telah mendapatkan popularitas sebagai alternatif yang lebih ramah lingkungan dibandingkan plastik berbasis minyak bumi, dengan tujuan mengurangi limbah plastik dan menurunkan beban lingkungan dari proses produksi plastik konvensional [1].

Namun, peningkatan penggunaan 3D printing juga diikuti oleh meningkatnya limbah PLA, sehingga menimbulkan kebutuhan mendesak akan strategi daur ulang dan pemanfaatan kembali yang efektif. Studi ini mengkaji kelayakan pengolahan kembali limbah PLA menjadi filamen yang dapat digunakan dengan memanfaatkan ekstruder sekrup tunggal [2]–[6]. Tahap ekstrusi merupakan langkah yang sangat penting dalam mengubah material PLA mentah menjadi filamen yang dapat dicetak. Proses ini bergantung pada ekstruder sekrup tunggal, yaitu peralatan serbaguna yang banyak digunakan untuk mengolah termoplastik seperti PLA [7]–[8]. Parameter proses kunci seperti suhu dan kecepatan sekrup berpengaruh signifikan terhadap kualitas dan konsistensi filamen. Suhu mengendalikan viskositas dan perilaku alir polimer dalam keadaan leleh, sedangkan kecepatan sekrup memengaruhi waktu tinggal dan gaya geser, yang pada gilirannya berdampak pada karakteristik mekanik filamen hasil ekstrusi [9]–[10].

Kekerasan merupakan sifat mekanik yang sangat penting karena memengaruhi ketahanan filamen terhadap deformasi dan keausan, sehingga berpengaruh pada durabilitas komponen hasil cetak. Variasi kondisi proses dapat menyebabkan perubahan kristalinitas, berat molekul, atau karakteristik struktural PLA, yang pada akhirnya

memengaruhi kekerasan [11]. Kajian sistematis terhadap pengaruh suhu dan kecepatan sekrup terhadap sifat-sifat ini akan memberikan wawasan penting untuk mengoptimalkan performa filamen PLA daur ulang.

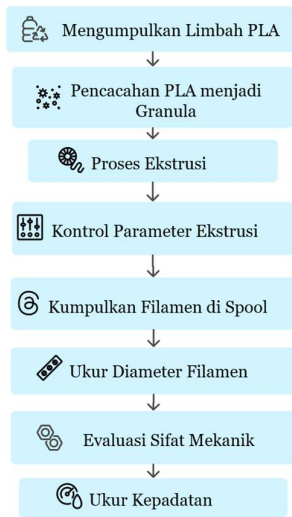
Meskipun sejumlah studi telah membahas pengaruh ekstrusi atau kecepatan sekrup terhadap kualitas filamen PLA, meskipun sejumlah studi telah membahas pengaruh suhu ekstrusi atau kecepatan sekrup terhadap kualitas filamen PLA, sebagian besar kajian sebelumnya masih cenderung menilai parameter tersebut secara terpisah, menggunakan rentang kondisi yang terbatas, atau berfokus pada *virgin PLA*. Akibatnya, pemahaman mengenai efek interaksi (kombinasi) suhu–kecepatan sekrup secara sistematis pada PLA daur ulang yang karakteristik reologinya dapat berubah akibat riwayat termal dan degradasi selama pemakaian masih belum tegas dan belum menghasilkan rujukan parameter proses yang konsisten untuk menghasilkan filamen dengan sifat mekanik stabil.

Selain itu, studi ini bertujuan untuk memperluas penerapan polimer *biodegradable*, memberikan manfaat bagi praktik manufaktur berkelanjutan di berbagai industri, dan mendorong prinsip ekonomi sirkular dalam penggunaan plastik. Penetapan praktik ekstrusi yang teroptimasi berpotensi memengaruhi teknologi daur ulang yang lebih luas dan metode produksi yang berwawasan lingkungan. Sebagai kesimpulan, daur ulang limbah PLA melalui proses ekstrusi sekrup tunggal merupakan jalur yang menjanjikan untuk mengurangi limbah plastik dan meningkatkan keberlanjutan dalam 3D printing. Dengan mengkaji peran suhu dan kecepatan sekrup serta pengaruhnya terhadap kekerasan filamen, penelitian ini bertujuan meningkatkan kualitas dan fungsionalitas filamen PLA daur ulang.

