

DESAIN DAN PENGEMBANGAN FILAMEN BIODEGRADABLE UNTUK FUSED DEPOSITION MODELING

Gerarda Siagian^{1*}, Sinaga Albert Hasurungan²

^{1,2} Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Pamulang

*E-mail: dosen03458@unpam.id

ABSTRAK

Teknologi pencetakan tiga dimensi (*3D Printing*) dengan metode *Fused Deposition Modeling* (FDM) semakin banyak digunakan dalam berbagai bidang industri karena kemampuannya menghasilkan produk dengan bentuk yang kompleks, biaya yang relatif rendah, dan waktu produksi yang singkat. Salah satu material yang umum digunakan pada proses FDM adalah *Polylactic Acid* (PLA), yang bersifat ramah lingkungan dan dapat terurai secara hayati (*biodegradable*). Namun, PLA memiliki keterbatasan pada beberapa sifat mekaniknya sehingga diperlukan pengembangan material komposit dengan penambahan bahan penguat. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh penambahan biochar tempurung kelapa, pola *infill*, dan ketebalan lapisan (*layer thickness*) terhadap sifat mekanik komposit PLA yang diproduksi menggunakan teknologi FDM. Metode penelitian meliputi pembuatan biochar dari tempurung kelapa menggunakan *muffle furnace*, fabrikasi filamen komposit PLA-biochar menggunakan ekstruder, pencetakan spesimen menggunakan printer 3D FDM, serta pengujian tarik dan lentur. Pengujian tarik dilakukan sesuai standar ASTM D638 menggunakan Universal Testing Machine (UTM). Variabel penelitian yang digunakan meliputi persentase biochar sebesar 3%, pola *infill* paralel (0°, 0°), *default* (-45°, 45°), dan vertikal (90°, 90°), serta ketebalan lapisan 0,15 mm, 0,20 mm, dan 0,25 mm. Hasil penelitian menunjukkan bahwa parameter proses pencetakan dan persentase biochar berpengaruh terhadap sifat mekanik spesimen. Nilai kekuatan tarik tertinggi sebesar 15,3 MPa diperoleh pada spesimen dengan kandungan biochar 3%, pola *infill* paralel (0°, 0°), dan ketebalan lapisan 0,15 mm. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penggunaan biochar tempurung kelapa sebagai bahan penguat komposit PLA berpotensi meningkatkan performa mekanik material hasil pencetakan 3D.

Keywords : *3D Printing, Fused Deposition Modeling (FDM), PLA, Biochar Tempurung Kelapa, Kekuatan Tarik, Kekuatan Lentur, Komposit.*

ABSTRACT

Three-dimensional (3D) printing technology using the *Fused Deposition Modeling* (FDM) method has been widely adopted across various industrial sectors due to its ability to produce complex-shaped components with relatively low production costs and short manufacturing times. One of the most commonly used materials in the FDM process is *Polylactic Acid* (PLA), an environmentally friendly and biodegradable thermoplastic. However, PLA has limitations in several of its mechanical properties, necessitating the development of composite materials through the incorporation of reinforcing fillers. This study aims to investigate the effects of coconut shell biochar content, *infill* pattern, and layer thickness on the mechanical properties of PLA-based composites manufactured using FDM technology. The research methodology consisted of producing biochar from coconut shells using a *muffle furnace*, fabricating PLA-biochar composite filaments with a filament extruder, printing test specimens using an FDM 3D printer, and conducting tensile and flexural tests. Tensile testing was performed in accordance with ASTM D638 using a Universal Testing Machine (UTM). The experimental variables included biochar contents of 3 wt.%, *infill* patterns of parallel (0°, 0°), *default* (-45°, 45°), and vertical (90°, 90°), as well as layer thicknesses of 0.15 mm, 0.20 mm, and 0.25 mm. The results indicate that both the printing process parameters

and the biochar content significantly influence the mechanical properties of the printed specimens. The highest tensile strength of 15.3 MPa was achieved by specimens containing 3 wt.% biochar, printed with a parallel infill pattern (0°, 0°) and a layer thickness of 0.15 mm. These findings demonstrate that coconut shell biochar is a promising reinforcing filler for PLA composites and has the potential to enhance the mechanical performance of materials produced through FDM-based 3D printing.

