

# Pengaruh Kecepatan Nozel terhadap Kekasaran Permukaan Produk 3D Printing Berbentuk Kurva

Amira Alissiya <sup>1)</sup>, Sally Cahyati <sup>2)\*</sup>,

<sup>1)</sup>Jurusan Teknik Mesin Universitas Trisakti, Fakultas Teknologi Industri

Naskah diterima 2022-01-03; direvisi 15 05 2023; disetujui 15 05 2023  
doi: <https://doi.org/10.24843/JEM.2022.v15.i01.p01>

## Abstrak

*Additive Manufacturing (AM)* adalah proses menambahkan material untuk membentuk suatu objek. Proses pembentukan tersebut dikenal sebagai *3D printing*, yang memungkinkan untuk menciptakan suatu model atau prototipe yang lebih kompleks menjadi lebih mudah. Penelitian ini membahas mengenai pengaruh parameter kecepatan gerak nozel terhadap ketelitian dimensi dan kekasaran permukaan produk hasil cetak mesin *3D printer* berbentuk kurva. Model didesain dalam bentuk kurva agar efek tangga (*staircase effect*) dapat terlihat dengan jelas, sehingga dapat dibandingkan perubahannya pada setiap kecepatan nozel yang berbeda. Benda yang sudah didesain pada perangkat lunak *Catia* kemudian diatur beberapa parameternya untuk pencetakan dengan perangkat lunak pengiris yaitu *Ultimaker Cura (versi 4.8.0)*. Perbedaan parameter kecepatan dan penambahan *support* (pendukung) diatur pada perangkat lunak ini. Kemudian hasil kostumisasi tersebut akan disimpan dalam format *GCode File*. Parameter kecepatan yang diuji dalam penelitian ini 30mm/detik, 40 mm/detik, 50 mm/detik, 60 mm/detik, dan 70 mm/detik. Masing-masing *GCode File* dengan kecepatan yang berbeda akan dicetak sebanyak 5 kali. Setiap cetakan akan mempunyai hasil yang berbeda. Oleh karena itu, dilakukan pengukuran ketelitian dimensi dan kekasaran permukaan produk *3D printing* agar didapatkan parameter kecepatan terbaik sebagai acuan referensi pencetakan prototipe suatu benda berbentuk kurva pada mesin *3D Printer* FDM.

Kata kunci: 3D Printing, kecepatan nozel, kurva, ketelitian dimensi, kekasaran permukaan

## Abstract

Additive manufacturing (AM) is a process to add materials to build an object. The formation process known as 3D Printing, which enables to create a complex model or prototype becomes easier. This study is discuss about the nozzle movement speed affecting dimensional accuracy and surface roughness of a curved 3D printed products. The model designed in a curve form to make the staircase effect seen clearly, so the product can compared with one another in a difference of a nozzle movement speed. The printed products then sliced by using Ultimaker Cura (V4.8.0) after designed by Catia software. The slicer had used for set up the print parameter and add the support. Then the customization result had saved in GCode File. Nozzle movement speed that used in this study is 30 mm/s, 40 mm/s, 50 mm/s, 60 mm/s, and 70 mm/s. Each different GCode file with different nozzle movement speed had printed 5 times that will produce different result. Therefore, measurements of the dimensional accuracy and surface roughness of curved 3D printed product were carrying out in order to obtain the best speed parameter as a reference for printing a prototype of a curved object in FDM 3D printer machine.

Keywords: 3D Printing, Nozzle Speed, Curve, Dimensional accuracy, Surface roughness.

## 1. Pendahuluan

Setelah Jerman mencetuskan revolusi industri 4.0 pada tahun 2013, hampir seluruh negara saat ini berupaya meningkatkan kinerja industrinya dengan mengikuti konsep dan strategi yang dicetuskan pada revolusi industri 4.0 ini [1]. Sebagaimana diketahui bahwa revolusi industri 4.0 ini didukung oleh 9 (Sembilan) pilar teknologi yaitum *additive manufacturing, cloud, cybersecurity, industrial internet of things, horizontal & vertical integration, simulation & augmented reality, autonompous robot, big data analytics, suplychain* [2]. Salah satu teknologi dalam Sembilan pilar tersebut adalah *additive manufacturing* atau *layer manufacturing* atau *rapid prototyping*, saat ini tidak hanya diindustri manufaktur saja

