

# Investigasi *Flexural Properties* Hasil Cetak 3D Printer Berbahan *Carbon Fiber Polylactic Acid* untuk Pembuatan Telapak Kaki Palsu

The Jaya Suteja<sup>1\*</sup>, Damario Poetra Elang Rahmawan<sup>2</sup>, Sunardi Tjandra<sup>3</sup> 

<sup>1,2,3</sup>Teknik Mesin dan Manufaktur, Universitas Surabaya, Surabaya, Indonesia

## ARTICLE INFO

### Article history:

Received July 28, 2024

Accepted October 13, 2024

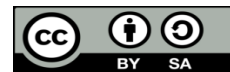
Available online October 25, 2024

### Kata Kunci:

*Flexural Properties*, 3D Printing, *Carbon Fiber*, *Polylactic Acid*

### Keywords:

*Flexural Properties*, 3D Printing, *Carbon Fiber*, *Polylactic Acid*



This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.

Copyright © 2024 by Author. Published by Universitas Pendidikan Ganesha.

## ABSTRAK

Telapak kaki palsu jenis *Energy-storing-and-returning* dan *Bionic* harus mempunyai kekuatan dan kekakuan tertentu. Material *Polylactic Acid* yang diperkuat dengan serat karbon (CF-PLA) dapat digunakan untuk meningkatkan kekuatan dari *foot* yang dibuat dengan 3D *printing*. Parameter proses dari 3D *printing* juga bisa digunakan untuk mendapatkan kekuatan tertentu dari *foot*. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menyelidiki pengaruh parameter 3D *printing* yaitu *infill density*, *shell thickness*, dan temperatur ekstruder terhadap rasio kekuatan tekuk dibanding massa, modulus kekakuan tekuk, dan regangan tekuk dari hasil cetakan berbahan CF-PLA serta memberi rekomendasi nilai parameter yang optimal. Rancangan eksperimen yang digunakan mengikuti metode *Taguchi Grey Relational Analysis* dengan tiga level dan dua kali replikasi. Spesimen uji tekuk berdasarkan standar ISO 178 digunakan sebagai obyek penelitian ini. Dari hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa parameter *infill density* dan *shell thickness* adalah parameter yang berpengaruh. Penelitian ini berkontribusi memberikan wawasan bahwa material CF-PLA berpotensi digunakan untuk membuat telapak kaki palsu dengan proses 3D *printing*. Untuk mendapatkan nilai rasio kekuatan tekuk dan massa, modulus elastisitas tekuk, dan regangan tekuk yang maksimum, nilai yang direkomendasikan untuk *infill density* adalah sebesar 40%, *shell thickness* adalah sebesar 1,2 mm, dan temperatur ekstruder adalah sebesar 210 °C.

## ABSTRACT

*Energy-storing-and-returning* and *Bionic* prosthetic feet must have particular strength and stiffness. *Polylactic Acid* material reinforced with carbon fibre (CF-PLA) can be used to increase the strength of the foot made by 3D printing. The process parameters of 3D printing can also be used to obtain specific foot strength. The purpose of this study was to investigate the effect of 3D printing parameters, namely *infill density*, *shell thickness*, and extruder temperature, on the ratio of bending strength to mass, bending stiffness modulus, and bending strain of CF-PLA printed results and to provide recommendations for optimal parameter values. The experimental design follows the *Taguchi-Gray Relational Analysis* method with three levels and two replications. Bending test specimens based on the ISO 178 standard were used as the objects of this study. The study results show that the *infill density* and *shell thickness* parameters are influential. This study provides insight into the potential of CF-PLA material to make prosthetic feet with the 3D printing process. To obtain the maximum values of the ratio of bending strength and mass, bending modulus of elasticity, and bending strain, the recommended values for *infill density* are 40%, *shell thickness* is 1.2 mm, and extruder temperature is 210°C.

## 1. PENDAHULUAN

Prostetik kaki palsu digunakan untuk menggantikan bagian kaki pengguna yang telah mengalami amputasi. Berdasarkan bagian kaki yang diamputasi, prostetik ini dibedakan menjadi kaki palsu yang menggantikan bagian atas lutut, bagian bawah lutut, atau bagian lain dari kaki pengguna. Kaki palsu umumnya terdiri dari beberapa komponen seperti *socket*, *socket adaptor*, *tube*, *foot adaptor*, dan *foot*. Contoh dari komponen prostetik *foot* atau telapak kaki palsu yang konvensional adalah *Solid Ankle Cushioned Heel*, *Jaipur*, dan *Niagara* (Banks et al., 2023; Subhash et al., 2022). Selain itu, komponen *foot* juga mempunyai tipe yang lain yaitu *Energy-storing-and-returning* dan *Bionic feet* (Chiriac & Bucur, 2020; Li et al., 2024). Tipe *energy-storing-and-returning* dan *bionic* ini akan mengalami tegangan tekan, tegangan tekuk, tegangan geser, dan juga bisa mengalami torsi pada saat digunakan untuk berdiri, berjalan, ataupun jongkok. Oleh karena itu, tipe *foot* ini harus mempunyai kekuatan tertentu agar tidak rusak dan mempunyai kekakuan tertentu serta ringan agar dapat memberikan kenyamanan pada pengguna (Banks et al., 2023; Tacca et al., 2023). Akan tetapi, *foot* yang dijual di pasar menggunakan material yang kuat dan kaku tapi berat sehingga masih belum bisa memenuhi kebutuhan pengguna.

\*Corresponding author.

E-mail addresses: [jayasuteja@staff.ubaya.ac.id](mailto:jayasuteja@staff.ubaya.ac.id) (The Jaya Suteja)

Dari hasil penelitian Tyagi, et al., Vijayan, et al., dan Yousif, et al., *foot* yang dibuat dari polimer menggunakan 3D *printing* jenis *Fused Filament Fabrication* menunjukkan sifat tekuk dan tekan yang superior serta ringan (Tyagi et al., 2024; Vijayan et al., 2020; Yousif et al., 2024). Berbagai material dapat dipakai dalam pembuatan *foot* menggunakan 3D *printing* agar *foot* mempunyai sifat yang dibutuhkan. Penelitian sebelumnya telah menggunakan berbagai material seperti *Nylon PA 12* dan komposit seperti *Polylactic Acid/Wood*, *Polylactic Acid/Marble*, dan *Carbon-covered Polylactic Acid/Marble* untuk mendapatkan *foot* dengan harga yang lebih murah tapi masih memenuhi standar (Kathrotiya et al., 2023; Yousif et al., 2024). Dari hasil penelitian tersebut, penggunaan *Carbon-covered Polylactic Acid/Marble* bisa mendapatkan unjuk kerja, biaya, dan berat yang terbaik. Material *Polylactic Acid* juga dapat diperkuat dengan serat karbon (CF-PLA) sebagai material 3D *printing* untuk meningkatkan kekuatan dari *foot* (Maqsood & Rimašauskas, 2021b; Tyagi et al., 2024; Valvez et al., 2020).