Keywords : 3D Printing, Fused Deposition Modeling (FDM), Polylactic Acid (PLA), Coconut Shell Biochar, Tensile Strength, Composite Materials

PENDAHULUAN

Teknologi Additive Manufacturing (AM) telah berkembang pesat dalam beberapa dekade terakhir dan menjadi salah satu teknologi manufaktur yang mampu menghasilkan komponen dengan bentuk kompleks, efisiensi material yang tinggi, serta waktu produksi yang relatif singkat. Salah satu metode AM yang paling banyak digunakan adalah Fused Deposition Modeling (FDM) karena memiliki biaya operasional rendah, kemudahan pengoperasian, dan kompatibilitas dengan berbagai jenis material termoplastik (Ngo et al., 2018). Dibandingkan dengan proses manufaktur konvensional, teknologi FDM mampu memproduksi komponen secara langsung dari model tiga dimensi tanpa memerlukan cetakan maupun proses pemesinan yang kompleks (Gibson et al., 2021).

Material filamen merupakan faktor utama yang menentukan kualitas produk hasil pencetakan FDM. Salah satu material yang paling banyak digunakan adalah Polylactic Acid (PLA) karena berasal dari sumber daya terbarukan, mudah diproses, memiliki stabilitas dimensi yang baik, serta bersifat biodegradable sehingga lebih ramah terhadap lingkungan dibandingkan polimer berbasis petrokimia (Farah et al., 2016). Namun demikian, PLA memiliki beberapa kelemahan, seperti sifat getas, ketahanan impak yang rendah, serta stabilitas termal yang terbatas sehingga penggunaannya pada aplikasi struktural masih memerlukan peningkatan sifat mekanik.

Sejak dekade terakhir, banyak penelitian fokus pada pengembangan filamen biodegradable khususnya berbasis PLA (Polylactic Acid), karena sifatnya yang terbarukan, biodegradable, dan cocok dengan mesin FDM. Namun, tantangan seperti kekuatan mekanik, stabilitas termal, dan kemampuan cetak (printability) masih menjadi hambatan besar.

Studi oleh Mechanical, Thermal and Microstructural Characteristic of 3D Printed Polylactide Composites with Natural Fibers: Wood, Bamboo and Cork (2021) menunjukkan bahwa meskipun PLA dengan penambahan serat alami seperti kayu, bambu, dan gabus dapat meningkatkan beberapa sifat mekanik, adhesi antara serat dan matriks PLA kurang bagus, menyebabkan peningkatan kekosongan (voids) dan penurunan kekuatan tarik dibanding PLA murni dalam beberapa kasus. (Mazur).

Berbagai penelitian telah dilakukan untuk meningkatkan performa mekanik PLA melalui penambahan material penguat alami. Penggunaan filler berbasis biomassa, seperti serat alam, tepung kayu, biochar, maupun limbah pertanian, menjadi salah satu pendekatan yang banyak dikembangkan karena mampu meningkatkan kekakuan material sekaligus mempertahankan karakteristik ramah lingkungan (Mohan et al., 2021). Di Indonesia, tempurung kelapa merupakan limbah biomassa yang tersedia dalam jumlah melimpah dan memiliki kandungan karbon yang tinggi setelah dikonversi menjadi biochar. Karakteristik

tersebut menjadikan biochar tempurung kelapa berpotensi sebagai bahan penguat pada komposit PLA untuk aplikasi pencetakan tiga dimensi.