penggunaannya, namun diberbagai bidang, seperti medis, konstruksi, bangunan, industri makanan, dan lain sebagainya [3]. Proses dalam additive manufacturing atau rapid prototyping adalah dengan membangun suatu produk 3D yang diiris dan dicetak setiap layer (lapisan) 2 dimensinya, kemudian ditumpuk menjadi bentuk 3D. Pengimplementasian teknologi *layer manufacturing* adalah mesin *3D printer* [4]. Penggunaan mesin *3D printer* dapan menjadi solusi agar kehidupan menjadi lebih mudah dan mampu untuk membuat prototipe dengan biaya lebih hemat [5]. Secara komersial, berbagai filamen termoplastik untuk 3D printer berbasis *Fused Deposition Modelling* mudah didapatkan [6].

Pada awalnya penggunaan mesin *3D printer* hanya dilakukan untuk menjalankan hobi saja, namun saat ini penggunaan mesin *3D printer* semakin beragam, seperti pada bidang otomotif, arsitektur, bahkan kesehatan. Akan tetapi masih terdapat banyak kekurangan saat menggunakan teknologi ini, terutama pada kecepatan mencetak dan akurasi dimensi [7]. Performa proses 3D printing, dipengaruhi oleh material dan parameter proses pencetakannya. Oleh karena itu, pengaruh parameter proses 3D printing perlu diteliti untuk mengoptimalkan proses pengerjaan [8].

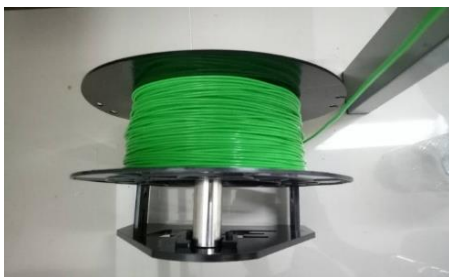
Orientasi yang sesuai dari suatu part menjadi sangat krusial dalam *additive manufaktur* untuk meningkatkan akurasi dimensi suatu produk, waktu pengerjaan dan biaya produksi secara keseluruhan [9]. Nadir Ayrilmis (2018) telah membuktikan bahwa arah pencetakan produk secara signifikan dapat memengaruhi kekasaran permukaan pada Spesimen. *Staircase effect* yang dihasilkan dari pencetakan suatu produk menyebabkan perbedaan geometris antara model CAD dengan bagian FDM yang diproduksi [10]. Kekasaran permukaan merupakan salah satu kriteria yang paling umum terhadap suatu pola, produk, atau aplikasi pada bidang *engineering* [11].

Untuk mendapatkan hasil cetak FDM yang ideal dan memenuhi semua persyaratan cukup sulit, terutama mendapatkan suatu produk dengan kualitas permukaan yang tinggi [12]. Pemilihan kecepatan gerak nozzle dapat disesuaikan dengan kebutuhan pencetak. Penelitian ini akan membahas pengaruh kostumisasi parameter kecepatan gerak nozzle terhadap kekasaran suatu produk *3D printing* berbentuk kurva.

## 2. Metode Penelitian

### 2.1. Alat dan Bahan

Terdapat beberapa alat yang digunakan dalam penelitian ini, yaitu: laptop dan mesin *3D Printing Fused Deposition Modelling (FDM) MakerGear M2* sebagai perangkat keras. Penggunaan mesin 3D printing berbasis FDM merupakan teknologi aditif manufaktur yang paling populer karena memiliki beberapa keuntungan seperti, mudah digunakan, filamen yang digunakan mudah diganti dan tidak berbahaya [13]. Perangkat lunak desain Catia dan perangkat lunak pengiris yaitu *CuraSlicer* versi 4.8.0. Fungsi utama dari perangkat lunak pengiris adalah memroses model fisik menjadi urutan gerakan pemesinan (G-Code) [14].



