



*Research Articles*

## **Pengaruh Suhu Ekstrusi dan Komposisi terhadap Karakteristik Filamen Biokomposit PLA/Hidroksiapatit untuk Aplikasi Ortopedi Berbasis 3D Printing**

### *The Effect of Extrusion Temperature and Composition on the Characteristics of PLA/Hydroxyapatite Biocomposite Filaments for Orthopedic Applications Based on 3D Printing*

**M. Mukaddam Alaydrus<sup>1</sup>, Wahyudin<sup>2</sup>, Susi Rahayu\*<sup>2</sup>, Dyah Purnaning<sup>1</sup>, Maz Isa A.A<sup>1</sup>, Muh. As'ad Hamzah<sup>1</sup>, Hurnah<sup>2</sup>, Ahmad Taufik S<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Program Studi Ilmu Kedokteran, Fakultas Kedokteran dan Ilmu Kesehatan

<sup>2</sup>Program Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Universitas Mataram, Nusa Tenggara Barat, INDONESIA

\*corresponding author, email : [susirahayu@unram.ac.id](mailto:susirahayu@unram.ac.id)

Manuscript received: 18-04-2026. Accepted: 26-06-2026

#### **ABSTRAK**

Teknologi 3D printing berbasis fused deposition modeling memerlukan filamen biomaterial dengan dimensi stabil, tekstur seragam, dan sifat mekanik memadai untuk aplikasi ortopedi. Penelitian ini menganalisis pengaruh suhu ekstrusi dan komposisi PLA/hidroksiapatit terhadap karakteristik filamen biokomposit. Hidroksiapatit disintesis dari limbah cangkang kerang mutiara *Pinctada maxima* melalui presipitasi basah, kemudian dicampurkan dengan PLA dan diekstrusi menggunakan single screw extruder. Variasi suhu ekstrusi PLA adalah 120, 125, 130, dan 135°C, sedangkan variasi komposisi PLA/hidroksiapatit adalah 100:0, 95:5, 90:10, dan 85:15. Hasil menunjukkan bahwa peningkatan suhu memperbaiki tekstur permukaan dan kestabilan diameter filamen, dengan suhu 135°C menghasilkan permukaan paling halus dan diameter 2,080 mm; namun sifat mekanik tertinggi PLA dicapai pada 130°C. Pada filamen biokomposit, seluruh diameter masih memenuhi kisaran filamen 3D printing. Komposisi PLA/hidroksiapatit 90:10 memberikan performa terbaik dengan densitas 1,470 g/cm<sup>3</sup>, kuat tarik 4,692 MPa, modulus elastisitas 1426,500 MPa, dan elongasi 0,173 mm. Penambahan hidroksiapatit 15% menurunkan kualitas akibat aglomerasi partikel. Filamen PLA/hidroksiapatit berpotensi dikembangkan sebagai bahan 3D printing ortopedi. Evaluasi lanjutan diperlukan untuk menguji biokompatibilitas, degradasi, dan performa hasil cetak langsung.

**Kata kunci** : 3D printing; PLA/hidroksiapatit; filamen biokomposit; suhu ekstrusi; biomaterial ortopedi

#### **ABSTRACT**

Fused deposition modeling-based 3D printing requires biomaterial filaments with stable dimensions, uniform surface texture, and adequate mechanical properties for orthopedic applications. This study examined the effects of extrusion temperature and PLA/hydroxyapatite composition on the characteristics of biocomposite filaments. Hydroxyapatite was synthesized from *Pinctada maxima* pearl shell waste through wet precipitation, mixed with PLA, and processed using a single-screw extruder. PLA extrusion temperatures were varied at 120, 125, 130, and 135°C, while PLA/hydroxyapatite compositions were 100:0, 95:5, 90:10, and 85:15. The results showed that increasing

temperature improved surface texture and diameter stability; 135°C produced the smoothest filament surface with a diameter of 2.080 mm, whereas the highest mechanical properties of PLA were obtained at 130°C. In the biocomposite filaments, all diameters remained within the standard range for 3D printing. The PLA/hydroxyapatite 90:10 composition showed the best performance, with a density of 1.470 g/cm<sup>3</sup>, tensile strength of 4.692 MPa, elastic modulus of 1426.500 MPa, and elongation of 0.173 mm. Adding 15% hydroxyapatite reduced quality due to particle agglomeration. Further validation is required.

**Keywords:** 3D printing; PLA/hydroxyapatite; biocomposite filament; extrusion temperature; orthopedic biomaterial

## PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi 3D printing saat ini sangat pesat di seluruh dunia dan menjadi salah satu inovasi utama dalam bidang manufaktur modern. Teknologi 3D printing ini merupakan metode manufaktur aditif yang dapat membentuk objek secara bertahap berdasarkan model digital dan hanya menggunakan material sesuai kebutuhan tanpa menimbulkan limbah. Berbeda halnya dengan metode manufaktur konvensional seperti machining atau *injection molding* dan *compression molding* yang membutuhkan alat cetak dan dapat menimbulkan limbah. Selain itu metode tersebut memiliki keterbatasan yaitu produk yang dihasilkan melalui *injection molding* cenderung memiliki densitas yang rendah serta sifat mekanik yang kurang optimal. Sementara itu, metode *compression molding* sering menghasilkan distribusi densitas yang tidak homogen, yang berpotensi menimbulkan cacat mikro pada material setelah proses sintering. Hal ini dapat menyebabkan terjadinya konsentrasi tegangan selama proses implantasi. Cacat tersebut berpotensi menjadi titik inisiasi perambatan retak yang pada akhirnya dapat menyebabkan kegagalan pada aplikasi medis (Binobaid et al., 2025; Wu et al., 2024). Sebaliknya, teknologi 3D printing menawarkan keunggulan yang signifikan dibandingkan metode konvensional. Berbasis model *Computer-Aided Design* (CAD), teknologi ini mampu memproduksi struktur dengan geometri kompleks secara presisi tinggi. Selain itu, memungkinkan pembuatan graft tulang yang disesuaikan dengan kebutuhan spesifik pasien (*patient-specific*), sehingga mampu mengatasi berbagai keterbatasan yang terdapat pada metode pembentukan konvensional. Oleh karena itu diberbagai sektor industri, kesehatan dan lainnya memanfaatkan teknologi 3d printing ini (Binobaid et al., 2025; Pristiansyah et al., 2019; Wu et al., 2024).

Dalam bidang kesehatan, teknologi 3D printing menunjukkan potensi yang sangat besar, khususnya dalam pembuatan implan ortopedik seperti *bone screw* (bioscrew), prostetik, dan implant, dan perangkat medis lainnya. Bioscrew berperan penting dalam menjaga stabilitas struktur tulang selama proses penyembuhan, sehingga membutuhkan material dengan kombinasi sifat mekanik yang baik, biokompatibilitas tinggi, serta kemampuan degradasi yang terkontrol (Zhang et al., 2026). Ketersediaan filamen yang biokompatibel, kuat secara mekanik, dan mudah dicetak menjadi faktor utama dalam aplikasi 3D printing biomaterial (G. Sunarto & Katmini, 2023).