II. METODOLOGI

Penelitian ini berfokus pada daur ulang limbah *Polylactic acid* (PLA) menjadi filamen yang dapat dicetak dengan menyelidiki pengaruh suhu ekstrusi dan kecepatan putar sekrup menggunakan ekstruder sekrup tunggal rakitan khusus. Diagram alir metodologi penelitian ditunjukkan pada Gambar 1(a), dengan foto proses pada Gambar 1(b).

Proses Daur Ulang PLA dan Produksi Filamen



(a)



(b)

Gambar 1. (a) Diagram Alir Proses Penelitian
(b) Foto Proses Memasukkan Cacahan PLA pada Mesin Ekstrusi

Material utama yang digunakan adalah PLA daur ulang yang diperoleh dari limbah pencetakan 3D, termasuk hasil cetak yang gagal dan *support* yang biasanya digunakan untuk membantu saat pencetakan 3D. Seluruh limbah berasal dari satu pemasok yang menyediakan filamen PLA+ merek

Sunlu untuk memastikan konsistensi komposisi dan kualitas. Limbah yang terkumpul kemudian dicacah menjadi granul dengan ukuran baku sekitar 5 mm. Pada setiap proses, digunakan 10 gram PLA daur ulang untuk mempermudah proses peleburan dan meningkatkan karakteristik aliran selama proses ekstrusi.

Sebuah ekstruder sekrup tunggal dirancang dan dibuat secara khusus untuk penelitian ini, yang terdiri atas *hopper*, sekrup, *barrel* berpemanas, dan *dies* untuk pembentukan filamen. Mesin ekstrusi digerakkan oleh motor 1 HP tiga fasa dengan kecepatan 1400 rpm yang dihubungkan ke *gearbox* reduksi 1:20. Kecepatan putar sekrup dapat diatur dalam rentang 15–50 rpm menggunakan sebuah inverter. Inverter berfungsi untuk mengatur kecepatan motor sekaligus mengubah suplai masukan motor tiga fasa menjadi suplai satu fasa. Sistem pemanas terdiri dari empat *band heater* yang masing-masing mampu mencapai suhu hingga 400 °C untuk memastikan peleburan dan pengolahan material yang memadai.

Proses ekstrusi dilakukan dalam kondisi terkontrol, dengan suhu *barrel* diatur pada 150 °C, 160 °C, dan 170 °C. Rentang suhu ini ditentukan berdasarkan perilaku pelelehan PLA yang dilaporkan pada jurnal sebelumnya, yang menunjukkan titik leleh 160–180 °C [12]. Uji pendahuluan dengan mesin ini, menunjukkan bahwa PLA yang diekstrusi pada 180 °C menjadi terlalu cair sehingga tidak dapat membentuk filamen yang stabil (Gambar 2). Sebaliknya, ekstrusi di bawah 150 °C menghasilkan pembentukan filamen yang buruk atau bahkan gagal sama sekali karena peleburan PLA yang tidak mencukupi. Oleh karena itu, rentang praktis 150–170 °C dipilih untuk penelitian ini.



Gambar 2. Filamen Tidak Stabil yang Diekstrusi Hingga 180 °C

Kecepatan putar sekrup diatur pada 20, 30, dan 40 rpm untuk mengevaluasi pengaruh laju geser terhadap filamen yang dihasilkan. Setiap kombinasi suhu dan kecepatan sekrup diulang tiga kali untuk meningkatkan keandalan hasil. Filamen hasil ekstrusi kemudian didinginkan dan digulung pada *spool*. Diameter filamen diukur pada beberapa titik menggunakan jangka sorong digital untuk memverifikasi kesesuaian dengan standar diameter 1,75 mm yang dibutuhkan untuk pencetakan 3D (Gambar 3).



Gambar 3. Pengukuran Diameter

Sifat mekanik filamen dievaluasi melalui pengujian kekerasan menggunakan durometer Shore A. Sampel filamen dengan panjang sekitar 10 cm dikondisikan pada suhu ruang selama 24 jam sebelum pengujian. Kekerasan diukur pada setiap sampel untuk mengakomodasi variasi, dan nilai rata-ratanya. Durometer Shore A pada Gambar 4 digunakan sebagai alat uji kekerasan.