Selain komposisi material, kualitas produk hasil pencetakan FDM juga dipengaruhi oleh parameter proses, seperti pola infill dan ketebalan lapisan (*layer thickness*). Kedua parameter tersebut berpengaruh terhadap ikatan antar-lapisan (*interlayer bonding*), densitas spesimen, porositas, dan distribusi tegangan sehingga secara langsung memengaruhi kekuatan tarik maupun kekuatan lentur hasil cetak (Dawoud et al., 2016). Oleh karena itu, optimasi parameter proses pencetakan menjadi aspek penting dalam menghasilkan produk dengan performa mekanik yang optimal.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini difokuskan pada pengembangan filamen komposit biodegradable berbasis PLA yang diperkuat biochar tempurung kelapa serta analisis pengaruh variasi kandungan biochar, pola infill, dan ketebalan lapisan terhadap sifat mekanik hasil pencetakan menggunakan teknologi FDM. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan alternatif material cetak tiga dimensi yang lebih ramah lingkungan, memiliki performa mekanik yang lebih baik, serta memanfaatkan sumber daya biomassa lokal sebagai bahan baku bernilai tambah.

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah: (1) bagaimana pengaruh penambahan biochar tempurung kelapa terhadap sifat mekanik komposit PLA hasil pencetakan FDM, (2) bagaimana pengaruh variasi pola infill dan ketebalan lapisan terhadap kekuatan tarik dan kekuatan lentur spesimen, serta (3) kombinasi parameter proses manakah yang menghasilkan sifat mekanik optimum.

Berdasarkan rumusan masalah tersebut, tujuan penelitian ini adalah mengembangkan filamen komposit biodegradable berbasis PLA–biochar tempurung kelapa, menganalisis pengaruh kandungan biochar, pola infill, dan ketebalan lapisan terhadap sifat mekanik hasil pencetakan FDM, serta menentukan kombinasi parameter yang menghasilkan performa mekanik terbaik.

Ruang lingkup penelitian meliputi pembuatan biochar dari tempurung kelapa, fabrikasi filamen komposit PLA–biochar menggunakan ekstruder, pencetakan spesimen dengan mesin FDM menggunakan variasi kandungan biochar, pola infill, dan ketebalan lapisan, serta pengujian sifat mekanik berupa uji tarik sesuai ASTM D638 dan uji lentur. Analisis difokuskan pada hubungan antara parameter material dan parameter proses terhadap kekuatan mekanik spesimen hasil pencetakan.

METODE

1. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental dengan pendekatan kuantitatif untuk menganalisis pengaruh penambahan biochar tempurung kelapa, pola *infill*, dan ketebalan lapisan (*layer thickness*) terhadap sifat mekanik komposit *Polylactic Acid* (PLA) yang diproduksi menggunakan teknologi *Fused Deposition Modeling* (FDM).

1.1 Bahan dan Peralatan

Bahan utama yang digunakan adalah filamen PLA, biochar tempurung kelapa, dan bahan pendukung proses pencampuran. *Biochar* diperoleh dari tempurung kelapa yang dikarbonisasi menggunakan muffle furnace, kemudian dihaluskan hingga ukuran partikel tertentu. Peralatan yang digunakan meliputi *filament extruder*, mesin pencetak 3D FDM, *Universal Testing Machine* (UTM) untuk pengujian tarik serta peralatan pendukung lainnya.

1.2 Prosedur Penelitian

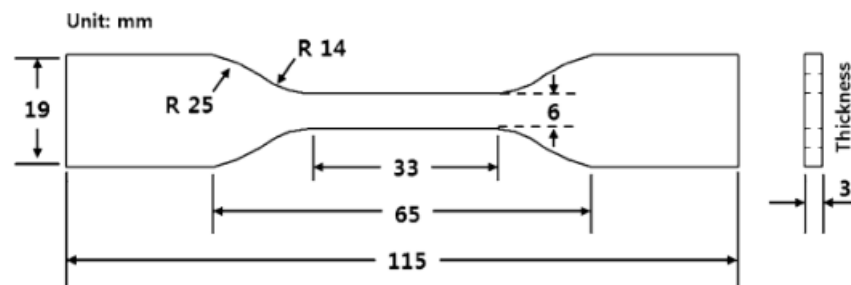
Penelitian dilaksanakan melalui beberapa tahapan, yaitu:

1. Pembuatan *biochar* dari tempurung kelapa menggunakan *muffle furnace*.
2. Penghalusan dan penyaringan *biochar* hingga diperoleh ukuran partikel yang seragam.
3. Pencampuran PLA dan *biochar* dengan variasi kandungan *biochar* sebesar 3 wt.%.
4. Fabrikasi filamen komposit menggunakan *filament extruder* hingga diperoleh filamen berdiameter 1,75 mm.
5. Pencetakan spesimen menggunakan mesin FDM dengan variasi parameter proses.



Gambar 1. Mesin FDM atau 3D Printing

6. Pengujian sifat mekanik, meliputi uji tarik sesuai ASTM D638.



Gambar 2. Spesimen ASTM D638

7. Analisis data untuk menentukan pengaruh masing-masing parameter terhadap kekuatan mekanik komposit.



Gambar 3. Ultimate Tensile Strength

1.3 Variabel Penelitian

Variabel bebas yang digunakan dalam penelitian meliputi:

- Kandungan biochar: 3 wt.% .
- Pola *infill*: Parallel (0°, 0°), Default (-45°, 45°), dan Vertical (90°, 90°)
- *Layer thickness*: 0,15 mm, 0,20 mm, dan 0,25 mm

Variabel terikat berupa sifat mekanik hasil pencetakan, yaitu:

- Kekuatan tarik (MPa)

Sedangkan variabel kontrol meliputi jenis material PLA, diameter filamen (1,75 mm), suhu *nozzle*, suhu *build plate*, kecepatan pencetakan, ukuran spesimen, dan kondisi lingkungan selama proses pencetakan.

1.4 Teknik Pengumpulan Data

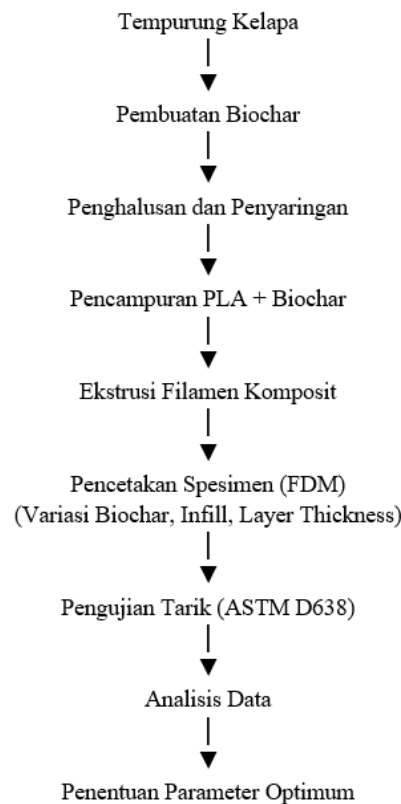
Data diperoleh melalui pengujian eksperimental terhadap spesimen hasil pencetakan. Pengujian tarik dilakukan menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM) sesuai standar ASTM D638. Nilai maksimum kekuatan tarik dan kekuatan lentur dicatat untuk setiap kombinasi parameter penelitian.

1.5 Teknik Analisis Data

Data hasil pengujian dianalisis secara deskriptif dan komparatif dengan membandingkan nilai rata-rata kekuatan tarik pada setiap variasi kandungan biochar, pola *infill*, dan ketebalan lapisan. Selanjutnya dilakukan analisis untuk menentukan kombinasi parameter proses yang menghasilkan sifat mekanik terbaik pada komposit PLA–*biochar*.

1.6 Alur Penelitian

Alur penelitian yang dilakukan dapat dijelaskan sebagai berikut.