Hidroksiapatit (HA) dengan rumus kimia  $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$  merupakan salah satu material yang dikenal memiliki sifat yang biokompatibel tinggi dan mempunyai sifat bioresorbable serta berfungsi sebagai osteo konduktif dan osteoinduktif (Siswanto et al., 2019). HA banyak dimanfaatkan dalam bidang medis sebagai system pengiriman obat, pelapis implan, perbaikan jaringan lunak, pengisi tulang, dan perancah untuk rekayasa jaringan tulang dan sebagai bahan dasar pembuatan filamen untuk pengaplikasian dibidang medis (Fernandes C3ta

et al., 2016). HA dapat diperoleh dari hasil sintesis kalsium oksida yang bersumber dari limbah tulang hewan seperti sapi dan ikan, serta cangkang hewan laut seperti cangkang kerang mutiara (*Pinctada maxima*), dimana pada limbah cangkang kerang ini terdapat 52,23% kalsium oksida (CaO). Nusa Tenggara Barat merupakan wilayah penghasil limbah kerang terbanyak yang mencapai sekitar 600 kg per tahun. Namun, limbah tersebut pemanfaatannya masih belum optimal. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh Rahayu et al., (2018) bahwa HA hasil sintesis dari cangkang kerang Mutiara memiliki derajat kristalinitas tertinggi yaitu sebesar 78,33% dengan ukuran partikel 1,40  $\mu\text{m}$ . Akan tetapi, HA memiliki sifat mekanik yang terbatas, sehingga perlu dikombinasikan dengan material lain untuk meningkatkan performanya seperti biomaterial jenis polimer.

Penggunaan polimer biodegradable berkembang pesat sebagai fokus penelitian, terutama karena potensinya untuk menghindari operasi sekunder setelah implantasi. Salah satu polimer biodegradable seperti polylactic acid (PLA) banyak digunakan sebagai material dasar filamen 3D printing karena sifat antisitotoksik, densitas rendah, biokompatibilitas, dan biodegradabilitas. Bahan biodegradable secara bertahap mampu meluruh (degradasi) dalam tubuh manusia untuk menghasilkan zat atau senyawa yang tidak bersifat racun yang dapat diekskresikan, kemudahan proses dan sifat mekanik yang cukup baik (Sari et al., 2019). Oligomer dan monomer asam laktat yang dihasilkan selama degradasi PLA diserap sepenuhnya oleh makhluk hidup. Selain itu, PLA memiliki kemampuan proses dan ketahanan mekanis yang tinggi. Keadaan kristal PLA dapat sepenuhnya amorf (non-kristal) atau hingga 40% kristal. Melting temperature ( $T_m$ ) PLA adalah antara 130 dan 180°C, sedangkan glass transition temperature ( $T_g$ ) antara 50 dan 80°C (Pramudya et al., 2025; Singh et al., 2019). Oleh karena itu PLA memiliki potensial untuk dikombinasikan dengan HA dalam pengembangan biokomposit berbasis 3D printing untuk aplikasi di bidang Kesehatan.

Beberapa penelitian terdahulu telah mengkaji kombinasi HA dengan PLA dalam pengembangan material biokomposit, khususnya dalam pembuatan filamen untuk diaplikasikan dalam 3D printing. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan HA mampu meningkatkan kekuatan serta performa mekanik biokomposit yang dihasilkan (L. Custodio et al., 2024). Temuan serupa juga dilaporkan oleh Tazibt et al., (2023) bahwa peningkatan fraksi HA berbanding lurus dengan peningkatan sifat mekanik biokomposit. Selain itu, penelitian biokomposit berbasis PLA/PCL/HA menunjukkan bahwa peningkatan kandungan PLA dan HA turut berkontribusi terhadap peningkatan sifat mekanik (Nugraha et al., 2024). Secara keseluruhan beberapa hasil penelitian tersebut mengindikasikan bahwa kombinasi PLA dan HA memiliki potensi yang signifikan dalam menghasilkan material biokomposit dengan karakteristik yang lebih unggul.

Penelitian mengenai pengembangan biokomposit PLA/HA telah banyak dilaporkan, studi mengenai biokomposit PLA/HA dimana HA yang digunakan bersumber dari limbah *Pinctada maxima* masih terbatas. Sebagian besar penelitian terdahulu berfokus pada pemanfaatan limbah biogenik seperti cangkang telur, tulang hewan, dan cangkang moluska lainnya. Berdasarkan karakteristik HA yang dilaporkan oleh Rahayu et al., (2018) maka cangkang kerang Mutiara memiliki potensi yang tinggi sebagai bahan dasar biomaterial yang masih minim dieksplorasi. Oleh karena itu penelitian ini dilakukan untuk mengkaji pengaruh suhu ekstruksi terhadap karakteristik filamen PLA serta mengevaluasi sifat mekanik dan sifat fisik filamen PLA/HA berdasarkan variasi komposisi. Penelitian ini meliputi proses fabrikasi

filamen PLA dan filamen biokomposit PLA/HA menggunakan metode ekstruksi dengan memanfaatkan limbah *Pinctada maxima* sebagai sumber kalsium untuk HA.

## BAHAN DAN METODE

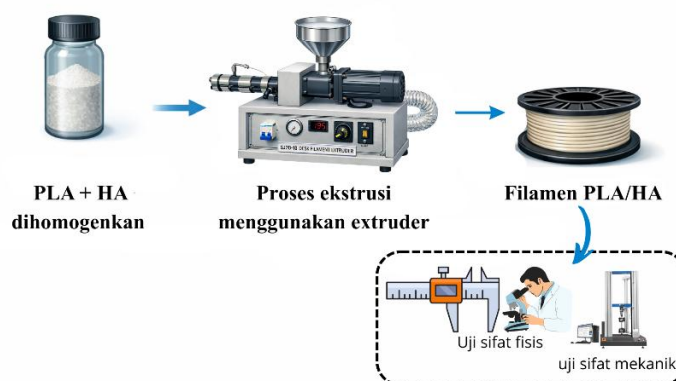
### Alat dan Bahan

Perlengkapan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi ayakan 100 mesh, mortar and pestle, batang pengaduk, cawan crucible, cawan petri, furnace, gelas kimia (200 mL dan 500 mL), magnetic stirrer with hot plate (IKA C-MAG HS, Indonesia), grinder (SY – 150 pulp grinder Yamamoto, Indonesia), magnetic bar, miller machine FCT-Z30, neraca analitik, oven, pipet volume (1 mL dan 25 mL), whattman 42 filter paper (PT. Bensara Sukses, Indonesia), plastic wrap, pH stick dan single srew extruder SJ20-10 (China). Bahan utama yang digunakan adalah cangkang kerang mutiara (*Pinctada Maxima*) dari perairan Nusa Tenggara Barat. Bahan kimia yang digunakan asam fosfat ( $H_3PO_4$ ) 0,3 M, ammonium hidroksida ( $NH_4OH$ ) 25% (Merck, Germany), aquades, polylactid acid (PLA) (NV, Indonesia).

