

Peningkatan Keakurasian Produk Cetak 3D Printing Menggunakan *Filamen PLA+*

Andi Meri¹, Muhammad Yunus¹, Pristiansyah^{1*}

¹Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung, Sungailiat

*E-mail : pristian_pay@yahoo.com

Received: 3 Desember 2025; Received in revised form: 19 Desember 2025;

Accepted: 22 Desember 2025

Abstract

This study aims to improve the dimensional accuracy of printed products in the 3D Printing process using the Fused Deposition Modeling (FDM) method with PLA+ filament material. The research employed the Taguchi L₉ (3²) experimental design to evaluate the influence of printing speed and layer height on the dimensional precision of the printed objects. Cube-shaped specimens measuring 20×20 mm were fabricated using an Ender 3 Pro printer and measured with a digital caliper of 0.02 mm accuracy. The results showed that the combination of a 0.10 mm layer height and 85 mm/s print speed produced the highest accuracy, with a minimal dimensional deviation of approximately ±0.05 mm from the nominal size. The Signal-to-Noise (S/N) Ratio analysis indicated that both parameters contributed equally to print quality. Therefore, optimizing printing parameters and utilizing PLA+ material effectively enhances dimensional precision, process stability, and geometric quality of 3D printed products. These findings can serve as a practical guideline for optimizing additive manufacturing processes based on the FDM technique.

Keywords: 3D Printing; FDM; PLA+; Printing Speed; Layer Height.

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan tingkat akurasi hasil cetak pada proses 3D Printing berbasis metode Fused Deposition Modeling (FDM) dengan memanfaatkan material filamen PLA+. Metode yang digunakan adalah eksperimen Taguchi L₉ (3²) untuk mengevaluasi pengaruh kecepatan cetak (print speed) dan tinggi lapisan (layer height) terhadap ketepatan dimensi hasil cetakan. Spesimen uji berbentuk kubus berukuran 20×20 mm dicetak menggunakan printer Ender 3 Pro, kemudian diukur dengan jangka sorong digital berketelitian 0,02 mm. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kombinasi layer height 0,10 mm dan print speed 85 mm/s menghasilkan akurasi tertinggi dengan penyimpangan ukuran sangat kecil, yaitu ±0,05 mm dari dimensi nominal. Analisis Signal-to-Noise (S/N) Ratio menunjukkan bahwa kedua parameter memiliki pengaruh seimbang terhadap kualitas hasil cetak. Dengan demikian, penggunaan material PLA+ dan pengaturan parameter yang optimal terbukti efektif dalam meningkatkan presisi dimensi, stabilitas proses, serta kualitas geometris produk cetak 3D. Hasil penelitian ini dapat dijadikan panduan dalam optimasi proses manufaktur aditif berbasis FDM.

Kata Kunci: 3D Printing; FDM; PLA+; Kecepatan Cetak; Tinggi Lapisan.

1. PENDAHULUAN

Teknologi Additive Manufacturing (AM), yang lebih dikenal sebagai 3D Printing [1], kini menempati posisi penting dalam evolusi industri manufaktur modern [2]. Selama dua puluh tahun terakhir, kemajuan teknologi ini berkembang secara signifikan berkat kemampuannya dalam menghasilkan objek tiga dimensi langsung dari model digital tanpa memerlukan cetakan atau perkakas tambahan [3]. Proses manufaktur yang dilakukan dengan

cara menumpuk material lapis demi lapis (*layer by layer*) memungkinkan efisiensi tinggi dalam penggunaan bahan, waktu produksi, serta kebebasan desain yang lebih luas dibandingkan metode konvensional [4]. Salah satu teknologi yang paling populer adalah Fused Deposition Modeling (FDM) karena sederhana dalam pengoperasian, biaya relatif rendah, dan banyak diterapkan pada sektor pendidikan hingga industri [5]. Namun, metode ini masih menghadapi kendala dalam hal presisi dimensi, yang sering kali menyebabkan

hasil cetak menyimpang dari rancangan awal [6].

