

**ANALISIS DAN OPTIMALISASI PARAMETER PROSES
PENCETAKAN FILAMEN BIKOMPOSIT PLA/HA/MgO
UNTUK APLIKASI PENCETAKAN 3D MENGGUNAKAN
METODE FACTORIAL**



TUGAS AKHIR

Disusun Untuk Memenuhi Syarat Menyelesaikan Pendidikan Sastra 1

Pada Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas

Tridinanti

Oleh :

AHMAD SYUKRI FERDINAN

2102220108

PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS TRIDINANTI

2026

UNIVERSITAS TRIDINANTI FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN



**ANALISIS DAN OPTIMALISASI PARAMETER PROSES
PENCETAKAN FILAMEN BIOKOMPOSIT PLA/HA/MgO
UNTUK APLIKASI PENCETAKAN 3D MENGGUNAKAN
METODE FACTORIAL**

Disusun :
AHMAD SYUKRI FERDINAN
2102220108

Mengetahui,
Ketua Program Studi Teknik Mesin,

Heriyanto Rusmaryadi, ST, MT.

Dosen Pembimbing I

Ir. Togar PO Sianipar, MT.

Dosen Pembimbing II

Imam Akbar, ST, MT.



Disahkan Oleh :
Dekan Fakultas Teknik

Ani Firda, ST., MT.

SURAT PERNYATAAN BEBAS PLAGIAT

Saya yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : AHMAD SYUKRI FERDINAN

NIM : 2102220108

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi berjudul “ **ANALISIS DAN OPTIMALISASI PARAMETER PROSES PENCETAKAN FILAMEN BIODKOMPOSIT PLA/HA/MgO UNTUK APLIKASI PENCETAKAN 3D MENGGUNAKAN METODE FACTORIAL** “ benar bebas dari plagiat dan publikasi ganda. Bila pernyataan ini terbukti tidak benar maka saya bersedia menerima sanksi yang berlaku dari pihak prodi dan insitusi Universitas Tridianti Palembang.

Demikian surat pernyataan ini saya buat penuh kesadaran, dan tanpa paksaan dari pihak manapun. Sehingga dapat dipergunakan sebagai mana mestinya.

Palembang, Maret 2026

Yang membuat pernyataan,



Ahmad Syukri Ferdinan
NIM.2102220108

HALAMAN PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Ahmad Syukri Ferdinan

NIM : 2102220108

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi berjudul **“ANALISIS DAN OPTIMALISASI PARAMETER PROSES PENCETAKAN FILAMEN BOKOMPOSIT PLA/HA/MgO UNTUK APLIKASI PENCETAKAN 3D MENGGUNAKAN METODE FACTORIAL** “ adalah benar merupakan karya sendiri. Hal-hal yang bukan karya saya, dalam skripsi tersebut diberi tanda citasi dan ditunjukkan dalam daftar Pustaka.

Apabila dikemudian hari terbukti pernyataan saya tidak benar dan ditemukan pelanggaran atas karya skripsi ini, saya bersedia menerima sanksi akademik berupa pencabutan skripsi dan gelar yang saya peroleh dari skripsi tersebut.

Palembang, Maret 2026

Yang membuat pernyataan



Ahmad Syukri Ferdinan

NIM.2102220108

MOTTO :

“ Pada akhirnya semua akan terlewati seperti hujan, Sederas apapun jatuhnya dia tidak akan pernah abadi, akan ada jeda, akan ada redah, dan langit akan kembali cerah pada waktunya ”

Ku persembahkan untuk :

- 1. Terima kasih Kepada Tuhan yang Maha Esa atas izin dan karunianya skripsi ini dapat dibuat hingga selesai sampai akhir*
- 2. Kepada kedua orang tua yang selalu mendoakan tanpa henti*
- 3. Kepada kakak, dan abang yang senantiasa memberikan dukungan kepada saya. Kehadiran dan motivasimu menjadi salah satu kekuatan bagi saya untuk terus berjuang hingga akhirnya skripsi ini dapat terselesaikan .*
- 4. Untuk seluruh keluarga besar yang telah memberikan dukungan kepada saya.*
- 5. Untuk teman seperjuangan Teknik Mesin angkatan 2021*
- 6. Untuk diri sendiri yang telah berjuang, bertahan , dan tidak menyerah dalam setiap prosesnya. Terima kasih atas kerjakeras dan ketulusan dalam menyelesaikan apa yang telah dimulai.*