Gambar 1. Filamen PLA

Alat ukur yang digunakan dalam penelitian ini adalah *surface roughness tester*. Sedangkan bahan

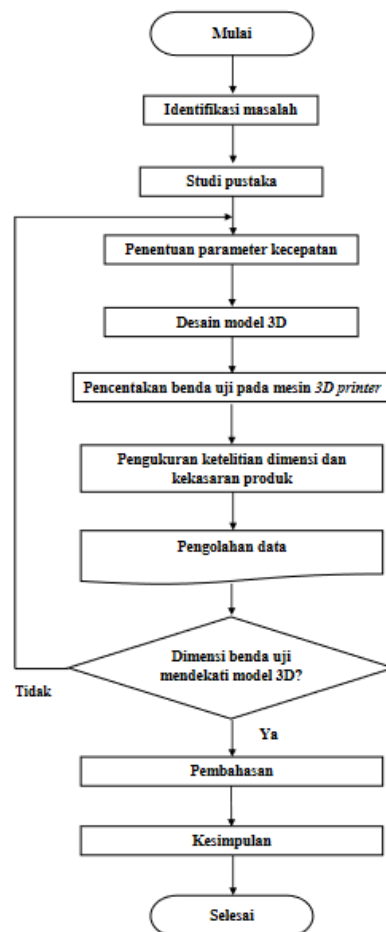
yang digunakan adalah filamen *Polylactic Acid (PLA)* dengan diameter 1,75 mm seperti pada Gambar 1. Filamen PLA merupakan sebuah termoplastik yang dapat terbiodegradasi yang berasal dari pati jagung dan tebu. Telah banyak peneliti yang melakukan pengujian terhadap Filamen PLA dari hasil uji coba tersebut, diperoleh nilai dari beberapa sifat mekanik seperti yang ditampilkan pada tabel 1 [15].

Tabel 1. Spesifikasi Material Benda Uji PLA

No.	Sifat Material	Spesifikasi
1	Kekuatan tarik	37 Mpa
2	Kemampuan Memanjang	6%
3	Modulus Lentur	4 GPa
4	Massa Jenis	1,3 g/cm <sup>3</sup>
5	Titik Lebur	173°C

### 2.2 Diagram Alir

Tahapan yang digunakan dalam penelitian ini dijelaskan dalam diagram alir yang terdapat pada Gambar 2.

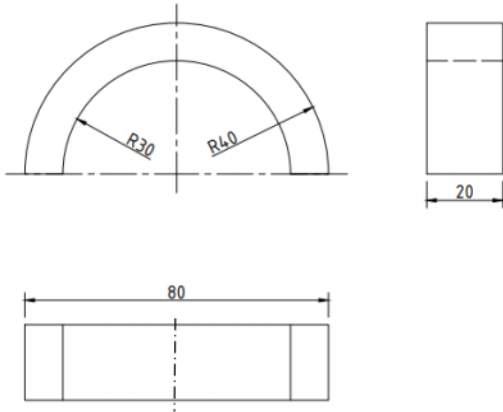


Gambar 2. Diagram Alir Penelitian.

### 2.3 Desain Spesimen Uji

Specimen uji yang digunakan berbentuk kurva setengah lingkaran agar perbedaan *staircase effect*

yang terjadi pada masing-masing kecepatan. Specimen kurva yang akan dicetak tidak terlalu besar, dengan ukuran radius dalam 30 mm dan radius luar sebesar 40 mm. Kemudian diberi ketebalan sebesar 20 mm. Desain dilakukan pada *software* Catia (V5R21) yang kemudian diterjemahkan pada format STL agar dibaca oleh *software* Cura Slicer. Gambar 2 merupakan desain 2D specimen uji berbentuk kurva.



Gambar 3. Desain Benda Uji 2 Dimensi

#### 2.4 Kekasaran Permukaan

Kekasaran permukaan dapat disebabkan dengan kesalahan dimensi filamen yang keluar melalui nozel, kesalahan dimensi tersebut dapat terjadi saat permulaan filamen keluar, percepatan, perlambatan, atau saat berhenti [16]. Kondisi kekasaran permukaan suatu benda yang diukur memengaruhi hasil pengukuran, terutama untuk skala mikro [17].

Pengukuran kekasaran permukaan menggunakan *surface roughness tester* SJ-301 merk mitutoyo. Terdapat dua sisi yang diuji, yaitu sisi pertama pada puncak dari specimen kurva dan sisi yang kedua pada bagian samping dari specimen kurva. Untuk memudahkan proses pengujian digunakan *parallel block* agar posisi benda uji sejajar dengan jarum pada surf test dan plastisin agar letak benda uji dan *parallel block* tidak mudah bergeser. Gambar 4 menunjukkan mekanisme pengujian kekasaran permukaan pada penelitian ini.