### Sintesis Hidroksiapatit

HA disintesis dari limbah cangkang kerrang Mutiara (*Pinctada maxima*) menggunakan metode presipitasi basah. Proses diawali dengan kalsinasi serbuk  $CaCO_3$  pada suhu  $900^\circ C$  selama 6 jam untuk mengurai  $CaCO_3$  menjadi kalsium oksida ( $CaO$ ). TaHA sintesis dimulai dengan melarutkan sebanyak 5,6 gram serbuk  $CaO$  ke dalam 200 mL akuades, kemudian ditambahkan larutan  $H_3PO_4$  0,3 M sebanyak 200 mL secara bertahap menggunakan metode titrasi. Selama proses reaksi berlangsung, pH larutan dijaga pada kondisi basa (pH 10) melalui penambahan  $NH_4OH$  (Merck, Germany). Campuran kemudian dipanaskan dan dihomogenkan untuk mempercepat reaksi pembentukan presipitat. Larutan yang dihasilkan didiamkan selama 24 jam pada suhu ruang guna memungkinkan proses pematangan (aging). Endapan yang dihasilkan kemudian dipisahkan melalui proses penyaringan dan dikeringkan pada suhu  $100^\circ C$ . Kemudian dikalsinasi kembali pada suhu  $900^\circ C$  selama 3 jam untuk menghasilkan serbuk hidroksiapatit.

### Ekstrusi Filamen PLA/HA



Gambar 1. Proses Pembuatan Filamen PLA dan Filamen Biokomposit PLA/HA

Proses ekstrusi dilakukan menggunakan extruder single screw tipe SJ20-10. Proses ekstrusi dimulai dengan memasukkan pelet PLA ke dalam hopper dengan kecepatan ulir 600

rpm dengan variasi suhu 120°C, 125°C, 130°C, 135°C. Selanjutnya filamen yang terbentuk keluar melalui nozzle dan didinginkan. Setelah diperoleh suhu optimum yang menghasilkan filamen dengan kualitas terbaik, parameter tersebut digunakan pada taHA pembuatan filamen biokomposit PLA/HA. Sebelum proses ekstrusi, pelet PLA dan serbuk HA dihomogenkan dengan metode *dry mixing* selama 10 menit berdasarkan variasi komposisi PLA/HA 100:0, 95:5, 90:10, 85:15. Campuran PLA/HA kemudian dimasukkan ke dalam hopper dan diproses menggunakan ekstruder pada kecepatan ulir 600 rpm serta suhu 135°C. Filamen yang terbentuk selanjutnya keluar melalui nozzle dan didinginkan hingga mencapai kondisi stabil.

### **Analisis dan Interpretasi Data**

Filamen PLA maupun biokomposit PLA/HAp yang dihasilkan dievaluasi berdasarkan sifat fisik dan mekaniknya. Pengamatan organoleptik dilakukan untuk menilai karakteristik visual filamen meliputi bentuk, dan tekstur permukaan. Analisis morfologi dilakukan menggunakan mikroskop digital untuk mengamati keseragaman permukaan dan potensi cacat seperti porositas atau ketidakteraturan struktur. Selain itu, pengukuran densitas dilakukan untuk mengetahui tingkat kerapatan filamen yang berkaitan dengan kualitas hasil ekstrusi. Sifat mekanik filamen dievaluasi melalui uji tarik menggunakan mesin uji kompresi RTG 1310 tipe Tensilon, dengan kecepatan penarikan 2,5 mm/menit. Spesimen filamen disiapkan sesuai standar pengujian, dan seluruh pengujian dilakukan sebanyak tiga kali untuk memastikan reproduktifitas data. Parameter yang diukur meliputi kuat tarik, modulus elastisitas (modulus Young), dan elongasi. Filamen yang dihasilkan dapat diterapkan untuk 3D printing jika memiliki diameter 1.75-2.85 mm (Taufik et al., 2023), nilai densitas 1.8-2.0 g/cm<sup>3</sup>, Kuat tekan 100-230 MPa, serta modulus young 7-30 GPa (Ficai et al., 2011).

Secara teoritis, elongation merupakan ukuran seberapa jauh sebuah material meregang akibat gaya tarik sebelum putus. Secara matematis elongasi dinyatakan sebagai berikut.

$$EL = \frac{L_f - L_0}{L_0} \quad (1.1)$$

Dimana EL merupakan elongation,  $L_f$  merupakan panjang akhir (m), dan  $L_0$  merupakan panjang awal (m). Elongation menunjukkan seberapa besar perubahan panjang yang dialami material selama pengujian Tarik (Callister, 2018). Nilai uji Tarik menunjukkan besar gaya maksimum yang dapat diterima material per satuan luas sebelum material tersebut putus, dan biasanya diukur dalam satuan tekanan seperti Pascal. Kuat tarik benda dapat di tentukan oleh persamaan berikut:

$$\sigma_t = \frac{F}{A} \quad (1.2)$$

Dimana  $\sigma_t$  adalah kuat tarik (N/m<sup>2</sup>), F adalah beban maksimal (N), dan A adalah luas penampang (m<sup>2</sup>) (Zakaria et al., 2023). Sementara itu, besarnya modulus Young ditentukan oleh persamaan:

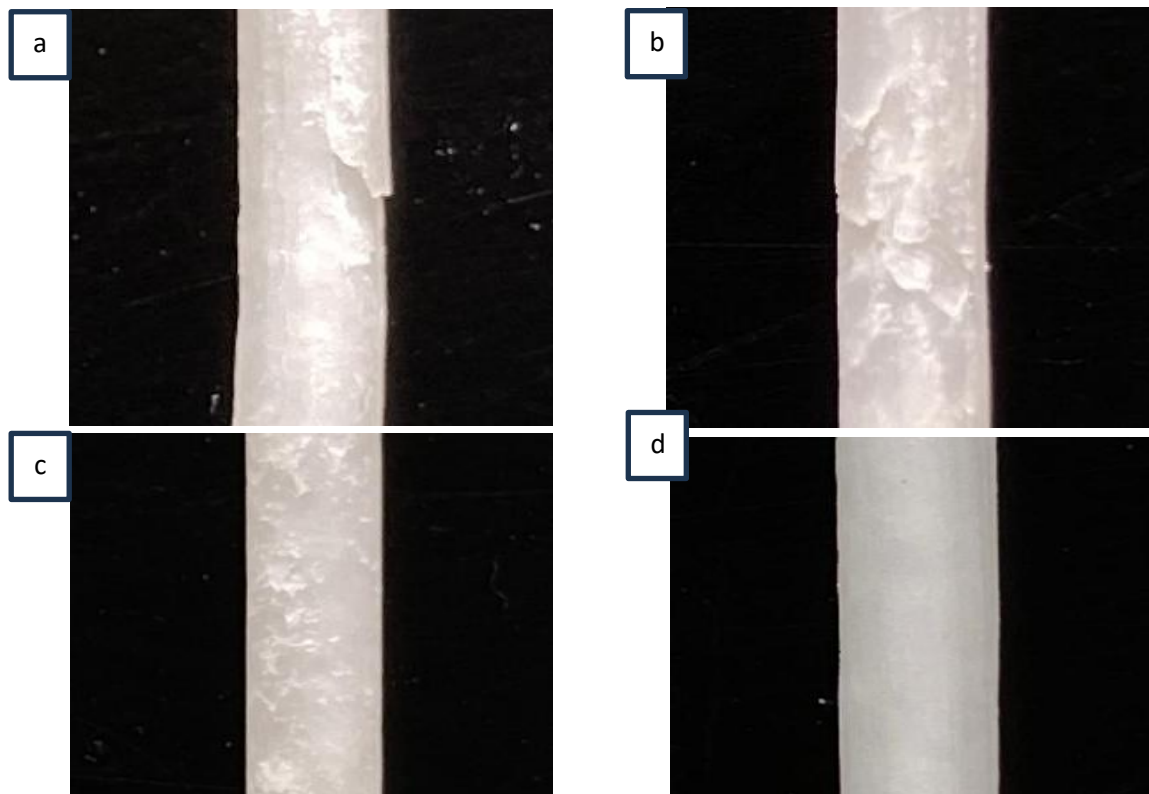
$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (1.3)$$

Dimana E adalah modulus elastis (N/m<sup>2</sup>). Nilai modulus elastis mencerminkan tingkat kekakuan material, yang menunjukkan kemampuan suatu material untuk menahan deformasi elastis ketika diberi beban (Callister, 2018). Karakteristik mekanik filamen menjadi parameter penting dalam menentukan kualitas material sebagai bahan baku 3D printing, karena sifat

tersebut mempengaruhi kestabilan proses pencetakan serta performa produk akhir. Filamen dengan sifat mekanik yang baik dan struktur yang seragam cenderung menghasilkan produk cetak dengan kualitas yang lebih optimal.

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Filamen PLA telah berhasil di fabrikasi dengan variasi suhu pemanasan awal 120°C, 125°C, 130°C, 135°C guna untuk mengidentifikasi suhu optimum yang kemudian dijadikan suhu tetap untuk fabrikasi filamen komposit PLA/HA. Variasi suhu pemanasan awal memberikan pengaruh langsung terhadap laju aliran dan homogenitas campuran, yang kemudian terlihat pada karakteristik fisik filamen berupa sifat organoleptik, kestabilan diameter, dan densitas. Secara organoleptik, filamen PLA yang dihasilkan pada suhu 120°C memiliki permukaan yang kasar dan retak yang menunjukkan bahwa proses pelelehan PLA belum berlangsung secara optimal. Hal ini dikarenakan titik leleh PLA yang masih tinggi sehingga berdampak pada aliran PLA tidak homogen. Pada suhu 125°C permukaan yang dihasilkan masih kasar namun retakan tidak lagi ditemukan, menunjukkan bahwa peningkatan suhu telah memperbaiki proses pelelehan dan aliran PLA meskipun belum sepenuhnya homogen. Kondisi ini mengindikasikan adanya peningkatan mobilitas rantai PLA, sehingga mampu mengurangi cacat struktural seperti retakan, namun belum cukup untuk menghasilkan permukaan yang halus. Peningkatan suhu lebih lanjut hingga 135°C menghasilkan permukaan yang halus dan homogen, menandakan bahwa proses pelelehan telah berlangsung optimal. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan suhu ekstrusi dapat meningkatkan homogenitas permukaan akibat menurunnya viskositas polimer (Farah et al., 2016).



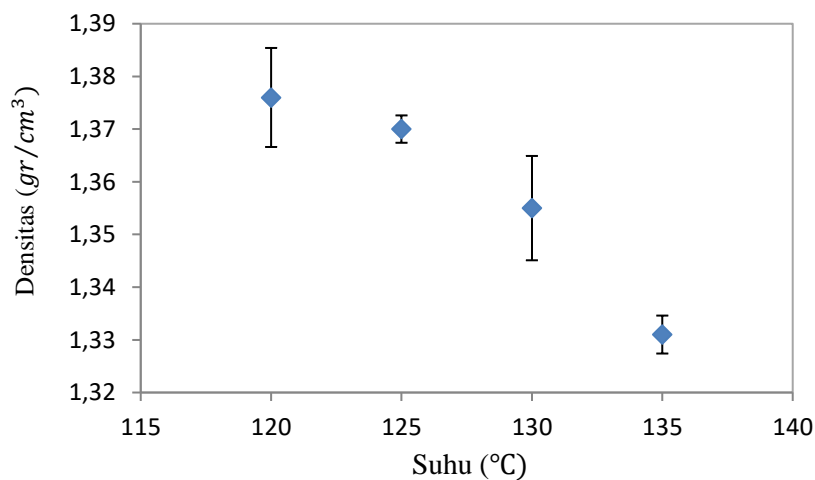
Gambar 2. Filamen PLA dengan suhu a) 120°C; b) 125°C; c) 130°C; d) 135°C

Selain berpengaruh terhadap hasil organolaptik, suhu ekstruksi juga mempengaruhi kestabilan diameter dimana diameter filamen dari suhu 120-135 menunjukkan perubahan yang relative kecil, namun seiring dengan peningkatan suhu ekstruksi diameter yang dihasilkan meningkat. Hal ini disebabkan oleh penurunan viskositas sehingga material lebih mudah untuk mengalir atau terjadi over-extrusion (Torrado et al., 2015). Secara keseluruhan diameter filamen yang dihasilkan berada pada rentang 2.050 – 2.080 mm, dimana diameter ini memenuhi standar diameter untuk 3D printing yaitu 1.75-2.85 mm sehingga filamen ini dapat diaplikasikan sebagai bahan 3D printing (Taufik et al., 2023).

Tabel 1. Hasil Pengukuran Diameter Filamen PLA

Suhu (°C)	Diameter (mm)
120	2,050 ± 0,002
125	2,050 ± 0,002
130	2,070 ± 0,002
135	2,080 ± 0,002

Sementara itu, nilai densitas mengalami penurunan seiring dengan peningkatan suhu ekstruksi, yaitu dari 1,376 g/cm<sup>3</sup> (120°C) menjadi 1,331 g/cm<sup>3</sup> (135°C). Penurunan densitas ini mengindikasikan terbentuknya porositas akibat suhu yang terlalu tinggi sehingga viskositas lelehan material menurun, akibatnya aliran material menjadi lebih cepat dan tidak stabil selama proses ekstruksi (Nofar & Park, 2014). Pada suhu 130°C, densitas sebesar 1,355 g/cm<sup>3</sup> menunjukkan kondisi yang relatif optimal karena masih mempertahankan struktur yang cukup padat.