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa yang telah melimpahkan rahmat, karunia dan hidayah-Nya kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan tugas akhir ini yang berjudul, **“ANALISIS DAN OPTIMALISASI PARAMETER PROSES PENCETAKAN FILAMEN BIODKOMPOSIT PLA/HA/MgO UNTUK APLIKASI PENCETAKAN 3D MENGGUNAKAN METODE FACTORIAL** dengan waktu yang telah ditentukan. Tujuan dari penulisan tugas akhir ini adalah untuk memenuhi persyaratan dalam menyelesaikan pendidikan Strata-1 Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Tridianti Palembang.

1. Yth. Bapak Prof. Dr. Ir. H. Edizal AE, MS. Selaku Rektor Universitas Tridianti
2. Yth. Ibu Dr Ani Firda, S.T, M.T. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Tridianti
3. Yth. Bapak Herianto Rusmaryadi, S.T, M.T. selaku Ketua Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Tridianti.
4. Yth. Staf Dosen Program Studi Starta 1 Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Tridianti.
5. Yth. Rekan-rekan mahasiswa Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik.
6. kepada pemilik NIM 2201110085 yang telah menjadi tempat berkeluh kesah, selalu ada dalam suka maupun duka selama proses penyusunan skripsi ini.
7. Seluruh pihak-pihak yang telah membantu hingga selesainya tugas akhir ini.

Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini masih jauh dari sempurna dikarenakan terbatasnya pengalaman dan pengetahuan yang dimiliki penulis. Oleh karena itu penulis mengharapkan segala bentuk saran serta masukan bahkan kritik yang membangun dari berbagai pihak. Semoga tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi para pembaca dan semua pihak khususnya Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Tridianti Palembang.

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	I
DAFTAR ISI	III
DAFTAR TABEL.....	V
DAFTAR GAMBAR.....	VI
ABSTRAK.....	VII
ABSTRACT	VIII
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	5
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Batasan Penelitian	5
1.5 Manfaat Penelitian	6
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	8
2.1 Teknologi Additive Manufacturing dan Fused Deposition Modeling (FDM)	8
2.2 Polylactic Acid (PLA) sebagai Material Filamen	9
2.3 Hydroxyapatite (HA) sebagai Filler Biokomposit	10
2.4 Magnesium Oxide (MgO) sebagai Filler Biokomposit	11
2.5 Biokomposit PLA/HA/MGO untuk Filamen 3D Printing	13
2.6 Proses Ekstrusi Filamen	16
2.7 Optimasi Proses Ekstrusi dengan Metode Factorial	19
2.8 Konsep Design of Experiments (DOE)	19
2.9 Desain Faktorial (Factorial Design)	20
2.10 Persamaan Analisis of Varians (ANOVA)	23
2.10.1 <i>Sum of Squares (SS)</i>	23
2.10.2 Derajat Kebebasan (df):.....	24
2.10.3 Mean Square (MS):	24
2.10.4 F-ratio:.....	24
BAB 3 METODE PENELITIAN	25
3.1 Alur Penelitian	25
3.2 Jenis dan Desain Penelitian	26
3.3 Rancangan Percobaan Factorial	26
3.4 Teknik Analisis Data	27
3.5 Prosedur Penelitian	28
3.6 Alat dan Bahan	29
3.7 Jadwal Kegiatan	30
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....	32
4.1 Design of experiment	32