Selain jenis material yang digunakan, parameter proses dari 3D *printing* juga berpengaruh terhadap sifat mekanik dari *foot*. Tyagi, et al., menemukan pengaruh dari diameter nosel dan *infill pattern* terhadap kekuatan tekuk dan tekan dari *foot*. Berdasarkan studi literatur yang dilakukan, parameter seperti *layer height*, *infill pattern*, *infill density*, *infill width*, dan kecepatan cetak mempengaruhi sifat mekanik hasil cetakan seperti kekuatan tarik dan luluh, keuletan, modulus elastisitas tarik, kekuatan tekan, kekuatan tekuk, dan kekakuan (Kristiawan et al., 2021; T. J. Suteja & Soesanti, 2020). Penelitian yang dilakukan sebelumnya telah menggunakan 3D *printing* untuk mencetak komposit berpenguat serat kontinu (Cui et al., 2023; J. Suteja et al., 2022). Serat penguat yang digunakan adalah *Kevlar* dan daun nanas untuk matriks polimer *Polylactic Acid*. Suteja, et al., menemukan pengaruh dan sekaligus mencari parameter *layer height*, *infill density*, dan *shell thickness* yang optimal untuk mendapatkan kekuatan tekuk paling besar dan waktu pencetakan yang paling singkat pada proses 3D *printing* dari *Polylactic Acid* (T. J. Suteja et al., 2023). Penelitian lain menjelaskan pengaruh dari *layer height*, *infill density*, *infill pattern*, temperatur ekstruder, keliling, and tipe lapisan terhadap kekuatan tekuk dan fatik dari hasil cetakan 3D *printing* berbahan *Polylactic Acid* (Son Minh et al., 2024).

Beberapa penelitian terkait kekuatan tekuk dari hasil cetakan berbahan CF-PLA telah dilakukan (Khalili et al., 2023; Maqsood & Rimašauskas, 2021a; Öteyaka et al., 2021; Yadav et al., 2021). Penelitian oleh Maqsood, et al. mencari nilai modulus tekuk dari hasil cetakan 3D *printing* berbahan CF-PLA (Maqsood & Rimašauskas, 2021a). Berdasarkan studi literatur yang sudah dilakukan, penelitian yang ada belum banyak membahas modulus tekuk dan regangan tekuk dari hasil cetakan 3D *printing* yang menggunakan material CF-PLA. Parameter 3D *printing* yang diteliti oleh beberapa penelitian sebelumnya juga masih terbatas pada *layer height*, *infill density*, *infill pattern*, orientasi cetak, kecepatan cetak, dan temperatur ekstruder (Dou et al., 2020; Khalili et al., 2023; Naranjo-Lozada et al., 2019; Vinoth Babu et al., 2022).

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menyelidiki pengaruh parameter 3D *printing* terhadap *flexural properties* atau sifat tekuk dari hasil cetakan berbahan CF-PLA dan kemudian merekomendasikan nilai parameter yang optimal. Sifat tekuk yang dibahas pada penelitian ini adalah rasio kekuatan tekuk dibanding massa, modulus kekakuan tekuk, dan regangan tekuk. Nilai rasio kekuatan tekuk dibanding massa dibutuhkan dalam menghasilkan *foot* yang ringan tapi tetap mampu menahan tegangan tekuk yang diakibatkan oleh tubuh pengguna. Nilai modulus kekakuan tekuk digunakan untuk mendapatkan jumlah energi tersimpan pada *foot* yang cukup untuk mengembalikan *foot* pada kondisi semula. Terakhir, nilai regangan tekuk dibutuhkan dalam membuat *foot* yang dapat membuat pengguna merasa nyaman dalam melangkah.

Parameter 3D *printing* yang diselidiki pada penelitian ini adalah *infill density*, *shell thickness*, dan temperatur ekstruder. Peningkatan nilai *infill density* akan meningkatkan kekuatan tekuk hasil cetakan (Atakok et al., 2022; T. J. Suteja et al., 2023). Demikian juga penambahan nilai *shell thickness* akan meningkatkan kekuatan tekuk hasil cetakan (Pirouzfard & Zeinedini, 2021; T. J. Suteja et al., 2023). Akan tetapi, kenaikan *shell thickness* akan menyebabkan rongga bagian dalam akan mengecil. Jika rongga diisi dengan *infill density* yang sama maka akan menghasilkan massa dan kekuatan hasil cetakan yang berbeda. Oleh karena itu, pengaruh *infill density* dan *shell thickness* terhadap rasio kekuatan tekuk dan massa akan berkorelasi dan perlu untuk diinvestigasi lebih lanjut. *Infill density* dan *shell thickness* juga akan mempengaruhi porositas dari hasil cetakan dan selanjutnya akan mempengaruhi modulus elastisitas tekuk dan regangan tekuk dari hasil cetakan. Sedangkan parameter temperatur ekstruder juga diteliti karena pengaruhnya terhadap modulus elastisitas tekuk dan regangan tekuk masih belum banyak dibahas.

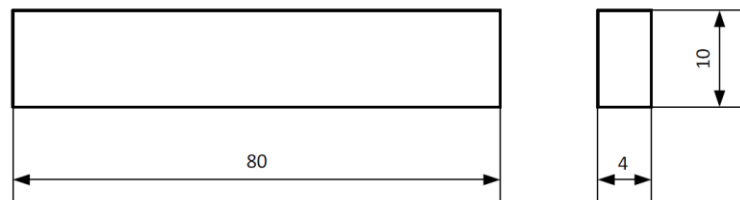
## 2. METODE

Rancangan eksperimen yang digunakan pada penelitian adalah metode *Taguchi L9* dengan tiga level dan dua kali replikasi. Kemudian metode *Taguchi Grey Relational Analysis* (*Taguchi GRA*) akan digunakan untuk mencari nilai *infill density*, *shell thickness*, dan temperatur ekstruder yang dapat

menghasilkan kombinasi rasio kekuatan tekuk dibanding massa, modulus kekakuan tekuk, dan regangan tekuk paling besar. Metode *Taguchi GRA* ini telah digunakan dalam penelitian lain untuk mengoptimalkan respon yang jumlahnya lebih dari satu (Patel et al., 2024; Tunçel et al., 2024).