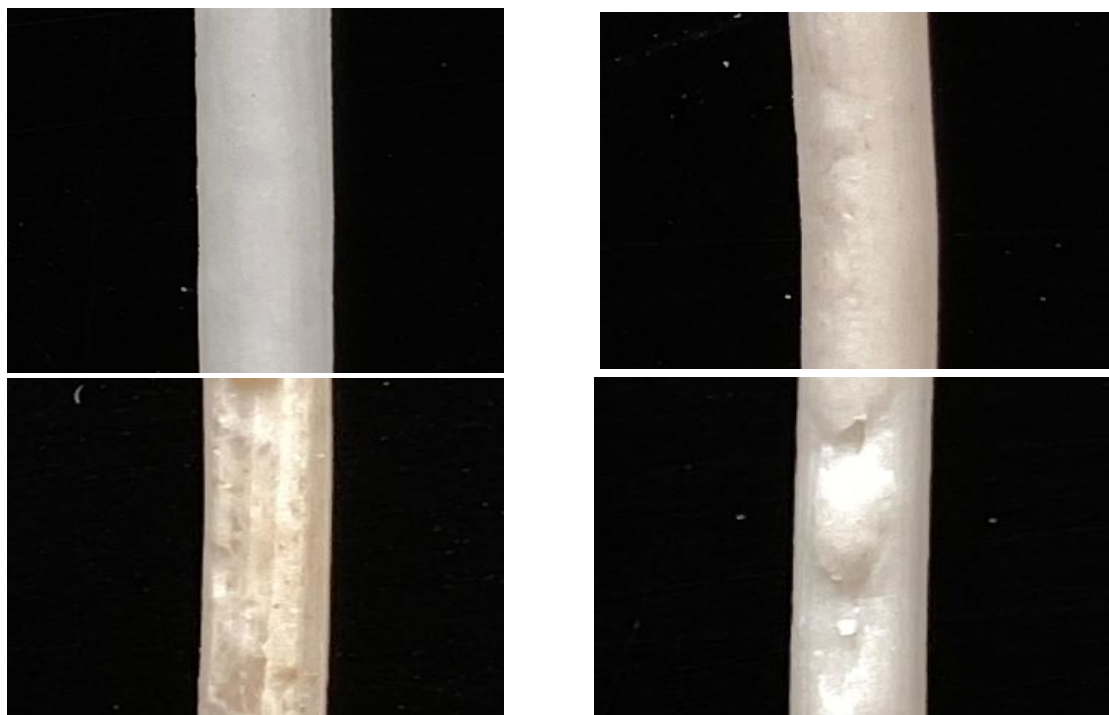
Gambar 3. Grafik Perubahan Densitas Filamen PLA

Hasil fabrikasi filamen menunjukkan bahwa parameter densitas dan kestabilan diameter memberikan indikasi awal terhadap kualitas material, namun belum sepenuhnya merepresentasikan performa fungsionalnya. Oleh karena itu, karakterisasi mekanik diperlukan untuk mengevaluasi hubungan antara struktur internal material dengan sifat mekaniknya. Hal ini sejalan dengan prinsip pada proses material extrusion, di mana performa mekanik sangat dipengaruhi oleh kualitas struktur mikro, terutama ikatan antar lapisan (interlayer bonding) dan tingkat porositas (Lepoivre et al., 2022; Pang et al., 2025).

Tabel 2. Hasil pengujian sifat mekanik filamen PLA

Suhu (°C)	Kekuatan tarik (MPa)	Modulus Elastis (MPa)	Elongation (mm)
120	2,829 ± 0,109	719,633 ± 71,491	0,106 ± 0,011
125	4,915 ± 1,040	827,013 ± 208,162	0,166 ± 0,041
130	16,658 ± 2,473	1975,967 ± 162,670	0,259 ± 0,059
135	3,944 ± 0,265	1104,007 ± 143,590	0,113 ± 0,023

Berdasarkan hasil pengujian, peningkatan suhu ekstrusi dari 120°C hingga 130°C menunjukkan peningkatan kuat tarik, modulus elastis, dan elongasi. Hal ini terjadi karena pada suhu ekstrusi yang lebih tinggi, viskositas material menurun sehingga meningkatkan kemampuan alir dan memungkinkan terjadinya difusi rantai polimer yang lebih optimal. Hal ini berkontribusi terhadap terbentuknya ikatan antar lapisan yang lebih kuat serta mengurangi porositas dalam material. Selain itu, suhu yang lebih tinggi juga mendukung distribusi filler yang lebih homogen dan meningkatkan interaksi antar fase dalam komposit (Pang et al., 2025; Rivera-López et al., 2024). Namun ketika suhu ekstrusi dinaikkan menjadi 135°C, sifat mekanik filamen cenderung mengalami penurunan. Hal ini disebabkan oleh terjadinya degradasi termal pada material, di mana rantai polimer mengalami pemutusan yang mengakibatkan penurunan berat molekul dan melemahnya kekuatan mekanik. Selain itu, pada suhu yang lebih tinggi, meskipun viskositas material menurun dan meningkatkan kemampuan alir serta menghasilkan permukaan yang lebih halus kondisi ini juga dapat menyebabkan berkurangnya keteraturan struktur internal. Akibatnya, kemampuan material dalam mentransfer dan menahan beban menjadi tidak optimal (Kumar et al., 2023; Lepoivre et al., 2022; Pang et al., 2025). Dengan demikian, peningkatan kualitas fisik yang dihasilkan pada suhu tinggi tidak selalu diikuti oleh peningkatan sifat mekanik, melainkan menunjukkan adanya perbedaan antara kualitas morfologi dan integritas struktur molekuler material.



Gambar 4. Filamen PLA/HA dengan Variasi komposisi a) 100:0; b) 95:5; c) 90:10; d) 85:15

Secara keseluruhan, suhu 135°C merupakan kondisi optimum dalam fabrikasi filamen PLA karena menghasilkan kombinasi terbaik antara kualitas permukaan, kestabilan dimensi, serta densitas, meskipun menghasilkan sifat mekanik yang lebih rendah. Oleh karena itu, suhu ini digunakan dalam ekstruksi filamen komposit PLA/HA, sehingga pengaruh penambahan hidroksiapatit dapat dianalisis. Adapun hasil ekstruksi filamen komposit PLA/HA dapat dilihat pada Gambar 4.