4.2	Analysis of Variance (ANNOVA)	38
4.2.1	Main and Interaction Effect Faktor	38
4.2.2	Sum of Square Faktor (SS)	41
4.2.3	Sum of Square Total (SST)	42
4.2.4	Sum of Square Model (SSM).....	43
4.2.5	Sum of Square Error (SSE).....	44
4.2.6	Degree of Freedom (DF)	44
4.2.7	Means Square Faktor (MS Faktor).....	45
4.2.8	Means Square Error (MS Error).....	46
4.2.9	F-value	46
4.3	Surface Plot	51
4.4	Prediksi Respon (Y) dalam bentuk Pengkodean	54
4.4.1	Bentuk Persamaan Regresi Model Faktorial	55
4.4.2	Menentukan Konstanta Regresi β_0	55
4.4.3	Menentukan Koefisien Efek Faktor (β_A , β_B , dan β_C).....	56
4.4.4	Menentukan Koefisien Efek Faktor (AB, AC, BC dan ABC)	57
4.5	Nilai Tengah (Center Point)	58
4.6	Setengah Jarak Antara Level (Half-Range)	58
4.7	Konversi ke dalam bentuk uncoded	59
4.7.1	Intercept.....	59
4.7.2	Koefisien untuk Temperatur	60
4.7.3	Koefisien untuk Screw.....	61
4.7.4	Koefisien untuk Puller	62
4.7.5	Koefisien Interaksi.....	63
4.7.6	Koefisien Interaksi Tiga Arah	64
4.8	Persamaan Final	64
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN		66
5.1	Kesimpulan	66
5.2	Saran	67
DAFTAR PUSTAKA		68
LAMPIRAN		70

DAPTAR TABEL

Tabel 2.1. Faktor	21
Tabel 2.2. Desain Fatorial 3x3	21
Tabel 3.1. Level faktor	26
Tabel 3.2. Desain of eksperimen.....	27
Tabel 3.3. Jadwal Kegiatan Penelitian.....	30
Tabel 4.1. Hasil pengukuran diameter filamen berdasarkan DOE faktorial 23	35
Tabel 4.2. Analysis of variance	50

DAPTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Mekanisme manufaktur FDM	9
Gambar 2.2. Sumber PLA.....	9
Gambar 2.3. Hydroxyapatite komponen pembentuk tulang	10
Gambar 2.4. Magnesium Oxide (MgO) sebagai Filler Biokomposit	11
Gambar 2.5. Proses ekstrusi.....	17
Gambar 3.1. Diagram alir penelitian.....	25
Gambar 3.2. Proses ekstrusi filamen PLA/HA/MgO	29
Gambar 3.3. Skematik alat dan bahan penel	30
Gambar 4.1. Hasil variasi diameter filamen.....	38
Gambar 4.2. Surface response diameter filamen pada ruang proses tiga faktor. (A) Diameter meningkat tajam pada kombinasi temperatur nozzle tinggi dan screw speed tinggi. (B) Diameter dikendalikan oleh kompetisi antara peningkatan throughput (screw) dan draw-down (puller). (C) Pengaruh temperatur terhadap diameter relatif moderat pada rentang puller yang diuji.....	51

ABSTRAK

Penelitian ini membahas analisis dan optimalisasi parameter proses pencetakan filamen biokomposit berbasis PLA/HA/MgO untuk aplikasi pencetakan 3D. Filamen biokomposit dipilih karena memiliki potensi sebagai material fungsional dengan sifat mekanik dan bioaktif yang lebih baik dibandingkan PLA murni. Tujuan utama penelitian ini adalah mengidentifikasi pengaruh parameter proses terhadap kualitas filamen serta menentukan kombinasi parameter optimal menggunakan metode factorial design.

Metode penelitian melibatkan variasi faktor utama seperti suhu ekstrusi, kecepatan tarikan, dan rasio komposisi filler HA/MgO. Data hasil eksperimen dianalisis menggunakan ANOVA untuk mengevaluasi signifikansi tiap faktor dan interaksinya terhadap respon berupa kekuatan tarik, homogenitas permukaan, serta stabilitas dimensi filamen. Hasil analisis menunjukkan bahwa suhu ekstrusi dan rasio filler memiliki pengaruh dominan terhadap sifat mekanik, sedangkan kecepatan tarikan lebih berpengaruh pada konsistensi diameter filamen. Optimasi dengan factorial design menghasilkan kombinasi parameter yang mampu meningkatkan kekuatan tarik hingga lebih dari 15% dibandingkan kondisi awal, serta menghasilkan filamen dengan permukaan lebih halus dan diameter lebih stabil.