Pada penelitian ini, spesimen uji tekuk berdasarkan standar ISO 178 digunakan sebagai obyek penelitian. Spesimen uji tekuk ini mempunyai panjang ( $l$ ) =  $80 \pm 2$  mm, lebar ( $b$ ) =  $10 \pm 0,2$  mm, dan tebal atau tinggi ( $h$ ) =  $4 \pm 0,2$  mm. Gambar 1 menunjukkan bentuk dan ukuran spesimen uji tekuk yang digunakan. Mula-mula, spesimen ini dimodelkan dengan perangkat lunak CAD dan dikonversi menjadi format STL. Kemudian model CAD ini dicetak dengan mesin 3D printer merek Anet A8. Untuk mengatur parameter proses 3D printing, penelitian ini menggunakan perangkat *Repetier-Host*. Dimensi spesimen hasil cetakan diukur terlebih dahulu untuk memastikan bahwa dimensi spesimen sesuai dengan standar. Setelah itu, spesimen ditimbang menggunakan neraca digital *Mettler Toledo tipe ME204E* dengan ketelitian 0,1 mg untuk mengetahui massa dari spesimen. Terakhir, spesimen diuji tekuk dengan menggunakan mesin *Tarno Grocki* dengan ketelitian 0,01 kg.

Tabel 1 menunjukkan nilai dari berbagai parameter proses 3D printing yang digunakan pada penelitian ini. Nilai parameter yang merupakan variabel bebas ditentukan berdasarkan beberapa pertimbangan. Nilai parameter ini ditentukan berdasarkan penelitian sebelumnya dan juga rekomendasi dari katalog. Spesimen uji tekuk disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Spesimen Uji Tekuk

Tabel 1. Nilai Parameter Proses 3D Printing

Parameter	Nilai
<i>Infill Density</i> (%)	40; 60; 80
<i>Shell Thickness</i> (mm)	0,4; 0,8; 1,2
Temperatur Ekstruder (°C)	190; 200; 210
Diameter Nosel (mm)	0,4
Pola Pengisian	<i>Triangular</i>
Temperatur Meja (°C)	75
Laju Pencetakan (mm/dtk)	90
Sudut Pengisian (°)	0
Orientasi Pencetakan	<i>On-edge</i>
<i>Layer Height</i> (mm)	0,2

Nilai parameter *infill density* yang merupakan variabel bebas pada penelitian ini ditentukan berdasarkan penelitian sebelumnya. Berdasarkan penelitian Babu, et al., kekuatan tekuk terbesar didapatkan jika menggunakan *infill density* sebesar 60 %. Berdasarkan data tersebut, penelitian ini menggunakan nilai *infill density* 60% sebagai level tengah. Level tinggi dari parameter *infill density* ditentukan sebesar 80% dan level rendah ditentukan sebesar 40%.

Nilai dari parameter *shell thickness* ditentukan berdasarkan kelipatan diameter nosel. Suteja, et al., menemukan bahwa peningkatan *shell thickness* akan meningkatkan kekuatan tekuk dan menurunkan waktu pencetakan. Akan tetapi, waktu pencetakan akan bertambah jika *shell thickness* melebihi nilai 1,2 mm. Oleh karena itu, level tinggi *shell thickness* yang digunakan adalah 1,2 mm. Level rendah *shell thickness* yang digunakan pada penelitian ini adalah 0,4 mm yang setara dengan ukuran satu nosel diameter. Sedangkan level tengah yang digunakan ditentukan berdasarkan rata-rata level tinggi dan level rendah *shell thickness* yaitu 0,8 mm.

Level temperatur ditentukan berdasarkan katalog material dan hasil eksperimen pendahuluan. Pada saat nilai temperatur yang digunakan adalah 220 °C, fenomena *stringing* terjadi sehingga material meleleh dan keluar dari ekstruder. Oleh karena itu, level tinggi dari temperatur ekstruder ditentukan adalah 210 °C. Level rendah dari temperatur ekstruder ditentukan berdasarkan katalog material yaitu 190 °C. Sedangkan level tengah dihitung berdasarkan rata-rata level temperatur yaitu sebesar 200 °C.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### Hasil

Penelitian ini mencetak sebanyak 18 buah spesimen uji tekuk untuk mencari pengaruh variabel bebas sebagai faktor terhadap variabel terikat sebagai respon. Gambar 2 menunjukkan semua spesimen uji yang telah diuji tekuk. Hasil pengujian tekuk disajikan pada Tabel 2.



Gambar 2. Spesimen Uji Setelah Ditekuk

Tabel 2. Hasil Pengujian Tekuk

<i>Infill Density</i> (%)	<i>Shell Thickness</i> (mm)	Temperatur Ekstruder (°C)	Rasio Kekuatan Tekuk dan Massa (MPa/gram)	Modulus Elastisitas Tekuk (MPa)	Regangan Tekuk
40	0,4	190	28,62000	2092,377	0,057949
40	0,4	190	29,01156	2111,393	0,054082
40	0,8	200	29,83315	3299,478	0,036035
40	0,8	200	30,95110	2882,002	0,042480
40	1,2	210	32,73056	3020,560	0,042480
40	1,2	210	31,65360	2992,848	0,042480
60	0,4	200	28,82389	2445,648	0,051504
60	0,4	200	29,43000	2417,477	0,050156
60	0,8	210	30,53019	3018,205	0,038613
60	0,8	210	29,96509	3266,810	0,036035
60	1,2	190	32,66871	2943,614	0,041191
60	1,2	190	31,12138	3430,150	0,036035
80	0,4	210	29,21928	2521,752	0,042480
80	0,4	210	27,85339	2716,438	0,043770
80	0,8	190	29,49892	2957,231	0,038613
80	0,8	190	27,55718	2481,968	0,045059
80	1,2	200	29,15236	2861,697	0,039902
80	1,2	200	30,21830	2965,137	0,042480

Tabel 2 menunjukkan nilai rasio kekuatan tekuk dan massa, modulus elastisitas tekuk, dan regangan tekuk sebagai fungsi dari *infill density*, *shell thickness*, dan temperatur ekstruder. Untuk mengetahui signifikansi pengaruh dari setiap faktor terhadap setiap respon, maka *Analysis of Variance (ANOVA)* digunakan pada penelitian ini. *ANOVA* dari setiap faktor terhadap rasio kekuatan tekuk dan massa, modulus elastisitas tekuk, dan regangan tekuk dapat dilihat pada Tabel 3, Tabel 4, dan Tabel 5 secara berurutan.