Gambar 4. Pengukuran Kekasaran Permukaan

#### 2.5 Pengaturan parameter *Software Slicer*

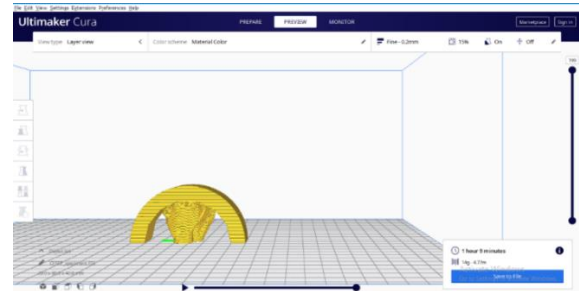
*Software interface slicer* digunakan untuk mengatur beberapa parameter pada saat proses pencetakan. Adapun parameter yang diatur dari perangkat lunak slicer adalah *infill pattern* (*honey, hexagonal, triangular*), ketinggian lapisan, diameter nozel, dan orientasi filamen [18]. Slicer yang digunakan dalam penelitian ini adalah Ultimaker Cura (v4.8.0). Perbedaan kecepatan gerak nozel pada penelitian ini

juga diatur dalam *Cura Slicer* ini. Pada Tabel 1 menampilkan parameter konstan yang dipilih untuk mencetak benda uji.

Tabel 1. Pengaturan Parameter *Slicer*

Jenis Parameter	Besaran
<i>Layer Height</i>	0.2 mm
<i>Infill Density</i>	15%
<i>Infill Pattern</i>	<i>Grid</i>
<i>Printing Temperature</i>	200 °C
<i>Bed Temperature</i>	50 °C
<i>Support Temperature</i>	<i>Tree</i>
<i>Support Placement</i>	<i>Everywhere</i>
<i>Support Overhang Angle</i>	50 °C

Melalui *software slicer* ini juga diatur penggunaan *support* yang dibutuhkan oleh specimen uji. Untuk specimen yang berbentuk kurva dibutuhkan *support tree/pohon*. Gambar 5 menunjukkan tampilan *software cura slicer* yang telah mengiris specimen uji.



Gambar 5. Tampilan Hasil Irisan Pada *Cura Slicer*.

#### 2.6 Pengolahan Data Menggunakan Statistik

Setelah benda uji diukur ketelitian dimensi dan kekasaran permukaannya, maka terdapat beberapa hal yang perlu dihitung dalam mengolah data statistik. Adapun beberapa hal yang harus dihitung adalah:

##### 1. Rata-rata

Rata-rata adalah jumlah seluruh data dibagi dengan banyaknya data.

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n} \quad (1)$$

##### 2. Varians

Varians adalah ragam atau ukuran seberapa jauh data yang dimiliki tersebar dari nilai rata-rata.

$$S^2 = \frac{(X_1 - \bar{X})^2 + (X_2 - \bar{X})^2 + \dots + (X_n - \bar{X})^2}{n-1} \quad (2)$$

##### 3. Standar Deviasi

Standar deviasi atau simpangan baku digunakan untuk mengetahui berapa banyak nilai atau jumlah data yang berbeda dari rata-rata.

$$A = S(\bar{X}) = \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (3)$$

#### 4. Ketidakpastian

Ketidakpastian memiliki dasar probabilitas yang mencerminkan pengetahuan yang tidak lengkap mengenai nilai kuantitas.

$$A = S(\bar{X}) = \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (4)$$

### 3. Hasil dan Pembahasan

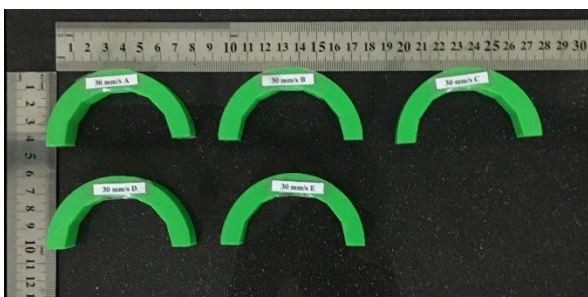
#### 3.1. Hasil Cetak Benda Uji

Pada perangkat lunak cura slicer, specimen uji membutuhkan *support* yang berbentuk tree/pohon. *Support* dibutuhkan agar mencegah filamen jatuh, specimen bergeser, dan ketidakseimbangan specimen [19]. Gambar 6 menunjukkan hasil cetak benda uji yang menggunakan *support*.