Berdasarkan gambar 4. filamen dengan 0% HA menunjukkan permukaan relatif halus namun tidak konsisten lurus yang mengindikasikan ketidakstabilan aliran material selama proses ekstrusi. Hal ini dipengaruhi oleh penurunan viskositas PLA pada suhu tinggi yang menyebabkan aliran menjadi kurang terkendali. Selain itu juga dikarenakan ketidakstabilan aliran di dalam nozzle serta pendinginan yang tidak merata (Farah et al., 2016; Marzuki et al., 2022). Sedangkan penambahan HA sebesar 5% menghasilkan permukaan yang lebih homogen dan stabil. Hal ini menunjukkan bahwa pada konsentrasi rendah, partikel HA masih terdispersi dengan baik dalam matriks PLA sehingga dapat meningkatkan viskositas lelehan. Namun, pada konsentrasi 10% dan 15%, permukaan menjadi kasar dan tidak rata, yang mengindikasikan terjadinya aglomerasi partikel yang mengganggu proses kristalisasi dan aliran lelehan, sehingga permukaan filamen menjadi kurang seragam (Tazibt et al., 2023).

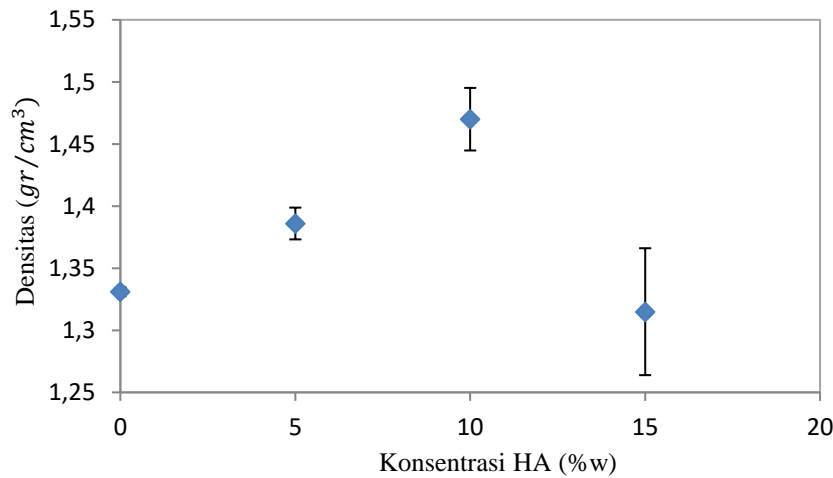
Tabel 3. Hasil pengukuran diameter Filamen PLA/HA

Konsentrasi PLA (%w)	Konsentrasi HA (%w)	Diameter (mm)
100	0	2,080 ± 0,002
95	5	2,083 ± 0,001
90	10	2,043 ± 0,001
85	15	2,126 ± 0,002

Hasil pengamatan organoleptik menunjukkan keterkaitan yang erat dengan kestabilan diameter filamen yang dihasilkan. Filamen dengan permukaan halus dan bentuk yang lurus cenderung memiliki diameter yang lebih stabil, yang mengindikasikan aliran lelehan yang konstan selama proses ekstrusi. Sebaliknya, filamen yang menunjukkan permukaan kasar dan tidak rata secara visual umumnya memiliki diameter yang fluktuatif yang mencerminkan ketidakstabilan aliran selama ekstrusi. Ketidakstabilan ini berpotensi menyebabkan distribusi partikel yang tidak merata. Berdasarkan hasil penelitian, peningkatan kandungan HA menyebabkan kenaikan viskositas lelehan yang berdampak pada ketidakstabilan aliran selama proses ekstrusi, sehingga menghasilkan diameter filamen yang tidak seragam (Wang et al., 2024). Selain itu, pada kandungan HA yang lebih tinggi, kecenderungan terjadinya aglomerasi partikel semakin meningkat, yang mengganggu distribusi material dan memperburuk kestabilan dimensi filamen (Khamvongsa et al., 2025). Akan tetapi secara keseluruhan, variasi komposisi PLA/HA yang digunakan menghasilkan filamen dengan diameter yang berada dalam kisaran standar untuk proses 3D printing, yaitu 1,75–2,85 mm (Taufik et al., 2023).

Densitas filamen mengalami peningkatan seiring dengan meningkatnya konsentrasi HA dengan nilai tertinggi pada konsentrasi 10% dengan nilai densitas sebesar 1,470 g/cm<sup>3</sup>. Peningkatan nilai densitas ini terjadi karena partikel HA mengisi rongga-rongga pada matriks

PLA, sehingga jumlah pori berkurang dan kerapatan material meningkat (Fitriyana et al., 2022).



Gambar 5. Grafik Hubungan Konsentrasi HA Dan Densitas Filamen PLA/HA

Akan tetapi, pada komposisi 15% HA, nilai densitas filamen mengalami penurunan. Penurunan tersebut disebabkan oleh konsentrasi HA yang terlalu tinggi, sehingga partikel HA cenderung menggumpal dan distribusi partikel tidak merata yang menyebabkan terjadinya penumpukan partikel di beberapa area yang memicu terbentuknya rongga pada struktur filamen, sehingga nilai densitas menjadi lebih rendah (Thirugnanasambandam et al., 2025). Dari grafik diatas juga, dapat kita lihat bahwa nilai error semakin meningkat seiring dengan bertambahnya konsentrasi HA. Hal ini berkaitan dengan morfologi filamen, yang dimana tingkat kekasaran permukaan filamen meningkat dengan bertambahnya konsentrasi HA. Hal ini menyebabkan hasil pengukuran diameter dan densitas filamen bervariasi sehingga nilai error semakin besar seiring dengan meningkatnya konsentrasi HA.

Tabel 4. Hasil pengujian sifat mekanik filamen PLA/HA

Konsentrasi PLA (%w)	Konsentrasi HA (%w)	Kekuatan Tarik (MPa)	Modulus Elastis (MPa)	Elongation (mm)
100	0	4,205 ± 0,262	970,683 ± 122,590	0,113±0,023
95	5	3,981 ± 0,869	1312,240 ± 527,84	0,159±0,139
90	10	4,692 ± 2,878	1426,500 ± 384,830	0,173±0,126
85	15	3,613± 1,055	820.713 ± 440,748	0,153±0,064

Penambahan hidroksiapatit (HA) ke dalam matriks polylactic acid (PLA) memberikan pengaruh signifikan terhadap morfologi, sifat fisik, serta mekaniknya. Berdasarkan tabel terlihat filamen dengan kandungan HA 10% menghasilkan sifat mekanik tertinggi dibandingkan yang lainnya yaitu nilai kuat Tarik sebesar 4,474 MPa, modulus elastis sebesar 1426,500 MPa, serta nilai elongasi sebesar 0,173 mm. Peningkatan sifat mekanik pada komposisi ini mengindikasikan bahwa penambahan HA mampu memperkuat struktur komposit dan meningkatkan kemampuan menahan deformasi karena HA bersifat kaku serta memiliki kesamaan komposisi dengan mineral tulang, sehingga banyak digunakan untuk meningkatkan performa biomaterial (Fernandes Cóta et al., 2016). Namun, pada kandungan HA 15% sifat mekanik menurun akibat lemahnya interaksi antarmuka antara PLA dan HA serta

terbentuknya aglomerasi partikel. Hasil ini sejalan dengan temuan (L. Custodio et al., 2024) yang melaporkan bahwa pada kadar HA yang tinggi, partikel HA cenderung mengalami aglomerasi dan tidak terdistribusi secara homogen dalam matriks. Kondisi tersebut dapat memicu terbentuknya cacat mikro yang menghambat transfer tegangan dari matriks ke filler, sehingga berdampak pada penurunan performa mekanik filamen.

### KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa suhu ekstrusi dan komposisi PLA/hidroksiapatit (PLA/HA) memengaruhi karakteristik fisik, morfologi, dan mekanik filamen biokomposit untuk aplikasi 3D printing berbasis fused deposition modeling. Pada filamen PLA, peningkatan suhu ekstrusi dari 120 hingga 135°C memperbaiki kehalusan permukaan dan kestabilan diameter. Seluruh diameter filamen PLA berada dalam kisaran standar filamen 3D printing, yaitu 1,75–2,85 mm. Suhu 135°C menghasilkan permukaan paling halus dan diameter sebesar  $2,080 \pm 0,002$  mm, sehingga digunakan sebagai parameter ekstrusi dalam pembuatan filamen biokomposit. Namun, sifat mekanik tertinggi pada filamen PLA diperoleh pada suhu 130°C, dengan kuat tarik sebesar  $16,658 \pm 2,473$  MPa, modulus elastisitas  $1975,967 \pm 162,670$  MPa, dan elongasi  $0,259 \pm 0,059$  mm. Temuan ini menunjukkan bahwa peningkatan kualitas morfologi pada suhu tinggi tidak selalu berbanding lurus dengan peningkatan kekuatan mekanik.

Pada filamen biokomposit PLA/HA, penambahan HA memengaruhi kestabilan diameter, densitas, dan sifat mekanik filamen. Seluruh variasi komposisi menghasilkan diameter yang masih sesuai dengan kisaran standar filamen 3D printing. Komposisi PLA/HA 90:10 memberikan performa terbaik, ditunjukkan oleh densitas sebesar  $1,470$  g/cm<sup>3</sup>, kuat tarik  $4,692 \pm 2,878$  MPa, modulus elastisitas  $1426,500 \pm 384,830$  MPa, dan elongasi  $0,173 \pm 0,126$  mm. Sebaliknya, peningkatan HA hingga 15% menurunkan densitas dan sifat mekanik akibat aglomerasi partikel serta ketidakhomogenan distribusi filler yang berpotensi membentuk cacat mikro. Dengan demikian, komposisi PLA/HA 90:10 merupakan formulasi paling prospektif dalam penelitian ini sebagai kandidat filamen biokomposit untuk pengembangan material 3D printing ortopedi. Namun, penerapan pada bidang ortopedi masih memerlukan evaluasi lanjutan terhadap homogenitas antarfasa, biokompatibilitas, degradasi, serta performa mekanik produk hasil cetak 3D.

### Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah memberikan dukungan dan bantuan selama pelaksanaan penelitian. Penelitian ini didukung oleh pendanaan Internal Universitas Mataram sumber PNBPN skema penelitian dosen pemula Fakultas Kedokteran dan Ilmu Kesehatan Tahun 2026. Selain itu, penelitian ini juga di support dari sumber pendanaan internal PNBPN Universitas Mataram Skema Kerjasama Dalam Negeri Tahun 2026.

### DAFTAR PUSTAKA

Binobaid, A., De Lisi, M., Camilleri, J., Hassanin, H., & Essa, K. (2025). Zirconia-Calcium Silicate Bioactive Composites For Dental Applications Using Dlp Additive Manufacturing. *Bioprinting*, 45. <https://doi.org/10.1016/j.bprint.2024.E00377>

- Callister, W. D., Jr., & R. D. G. (2018). *Materials Science And Engineering: An Introduction* (Nj: John Wiley & Sons., Ed.; 10th Ed.). Hoboken.
- Farah, S., Anderson, D. G., & Langer, R. (2016). Physical And Mechanical Properties Of Pla, And Their Functions In Widespread Applications — A Comprehensive Review. In *Advanced Drug Delivery Reviews* (Vol. 107, Pp. 367–392). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.addr.2016.06.012>
- Fernandes Cóta, L., Licona, K. P. M., Lunz, J. Do N., Ribeiro, A. A., Alonso, L. M., De Oliveira, M. V., & Pereira, L. C. (2016). Hydroxyapatite Nanoparticles: Synthesis By Sonochemical Method And Assessment Of Processing Parameters Via Experimental Design. *Materials Science Forum*, 869, 896–901. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.869.896>
- Ficai, A., Andronescu, E., Voicu, G., & Ficai, D. (2011). Advances In Collagen/Hydroxyapatite Composite Materials. In *Advances In Composite Materials For Medicine And Nanotechnology*. Intech. <https://doi.org/10.5772/13707>
- Fitriyana, D. F., Nugraha, F. W., Laroybafih, M. B., Ismail, R., Bayuseno, A. P., Muhamadin, R. C., Ramadan, M. B., Qudus, A. R., & Siregar, J. P. (2022). The Effect Of Hydroxyapatite Concentration On The Mechanical Properties And Degradation Rate Of Biocomposite For Biomedical Applications. *Iop Conference Series: Earth And Environmental Science*, 969(1), 012045. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/969/1/012045>
- Sunarto, G., & Katmini, A. D. E. (2023). Efektifitas Biaya Penggunaan Teknologi Pencetakan 3d (Industri 4.0) Pada Alat Bantu Ortotik Prostetik Gatot Sunarto. *Jurnal Penelitian Kesehatan Suara Forikes*, 14(1), 17–26.
- Khamvongsa, M., Milton, K., & Faisal, T. R. (2025). Mechanical Characterization Of Low-Cost 3d Fdm Printed Scaffolds Fabricated With Synthesized Pla/Ha Bio-Composite Filament. *Annals Of 3d Printed Medicine*, 18. <https://doi.org/10.1016/j.stlm.2025.100194>
- Kumar, M. S., Farooq, M. U., Ross, N. S., Yang, C. H., Kavimani, V., & Adediran, A. A. (2023). Achieving Effective Interlayer Bonding Of Pla Parts During The Material Extrusion Process With Enhanced Mechanical Properties. *Scientific Reports*, 13(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-33510-7>
- L. Custodio, C., M. Broñola, P. J., R. Cayabyab, S., U. Lagura, V., R. Celorico, J., & A. Basilia, B. (2024). Powder Loading Effects On The Physicochemical And Mechanical Properties Of 3d Printed Poly Lactic Acid/Hydroxyapatite Biocomposites. *International Journal Of Bioprinting*, 7(1), 326. <https://doi.org/10.18063/ijb.v7i1.326>
- Lepoivre, A., Boyard, N., Levy, A., & Sobotka, V. (2022). Methodology To Assess Interlayer Quality In The Material Extrusion Process: A Temperature And Adhesion Prediction On A High Performance Polymer. *Additive Manufacturing*, 60. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.103167>
- Marzuki, A. P., Salleh, F. M., Nazri, M., Rosli, S., Tharazi, I., Abdullah, A. H., Hayati, N., & Halim, A. (2022). Rheological, Mechanical And Physical Properties Of Poly-Lactic Acid (Pla)/ Hydroxyapatites (Ha) Composites Prepared By An Injection Moulding Process. In *Journal Of Mechanical Engineering* (Vol. 19, Number 2).