**Tabel 3. Analysis of Variance Rasio Kekuatan Tekuk dan Massa**

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Infill Density (%)	2	9.349	46.746	6.73	0.012
Shell Thickness (mm)	2	18.139	90.695	13.05	0.001
Temperatur Ekstruder (°C)	2	1.368	0.6842	0.98	0.404
Error	11	7.645	0.6950		
Lack-of-Fit	2	1.437	0.7183	1.04	0.392
Pure Error	9	6.208	0.6898		
Total	17	36.501			

**Tabel 4. Analysis of Variance Modulus Elastisitas Tekuk**

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Infill Density (%)	2	128250	64125	1.14	0.354
Shell Thickness (mm)	2	1574396	787198	14.03	0.001
Temperatur Ekstruder (°C)	2	193501	96750	1.72	0.223
Error	11	617245	56113		
Lack-of-Fit	2	242641	121321	2.91	0.106
Pure Error	9	374604	41623		
Total	17	2513392			

**Tabel 5. Analysis of Variance Regangan Tekuk**

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Infill Density (%)	2	0.000057	0.000028	2.00	0.181
Shell Thickness (mm)	2	0.000395	0.000197	13.92	0.001
Temperatur Ekstruder (°C)	2	0.000062	0.000031	2.19	0.158
Error	11	0.000156	0.000014		
Lack-of-Fit	2	0.000085	0.000043	5.43	0.028
Pure Error	9	0.000071	0.000008		
Total	17	0.000670			

Berdasarkan **Tabel 3**, rasio kekuatan tekuk dan massa dari spesimen uji dipengaruhi secara signifikan oleh *infill density* dan *shell thickness*. Sedangkan temperatur ekstruder tidak mempengaruhi rasio kekuatan tekuk dan massa secara signifikan. Hasil ANOVA dari modulus elastisitas tekuk menunjukkan bahwa *shell thickness* mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap modulus elastisitas tekuk. Sedangkan *infill density* dan temperatur ekstruder tidak berpengaruh secara signifikan terhadap modulus elastisitas tekuk. **Tabel 5** menunjukkan bahwa regangan tekuk dipengaruhi secara signifikan oleh *shell thickness*. Sedangkan regangan tekuk tidak dipengaruhi secara signifikan oleh *infill density* dan temperatur ekstruder.

Dengan menggunakan metode *Taguchi GRA*, pertama-tama, *Signal-to-Noise Ratio (SNR)* untuk masing-masing respon dari masing-masing kombinasi nilai parameter dihitung dengan menggunakan rumus "*Larger-the-Better*". Kemudian *normalized value* dari respon untuk masing-masing kombinasi dihitung dan kemudian *normalized value* tersebut digunakan untuk menghitung *deviation sequence* dari masing-masing kombinasi. *Normalized value* digunakan untuk mengubah nilai *SNR* agar berada dalam skala antara 0 hingga 1 sehingga dapat menampilkan kualitas respon. *Deviation sequence* adalah urutan nilai deviasi antara data asli dengan nilai referensi yang telah ditentukan. Nilai referensi yang ditentukan dalam hal ini adalah 1. *Deviation sequence* memberikan gambaran seberapa dekat atau jauh hubungan antara nilai masing-masing *SNR* dengan nilai referensi. Nilai *SNR*, *normalized value*, dan *deviation sequence* dari masing-masing respon dapat dilihat pada **Tabel 6**.

**Tabel 6. Nilai SNR, Normalized Value, dan Deviation Sequence**

Signal-to-Noise Ratio			Normalized Value			Deviation Sequence		
Rasio kekuatan Tekuk dan Massa	Modulus Elastisitas Tekuk	Regangan Tekuk	Rasio kekuatan Tekuk dan Massa	Modulus Elastisitas Tekuk	Regangan Tekuk	Rasio kekuatan Tekuk dan Massa	Modulus Elastisitas Bending	Regangan Tekuk
29,1920	66,4519	-25,0493	0,0958	0,0000	1,0000	0,9042	1,0000	0,0000
29,6508	69,7418	-28,2094	0,5282	0,9295	0,1039	0,4718	0,0705	0,8961

Signal-to-Noise Ratio			Normalized Value			Deviation Sequence		
Rasio kekuatan Tekuk dan Massa	Modulus Elastisitas Tekuk	Regangan Tekuk	Rasio kekuatan Tekuk dan Massa	Modulus Elastisitas Tekuk	Regangan Tekuk	Rasio kekuatan Tekuk dan Massa	Modulus Elastisitas Bending	Regangan Tekuk
30,1513	69,5615	-27,4362	1,0000	0,8786	0,3231	0,0000	0,1214	0,6769
29,2845	67,7173	-25,8799	0,1830	0,3575	0,7645	0,8170	0,6425	0,2355
29,6127	69,9251	-28,5757	0,4923	0,9813	0,0000	0,5077	0,0187	1,0000
30,0668	69,9913	-28,3234	0,9203	1,0000	0,0716	0,0797	0,0000	0,9284
29,1005	68,3450	-27,3083	0,0096	0,5349	0,3594	0,9904	0,4651	0,6406
29,0903	68,5905	-27,6464	0,0000	0,6042	0,2635	1,0000	0,3958	0,7365
29,4466	69,2839	-27,7166	0,3358	0,8001	0,2436	0,6642	0,1999	0,7564

Berdasarkan nilai *deviation sequence* yang diperoleh, nilai *grey relational coefficient* dari masing-masing respon bisa dihitung. *Grey relational coefficient* akan menunjukkan *sequence* yang mempunyai nilai deviasi terendah. *Sequence* dengan deviasi terendah akan menghasilkan *grey relational coefficient* dengan nilai tertinggi. Terakhir, *grey relational coefficient* digunakan untuk menghitung *grey relational grade*. Dengan menggunakan bobot yang sama untuk semua respon, *grey relational grade* dapat dihitung dengan melakukan rata-rata nilai *grey relational coefficient*. Semakin tinggi nilai *grey relational grade* menunjukkan korelasi yang lebih kuat antara tujuan dan *sequence*. Jadi, *grey relational grade* tertinggi menggambarkan kombinasi optimal dari 3 respon pada setiap percobaan. Tabel 7 menunjukkan nilai *grey relational coefficient* dan *grey relational grade* dari masing-masing respon.