Gambar 4. Durometer Shore A

Pengukuran densitas dilakukan menggunakan prinsip Archimedes, yang menentukan volume suatu benda padat dengan mengukur gaya apungnya dalam fluida. Pada metode ini, sampel filamen terlebih dahulu ditimbang di udara untuk mendapatkan massa kering (m_{air}). Sampel kemudian dicelupkan ke dalam air, dan massa (m_{water}) dicatat menggunakan neraca presisi. Volume sampel (V) dihitung dari selisih antara m_{air} dan m_{water} dengan mempertimbangkan densitas air (ρ_{water}). Densitas curah sampel (ρ_{bulk}) ditentukan dengan Rumus 1.

$$\rho_{bulk} = \frac{m_{air}}{V} = \frac{m_{air}}{(m_{air} - m_{water}) / \rho_{water}} \quad (1)$$

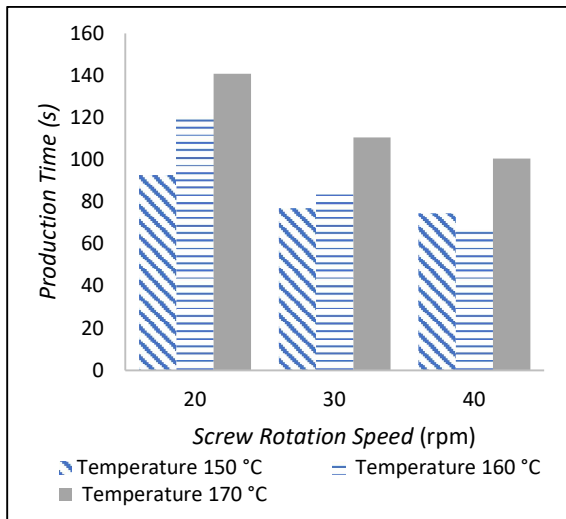
Metode ini memberikan estimasi densitas filamen PLA hasil ekstrusi yang andal. Metodologi ini menyediakan pendekatan sistematis untuk mengoptimalkan daur ulang limbah PLA menjadi filamen berkualitas tinggi untuk proses manufaktur aditif. Dengan mengendalikan parameter ekstrusi serta mengevaluasi sifat mekanik dan struktural, penelitian ini bertujuan untuk berkontribusi pada praktik berkelanjutan dalam daur ulang polimer dan aplikasi pencetakan 3D.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian ini disajikan pada Tabel 1 berikut.

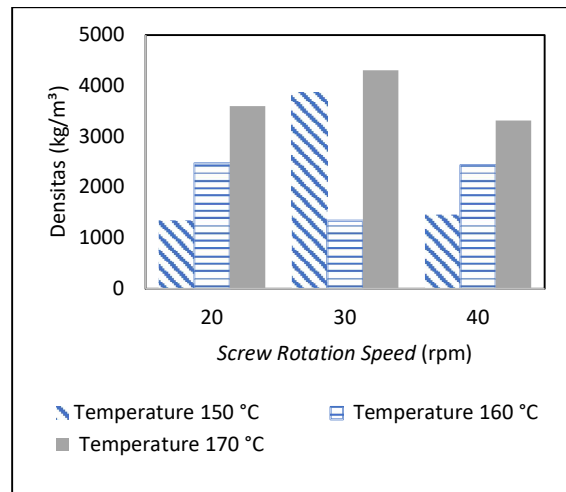
Tabel 1. Hasil Penelitian

Temperature (°C)	Kecepatan Skrup (rpm)	Densitas (kg/m ³)	Hardness (HA)
150 °C	20	1348	95
	30	3873	95
	40	1459	95.33
160 °C	20	2469	96.33
	30	1339	96.33
	40	2434	96.67
170 °C	20	3596	96
	30	4301	97.16
	40	3310	97



Bagan 1. Kecepatan Sekrup dan Temperatur terhadap Waktu Produksi

Peningkatan suhu pada umumnya menurunkan viskositas lelehan polimer, sehingga mempermudah aliran material. Pada Bagan 1, secara umum peningkatan kecepatan putaran *screw* cenderung menurunkan waktu produksi, namun kenaikan temperatur pemanasan justru meningkatkan waktu produksi pada setiap tingkat kecepatan. Hasil pada 170 °C menunjukkan bahwa waktu produksi tetap tinggi pada semua kecepatan sekrup. Hal ini mengindikasikan bahwa degradasi material atau ketidakstabilan pada suhu tinggi mengimbangi keuntungan dari penurunan viskositas.