- Nofar, M., & Park, C. B. (2014). Poly (Lactic Acid) Foaming. *Progress In Polymer Science*, 39(10), 1721–1741. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2014.04.001>
- Nugraha, F. W., Ismail, R., Bayuseno, A. P., Fitriyana, D. F., Ariyanto, M., Mubarak, M. H., & Bagaskara, I. F. (2024). Influence Of Preheat Temperature Variation On Single Screw Extrusion For Characterizing Pla, Pcl, And Ha Biocomposite Filaments. *E3s Web Of Conferences*, 576, 06007. <https://doi.org/10.1051/E3sconf/202457606007>
- Pang, R., Lai, M. K., Teo, H. H., & Yap, T. C. (2025). Influence Of Temperature On Interlayer Adhesion And Structural Integrity In Material Extrusion: A Comprehensive Review. In *Journal Of Manufacturing And Materials Processing* (Vol. 9, Number 6). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (Mdpi). <https://doi.org/10.3390/Jmmp9060196>
- Pramudya, I. I., Rahmawati, R., Slamet, S., Arrohman, S., Raya, J., Sungkono, M., & Km, N. (2025). Review Jurnal: Pengembangan Biokomposit Pla, Pcl, Ha Berbasis Serat Alami Untuk Aplikasi Teknik Dan Medis. *Pros Iding Snatif Ke-8*.
- Pristiansyah, P., Hasdiansah, H., & Sugiyarto, S. (2019). Optimasi Parameter Proses 3d Printing Fdm Terhadap Akurasi Dimensi Menggunakan Filament Eflex. *Manutech: Jurnal Teknologi Manufaktur*, 11(01), 33–40. <https://doi.org/10.33504/Manutech.V11i01.98>
- Rahayu, S., Kurniawidi, D. W., & Gani, A. (2018). Pemanfaatan Limbah Cangkang Kerang Mutiara (Pinctada Maxima) Sebagai Sumber Hidroksiapatit.. *Pendidikan Fisika Dan Teknologi*, 4(2), 226–231.
- Rivera-López, F., Pavón, M. M. L., Correa, E. C., & Molina, M. H. (2024). Effects Of Nozzle Temperature On Mechanical Properties Of Polylactic Acid Specimens Fabricated By Fused Deposition Modeling. *Polymers*, 16(13). <https://doi.org/10.3390/Polym16131867>
- Sari, N. R., Jalinus, N., Pratama, R., & Arafat, A. (2019). Analisa Kekerasan Dan Struktur Mikro Paduan Seng (Zn) Biodegradable Untuk Aplikasi Implan Biomedis. *Journal Of Multidisciplinary Research And Development*, 1(4), 966–974.
- Singh, D., Babbar, A., Jain, V., Gupta, D., Saxena, S., & Dwibedi, V. (2019). Synthesis, Characterization, And Bioactivity Investigation Of Biomimetic Biodegradable Pla Scaffold Fabricated By Fused Filament Fabrication Process. *Journal Of The Brazilian Society Of Mechanical Sciences And Engineering*, 41(3), 121. <https://doi.org/10.1007/S40430-019-1625-Y>
- Siswanto, Hikmawati, D., & Hariyanto, M. (2019). Synthesis Of Hydroxyapatite Based On Coral Banyuwangi Using Sol-Gel Method: Observe The Effect Of Calcination Temperature On Its Phase And Crystallinity. *Journal Of Physics: Conference Series*, 1153, 012081. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1153/1/012081>
- Taufik, M., Suryani Lubis, G., & Ivanto, M. (2023). Rancang Bangun Mesin Pultrusion Pembuat Filamen 3d Printing Berbasis Limbah Plastik Botol Pet. *Jurnal Teknologi Rekayasa Teknik Mesin (Jtrain)*, 4(1), 1–8.
- Tazibt, N., Kaci, M., Dehouche, N., Ragoubi, M., & Atanase, L. I. (2023). Effect Of Filler Content On The Morphology And Physical Properties Of Poly(Lactic Acid)-Hydroxyapatite Composites. *Materials*, 16(2). <https://doi.org/10.3390/Ma16020809>
- Thirugnanasambandam, A., Nallamuthu, R., Rangappa, S. M., Siengchin, S., & Vijay Kumar, V. (2025). Material Extrusion Of The Poly(Lactic Acid)/Hap Nanocomposite Scaffold For

- Bone Tissue Applications: A Comprehensive Investigation. *Acs Omega*, 10(39), 44948–44959. <https://doi.org/10.1021/acsomega.5c02055>
- Torrado, A. R., Shemelya, C. M., English, J. D., Lin, Y., Wicker, R. B., & Roberson, D. A. (2015). Characterizing The Effect Of Additives To Abs On The Mechanical Property Anisotropy Of Specimens Fabricated By Material Extrusion 3d Printing. *Additive Manufacturing*, 6, 16–29. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2015.02.001>
- Wang, X., Huang, L., Li, Y., Wang, Y., Lu, X., Wei, Z., Mo, Q., Zhang, S., Sheng, Y., Huang, C., Zhao, H., & Liu, Y. (2024). Research Progress In Polylactic Acid Processing For 3d Printing. In *Journal Of Manufacturing Processes* (Vol. 112, Pp. 161–178). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.01.038>
- Wu, J., Jiao, C., Yu, H., Naqvi, S. M. R., Ge, M., Cai, K., Liang, H., Liu, J., Zhao, J., Tian, Z., Wang, D., & Shen, L. (2024). 3d Printed Barium Titanate/Calcium Silicate Composite Biological Scaffold Combined With Structural And Material Properties. *Biomaterials Advances*, 158. <https://doi.org/10.1016/j.bioadv.2024.213783>
- Zakaria, S., Stighfarrinata, R., & Maghfiroh, A. M. (2023). Optimasi Parameter Proses 3d Printing Terhadap Kuat Tarik Filament Petg Menggunakan Metode Taguchi. *Justi (Jurnal Sistem Dan Teknik Industri)*, 3(4), 538. <https://doi.org/10.30587/justicb.v3i4.6150>
- Zhang, Y., Raza Naqvi, S. M., Sun, L., Gu, J., Nasir, M. A., Jiao, C., & Shen, L. (2026). A Study On Biocompatibility And Implant Stability Of 3d Printed Alumina/Magnesium Silicate Composite Ceramic Bone Screws. *Journal Of The Mechanical Behavior Of Biomedical Materials*, 177. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2026.107366>