Tabel 7. Nilai *grey Relational Coefficient* dan *Grey Relational Grade*

Grey Relational Coefficient			
Rasio Kekuatan Tekuk dan Massa (MPa/gram)	Modulus Elastisitas Tekuk (MPa)	Regangan Tekuk	Grey Relational Grade
0,3561	0,3333	1,0000	0,5631
0,5145	0,8764	0,3581	0,5830
1,0000	0,8046	0,4249	0,7432
0,3796	0,4376	0,6798	0,4990
0,4962	0,9639	0,3333	0,5978
0,8625	1,0000	0,3500	0,7375
0,3355	0,5181	0,4384	0,4306
0,3333	0,5582	0,4044	0,4320
0,4295	0,7144	0,3980	0,5140

Untuk mengetahui parameter 3D *printing* yang menghasilkan respon yang paling optimal, nilai *grey relational grade* dari masing-masing nilai parameter dirata-rata. Pada penelitian ini, nilai respon yang paling optimal adalah nilai yang paling besar. Berdasarkan hasil ANOVA dari nilai rata-rata *grey relational grade* yang terlihat pada Tabel 8, parameter yang paling berpengaruh signifikan terhadap kombinasi rasio kekuatan tekuk dan massa, modulus elastisitas tekuk, dan regangan tekuk adalah *infill density* dengan kontribusi sebesar 50 % dan kemudian *shell thickness* dengan kontribusi sebesar 43,4 %. Sedangkan kontribusi dari temperatur ekstruder hanya 5,4 % saja.

Nilai rasio kekuatan tekuk dan massa, modulus elastisitas tekuk, dan regangan tekuk yang mempunyai nilai rata-rata *grey relational grade* paling besar merupakan nilai yang dapat menghasilkan nilai kombinasi respon paling tinggi. Tabel 9 menunjukkan rata-rata nilai *grey relational grade* dari masing-masing nilai parameter. Pada Tabel 9 terlihat bahwa nilai *infill density* sebesar 40%, *shell thickness* sebesar 1,2 mm, dan temperatur ekstruder sebesar 210 °C akan menghasilkan kombinasi rasio kekuatan tekuk dan massa, modulus elastisitas tekuk, dan regangan tekuk yang paling besar.

Tabel 8. Analysis of Variance Grey Relational Grade

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Infill Density (%)	2	0,052838	0,026419	40,46	0,024
Shell Thickness (mm)	2	0,045782	0,022891	35,05	0,028
Temperatur Ekstruder (C)	2	0,005668	0,002834	4,34	0,187

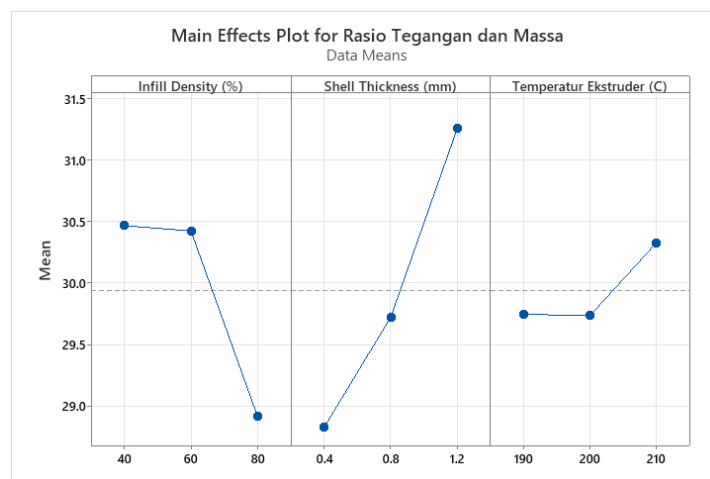
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Error	2	0,001306	0,000653		
Total	8	0,105594			

**Tabel 9.** Rata-Rata Nilai Grey Relational Grade

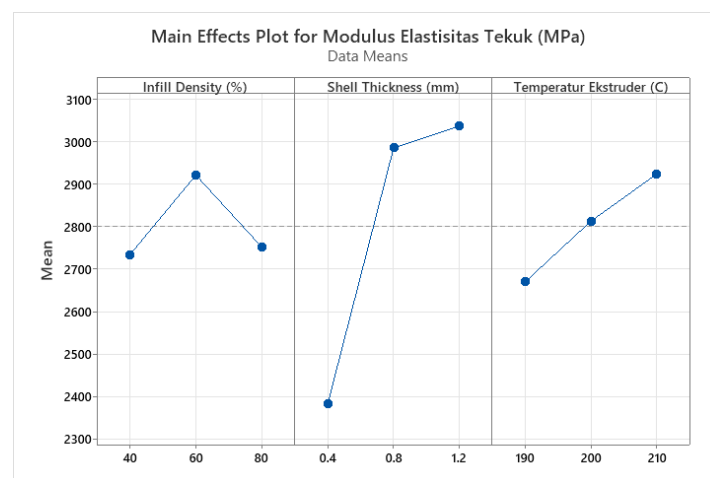
Infill Density (%)	AVG GRG	Shell Thickness (mm)	AVG GRG	Temperatur Ekstruder (°C)	AVG GRG
40	0,6298	0,4	0,2488	190	0,2888
60	0,6115	0,8	0,2688	200	0,2660
80	0,4589	1,2	0,3324	210	0,2953

**Pembahasan**

Hasil analisis menunjukkan semakin tinggi *infill density*, maka rasio kekuatan tekuk dan massa akan semakin menurun, hasil analisis data disajikan pada [Gambar 3](#). Hal ini berarti kenaikan *infill density* dari 40 % menjadi 80% akan menambah massa secara signifikan tapi tidak menambah kekuatan tekuk ([Maqsood & Rimašauskas, 2021c](#); [Tamizi et al., 2022](#)). Sebaliknya, kenaikan *shell thickness* dan temperatur ekstruder akan meningkatkan rasio kekuatan tekuk dan massa. Kenaikan *shell thickness* akan menambah momen inersia bidang dari penampang spesimen uji sehingga meningkatkan kekuatan tekuk secara signifikan tanpa menambah massa secara signifikan ([Bedan et al., 2023](#); [T. J. Suteja et al., 2023](#)). Peningkatan temperatur ekstruder akan meningkatkan ikatan antar lapisan dan juga antara serat penguat dan matriks sehingga meningkatkan kekuatan tekuk tanpa menambah massa ([Bedan et al., 2023](#); [Zhang et al., 2023](#)). Main effect plot untuk modulus elastisitas tekuk disajikan pada [Gambar 4](#).