Bagan 2. Pengaruh Kecepatan Putar Sekrup dan Suhu terhadap Densitas Material

Dalam penelitian ini, kecepatan sekrup jelas memengaruhi waktu produksi, pada 150–160 °C, kecepatan sekrup yang lebih tinggi secara konsisten menurunkan waktu produksi, sehingga menegaskan efek positif dari peningkatan aliran material dalam kondisi terkontrol. Kecepatan sekrup yang lebih tinggi umumnya gaya geser, sehingga mempercepat peleburan dan laju keluaran material.

Bagan 2 menggambarkan pengaruh kecepatan putar sekrup dan suhu proses terhadap densitas rata-rata material yang dihasilkan selama suatu proses manufaktur tertentu. Tiga suhu, yaitu 150 °C, 160 °C, dan 170 °C digunakan dengan kecepatan putar sekrup 20, 30, dan 40 rpm. Secara umum, densitas material cenderung meningkat pada temperatur pemanasan yang lebih tinggi, sementara pengaruh kecepatan putaran *screw* menunjukkan pola fluktuatif dengan densitas tertinggi terjadi pada kondisi tertentu.

Terlihat dengan jelas bahwa densitas bergantung pada kecepatan putar sekrup dan suhu. Pada 170 °C, material secara konsisten menunjukkan densitas tertinggi untuk semua kecepatan sekrup, dengan densitas maksimum 4301 kg/m³ pada 30 rpm. Hal ini menunjukkan bahwa suhu proses yang lebih tinggi mendorong pemadatan atau fusi material yang lebih baik, kemungkinan karena aliran lelehan polimer yang lebih baik sehingga menurunkan

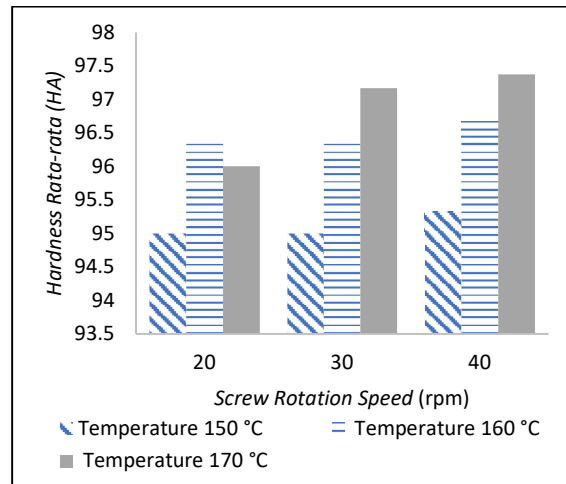
kandungan rongga (*void*) dan meningkatkan kohesi material.

Sebaliknya, nilai densitas terendah diamati pada 150 °C dan 160 °C, khususnya pada 30 rpm untuk kondisi 160 °C (1339 kg/m³), yang mengindikasikan pengolahan material yang kurang optimal pada kombinasi parameter tersebut. Menariknya, pada 30 rpm, densitas pada 150 °C (3873 kg/m³) lebih tinggi dibandingkan pada 160 °C, yang menyoroti adanya hubungan nonlinier antara suhu dan pendensifikasian material. Anomali ini dapat disebabkan oleh degradasi material atau fusi yang tidak sempurna pada 160 °C, sehingga perlu dilakukan analisis termal atau reologi lebih lanjut.

Pada kecepatan 20 dan 40 rpm, terlihat tren yang lebih dapat diprediksi. Densitas meningkat secara konsisten seiring kenaikan suhu; untuk kecepatan 20 rpm, densitas meningkat dari 1348 kg/m³ (150 °C) menjadi 3596 kg/m³ (170 °C); dan untuk 40 rpm, dari 1459 kg/m³ (150 °C) menjadi 3310 kg/m³ (170 °C). Hal ini menunjukkan bahwa kecepatan sekrup saja tidak menentukan pendensifikasian; sebaliknya, suhu memiliki pengaruh yang lebih dominan, kemungkinan karena dampak langsungnya terhadap viskositas dan perilaku aliran. Peningkatan kecepatan sekrup cenderung memperbaiki laju keluaran dan perilaku lelehan, yang dalam beberapa kondisi suhu dapat meningkatkan pemadatan, meskipun pada banyak kasus peningkatan kecepatan sekrup juga mengurangi waktu tinggal, yang dapat menyebabkan peleburan kurang sempurna atau lebih banyak rongga jika suhu tidak memadai [13], [14].