Gambar 4. Grafik Metodologi Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

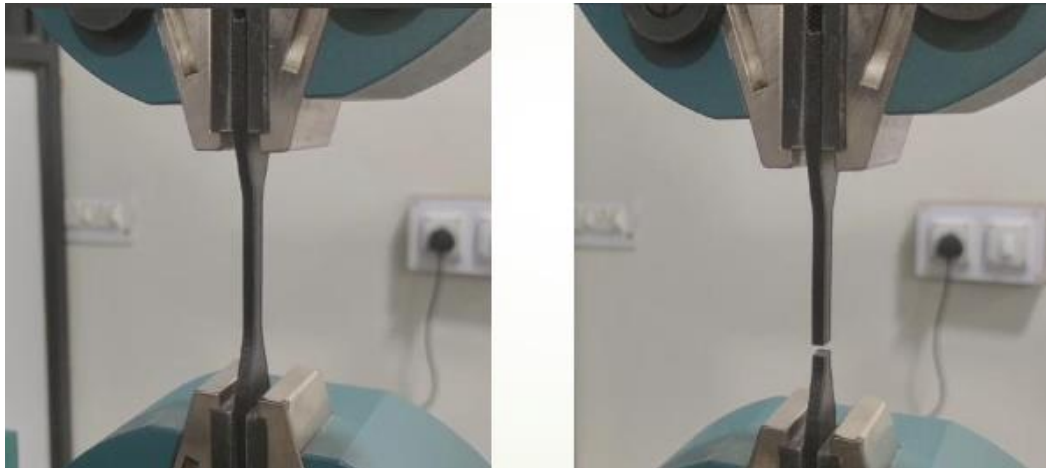
1. Hasil Pengujian Sifat Mekanik

Pengujian mekanik dilakukan untuk mengetahui pengaruh kandungan biochar tempurung kelapa, pola *infill*, dan ketebalan lapisan (*layer thickness*) terhadap kekuatan tarik dan kekuatan lentur komposit PLA hasil pencetakan menggunakan teknologi Fused Deposition Modeling (FDM). Variasi parameter yang digunakan terdiri atas kandungan biochar sebesar 3 wt.%, pola *infill* parallel (0°, 0°), default (-45°, 45°), dan vertical (90°, 90°), serta ketebalan lapisan 0,15 mm, 0,20 mm, dan 0,25 mm.

Tabel 1. Hasil Pengujian Kekuatan Tarik dan Kekuatan Lentur

Biochar (wt.%)	Infill Pattern	Layer Thickness (mm)	Tensile Strength (MPa)
3	Parallel (0°,0°)	0.15	15.3
3	Parallel (0°,0°)	0.20	13.9
3	Parallel (0°,0°)	0.25	13.5
3	Default (-45°,45°)	0.15	15.2
3	Default (-45°,45°)	0.20	14.5
3	Default (-45°,45°)	0.25	14.2
3	Vertical (90°,90°)	0.15	12.6
3	Vertical (90°,90°)	0.20	13.7
3	Vertical (90°,90°)	0.25	13.9

Hasil pengujian menunjukkan bahwa kombinasi biochar 3 wt.%, pola *infill* parallel (0°, 0°), dan *layer thickness* 0,15 mm menghasilkan nilai kekuatan tarik dan kekuatan lentur tertinggi, masing-masing sebesar 15.3 MPa. Sebaliknya, spesimen dengan pola *infill* vertikal menunjukkan nilai kekuatan mekanik yang lebih rendah akibat orientasi deposisi filamen yang kurang mampu menahan beban tarik maupun lentur.



Gambar 5. Sebelum dan Sesudah terjadi Uji Tarik



Gambar 6. Proses Pemasangan Benda pada Mesin Uji Tarik (*Ultimate Tensile Strength*)

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian mengenai pengaruh persentase biochar tempurung kelapa, pola infill, dan ketebalan lapisan (*layer thickness*) terhadap sifat mekanik komposit PLA-biochar yang diproduksi menggunakan teknologi *Fused Deposition Modeling* (FDM), dapat disimpulkan bahwa:

1. Penambahan biochar tempurung kelapa ke dalam matriks PLA dapat digunakan sebagai material komposit yang berpotensi meningkatkan sifat mekanik hasil pencetakan 3D.
2. Pola infill memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kekuatan mekanik spesimen. Pola infill paralel (0° , 0°) menghasilkan nilai kekuatan tarik dan kekuatan lentur yang lebih tinggi dibandingkan pola infill vertikal (90° , 90°).
3. Ketebalan lapisan (*layer thickness*) yang lebih kecil, yaitu 0,15 mm, cenderung menghasilkan kekuatan mekanik yang lebih baik dibandingkan ketebalan lapisan 0,20 mm dan 0,25 mm karena ikatan antar lapisan yang lebih baik.
4. Nilai kekuatan tarik tertinggi sebesar 15,3 pola infill paralel (0° , 0°), dan ketebalan lapisan 0,15 mm.

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, beberapa saran untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Melakukan variasi persentase biochar yang lebih luas, misalnya 1%, 3%, 5%, 7%, dan 10%, untuk mengetahui batas optimum penambahan biochar terhadap sifat mekanik material.
2. Melakukan pengujian sifat material lainnya, seperti uji impak, uji kekerasan, uji keausan, dan analisis termal untuk memperoleh karakterisasi material yang lebih lengkap.
3. Menggunakan ukuran partikel biochar yang berbeda untuk mengetahui pengaruh ukuran partikel terhadap kualitas filamen dan sifat mekanik produk hasil pencetakan 3D.

DAFTAR PUSTAKA

- Gurminder Singh, Ranvijay Kumar, Kamalpreet Sandhu, Eujin Pei, and Sunpreet Singh, 2019. Handbook of Post – Processing in Additive Manufacturing Requirement, Theories and Methods. CRC Press.
- Mohammed Hosseini Fouladi, Satesh Narayana Namasivayam, Vignesh Sekar, Priya Marappan, Hui Leng Choo, Thai Kiat Ong, Rashmi Walvekar, Charalampos Baniotopoulos, 2020. Pretreatment Studies and Characterization of Bio-Degradable and 3dPrintable Filaments from Coconut Waste. International Journal of Nanoelectronics and Materials.
- Mohd Nazri Ahmad, Mohamad Ridzwan Ishak , Mastura Mohammad Taha, Faizal Mustapha and Zulkiflle Leman, 2023. A Review of Natural Fiber-Based Filaments for 3D Printing: Filament Fabrication and Characterization. MDPI: Material.
- J. Kananathan, M. Samykano, K. Kadirgama, D. Ramasamy and M. M. Rahman, 2021. Statistical Model for Impact and Energy Absorption of 3D Printed Coconut Wood-PLA. Tech Science Press.
- S Kesavarma, C K Kong, M Samykano, K Kadirgama and A K Pandey, 2020. Bending properties of 3D printed coconut wood-PLA composite. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.
- Ching Hao Lee, Farah Nadia Binti Mohammad Padzil, Seng Hua Lee, Zuriyati Mohamed Asa'ari Ainun, and Luqman Chuah Abdullah, 2021. Review Potential for Natural Fiber Reinforcement in PLA Polymer Filaments for Fused Deposition Modeling (FDM) Additive Manufacturing: A Review. MDPI: Polymer.
- Jakiya Sultana, Md Mazedur Rahman, Yanen Wang, Ammar Ahmed, Chen Xiaohu, 2023. Influences of 3D printing parameters on the mechanical properties of wood PLA filament: an experimental analysis by Taguchi method. Springer.
- Justin George , Daeseung Jung and Debes Bhattacharyya, 2023. Improvement of Electrical and Mechanical Properties of PLA/PBAT Composites Using Coconut Shell Biochar for Antistatic Applications. MDPI: Applied Science.
- Prashant Anerao, Atul Kulkarni, Yashwant Munde, Avinash Shinde, Oisik Das, 2023. Biochar reinforced PLA composite for fused deposition modelling (FDM): A parametric study on mechanical performance. Sciencedirect: Elsevier, Composite Part C Open Access.
- Zhaobing Liua, Qian Lei, Shuaiqi Xing, 2019. Mechanical characteristics of wood, ceramic, metal and carbon fiber-based PLA composites fabricated by FDM. Journal of Materials Research and Technology.
- David Stoof, Kim Pickering and Yuanji Zhang, 2017. Fused Deposition Modelling of Natural Fibre/Polylactic Acid Composites. MDPI: Composite Science.
- Sekar, V., Fouladi, M.H., Namasivayam, S.N., Sivanesan, S., 2019. Review Article: Additive Manufacturing: A Novel Method for Developing an Acoustic Panel Made of Natural Fiber-Reinforced Composites with Enhanced Mechanical and Acoustical Properties. Hindawi: Journal of Engineering.
- Valentina Mazzanti, Lorenzo Malagutti and Francesco Mollica, 2019. Review: FDM 3D Printing of Polymers Containing Natural Fillers: A Review of their Mechanical Properties. MDPI: Polymer.
- Delphine Depuydt, Michiel Balthazar, Kevin Hendrickx, Wim Six, Eleonora Ferraris,