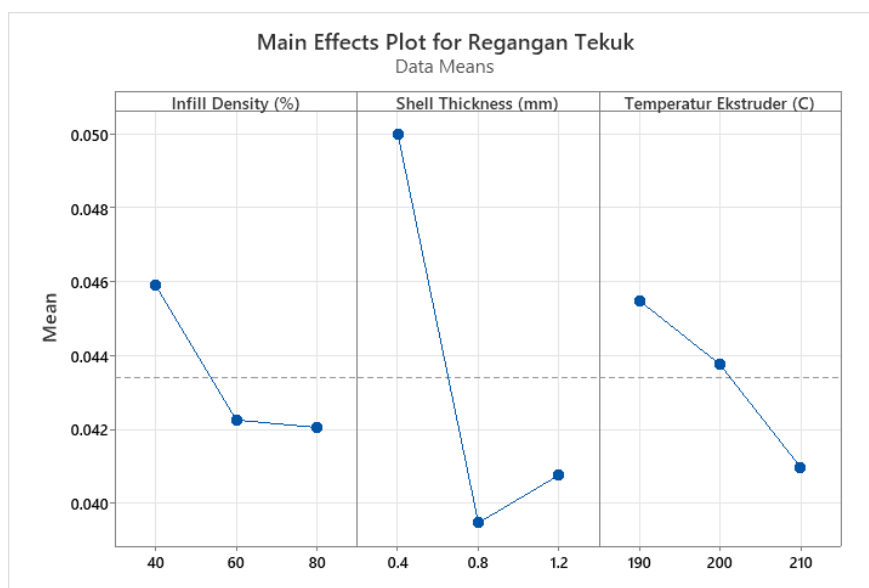


**Gambar 3.** Main Effect Plot untuk Rasio Kekuatan Tekuk dan Massa



**Gambar 4.** Main Effect Plot untuk Modulus Elastisitas Tekuk

Berdasarkan Gambar 4, modulus elastisitas tekuk akan naik pada saat *infill density* naik dari 40 % menjadi 60 % dan kemudian akan turun pada saat *infill density* naik dari 60 % menjadi 80 %. Kenaikan *infill density* akan membuat spesimen uji semakin padat dan defleksi yang terjadi semakin kecil sehingga modulus elastisitas tekuk akan semakin meningkat (Harpool et al., 2021; Kumar et al., 2022). Akan tetapi, modulus elastisitas tekuk menurun pada saat *infill density* naik dari 60 % menjadi 80 %. Kenaikan *infill density* tidak menyebabkan perubahan defleksi yang signifikan tapi kekuatan tekuk menurun secara drastis. Penurunan kekuatan tekuk disebabkan karena penggunaan *infill pattern* jenis *triangle* dengan kerapatan yang cukup tinggi dapat menyebabkan konsentrasi tegangan di bagian sudut (Marabello et al., 2024; Wang et al., 2020). Sedangkan kenaikan *shell thickness* dan temperatur ekstruder akan meningkatkan modulus elastisitas tekuk. Penambahan *shell thickness* akan memperbesar momen inersia bidang dari penampang spesimen dan menurunkan defleksi yang terjadi sehingga meningkatkan modulus elastisitas tekuk dari spesimen uji (Gebrehiwot et al., 2021; Medel et al., 2022). Kenaikan temperatur ekstruder akan meningkatkan ikatan antar lapisan, ikatan antara serat karbon dan PLA, dan menurunkan *void* atau lubang yang terjadi sehingga modulus elastisitas tekuk akan meningkat (Butt et al., 2021; Rendas et al., 2023). Main effect plot untuk regangan tekuk pada Gambar 5.



Gambar 5. Main Effect Plot untuk Regangan Tekuk

Gambar 5 menunjukkan bahwa peningkatan *infill density* dan temperatur ekstruder akan menurunkan regangan tekuk. Peningkatan *infill density* menyebabkan defleksi yang terjadi semakin kecil sehingga regangan tekuk semakin menurun (Harpool et al., 2021; Kumar et al., 2022). Peningkatan temperatur ekstruder memperkecil *void* atau lubang di dalam spesimen uji dan menurunkan defleksi yang terjadi sehingga semakin menurunkan regangan tekuk yang terjadi (Butt et al., 2021; Rendas et al., 2023). Sedangkan kenaikan *shell thickness* memperbesar momen inersia bidang dari penampang spesimen dan menurunkan defleksi yang terjadi sehingga regangan tekuk akan mengecil (Bedan et al., 2023; T. J. Suteja et al., 2023). Akan tetapi pada saat *shell thickness* dinaikkan menjadi 1,2 mm, distribusi tegangan dapat lebih merata sehingga konsentrasi tegangan berkurang. Hal ini menyebabkan defleksi yang terjadi menjadi lebih besar sebelum terjadi kerusakan.

Kombinasi nilai faktor yang menghasilkan respon optimal dapat dicari dengan menghitung nilai *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) untuk setiap percobaan. Jenis fungsi SNR yang digunakan adalah "Larger-the-Better" karena penelitian ini akan memaksimalkan rasio kekuatan tekuk dan massa, modulus elastisitas tekuk, dan regangan tekuk yang dimiliki oleh spesimen uji tekuk. Karena ada lebih dari satu respon yang akan dimaksimalkan maka penelitian ini menggunakan metode *Taguchi Grey Relational Analysis* (Taguchi GRA). Taguchi GRA digunakan untuk mencari nilai *infill density*, *shell thickness*, dan *temperatur ekstruder* yang dapat menghasilkan kombinasi rasio kekuatan tekuk dibanding massa, modulus kekakuan tekuk, dan regangan tekuk paling besar.