Tingkat akurasi dimensi merupakan faktor penting dalam menentukan kualitas suatu produk hasil cetak 3D [7]. Jika tingkat akurasi rendah, maka akan timbul ketidaksesuaian bentuk dan ukuran terhadap desain aslinya, yang dapat berdampak pada penurunan kinerja komponen [8]. Beberapa variabel yang berpengaruh terhadap akurasi hasil cetakan di antaranya adalah pengaturan parameter proses (suhu nozzle, kecepatan cetak, tinggi lapisan), kondisi lingkungan, serta karakteristik bahan yang digunakan [9]. Penelitian Mengemukakan bahwa pengaturan parameter proses secara optimal dapat meminimalkan deviasi dimensi secara signifikan [10]. Oleh sebab itu, kombinasi antara pemilihan material yang tepat dan optimasi parameter pencetakan merupakan kunci untuk mencapai hasil cetakan yang presisi [11].

Salah satu bahan yang banyak digunakan dalam pencetakan berbasis FDM adalah *Polylactic Acid* (PLA), karena sifatnya yang ramah lingkungan, mudah dicetak, dan stabil selama proses pencetakan [9]. Walaupun demikian, PLA konvensional memiliki beberapa kekurangan seperti kekuatan mekanik yang rendah dan ketahanan panas yang terbatas, yang dapat menyebabkan penyusutan atau deformasi setelah pencetakan selesai [12]. Untuk mengatasi permasalahan ini, dikembangkanlah PLA+, yaitu varian PLA yang telah dimodifikasi dengan bahan aditif guna meningkatkan kekuatan tarik, stabilitas termal, dan kualitas permukaan hasil cetak [13].

Menurut penelitian sebelumnya, penggunaan PLA+ terbukti mampu meningkatkan ketelitian dimensi hingga lebih dari 10% dibandingkan dengan PLA standar

[14]. Hasil yang sejalan juga dilaporkan oleh Suzen [15], yang menyebutkan bahwa penggunaan PLA+ dengan parameter cetak yang dioptimalkan menghasilkan permukaan produk yang lebih halus dan akurat [16].

Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan tingkat keakuratan hasil cetak 3D dengan memanfaatkan material PLA+ melalui optimasi pengaturan parameter proses pada printer FDM [17]. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam memahami pengaruh kombinasi material dan parameter pencetakan terhadap kualitas geometris produk [18]. Selain itu, hasil penelitian ini juga dapat dijadikan panduan bagi pengguna 3D printer dalam menentukan konfigurasi material dan parameter proses yang paling efektif untuk menghasilkan produk yang presisi, efisien, serta memiliki konsistensi tinggi di berbagai kondisi pencetakan [19].

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan eksperimen yang bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi print speed dan layer height terhadap akurasi dimensi hasil cetakan menggunakan filamen PLA+ pada proses 3D Printing dengan metode *Fused Deposition Modeling* (FDM). Proses pencetakan spesimen dilakukan menggunakan printer 3D tipe *Ender 3 Pro*, di mana kedua parameter tersebut divariasikan dalam tiga tingkat berbeda dan dievaluasi menggunakan rancangan *ortogonal Taguchi* L_9 (3^2) guna menentukan kombinasi parameter yang memberikan hasil cetak paling presisi. Penulisan persamaan/formula harus menggunakan equation dengan memberikan keterangan nomor persamaan seperti berikut ini.

Tabel 1. *Matriks ortogonal* L_9 (3^2)

EXP	Print Speed	Layer Height
1	80	0,05
2	80	0,1
3	80	0,15
4	85	0,05
5	85	0,1
6	85	0,15
7	90	0,05
8	90	0,1
9	90	0,15

Pada Tabel 1 disajikan rancangan percobaan penelitian yang menerapkan metode Taguchi dengan menggunakan *matriks*

ortogonal L_9 (3^2). Pendekatan ini disusun berdasarkan perhitungan derajat kebebasan untuk memastikan setiap kombinasi faktor

dapat diuji secara efisien. Dalam rancangan tersebut, setiap kolom merepresentasikan faktor yang diteliti, sementara setiap baris menggambarkan kombinasi perlakuan yang digunakan dalam proses eksperimen. Pemilihan model desain ini bertujuan agar distribusi faktor menjadi seimbang dan hasil pengujian lebih representatif. Selain itu, metode Taguchi dengan konsep “*nominal is best*” digunakan untuk memperoleh nilai keluaran yang paling mendekati target ideal dengan tingkat deviasi seminimal mungkin, sehingga proses eksperimen menjadi lebih stabil, akurat, dan sesuai dengan standar kualitas pengujian.