Gambar 6. Specimen Uji dengan *Support*.

Pendukung internal berbasis kerangka berbentuk pohon bercabang dapat menopang area yang membutuhkan kekuatan struktur yang cukup kuat [20]. *Support* pada benda uji kemudian dilepas menggunakan *cutter*. Total benda uji yang digunakan sebanyak 25 specimen. Pada setiap kecepatan dilakukan 5 kali pengulangan cetak. Gambar 7 menunjukkan 5 specimen uji pada kecepatan 30 mm/s dengan *support* yang sudah dilepas.



Gambar 7. Specimen Uji Tanpa *Support*.

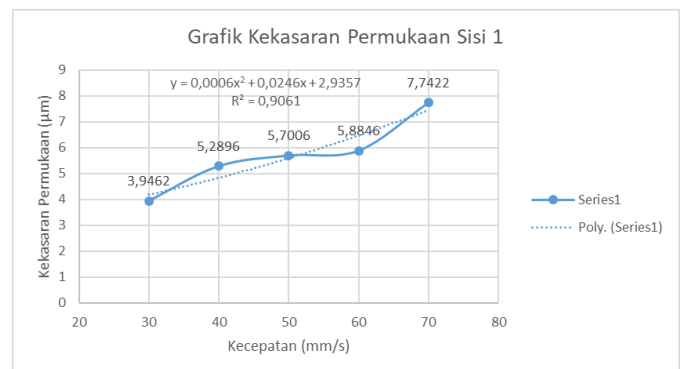
#### 3.2 Analisa Kekasaran Permukaan

Nilai yang terlihat pada Tabel 2 menampilkan angka kekasaran permukaan ( $R_a$ ) pada sisi 1 specimen cetak. Terlihat pada tabel nilai  $R_a$  masing specimen cukup variatif, akan tetapi jika dilihat pada kolom rata-rata semakin tinggi angka kecepatan semakin besar juga nilai  $R_a$  yang dihasilkan.

Tabel 2. Pengolahan Data Kekasaran Permukaan 1

Sisi 1				
Kecepatan (mm/detik)	Rata-rata ( $\mu\text{m}$ )	Varians ( $\mu\text{m}^2$ )	Standar Deviasi ( $\mu\text{m}$ )	Ketidakpastian
30	3,946	0,702	0,838	0,375
40	5,290	0,988	0,994	0,444
50	5,701	0,893	0,945	0,423
60	5,885	1,295	1,138	0,509
70	7,742	0,480	0,692	0,301

Hasil pengolahan data pada Tabel 4 digambarkan pada grafik kekasaran permukaan sisi 1 yang terletak pada Gambar 9. Pada grafik tersebut terdapat garis putus-putus yang menunjukkan *trendline* sebagai pendekatan yang digunakan untuk memprediksi nilai kekasaran permukaan pada kecepatan lainnya.



Gambar 8. Grafik Kekasaran Permukaan Sisi 1

Pada Gambar 8 terdapat garis putus-putus yang menunjukkan *trendline* sebagai pendekatan yang digunakan untuk memprediksi nilai kekasaran permukaan pada kecepatan lainnya. Garis tersebut didapatkan dari regresi polinomial yang merupakan suatu pendekatan antara variabel terikat  $x$  yaitu kecepatan (mm/detik) dan variabel bebas  $y$  yaitu kekasaran permukaan ( $\mu\text{m}$ ).

Nilai  $R^2 = 0,9061$  merupakan angka hasil perhitungan korelasi polinomial. Nilai  $y = 0,0006x^2 + 0,0246x + 2,9357$  adalah persamaan polinomial yang digunakan untuk perhitungan regresi. Hal tersebut menunjukkan variasi total dalam kekasaran permukaan sisi 1 yang dapat dijelaskan dalam variable kecepatan sebesar 90,61 %.