#### 4. SIMPULAN

Berdasarkan hasil ANOVA, rasio kekuatan tekuk dan massa dari spesimen uji dipengaruhi secara signifikan oleh *infill density* dan *shell thickness*. Hanya *shell thickness* yang mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap modulus elastisitas tekuk dan regangan tekuk. Sedangkan, parameter *infill density* adalah parameter yang paling berpengaruh terhadap kombinasi rasio kekuatan tekuk dan massa, modulus elastisitas tekuk, dan regangan tekuk, kemudian diikuti oleh *shell thickness* dan temperatur ekstruder secara berurutan. Untuk mendapatkan nilai rasio kekuatan tekuk dan massa, modulus elastisitas tekuk, dan regangan tekuk yang maksimum, nilai yang sebaiknya digunakan untuk *infill density* adalah sebesar 40%, *shell thickness* adalah sebesar 1,2 mm, dan temperatur ekstruder adalah sebesar 210 °C. Penelitian ini berkontribusi memberikan wawasan bahwa material *Polylactic Acid* yang diperkuat dengan serat karbon berpotensi digunakan untuk membuat telapak kaki palsu dengan proses 3D *printing*. Penelitian lebih lanjut dibutuhkan untuk membuat dan menguji kaki palsu dalam skala sebenarnya dengan menggunakan proses 3D *printing*.

#### 5. DAFTAR PUSTAKA

- Atakok, G., Kam, M., & Koc, H. B. (2022). Tensile, three-point bending and impact strength of 3D printed parts using PLA and recycled PLA filaments: A statistical investigation. *Journal of Materials Research and Technology*, 18, 1542–1554. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.03.013>.
- Banks, B. P., Frei, J. S., Spencer, A., Renninger, K. D., Grover, J. K., Abbott, K., Carlson, B. J., & Bruening, D. A. (2023). Low-cost prosthetic feet for underserved populations: A comparison of gait analysis and mechanical stiffness. *Prosthetics and Orthotics International*, 47(4). <https://journals.lww.com/poijournal/fulltext/2023/08000>.
- Bedan, A. S., Abbas, T. F., & Hussein, E. A. (2023). Prediction and investigation of the interactive impact of shell thickness and infill density on the mechanical properties, and the Mass of ABS Prints. *Journal of Hunan University Natural Sciences*, 50(1), 198–207. <https://doi.org/10.55463/issn.1674-2974.50.1.20>.
- Butt, J., Bhaskar, R., & Mohaghegh, V. (2021). Investigating the effects of extrusion temperatures and material extrusion rates on FFF-printed thermoplastics. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 117(9), 2679–2699. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07850-5>.
- Chiriac, O. A., & Bucur, D. (2020). From conventional prosthetic feet to bionic feet. a review. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 143(December), 130–138. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-53973-3\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-030-53973-3_14).
- Cui, Z., Huang, X., Jia, M., Panahi-Sarmad, M., Hossen, M. I., Dong, K., & Xiao, X. (2023). 3D printing of continuous fiber reinforced cellular structural composites for the study of bending performance. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 42(13–14), 673–684. <https://doi.org/10.1177/07316844221137017>.
- Dou, H., Cheng, Y., Ye, W., Zhang, D., Li, J., Miao, Z., & Rudykh, S. (2020). Effect of process parameters on tensile mechanical properties of 3D printing continuous carbon fiber-reinforced PLA composites. *Materials*, 13(17). <https://doi.org/10.3390/ma13173850>.
- Gebrehiwot, S. Z., Espinosa Leal, L., Eickhoff, J. N., & Rechenberg, L. (2021). The influence of stiffener geometry on flexural properties of 3D printed polylactic acid (PLA) beams. *Progress in Additive Manufacturing*, 6(1), 71–81. <https://doi.org/10.1007/s40964-020-00146-2>.
- Harpool, T. D., Alarifi, I. M., Alshammari, B. A., Aabid, A., Baig, M., Malik, R. A., Sayed, A. M., Asmatulu, R., & El-Bagory, T. M. A. A. (2021). Evaluation of the infill design on the tensile response of 3d printed polylactic acid polymer. *Materials*, 14(9), 1–20. <https://doi.org/10.3390/ma14092195>.
- Kathrotiya, D., Yusuf, A., Bhagchandani, R. K., & Gupta, S. (2023). A Study for the development of prosthetic foot by additive manufacturing. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 45(3), 187. <https://doi.org/10.1007/s40430-023-04107-y>.
- Khalili, A., Kami, A., & Abedini, V. (2023). Tensile and flexural properties of 3D-printed polylactic acid/continuous carbon fiber composite. *Mechanics of Advanced Composite Structures*, 10(2), 407–418. <https://doi.org/10.22075/mac.2023.29500.1466>.
- Kristiawan, R. B., Imaduddin, F., Ariawan, D., Ubaidillah, & Arifin, Z. (2021). A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: Filament processing, materials, and printing parameters. *Open Engineering*, 11(1), 639–649. <https://doi.org/10.1515/eng-2021-0063>.
- Kumar, S., Teraiya, S., & Koriya, V. K. (2022). FDM Fabricated PLA Parts: an experimental study of effect of process parameters on mechanical properties under compressive and flexural loading. *International Journal of Modern Manufacturing Technologies*, 14(2), 111–120. <https://doi.org/10.54684/ijmmt.2022.14.2.111>.