Pengukuran dimensi dilakukan menggunakan jangka sorong digital dengan ketelitian 0,02 mm untuk menilai pengaruh

variasi parameter cetak terhadap akurasi hasil. Beberapa alat uji utama dan pendukung digunakan sesuai kebutuhan eksperimen agar proses pengukuran dan analisis berlangsung tepat dan konsisten. Adapun alat uji yang digunakan pada penelitian ini, yaitu:

2.1 Jangka Sorong

Penelitian ini menggunakan jangka sorong digital berketelitian 0,02 mm yang ditunjukkan pada Gambar 1 sebagai alat ukur utama untuk memperoleh data presisi dimensi spesimen PLA+ hasil cetak FDM. Pengukuran ini dilakukan guna menganalisis pengaruh variasi kecepatan cetak dan *suhu nozzle* terhadap tingkat akurasi dimensi produk yang dihasilkan.

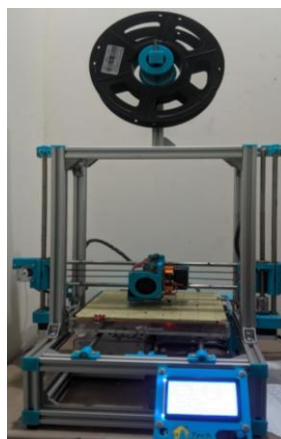


Gambar 1. Jangka Sorong Digital

2.2 Mesin 3D Printer

Penelitian ini menggunakan jangka sorong digital dengan ketelitian 0,02 mm sebagai alat ukur utama untuk memperoleh

data dimensi spesimen PLA+ hasil cetak FDM. Data tersebut digunakan untuk menilai pengaruh perubahan kecepatan cetak dan *suhu nozzle* terhadap akurasi dimensi produk.



Gambar 2. Mesin 3D Printer tipe Ender 3 Pro

2.3 Jenis Filamen

Gambar 3 menunjukkan filamen PLA+ merek eSUN yang dimanfaatkan sebagai material utama dalam proses pencetakan 3D berbasis metode FDM pada penelitian ini. Filamen berukuran 1,75 mm dengan berat 1 kg tersebut dikemas dalam spool hitam berlabel hijau khas eSUN. Material PLA+ memiliki karakteristik unggul seperti ketahanan panas

yang lebih baik, kekuatan mekanik yang tinggi, serta hasil permukaan cetak yang lebih halus dibandingkan PLA konvensional. Filamen berwarna merah ini juga memberikan tampilan menarik dan mencolok, sehingga ideal digunakan dalam pembuatan prototipe maupun komponen fungsional pada penelitian manufaktur aditif.

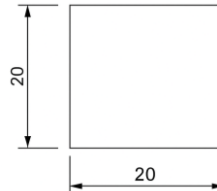


Gambar 3. Filamen PLA+

2.4 Spesimen

Penelitian ini menggunakan spesimen uji yang dirancang melalui perangkat lunak

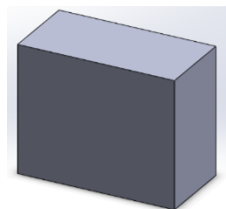
Autodesk Solidwork, dengan hasil desain ditampilkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Desain Spesimen

Gambar 4 menampilkan hasil rancangan spesimen yang dibuat menggunakan perangkat lunak pemodelan tiga dimensi. Model tersebut terdiri dari perpaduan bentuk kubus. Proses perancangannya dilakukan

melalui aplikasi Ideamaker untuk menyiapkan desain sekaligus *file* cetak 3D. Spesimen ini digunakan sebagai objek uji dalam penelitian serta sebagai prototipe awal dalam analisis struktur.