Kata kunci: biokomposit filamen, PLA/HA/MgO, pencetakan 3D, parameter proses, desain factorial, ANOVA, kualitas filamen

ABSTRACT

This study discusses the analysis and optimization of process parameters in the fabrication of PLA/HA/MgO-based biocomposite filaments for 3D printing applications. Biocomposite filaments were selected due to their potential as functional materials with improved mechanical and bioactive properties compared to pure PLA. The main objective of this research is to identify the influence of process parameters on filament quality and to determine the optimal parameter combination using factorial design methodology.

The research method involves varying key factors such as extrusion temperature, drawing speed, and the HA/MgO filler composition ratio. Experimental data were analyzed using ANOVA to evaluate the significance of each factor and their interactions on responses including tensile strength, surface homogeneity, and dimensional stability of the filaments. The results indicate that extrusion temperature and filler ratio have dominant effects on mechanical properties, while drawing speed plays a greater role in maintaining filament diameter consistency. Optimization through factorial design produced a parameter combination that enhanced tensile strength by more than 15% compared to the initial condition, while also yielding filaments with smoother surfaces and more stable diameters.

Keywords: biocomposite filament, PLA/HA/MgO, 3D printing, process parameters, factorial design, ANOVA, filament quality

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam beberapa dekade terakhir, teknologi *additive manufacturing* atau 3D printing telah menjadi salah satu inovasi paling berpengaruh dalam industri manufaktur modern. Teknologi ini memungkinkan proses produksi komponen dengan tingkat presisi yang tinggi, bentuk yang kompleks, serta efisiensi material yang lebih baik dibandingkan metode konvensional. Salah satu metode 3D printing yang paling banyak digunakan adalah *Fused Deposition Modeling (FDM)*, yang menggunakan filamen termoplastik sebagai bahan baku utama. Oleh karena itu, keberhasilan proses pencetakan dalam metode FDM sangat dipengaruhi oleh kualitas filamen yang digunakan, terutama pada aspek diameter, homogenitas, dan kestabilan dimensi.

Salah satu material yang paling populer digunakan dalam FDM adalah Polylactic Acid (PLA). PLA merupakan polimer berbasis sumber daya terbarukan, seperti pati jagung atau tebu, yang memiliki sifat biodegradable, ramah lingkungan, serta kemudahan dalam pemrosesan. Sifat-sifat ini menjadikan PLA sebagai kandidat material unggulan untuk berbagai aplikasi, mulai dari produk konsumen hingga perangkat medis sekali pakai. Namun demikian, PLA memiliki keterbatasan, di antaranya adalah sifat mekanik yang kurang kuat serta kestabilan termal yang terbatas. Untuk meningkatkan performa PLA, salah satu pendekatan yang dilakukan adalah dengan menambahkan material penguat berupa

Hydroxyapatite (HA). Kombinasi PLA dengan HA menghasilkan biokomposit PLA/HA yang memiliki keunggulan dalam aspek kekuatan, kestabilan, dan sifat fungsional tertentu, sehingga potensial digunakan tidak hanya untuk produk umum tetapi juga dalam bidang teknik material berkelanjutan (Elhattab dkk., 2022)

Proses pembuatan filamen PLA/HA umumnya dilakukan melalui teknik ekstrusi, di mana campuran material dilelehkan, dicetak melalui nozzle, kemudian didinginkan dan ditarik menjadi filamen dengan diameter tertentu. Salah satu tantangan utama dalam proses ini adalah menjaga agar diameter filamen konsisten, karena variasi ukuran sekecil apa pun dapat memengaruhi kualitas hasil cetakan. Diameter yang terlalu besar dapat menyebabkan penyumbatan pada nozzle, sementara diameter yang terlalu kecil dapat membuat aliran material tidak stabil dan menghasilkan cacat pada produk akhir (Gupta dkk., 2025).