Secara ringkas, interaksi antara suhu dan kecepatan sekrup berperan sangat penting dalam mengoptimalkan densitas material. Hasil ini mengindikasikan bahwa kecepatan sekrup menengah (30 rpm) yang dikombinasikan dengan suhu proses tinggi (170 °C) merupakan kondisi yang paling efektif untuk mencapai pendensifikasian maksimum. Penelitian lanjutan sebaiknya mengeksplorasi perubahan mikrostruktural atau morfologi yang terjadi pada

kondisi ini untuk lebih memahami mekanisme yang mendasarinya.



Bagan 3. Pengaruh Kecepatan Putar Sekrup dan Suhu terhadap Kekerasan Material

Pada Bagan 3, pengaruh kecepatan putar sekrup dan suhu proses terhadap kekerasan rata-rata (HA) suatu material diperlihatkan. Secara umum, nilai kekerasan rata-rata meningkat seiring dengan kenaikan temperatur pemanasan dan kecepatan putaran *screw*, dengan kekerasan tertinggi diperoleh pada kombinasi temperatur 170 °C dan kecepatan 40 rpm. Data menunjukkan bahwa kedua variabel tersebut memengaruhi kekerasan, dengan suhu memberikan dampak yang lebih dominan. Pada semua kecepatan sekrup (20, 30, dan 40 rpm), peningkatan suhu proses dari 150 °C menjadi 170 °C menghasilkan kenaikan kekerasan yang nyata. Sebagai contoh, pada 40 rpm, kekerasan meningkat dari 95,33 HA pada 150 °C menjadi 97,375 HA pada 170 °C. Suhu berperan penting dalam menentukan kekerasan material; seiring penurunan suhu, nilai kekerasan juga menurun karena peleburan yang tidak sempurna dan ikatan yang buruk [7]. Hal ini menunjukkan bahwa suhu yang lebih tinggi meningkatkan konsolidasi material, kemungkinan melalui mobilitas molekul dan fusi yang lebih baik selama pemrosesan, sehingga menghasilkan struktur internal yang lebih padat dan seragam [15], [16].

Meskipun pengaruh kecepatan sekrup kurang menonjol dibandingkan suhu, kecepatan ini tetap

memberikan kontribusi positif terhadap kekerasan, terutama bila dikombinasikan dengan suhu tinggi. Sebagai contoh, pada 170 °C, peningkatan kecepatan sekrup dari 20 menjadi 40 rpm meningkatkan kekerasan dari 96 HA menjadi 97,375 HA. Tren ini dapat dikaitkan dengan peningkatan pemanasan geser dan aliran lelehan yang lebih baik pada kecepatan sekrup yang lebih tinggi, yang dapat meningkatkan pencampuran partikel dan mengurangi rongga internal. Namun, kecepatan sekrup yang terlalu tinggi atau pengendalian suhu yang buruk dapat mempercepat degradasi atau menyebabkan peleburan yang tidak memadai, sehingga berdampak negatif pada sifat mekanik [17].

Pengamatan ini konsisten dengan literatur yang ada. Ding et al. (2022) secara khusus mempelajari campuran tersier LDPE/PS/PMMA dan melaporkan bahwa kecepatan sekrup dan suhu *barrel* memengaruhi kristalinitas dan sifat mekanik, dengan suhu sering kali memberikan pengaruh yang lebih kuat [16]. Salleh et al. (2014) juga melaporkan bahwa suhu proses yang lebih tinggi meningkatkan modulus tarik dan sifat mekanik terkait dalam studi pengolahan polimer, yang mendukung gagasan bahwa energi termal meningkatkan performa [15]. Zhang et al. (2012) mengamati pengaruh kecepatan sekrup terhadap sifat mekanik pada campuran polimer hasil ekstrusi dan menekankan peran kecepatan sekrup dalam menentukan struktur dan kekuatan ketika dikombinasikan dengan profil suhu yang sesuai [18].

Sebagai kesimpulan, interaksi antara kecepatan putar sekrup dan suhu proses berperan penting dalam mengoptimalkan kekerasan. Kombinasi 170 °C dan 40 rpm ditemukan sebagai kondisi yang paling efektif untuk memaksimalkan kekerasan [16].