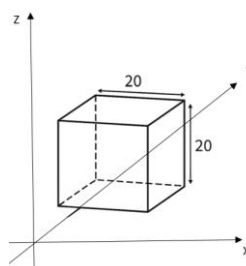


Gambar 5. Desain Software Autodesk Solidwork

Gambar 5 menampilkan model spesimen 3D berbentuk kubus yang dirancang menggunakan perangkat lunak pemodelan tiga dimensi. Struktur kubus ini memiliki permukaan datar dan sudut tegak lurus, merepresentasikan bentuk geometris sederhana yang digunakan untuk pengujian dimensi. Model kubus tersebut berfungsi sebagai objek uji utama dalam penelitian untuk mengevaluasi tingkat akurasi hasil cetakan pada setiap sumbu X, Y, dan Z.

2.5 Pengukuran Spesimen

Gambar 6 menampilkan model spesimen 3D berbentuk kubus dengan ukuran 20×20 mm yang disertai sistem koordinat kartesius. Sumbu X, Y, dan Z digunakan sebagai acuan untuk menentukan arah pengukuran dimensi pada setiap sisi kubus. Model ini berfungsi untuk mengidentifikasi ketelitian hasil cetak pada masing-masing sumbu selama proses pencetakan 3D berlangsung.



Gambar 6. Pengukuran Spesimen

Tabel 2. Parameter Proses Penelitian

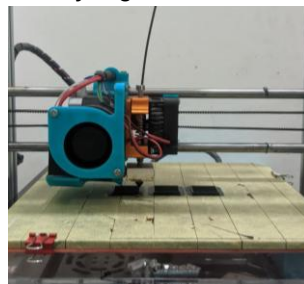
Faktor	Parameter Proses	Level		
		1	2	3
1	Print Speed	80	85	90
2	Layer Height (mm)	0,5	0,1	0,15

Langkah awal dalam menganalisis pengaruh parameter proses pada pencetakan 3D terhadap ketepatan dimensi spesimen adalah menentukan parameter uji yang relevan. Fokus utama penelitian ini berada pada kecepatan cetak (Print speed) dan tinggi lapisan (*layer height*), karena keduanya berperan penting dalam menentukan kualitas permukaan serta ketepatan ukuran hasil cetak. Penetapan parameter tersebut sejak awal membantu penelitian berjalan lebih terarah dan menghasilkan evaluasi akurasi dimensi yang

lebih valid serta mudah dibandingkan secara sistematis.

2.6 Proses Pencetakan Spesimen

Gambar 7. menunjukkan proses pencetakan spesimen menggunakan printer 3D Ender dengan metode FDM, di mana beberapa spesimen berbentuk balok dicetak secara bersamaan dan disusun secara sistematis sesuai kelompok atau variabel penelitian.



Gambar 7. Proses Pencetakan Spesimen

Gambar 8 menampilkan sejumlah spesimen berbentuk kubus berwarna hitam yang tersusun rapi di atas permukaan datar. Setiap spesimen memiliki ukuran yang seragam dan digunakan sebagai sampel uji dalam penelitian, seperti pengujian akurasi

dimensi atau evaluasi kualitas hasil cetak. Penataan yang teratur menunjukkan bahwa seluruh spesimen telah dipersiapkan secara sistematis untuk memperoleh hasil pengujian yang konsisten dan presisi.



Gambar 8. Seluruh Spesimen

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini disajikan hasil pencetakan spesimen menggunakan 3D Printer tipe Atech, yang kemudian dianalisis berdasarkan data hasil pengujian. Pembahasan difokuskan pada evaluasi tingkat ketepatan dimensi dengan membandingkan ukuran hasil cetakan terhadap ukuran nominal

pada desain CAD. Pengukuran dilakukan pada sumbu X, Y, dan Z untuk menilai sejauh mana pengaturan parameter pencetakan memengaruhi kualitas serta ketelitian spesimen. Uraian ini menjelaskan hubungan dan makna dari hasil yang diperoleh, sekaligus menjawab tujuan penelitian secara objektif,

termasuk apabila ditemukan data yang menyimpang.

3.1. Hasil Pengukuran

Gambar 9 memperlihatkan spesimen yang ditempatkan dalam sistem koordinat kartesius tiga dimensi (X, Y, Z) dengan tampilan isometrik. Sumbu Z ditunjukkan tegak ke atas sebagai penanda tinggi spesimen,

sedangkan sumbu X berada di bagian depan dan sumbu Y diarahkan ke sisi samping. Orientasi ini memudahkan dalam penentuan arah serta proses pengukuran dimensi pada setiap sumbu secara lebih akurat. Sedangkan pada Gambar 10, menunjukkan bahwa Pengukuran spesimen menggunakan jangka sorong digital menunjukkan hasil sebesar 20.0 mm.