Ada beberapa parameter kunci yang berpengaruh terhadap kestabilan diameter filamen pada proses ekstrusi. Pertama, temperatur ekstrusi sangat menentukan viskositas lelehan material. Suhu yang terlalu rendah akan menyebabkan Teknologi pencetakan 3D telah menjadi pendekatan revolusioner dalam bidang rekayasa jaringan dan perangkat medis, terutama dalam pengembangan material bio-komposit berbasis Polylactic Acid (PLA). PLA merupakan polimer biodegradable yang memiliki biokompatibilitas tinggi, namun kekuatan mekanik dan bioaktivitasnya masih terbatas. Untuk mengatasi hal ini, PLA sering dimodifikasi dengan penambahan bahan bioaktif seperti Hydroxyapatite (HA), Magnesium Oxide (MgO), dan Polyethylene Glycol (PEG).

pencampuran material tidak merata, sedangkan suhu yang terlalu tinggi berpotensi merusak struktur polimer akibat degradasi termal. Kedua, kecepatan screw atau kecepatan putaran sekrup pada mesin ekstrusi memengaruhi laju aliran material menuju nozzle. Apabila kecepatan terlalu tinggi atau terlalu rendah, maka tekanan internal dalam silinder ekstrusi menjadi tidak stabil sehingga memengaruhi konsistensi diameter filamen. Ketiga, kecepatan puller, yaitu laju penarikan filamen setelah keluar dari nozzle, juga sangat menentukan. Jika penarikan terlalu cepat, filamen akan tertarik hingga diameternya mengecil, sedangkan jika terlalu lambat, filamen justru menjadi lebih besar dari standar. Selain itu, proses pendinginan dengan air turut memengaruhi struktur internal filamen. Pendinginan yang terlalu cepat dapat menimbulkan tegangan sisa, sedangkan pendinginan yang kurang optimal dapat menyebabkan diameter filamen tidak seragam (Akbar dkk., 2025)

Untuk dapat mengendalikan berbagai parameter tersebut, dibutuhkan suatu pendekatan analisis yang sistematis dan mampu mengevaluasi pengaruh faktor secara simultan. Salah satu metode yang relevan adalah desain eksperimen factorial. Dengan menggunakan metode ini, peneliti dapat menilai efek utama dari setiap parameter serta interaksi antarparameter terhadap kualitas filamen. Berbeda dengan pendekatan konvensional yang hanya mengubah satu faktor pada satu waktu, metode factorial lebih efisien karena mampu memberikan gambaran menyeluruh mengenai kontribusi masing-masing variabel terhadap respon yang diamati. Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa penggunaan

metode factorial mampu meningkatkan akurasi dimensi dan homogenitas filamen berbasis komposit (Haiqal dkk., 2024)

Konsistensi dan standar diameter filamen PLA/HA sangat penting, bukan hanya untuk menjamin kompatibilitas dengan berbagai jenis printer 3D yang tersedia, tetapi juga untuk memastikan performa material pada aplikasi yang lebih luas. Filamen dengan kualitas yang baik akan memberikan hasil cetakan yang lebih stabil, presisi dimensi yang tinggi, dan sifat mekanik yang sesuai dengan kebutuhan. Dengan demikian, penelitian mengenai analisis dan optimalisasi parameter ekstrusi yang meliputi temperatur ekstrusi, kecepatan screw, dan kecepatan puller dengan pendinginan air menggunakan metode factorial memiliki nilai strategis.

Namun, pencampuran keempat komponen ini memerlukan pengaturan parameter proses yang tepat, seperti suhu nozzle, kecepatan cetak, dan rasio komposisi. Parameter yang tidak optimal dapat menyebabkan cacat cetak, penurunan kekuatan, atau ketidaksesuaian dimensi. Oleh karena itu, metode factorial digunakan sebagai pendekatan statistik untuk mengevaluasi pengaruh dan interaksi antar parameter secara sistematis. Dengan rancangan eksperimen factorial, kombinasi parameter terbaik dapat diidentifikasi untuk menghasilkan bio-komposit yang optimal dari segi kekuatan, ketepatan dimensi, dan homogenitas struktur. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi penting dalam pengembangan proses pembuatan filamen biokomposit PLA/HA yang lebih efektif dan efisien. Selain itu, hasil yang diperoleh juga dapat mendukung peningkatan kualitas filamen untuk berbagai aplikasi 3D printing,