Seperti yang digambarkan pada grafik pada Gambar 9 rata-rata kekasaran permukaan meningkat

dari 3,9462  $\mu\text{m}$  pada 30 mm/detik hingga 7,7422  $\mu\text{m}$  pada 70 mm/detik. Hal tersebut membuktikan bahwa kecepatan gerak nozel **berpengaruh** terhadap kekasaran permukaan produk 3D Printing berbentuk kurva.

Tabel 3. Data Kekasaran Permukaan Sisi 2

Sisi 2				
Kecepatan (mm/detik)	Rata-rata ( $\mu\text{m}$ )	Varians ( $\mu\text{m}^2$ )	Standar Deviasi ( $\mu\text{m}$ )	Ketidaktastian ( $\mu\text{m}$ )
30	16,985	0,272	0,521	0,233
40	17,142	0,150	0,387	0,173
50	17,428	0,310	0,556	0,249
60	18,057	1,260	1,122	0,502
70	18,454	0,330	0,574	0,257

Seperti pembahasan sebelumnya, data pada tabel 3 menunjukkan bahwa tidak seluruh permukaan spesimen dengan kecepatan lebih rendah memiliki angka kekasaran yang lebih rendah, akan tetapi jika dilihat secara keseluruhan dengan nilai rata-rata, angka kekasaran permukaan meningkat secara konstan seiring dengan peningkatan kecepatan seperti yang digambarkan grafik pada Gambar 9.



Gambar 9. Grafik Kekasaran Permukaan Sisi 2

Pada grafik Gambar 9 terdapat hasil perhitungan rata-rata angka kekasaran permukaan Spesimen uji sisi 2. Garis putus-putus menampilkan *trendline* yang didapatkan dari regresi polynomial. Nilai  $R^2 = 0,9858$  merupakan angka hasil perhitungan korelasi polynomial. Persamaan nilai regresi polynomial yaitu  $y = 0,0006x^2 - 0,0202x + 17,039$ . Hal tersebut menunjukkan variasi total dalam kekasaran permukaan sisi 2 yang dapat dijelaskan dalam variable kecepatan sebesar 98,58 %.

Kekasaran permukaan pada specimen berbentuk kurva disebabkan oleh kesalahan dimensi lelehan filamen yang keluar melalui nozel. Kesalahan dimensi filamen tersebut akan membentuk efek tangga. Semakin tinggi kecepatan gerak nozel maka kemungkinan terjadinya kesalahan dimensi dan efek tangga pada saat ekstrusi filamen juga semakin tinggi.

Berdasarkan penelitian ini, kecepatan gerak nozel **berpengaruh** terhadap kekasaran permukaan produk 3D printing berbentuk kurva, hal ini sesuai dengan pendapat Bellini [16].

#### 4. Simpulan

- Semakin tinggi kecepatan gerak nozel, semakin besar kemungkinan error pada ekstrusi filamen yang menyebabkan terjadinya *staircase effect*.
- *Staircase effect* akan memengaruhi kekasaran permukaan produk 3D printing berbentuk kurva.
- Diharapkan hasil penelitian ini dapat dijadikan acuan untuk menentukan parameter kecepatan produk 3D Printing berbentuk kurva atau mejadi referensi untuk penelitian selanjutnya.