Gambar 9. Pengukuran Sumbu Z (Tinggi)



Gambar 10. Pengukuran Sumbu X

Gambar 11. menunjukkan proses pengukuran sumbu Y pada spesimen menggunakan jangka sorong digital. Hasil

pengukuran pada layar menunjukkan nilai 20.0 mm, yang menandakan ukuran diameter luar spesimen.



Gambar 11. Pengukuran Sumbu Y

3.2. Data Hasil Pengukuran

Berdasarkan data pada Tabel 3, pengukuran spesimen dilakukan pada tiga titik untuk setiap sumbu X, Y, dan Z. Nilai rata-rata setiap sumbu diperoleh dari perhitungan rerata ketiga titik pengukuran tersebut. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa variasi nilai

antar titik sangat kecil, menandakan kestabilan dan konsistensi dimensi spesimen yang baik. Rentang nilai rata-rata pada ketiga sumbu berada antara 20,000 hingga 20,067 mm, sehingga dapat disimpulkan bahwa penyimpangan terhadap ukuran nominal sangat minimal dan tingkat akurasi dimensi hasil cetakan tergolong tinggi.

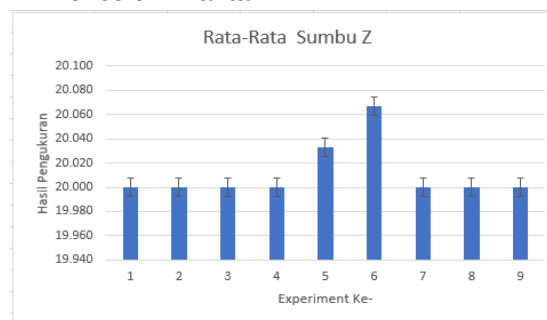
NO. EXP	X1	X2	X3	RATA- RATA	Y1	Y2	Y3	RATA- RATA	Z1	Z2	Z3	RATA- RATA
1	20	20	20	20.000	20	20	20	20.000	20	20	20	20.000
2	20	20,1	20	20.033	20	20	20	20.000	20	20	20	20.000
3	20,2	20	20	20.067	20	20	20	20.000	20	20	20	20.000
4	20	20	20	20.000	20	20	20	20.000	20	20	20	20.000
5	20	20	20	20.000	20	20	20	20.000	20	20,1	20	20.033
6	20	20	20	20.000	20	20	20,1	20.033	20	20	20,2	20.067
7	20,1	20,2	20	20.100	20	20	20	20.000	20	20	20	20.000
8	20,1	20	20	20.033	20	20	20,2	20.067	20	20	20	20.000
9	20	20	20	20.000	20	20,1	20	20.033	20	20	20	20.000

Gambar 12. Tabel Hasil Pengukuran

3.3. Grafik Hasil Pengukuran

Pada Gambar 13, diagram tersebut menampilkan data hasil pengukuran tinggi (sumbu Z) dari objek yang diuji dalam 9 kali eksperimen. Nilai pengukuran menunjukkan kestabilan yang sangat baik, dengan tinggi berkisar di angka 20 satuan. Tidak tampak adanya penyimpangan mencolok antar

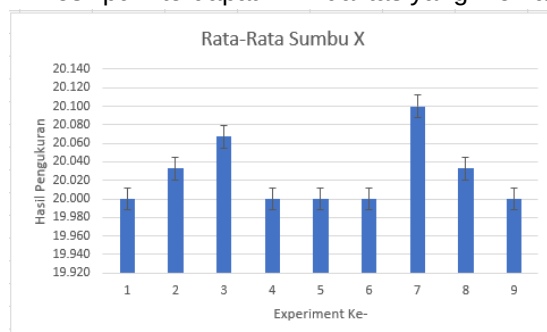
percobaan, yang menandakan bahwa proses pembuatan atau pencetakan objek berlangsung secara konsisten pada dimensi vertikal. Stabilitas ini memperlihatkan bahwa variabel tinggi tidak terpengaruh oleh kondisi eksternal maupun internal selama proses berlangsung.