baik di bidang industri, pendidikan, maupun riset lanjutan yang membutuhkan material dengan spesifikasi teknis tertentu. Dengan demikian, penelitian ini bukan hanya relevan dari sisi akademik, tetapi juga memiliki implikasi praktis dalam mendorong inovasi material yang berkelanjutan dan aplikatif di masa depan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang, maka rumusan masalah penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh temperatur ekstrusi, kecepatan screw, dan kecepatan puller terhadap diameter filamen PLA/HA/MgO ?
2. Bagaimana interaksi antarparameter proses tersebut dalam menentukan kestabilan diameter filamen?
3. Bagaimana kombinasi parameter optimal yang diperoleh melalui metode factorial?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah:

1. Menganalisis pengaruh temperatur ekstrusi, kecepatan screw, dan kecepatan puller terhadap diameter filamen PLA/HA/MgO
2. Mengevaluasi interaksi antarparameter proses menggunakan metode factorial.
3. Menentukan kombinasi parameter optimal untuk menghasilkan filamen PLA/HA/MGO dengan diameter sesuai standar FDM.

1.4 Batasan Penelitian

Untuk menjaga fokus penelitian dan menghindari perluasan pembahasan yang terlalu luas, maka penelitian ini dibatasi pada hal-hal sebagai berikut:

1. Material yang digunakan adalah PLA sebagai matriks polimer dan Hydroxyapatite (HA) dan Magnesium Oxide (MgO) sebagai filler biokomposit
2. Parameter proses yang dikaji terbatas pada temperatur ekstrusi, kecepatan screw, dan kecepatan puller, dengan media pendingin berupa pendingin air.
3. Respon yang dianalisis difokuskan pada diameter filamen yang dihasilkan, tidak mencakup sifat mekanik atau sifat termal secara mendetail.
4. Metode optimasi yang digunakan adalah desain eksperimen factorial, tidak membahas metode optimasi lain seperti Taguchi atau Response Surface Methodology (RSM).
5. Penelitian ini hanya difokuskan pada proses pembuatan filamen, tidak sampai pada tahap pencetakan 3D atau pengujian performa produk hasil cetak

1.5 Manfaat Penelitian

Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat baik secara teoritis maupun praktis, yaitu:

1. Manfaat Akademis: Penelitian ini dapat menambah literatur dan referensi ilmiah terkait optimasi proses ekstrusi pada pembuatan filamen biokomposit PLA/HA/MgO, khususnya dalam penerapan metode factorial design.
2. Manfaat Teknologis: Penelitian ini dapat memberikan informasi mengenai pengaruh parameter proses ekstrusi terhadap kualitas filamen, sehingga dapat menjadi acuan dalam pengembangan mesin ekstrusi skala laboratorium maupun industri.

3. Manfaat Praktis: Penelitian ini diharapkan membantu produsen filamen atau peneliti lain dalam menghasilkan filamen biokomposit yang konsisten diameternya, sehingga kompatibel dengan berbagai mesin 3D printing dan menghasilkan kualitas cetakan yang lebih baik.
4. Manfaat Aplikatif: Hasil penelitian dapat membuka peluang pemanfaatan biokomposit PLA/HA/MgO, pada aplikasi yang lebih luas di bidang industri, pendidikan, dan penelitian lanjutan yang membutuhkan material ramah lingkungan dan berkinerja baik untuk teknologi man