- Frederik Desplentere, Jan Ivens, Aart W. Van Vuure, 2018. Production and Characterization of Bamboo and Flax Fiber Reinforced Polylactic Acid Filaments for Fused Deposition Modeling (FDM). Polymer Composite.
- Mirko Kariz, Milan Sernek, Murco Obucina, Manja ' Kitek Kuzman, 2017. Effect of wood content in FDM filament on properties of 3D printed parts. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2017.12.016>
- Yubo Tao, Honglei Wang, Zelong Li, Peng Li, and Sheldon Q. Shi, 2017. Development and Application of Wood Flour-Filled Polylactic Acid Composite Filament for 3D Printing. MDPI: Materials. <https://doi.org/10.3390/ma10040339>
- Saquib Rouf, Abrar Malik, Navdeep Singh, Ankush Raina, Nida Naveed , Md Irfanul Haque Siddiqui, Mir Irfan Ul Haq, 2022. Additive manufacturing technologies: Industrial and medical applications. ScienceDirect : Suistainable Operations and Computers.
- Sunpreet Singh, Chander Prakash, Seeram Ramakrishna, 2022. Innovative processes and materials in additive manufacturing. Elviiser Science.
- Goole Jonathan, Amighi Karim. 2015. 3D Printing in Pharmaceuticals: A new tool for designing customized drug delivery systems. International Journal Of Pharmaceutics.
- Omar A. Mohamed, Syed H. Masood, Jahar L. Bhowmik. 2015. Optimization of fused deposition modeling process parameters: review of current research and future prospects. Adv. Manuf 3:42-53. <https://doi.org/10.1007/s40436-014-0097-7>
- R. Patel, V. Z. Dhimmarr, S. A. Kagzi, and M. R. Patel. 2022. Investigation of Fused Deposition Modelling Process Parameters in 3D Printing for Composite Material (Poly Lactic Acid and Banana Fibre). International Journal of Automative and Mechanical Engineering (IJAME): ISSN: 229-8649.
- Imre Fekete, Ferenc Ronkay, and Laszlo Lendvai. 2021. Highly Toughened Blends of Poly(Lactic Acid) (PLA) and Natural Rubber (NR) for FDM-based 3D Printing Applications: The Effect of Comprasion and Infill Pattern. Elvisier: Polymer Testing. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2021.107205>.
- Rezgar Hasanzadeh, Peyman Mihankahah, Taher Azdast, Sorous Aghaiee, and Chul B. Park. 2023. Optimization of Process Parameters of Fused Filament Fabrication of Polylactic Acid Composites Reinforced by Aluminum Using Taguchi Approach. MDPI: Metals. <https://doi.org/10.3390/met13061013>.
- Jaya Suteja, Hudiyo Firmanto, Arum Soesanti, and Christian Christian. 2020. Properties Investigation of 3D Printed Continious Pineapple Leaf Fiber-Reinforced PLA Composite. Journal of Thermoplastic Composite Materials. <https://doi.org/10.1177/0892705720945371>.