Gambar 13. Diagram Sumbu Z

Berdasarkan Gambar 14, bahwa diagram tersebut menggambarkan hasil Sumbu X pada bidang dari objek yang sama dalam 9 pengulangan eksperimen. Secara umum, data menunjukkan kestabilan yang cukup tinggi, dengan nilai diameter berada di sekitar angka 20 satuan. Meskipun terdapat

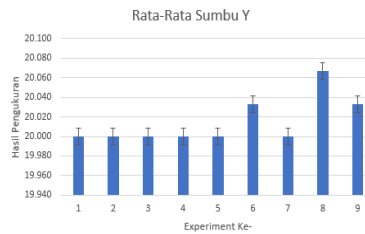
sedikit variasi antar percobaan, perbedaan tersebut sangat kecil dan masih dalam batas toleransi yang dapat diterima. Hal ini menunjukkan bahwa ukuran horizontal objek tetap terjaga dengan baik, menandakan proses produksi berlangsung dengan tingkat kontrol kualitas yang memadai.



Gambar 14. Diagram Sumbu X

Berdasarkan Gambar 15 menunjukkan bahwa grafik sumbu Y terlihat bahwa nilai pengukuran untuk sembilan percobaan menunjukkan hasil yang stabil. Setiap eksperimen menghasilkan ukuran diameter

dalam yang hampir sama, yaitu sekitar 20 mm. Kondisi ini mengindikasikan bahwa proses percobaan berjalan secara konsisten tanpa adanya perbedaan signifikan antar sampel.

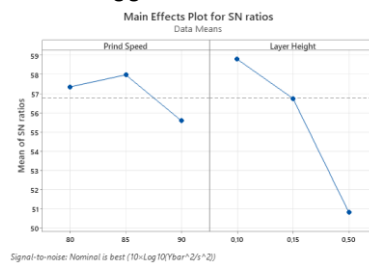


Gambar 15. Diagram Sumbu Y

3.4. Tabel Analisis

Pada Gambar 16 yaitu Grafik *Main Effects Plot S/N Ratios* menunjukkan bahwa *Layer Height* dan *Print Speed* berpengaruh berbeda terhadap nilai S/N. Nilai tertinggi

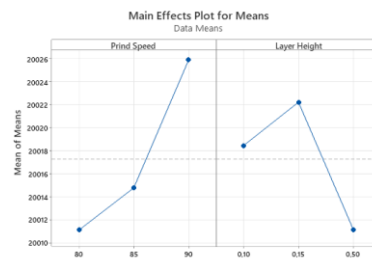
diperoleh pada *Print Speed* 85% dan *Layer Height* 0,10 mm, menandakan bahwa kombinasi tersebut merupakan kondisi paling optimal untuk menghasilkan kualitas terbaik berdasarkan nilai S/N tertinggi.



Gambar 16. S/N Ratio Plot

Berdasarkan Gambar 16, grafik *Main Effects Plot for Means* memperlihatkan bahwa *Layer Height* dan *Print Speed* memengaruhi nilai rata-rata hasil. Nilai mean terendah

muncul pada *Print Speed* 90% dan *Layer Height* 0,5 mm, sehingga kombinasi tersebut dianggap memberikan hasil paling optimal.



Gambar 17 . Main Effects For Means

Berdasarkan Gambar 18, nilai *Response Table for Signal to Noise Ratios*, terlihat bahwa *Layer Height* dan *Print Speed* memiliki pengaruh setara terhadap kualitas hasil cetak. Nilai *Delta* sebesar 7,99 pada kedua faktor menunjukkan bahwa keduanya memberikan

kontribusi yang seimbang dalam memengaruhi rasio *Signal-to-Noise*, sehingga keduanya penting untuk mencapai kualitas cetak yang optimal.