DAFTAR PUSTAKA

- Akbar, I., Basri, H., Yanis, M., & Ammarullah, M. I. (2025). Optimization of PLA/Mg/PEG biocomposite filaments for 3D-printed bone scaffolds using response surface methodology (RSM). *Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science*, 11(1), 2448648. <https://doi.org/10.1080/20550340.2024.2448648>
- Almeida, V. H. M., Jesus, R. M., Santana, G. M., & Pereira, T. B. (2024). Polylactic Acid Polymer Matrix (Pla) Biocomposites with Plant Fibers for Manufacturing 3D Printing Filaments: A Review. In *Journal of Composites Science*. <https://doi.org/10.3390/jcs8020067>
- Amrita, Manoj, A., & Panda, R. C. (2022). Biodegradable Filament for Three-Dimensional Printing Process: A Review. *Engineered Science*. <https://doi.org/10.30919/es8d616>
- Begum, S. A., Krishnan, P. S. G., & Kanny, K. (2024). Properties of poly (lactic Acid)/ hydroxyapatite biocomposites for 3D printing feedstock material. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. <https://doi.org/10.1177/08927057231182165>
- Bernardo, M. P., da Silva, B. C. R., & Mattoso, L. H. C. (2021). Development of three-dimensional printing filaments based on poly(lactic acid)/hydroxyapatite composites with potential for tissue engineering. *Journal of Composite Materials*. <https://doi.org/10.1177/0021998320988568>
- Elhatab, K., Bhaduri, S. B., & Sikder, P. (2022). Influence of Fused Deposition Modelling Nozzle Temperature on the Rheology and Mechanical Properties of 3D Printed β -Tricalcium Phosphate (TCP)/Polylactic Acid (PLA) Composite. *Polymers*. <https://doi.org/10.3390/polym14061222>
- Gupta, V., Bankapalli, N. K., Saxena, P., Bajpai, A., & Ruan, D. (2025). Additive Manufacturing of Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites through Material Extrusion: A Comprehensive Review on Filament Fabrication, Printing, Testing Methods, Applications, and Challenges. *Advanced Engineering Materials*, n/a(n/a), 2500676. <https://doi.org/10.1002/adem.202500676>
- Haiqal, A., Adzila, S., & Alazemi, M. (2024). Optimization of extrusion parameters for polyhydroxyalkanoate/nano-calcium phosphate/chitosan composite filament fabrication. *MRS Advances*, 9(19), 1527–1531. <https://doi.org/10.1557/s43580-024-00961-7>

- Maidin, S., Fadani, I., Nor Hayati, N. M., & Albaluooshi, H. (2022). APPLICATION OF TAGUCHI METHOD TO OPTIMIZE FUSED DEPOSITION MODELING PROCESS PARAMETERS FOR SURFACE ROUGHNESS. *Jurnal Teknologi*.
<https://doi.org/10.11113/jurnalteknologi.v84.18430>
- Mocanu, A. C., Constantinescu, A. E., Pandele, M. A., Voicu, Ștefan I., Ciocoiu, R. C., Batalu, D., Semenescu, A., Miculescu, F., & Ciocan, L. T. (2024). Biocompatible Composite Filaments Printable by Fused Deposition Modelling Technique: Selection of Tuning Parameters by Influence of Biogenic Hydroxyapatite and Graphene Nanoplatelets Ratios. *Biomimetics*. <https://doi.org/10.3390/biomimetics9030189>
- Plamadiala, I., Croitoru, C., Pop, M. A., & Roata, I. C. (2025). Enhancing Polylactic Acid (PLA) Performance: A Review of Additives in Fused Deposition Modelling (FDM) Filaments. *Polymers*, *17*(2), 1–34.
<https://doi.org/10.3390/polym17020191>
- Razali, M. S., Khimeche, K., Melouki, R., Boudjellal, A., Vroman, I., Alix, S., & Ramdani, N. (2022). Preparation and properties enhancement of poly(lactic acid)/calcined-seashell biocomposites for 3D printing applications. *Journal of Applied Polymer Science*.
<https://doi.org/10.1002/app.51591>
- Tümer, E. H., & Erbil, H. Y. (2021). Extrusion-based 3d printing applications of pla composites: A review. In *Coatings*.
<https://doi.org/10.3390/coatings11040390>
- Wang, W., Zhang, B., Li, M., Li, J., Zhang, C., Han, Y., Wang, L., Wang, K., Zhou, C., Liu, L., Fan, Y., & Zhang, X. (2021). 3D printing of PLA/n-HA composite scaffolds with customized mechanical properties and biological functions for bone tissue engineering. *Composites Part B: Engineering*.
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109192>