#### Daftar Pustaka

- [1] S. Cahyati, "Integrated CAD Customization System for Fused Deposition Models in Additive Manufacture with 3D Printing Machine Integrated CAD customization System for Fused Deposition Models in Additive Manufacture with 3D Printing Machine," 2019, doi: 10.1088/1757-899X/694/1/012008.
- [2] S. Cahyati, "A Prototyping of Additive Manufacturing Cell in Cyber Physical System for Maintenance 4.0 Preparation," vol. 29, no. 05, pp. 575–584, 2020.
- [3] S. Cahyati, B. Satriawan, J. Teknik, M. Fakultas, T. Industri, and U. Trisakti, "Ketelitian Dimensi Produk Hasil Proses Modifikasi Mesin Fdm Dual Extruder," *Semin. Nas. Pakar ke 2*, pp. 1–7, 2019.
- [4] S. Cahyati and D. P. Muliando, "Redesain Meja Cetakan Mesin 3D Printer Berbasis Fused Deposition Modelling," *J. Energi Dan Manufaktur*, vol. 12, no. 2, p. 99, 2019, doi: 10.24843/jem.2019.v12.i02.p09.
- [5] J. Anggono, W. Budiman, and K. V. Philbert, "Accuracy In Fused Deposition Modelling: A Comparative Study on Parts Making Using," no. February, pp. 69–76, 2020.
- [6] M. S. Alsoufi and A. E. Elsayed, "Surface Roughness Quality and Dimensional Accuracy — A Comprehensive Analysis of 100 % Infill Printed Parts Fabricated by a Personal / Desktop Cost-Effective FDM 3D Printer," pp. 11–40, 2018, doi: 10.4236/msa.2018.91002.
- [7] S. Khabia and K. K. Jain, "Influence of Change in Layer Thickness on Mechanical Properties of Components 3D Printed on Zortrax M 200 FDM printer with Z-ABS Filament Material & Accucraft i250+ FDM Printer with Low Cost ABS Filament Material," *Mater. Today Proc.*, vol. 26, no. xxxx, pp. 1315–1322, 2019, doi: 10.1016/j.matpr.2020.02.268.
- [8] E. Of, I. Pattern, I. Density, A. On, and T. H. E. Printing, "Angle on the Printing Time and Filament of Length of 3D," no. February, pp.

- 145–152, 2021.
- [9] O. Abdulhameed, A. Al-Ahmari, W. Ameen, and S. H. Mian, "Additive Manufacturing: Challenges, Trends, and Applications," *Adv. Mech. Eng.*, vol. 11, no. 2, pp. 1–27, 2019, doi: 10.1177/1687814018822880.
- [10] N. Ayrilmis, "Effect of Layer Thickness on Surface Properties of 3D Printed Materials Produced From Wood Flour/PLA Filament," *Polym. Test.*, vol. 71, no. September, pp. 163–166, 2018, doi: 10.1016/j.polymertesting.2018.09.009.
- [11] M. Badola, "Parameters Affecting Surface Roughness of Fused Deposition Modelling" no. January 2016, 2019, doi: 10.26634/jme.6.1.3739.
- [12] P. Mercedes, G. Medina-s, and D. Carou, "Surface Quality Enhancement of Fused Deposition Modeling ( FDM ) Printed Samples Based on the Selection of Critical Printing Parameters," doi: 10.3390/ma11081382.
- [13] O. Luzanin, D. Movrin, and M. Plancak, "Experimental Investigation of Extrusion Speed and Temperature Effects on Arithmetic Mean Surface Roughness in FDM" no. April, 2013.
- [14] F. Wasserfall, N. Hendrich, D. Ahlers, and J. Zhang, "Topology-Aware Routing of 3D-Printed Circuits," *Addit. Manuf.*, p. 101523, 2020, doi: 10.1016/j.addma.2020.101523.
- [15] R. Roy and A. Mukhopadhyay, "Tribological Studies of 3D Printed ABS and PLA Plastic Parts," *Mater. Today Proc.*, no. xxxx, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2020.09.235.
- [16] B. N. Turner and S. A. Gold, "A Review of Melt Extrusion Additive Manufacturing Processes : II . Materials , Dimensional Accuracy , and Surface Roughness," vol. 3, no. February 2013, pp. 250–261, 2015, doi: 10.1108/RPJ-02-2013-0017.
- [17] W. P. Syam, "Metrologi Manufaktur Pengukuran Geometri dan Analisis Ketidakpastian."
- [18] X. Meng, L. Shi, L. Yao, Y. Zhang, and L. Cui, "ur na I P re of," *Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.*, no. lii, p. 124658, 2020, doi: 10.1016/j.compositesb.2020.108474.
- [19] N. Zhang, L. Zhang, Y. Chen, and Y. Shi, "Computer-Aided Design Local Barycenter Based Efficient Tree-Support Generation for 3D," *Comput. Des.*, vol. 115, pp. 277–292, 2019, doi: 10.1016/j.cad.2019.06.004.
- [20] L. Zhu, R. Feng, X. Li, J. Xi, and X. Wei, "Design of Lightweight Tree-Shaped Internal Support Structures for 3D Printed Shell Models," no. September, 2019, doi: 10.1108/RPJ-04-2019-0108.