Response Table for Signal to Noise Ratios

Nominal is best ($10 \times \log_{10}(\bar{Y}^2/s^2)$)

Level	Print Speed	Layer Height
1	57,35	58,80
2	57,98	56,75
3	55,59	50,81
Delta	2,39	7,99
Rank	2	1

Gambar 18. S/N Ratios

Merujuk pada Gambar 19, nilai *Response Table for Means*, terlihat bahwa *Layer Height* dan *Print Speed* memberikan pengaruh yang seimbang terhadap rata-rata hasil cetakan. Kesamaan nilai *Delta* sebesar 15 menunjukkan bahwa kedua variabel

memiliki tingkat kontribusi yang serupa terhadap kualitas produk. Oleh karena itu, baik *Infill Density* maupun *Layer Height* sama-sama berperan dalam mencapai hasil cetak yang optimal.

Response Table for Means

Level	Print Speed	Layer Height
1	20011	20018
2	20015	20022
3	20026	20011
Delta	15	11
Rank	1	2

Gambar 19. *Response Table for Means*

3.5. Uji Konfirmasi

Exp.	Sumbu	Parameter Proses Optimum	Replikasi 1 (mm)	Replikasi 2 (mm)	Replikasi 3 (mm)	Rata- rata
1	Sumbu Z	Layer Height: 0,5 mm Infill Density: 95%	20,00	20,03	20,07	20,03
2	Sumbu X	Layer Height: 0,5 mm Infill Density: 95%	20,00	20,02	20,03	20,02
3	Sumbu Y	Layer Height: 0,5 mm Infill Density: 95%	20,00	20,02	20,03	20,02

Gambar 20. Tabel Uji Konfirmasi

Berdasarkan Gambar 20 Uji konfirmasi dilakukan untuk memastikan ketelitian dimensi hasil cetak terhadap ukuran nominal 20 mm pada tiga sumbu utama (Z, X, dan Y) dengan parameter optimum *Layer Height* 0,5 mm dan *Infill Density* 95%. Berdasarkan hasil pengukuran, rata-rata dimensi yang diperoleh yaitu 20,03 mm pada sumbu Z, 20,03 mm pada sumbu X, dan 20,02 mm pada sumbu Y. Selisih yang sangat kecil dari ukuran nominal ($\pm 0,05$ mm) membuktikan bahwa kombinasi parameter tersebut menghasilkan cetakan yang presisi, stabil, dan konsisten sehingga layak dianggap sebagai konfigurasi optimal dalam menjaga akurasi hasil 3D printing.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil eksperimen dan analisis data, diperoleh bahwa kombinasi *Layer Height* 0,10 mm dan *Print Speed* 85 mm/s merupakan konfigurasi paling optimal untuk mencapai dimensi hasil cetak yang akurat dan stabil. Kedua parameter tersebut berkontribusi secara seimbang terhadap peningkatan presisi dimensi. Nilai deviasi yang sangat kecil menunjukkan bahwa proses

pencetakan berlangsung konsisten dan terkontrol dengan baik. Secara keseluruhan, penggunaan filamen PLA+ mampu memberikan kualitas cetakan yang lebih presisi dibandingkan dengan PLA konvensional. Hasil penelitian ini dapat dijadikan acuan dalam pengaturan parameter proses pada teknologi FDM untuk menghasilkan produk manufaktur presisi dengan efisiensi tinggi.

Referensi

- [1] I. S. Eldeeb, E. Esmael, S. Ebied, M. R. Diab, M. Dekis, M. A. Petrov, A. A. Zayed, dan M. Egiza, "Optimization of Nozzle Diameter and Printing Speed for Enhanced Tensile Performance of FFF 3D-Printed ABS and PLA," *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, vol. 9, no. 7, 2025
- [2] A. F. Mohammadimehr, "Effect of infill pattern and density on the mechanical behaviour of FDM 3D-printed parts – a current review," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022.
- [3] M. A. R. S. H. Susilo, M. Maryono, L. Lazuardi, "Analysis of 3D Printing