- Li, B., Xu, G., Teng, Z., Luo, D., Pei, J., Chen, R., & Zhang, S. (2024). Intelligent ankle-foot prosthesis based on human structure and motion bionics. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 21(1), 1–12. <https://doi.org/10.1186/s12984-024-01414-w>.
- Maqsood, N., & Rimašauskas, M. (2021a). Characterization of carbon fiber reinforced PLA composites manufactured by fused deposition modeling. *Composites Part C: Open Access*, 4(January). <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2021.100112>.
- Maqsood, N., & Rimašauskas, M. (2021b). Delamination observation occurred during the flexural bending in additively manufactured PLA-short carbon fiber filament reinforced with continuous carbon fiber composite. *Results in Engineering*, 11. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2021.100246>.
- Maqsood, N., & Rimašauskas, M. (2021c). Tensile and flexural response of 3D printed solid and porous CCFRPC structures and fracture interface study using image processing technique. *Journal of Materials Research and Technology*, 14, 731–742. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.06.095>.
- Marabello, G., Chairi, M., & Di Bella, G. (2024). Optimising additive manufacturing to produce PLA sandwich structures by varying cell type and infill: Effect on flexural properties. *Journal of Composites Science*, 8(9). <https://doi.org/10.3390/jcs8090360>.
- Medel, F., Abad, J., & Esteban, V. (2022). Stiffness and damping behavior of 3D printed specimens. *Polymer Testing*, 109(March), 107529. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2022.107529>.
- Naranjo-Lozada, J., Ahuett-Garza, H., Orta-Castañón, P., Verbeeten, W. M. H., & Sáiz-González, D. (2019). Tensile properties and failure behavior of chopped and continuous carbon fiber composites produced by additive manufacturing. *Additive Manufacturing*, 26(August 2018), 227–241. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.12.020>.
- Öteyaka, M. Ö., Aybar, K., & Öteyaka, H. C. (2021). Effect of infill ratio on the tensile and flexural properties of unreinforced and carbon fiber-reinforced polylactic acid Manufactured by Fused Deposition Modeling. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30(7), 5203–5215. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-05694-4>.
- Patel, K., Acharya, S., & Acharya, G. D. (2024). Taguchi grey relational analysis for multi-objective FDM parameter optimization of PLA components. *Jurnal Kejuruteraan*, 36(3), 1155–1165. [https://doi.org/10.17576/jkukm-2024-36\(3\)-26](https://doi.org/10.17576/jkukm-2024-36(3)-26).
- Pirouzfard, S., & Zeinedini, A. (2021). Effect of geometrical parameters on the flexural properties of sandwich structures with 3D-printed honeycomb core and E-glass/epoxy Face-sheets. *Structures*, 33(April), 2724–2738. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.06.033>.
- Rendas, P., Figueiredo, L., Geraldo, M., Vidal, C., & Soares, B. A. (2023). Improvement of tensile and flexural properties of 3D printed PEEK through the increase of interfacial adhesion. *Journal of Manufacturing Processes*, 93(March), 260–274. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.03.024>.
- Son Minh, P., Nguyen, V.-T., Uyen, T. M. T., Do, T. T., Duong Thi Van, A., & Nguyen Le Dang, H. (2024). The effects of 3D printing designs on PLA polymer flexural and fatigue strength. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 34(6), 65004. <https://doi.org/10.1088/1361-6439/ad4b2a>.
- Subhash, N. N., Mehra, N., Choudhary, A., Baby, C. J., Aravind, A. U., Benny, P., & Muraleedharan, C. V. (2022). Structural performance assessment of fupro grace foot. *Trends in Biomaterials and Artificial Organs*, 36(2), 94–101.
- Suteja, J., Firmanto, H., Soesanti, A., & Christian, C. (2022). Properties investigation of 3D printed continuous pineapple leaf fiber-reinforced PLA composite. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 35(11), 2052–2061. <https://doi.org/10.1177/0892705720945371>.
- Suteja, T. J., Handoko, R., & Soesanti, A. (2023). Optimization of infill density, layer height, and shell thickness to achieve maximum bending strength and minimum printing time of PLA 3D printed part. *Polimesin*, 21(5), 1–5. <https://e-jurnal.pnl.ac.id/polimesin/article/view/3626/3230>.
- Suteja, T. J., & Soesanti, A. (2020). Mechanical properties of 3D printed polylactic acid product for various infill design parameters: A review. *Journal of Physics: Conference Series*, 1569(4). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1569/4/042010>.
- Tacca, J. R., Colvin, Z. A., & Grabowski, A. M. (2023). Characterizing the mechanical properties of low-profile prosthetic feet. In *bioRxiv (preprint)*. <https://doi.org/10.1101/2023.04.14.536964>.
- Tamizi, N. S. M., Zainon, N., Deros, M. A. M., & Basri, A. A. (2022). Investigation on the effect of printing parameters on flexural properties of 3D printed polymeric scaffolds. *Journal of Physics: Conference Series*, 2169(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2169/1/012027>.
- Tunçel, O., Tüfekci, K., & Kahya, Ç. (2024). Multi-objective optimization of 3D printing process parameters using gray-based Taguchi for composite PLA parts. *Polymer Composites*, April, 1–15. <https://doi.org/10.1002/pc.28674>.
- Tyagi, B., Dixit, K., Sahai, A., & Sharma, R. S. (2024). Characterization of flexural and compressive behavior

- in polylactic acid composites for low-cost transtibial prosthetic applications: Influence of reinforcements. *Journal of Applied Polymer Science*, 141(18), e55319.
- Valvez, S., Santos, P., Parente, J. M., Silva, M. P., & Reis, P. N. B. (2020). 3D printed continuous carbon fiber reinforced PLA composites: A short review. *Procedia Structural Integrity*, 25(2019), 394–399. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.04.056>.
- Vijayan, V., Kumar, S. A., Gautham, S., Masthan, M. M., & Piraichudan, N. (2020). Design and analysis of prosthetic foot using additive manufacturing technique. *Materials Today: Proceedings*, 37(Part 2), 1665–1671. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.195>.
- Vinoth Babu, N., Venkateshwaran, N., Rajini, N., Ismail, S. O., Mohammad, F., Al-Lohedan, H. A., & Suchart, S. (2022). Influence of slicing parameters on surface quality and mechanical properties of 3D-printed CF/PLA composites fabricated by FDM technique. *Materials Technology*, 37(9), 1008–1025. <https://doi.org/10.1080/10667857.2021.1915056>.
- Wang, K., Xie, X., Wang, J., Zhao, A., Peng, Y., & Rao, Y. (2020). Effects of infill characteristics and strain rate on the deformation and failure properties of additively manufactured polyamide-based composite structures. *Results in Physics*, 18(April), 103346. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2020.103346>.
- Yadav, P., Sahai, A., & Sharma, R. S. (2021). Flexural strength and surface profiling of carbon-based PLA parts by additive manufacturing. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, 102(4), 921–931. <https://doi.org/10.1007/s40032-021-00719-2>.
- Yousif, L. E., Abed, M. S., Al-Zubidi, A. B., & Resan, K. K. (2024). Innovations in prosthetic foot design enhancing durability, functionality and comfort through PLA composite filament 3D printing. *Pigment & Resin Technology, ahead-of-p*(ahead-of-print). <https://doi.org/10.1108/PRT-10-2023-0092>.
- Zhang, H., Wu, J., Jia, M., Chen, Y., & Wang, H. (2023). Enhancement on the mechanical properties of 3D printing PEI composites via high thermal processing and fiber reinforcing. *Polymers for Advanced Technologies*, 34(10), 3115–3124. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/pat.6128>.