Pengaruh suhu ekstrusi terhadap kekerasan dan struktur kristal telah banyak dilaporkan. Wang (2024) menyatakan bahwa peningkatan suhu ekstrusi menurunkan viskositas PLA, sehingga memungkinkan rantai polimer memiliki mobilitas yang lebih besar dan tersusun menjadi struktur kristalin yang lebih teratur. Hal ini umumnya

menghasilkan peningkatan sifat mekanik seperti modulus, kekerasan, dan kekakuan [1]. Konsisten dengan hal tersebut, data pada penelitian ini juga menunjukkan bahwa kekerasan meningkat seiring kenaikan suhu proses dari 150 °C menjadi 170 °C. Selain suhu, kecepatan putar sekrup juga berperan penting. Gigante (2023), dengan pendekatan *Design of Experiment* (DoE), menunjukkan bahwa kecepatan ekstrusi secara signifikan memengaruhi morfologi, termasuk distribusi ukuran kristal dan porositas, serta kinerja mekanik PLA. Pada kecepatan sekrup rendah, geser yang tidak mencukupi dapat menyebabkan distribusi panas yang tidak merata dan kristalisasi yang kurang seragam, sedangkan kecepatan sekrup yang lebih tinggi meningkatkan gaya geser dan orientasi molekul. Sejalan dengan itu, dalam penelitian ini, kecepatan sekrup yang lebih tinggi (30–40 rpm) menghasilkan nilai kekerasan sedikit lebih tinggi dibandingkan 20 rpm, khususnya pada suhu yang lebih tinggi [19].

Selanjutnya, Fakhurrozi et al. (2025) melaporkan bahwa komposisi pengisi dan parameter ekstrusi sangat memengaruhi densitas dan porositas internal, di mana porositas yang lebih rendah (atau densitas yang lebih tinggi) berkorelasi dengan perilaku mekanik yang lebih baik, seperti kekerasan dan ketahanan terhadap deformasi. Tren ini juga terlihat dalam penelitian ini, di mana densitas rata-rata yang lebih tinggi, yang dicapai pada suhu dan kecepatan sekrup yang lebih tinggi, berkaitan dengan peningkatan kekerasan [20]. Meskipun demikian, studi-studi sebelumnya juga mengingatkan bahwa suhu ekstrusi atau kecepatan sekrup yang terlalu tinggi dapat mendorong degradasi termal dan pemutusan rantai, yang pada akhirnya menurunkan kinerja mekanik jika tidak dikendalikan dengan baik. Sebaliknya, temuan saat ini tidak menunjukkan indikasi penurunan kekerasan, yang mengisyaratkan bahwa jendela parameter proses yang dipilih masih berada dalam rentang yang aman untuk PLA [1], [19].

Secara korelatif, peningkatan kecepatan putaran *screw* cenderung mempercepat aliran material di dalam *barrel*, yang berdampak langsung pada

penurunan waktu produksi, namun efeknya terhadap densitas dan kekerasan tidak selalu linier karena dipengaruhi oleh kondisi termal material. Pada temperatur rendah, kenaikan rpm dapat menyebabkan pengisian material kurang optimal dan meningkatkan porositas, sehingga densitas dan kekerasan relatif lebih rendah. Sebaliknya, pada temperatur yang lebih tinggi, material menjadi lebih homogen dan viskositas menurun, sehingga kombinasi rpm dan temperatur tinggi menghasilkan densitas lebih besar dan kekerasan yang meningkat, akibat ikatan antarmolekul yang lebih baik serta berkurangnya rongga internal. Dengan demikian, temperatur berperan dominan dalam kualitas material (densitas dan kekerasan), sedangkan kecepatan *screw* lebih berpengaruh terhadap efisiensi proses, dan keduanya saling berinteraksi dalam menentukan performa akhir produk.

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

Hasil penelitian dengan jelas menunjukkan bahwa suhu ekstrusi berperan dominan dalam menentukan densitas dan kekerasan PLA. Suhu yang lebih tinggi, khususnya pada 170 °C, meningkatkan aliran lelehan dan konsolidasi material, sehingga menurunkan porositas dan memperbaiki densifikasi. Densitas optimum diperoleh pada kondisi 170 °C dan 30 rpm (4301 kg/m³), yang mengindikasikan bahwa kecepatan sekrup menengah dapat menghasilkan gaya geser dan waktu tinggal yang cukup untuk mencapai pemadatan yang lebih baik. Sebaliknya, nilai densitas yang sangat rendah pada 160 °C dan 30 rpm menunjukkan adanya perilaku reologi nonlinier yang mungkin berkaitan dengan fusi yang tidak sempurna atau efek termal lokal.