- Applications with ABS Filament Material for Designing Unmanned Aircraft Bodybuilds,” *Vrimata: Journal of Mechanical Engineering*, vol. 25, pp. 25–32, 2024.
- [4] Y. Zhang, K. Mao, S. Leigh, A. Shah, Z. Chao, G. Ma, “A parametric study of 3D printed polymer gears,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology (Springer)*, 2020.
- [5] E. H. E. Suryadarma, P. W. Laksono, I. Priadythama, “Optimal PLA+ 3D Printing Parameters through Charpy Impact Testing: A Response Surface Methodology,” *Jurnal Optimasi Sistem Industri*, vol. 23, no. 1, hlm. 76–91, 2024.
- [6] Tunçel, Oğuz. Optimization of Charpy Impact Strength of Tough PLA Samples Produced by 3D Printing Using the Taguchi Method. *Polymers*, 16(4), 459 (2024).
- [7] P. Pristiansyah, H. Hasdiansah and A. Ferdiansyah, Pengaruh Parameter Proses Pada 3D Printing FDM Terhadap Kekuatan Tarik Filament ABS CCTREE,” *Manutech: Jurnal Teknologi Manufaktur*, vol. 14, no. 1, pp. , 2022.
- [8] M. A. Fauzan dan R. A. Fauzan, “Perancangan Extruder Mesin Rapid Prototyping Berbasis Fused Deposition Modeling (FDM) untuk Material Filament Polylactic Acid (PLA) Diameter 1,75 mm,” *Manufaktur Bandung Repository*, 2017.
- [9] Y. Li, A. Molazem, H.-I. Kuo, V. Ahmadi, V. P. Shastri, “Comparative Analysis of Dimensional Accuracy in PLA-Based 3D Printing: Effects of Key Printing Parameters and Related Variables,” *Polymers*, 17(12), 1698 (2025).
- [10] D. A. Hutauruk, S. A. Tondang, “The influence of heating and cooling on the precision and microstructure of 3D printing results with PLA+ material,” *Jurnal Polimesin*, 2024.
- [11] I. Akbar, Z. Sirwansyah Suzen, dan I. Idiar, “Analisis Proses 3D Printing terhadap Pengujian Impak Metode Charpy pada Material PLA+,” *Jurnal Syntax Admiration*, vol. 2, no. 8, pp. 1480–1493, 2021.
- [12] W. Wahyudi, Z. S. Suzen, dan P. Pristiansyah, “Pengaruh Parameter Proses Pencetakan 3D Printing Terhadap Kebulatan Produk Menggunakan Filament PETG,” vol. 3, no. 1, pp. 207–213, 2023.
- [13] Y. Y. Tanoto, N. Anggraini, R. Febrian, “Optimasi Multirespon pada Proses 3D Printing Material PLA dengan Metode Taguchi-Grey,” *Jurnal Rekayasa Mesin*, vol. 13, no. 2, hlm. 577–588, 2023.
- [14] Y. S. Muhammad, H. Hasdiansah, A. Ferdiansyah, “Pengaruh Parameter Proses Terhadap Kekuatan Tarik Filamen ST-PLA Menggunakan Metode Taguchi,” *Prosiding Seminar Nasional Inovasi Teknologi Terapan*, vol. 1, no. 1, hlm. 74–79, 2021.
- [15] H. Hanon, A. Zsidai, T. Klébert, “Accuracy investigation of 3D printed PLA with various process parameters,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 51, pp. 1874–1880, 2021,
- [16] A. D. Mahendra, S. Mustika, dkk, “Optimization of Fused Deposition Modeling (FDM) Machine Parameters for Carbon Fiber Tensile Strength Using the Taguchi Method,” *Journal of Mechanical Engineering, Science, and Innovation*, 2023.
- [17] R. Ramadhan, S. Dewi, M. T. Ardian, “Layer Height, Temperature Nozzle, Infill Geometry and Printing Speed Effect on Accuracy 3D Printing PETG,” *R.E.M. (Rekayasa Energi Manufaktur) Jurnal*, 2022.
- [18] M. Hasan, T. Nur, S. Budi, Z. D. Abas, “Parametric investigation and optimization to study the effect of process parameters on the dimensional deviation of Fused Deposition Modeling of 3D printed parts,” *Polymers*, 2022.
- [19] R. Ismail, J. Pratama, T. Mulyono, P. Budi, H. Agus, L. Fitriani, B. Baskoro, K. A. Yaqin, “Material and process parameter optimization for dimensional accuracy in Fused Deposition Modeling 3D printing,” *Jurnal Polimesin*, 2021.