Kekerasan mengikuti tren serupa, di mana suhu yang lebih tinggi secara konsisten meningkatkan nilai kekerasan pada semua kecepatan sekrup. Meskipun pengaruh kecepatan sekrup tidak sedominan suhu, kecepatan yang lebih tinggi (30–40 rpm) sedikit meningkatkan kekerasan ketika dikombinasikan dengan suhu tinggi, kemungkinan karena pemanasan geser yang lebih baik dan orientasi molekuler yang meningkat. Korelasi positif antara densitas dan kekerasan menunjukkan

bahwa penurunan porositas berkontribusi secara langsung terhadap penguatan mekanik. Jendela proses pada 170 °C dan 40 rpm ditemukan sebagai kondisi yang paling efektif untuk memaksimalkan performa, tanpa adanya indikasi degradasi, dan karenanya dapat dipertimbangkan sebagai kondisi optimal untuk proses ekstrusi PLA.

Penelitian di masa depan sebaiknya mencakup analisis mikrostruktural (misalnya SEM, DSC untuk mengamati perubahan kristalinitas) guna memahami lebih jauh mekanisme perubahan ini, serta mengeksplorasi rentang kondisi proses yang lebih luas untuk mengidentifikasi batas performa yang mungkin.

Hasil penelitian ini memiliki implikasi praktis yang relevan bagi UMKM filamen dan laboratorium pendidikan. Bagi pelaku UMKM filamen daur ulang, pengaturan temperatur pemanasan yang stabil dan relatif tinggi disarankan untuk menghasilkan filamen dengan densitas dan kekerasan yang lebih konsisten, sementara kecepatan putaran *screw* dapat disesuaikan guna memenuhi target kapasitas produksi tanpa memerlukan investasi mesin berteknologi tinggi. Di sisi lain, penelitian ini juga dapat dimanfaatkan sebagai modul praktikum di laboratorium pendidikan teknik mesin atau manufaktur untuk memperkenalkan hubungan sebab-akibat antara parameter proses ekstrusi dan sifat material, sehingga mendukung pembelajaran berbasis eksperimen pada bidang proses manufaktur, material polimer, dan optimasi proses.

REFERENSI

- [1] X. Wang et al., "Research progress in *Polylactic acid* processing for 3D printing," J. Manuf. Process., vol. 112, pp. 161–178, 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.01.038>.
- [2] M. Niaounakis, "Recycling of biopolymers – The patent perspective," Eur. Polym. J., vol. 114, pp. 464–475, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2019.02.027>.
- [3] M. R. Hasan, I. J. Davies, A. Pramanik, M. John, and W. K. Biswas, "Recycling Post-

- Consumed *Polylactic acid* Waste Through Three-Dimensional *Printing*: Technical vs. Resource Efficiency Benefits,” *Sustain.*, vol. 17, no. 6, pp. 1–26, 2025, doi: 10.3390/su17062484.
- [4] S. Budin, N. C. Maideen, M. H. Koay, D. Ibrahim, and H. Yusoff, “A comparison study on mechanical properties of virgin and recycled *Polylactic acid* (PLA),” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1349, no. 1, 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1349/1/012002.
- [5] M. R. Hasan, I. J. Davies, A. Pramanik, M. John, and W. K. Biswas, “Potential of recycled PLA in 3D *printing*: A review,” *Sustain. Manuf. Serv. Econ.*, vol. 3, no. March, p. 100020, 2024, doi: 10.1016/j.smse.2024.100020.
- [6] D. Hidalgo-carvajal, Á. H. Muñoz, J. Garrido-gonz, R. Carrasco-gallego, and V. Alc, “Recycled PLA for 3D *Printing*: A Comparison of Recycled PLA Filaments from Waste of Different Origins after Repeated Cycles of Extrusion,” 2023.
- [7] M. R. Hasan, I. J. Davies, A. Paramanik, M. John, and W. K. Biswas, “Fabrication and Characterisation of Sustainable 3D-Printed Parts Using Post-Consumer PLA Plastic and Virgin PLA Blends,” *Processes*, vol. 12, no. 4, 2024, doi: 10.3390/pr12040760.
- [8] S. S. Patil, A. C. Anbalagan, R. D. Pyarasanic, A. Sukhdev, and J. Amalraj, “Advances in Material Extrusion Additive Manufacturing Technology with Polymer Materials and Polymer Nanocomposites: A Comprehensive Review Advances in Material Extrusion Additive Manufacturing Technology with Polymer Materials and Polymer Nanocomposites,” 2024, doi: 10.20944/preprints202409.2448.v1.
- [9] S. B. Y. Pratama, N. P. Sari, H. Wicaksono, and A. Faizin, “THE INFLUENCE OF *TEMPERATURE* AND *SCREW* ROTATION SPEED ON DIAMETER IRREGULARITY IN PLASTIC EXTRUSION USING RECYCLED PLA,” *J. Appl. Mech. Eng. Technol. Innov.*, vol. 1, no. 1, pp. 21–29, 2025, doi: <https://doi.org/10.52158/jameti.v1i1.1314>.
- [10] N. Ranjan, R. Kumar, and R. Singh, “1.33 - Single *screw* extrusion for recycling of biomedical scaffolds,” S. B. T.-C. M. P. (Second E. Hashmi, Ed. Oxford: Elsevier, 2024, pp. 307–313. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-96020-5.00114-X>.
- [11] V. K. Selvaraj et al., “Sustainable additive manufacturing of recycled RPU/PLA composites via filament extrusion for enhanced mechanical and acoustic properties,” *Results Eng.*, vol. 27, no. July, p. 106365, 2025, doi: 10.1016/j.rineng.2025.106365.
- [12] F. Ebrahimi and H. Ramezani Dana, “Poly lactic acid (PLA) polymers: from properties to biomedical applications,” *Int. J. Polym. Mater. Polym. Biomater.*, vol. 71, no. 15, pp. 1117–1130, Oct. 2022, doi: 10.1080/00914037.2021.1944140.
- [13] K. Wilczyński, K. Buziak, K. J. Wilczyński, A. Lewandowski, and A. Nastaj, “Computer modeling for single-*screw* extrusion of wood-plastic composites,” *Polymers (Basel)*, vol. 10, no. 3, 2018, doi: 10.3390/polym10030295.
- [14] C. Jameson, D. M. Devine, G. Keane, and N. M. Gately, “Influence of Extrusion *Screw* Speed and CNT Concentration on the Mechanical and EMI Properties of PC/ABS Based Nanocomposites,” *Materials (Basel)*, vol. 17, no. 11, 2024, doi: 10.3390/ma17112625.
- [15] F. M. Salleh, A. Hassan, R. Yahya, and A. D. Azzahari, “Effects of extrusion *Temperature* on the rheological, dynamic mechanical and tensile properties of kenaf fiber/HDPE composites,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 58, pp. 259–266, 2014, doi: 10.1016/j.compositesb.2013.10.068.
- [16] Y. Ding, C. Abeykoon, and Y. S. Perera, “The effects of extrusion parameters and blend composition on the mechanical, rheological and thermal properties of LDPE/PS/PMMA

- ternary polymer blends,” *Adv. Ind. Manuf. Eng.*, vol. 4, no. October 2021, p. 100067, 2022, doi: 10.1016/j.aime.2021.100067.
- [17] C. Abeykoon, A. McMillan, and B. K. Nguyen, “Energy efficiency in extrusion-related polymer processing: A review of state of the art and potential efficiency improvements,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 147, no. May, 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.111219.
- [18] Z. X. Zhang, C. Gao, Z. X. Xin, and J. K. Kim, “Effects of extruder parameters and silica on physico-mechanical and foaming properties of PP/wood-fiber composites,” *Compos. Part B Eng.*, vol. 43, no. 4, pp. 2047–2057, 2012, doi: 10.1016/j.compositesb.2012.01.047.
- [19] V. Gigante et al., “Tailoring morphology and mechanical properties of PLA/PBSA blends optimizing the twin-screw extrusion processing parameters aided by a 1D simulation software,” *Polym. Test.*, vol. 129, no. November, p. 108294, 2023, doi: 10.1016/j.polymertesting.2023.108294.
- [20] I. F. Fakhurrozi, M. K. Herliansyah, and Kusmono, “Characterization and mechanical properties of PLA/acetylated cellulose nanocrystals composites for dental crown prototype application,” *Results Eng.*, vol. 25, no. January, p. 103903, 2025, doi: 10.1016/j.rineng.2024.103903.