



## Pengaruh *Nozzle Temperature* terhadap Kekuatan Tarik Material PLA+ menggunakan Mesin 3D Printing Dual Extruder

Muhammad Ja'far Ahsinul Rokhmat <sup>1)</sup>, Ikhwan Taufik<sup>2\*)</sup>, Julian Anindito Widiatmoko<sup>3)</sup>

<sup>1)2)</sup> Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Tidar, Jl. Kapten Suparman No. 39, Potrobangsari, Magelang 56116

<sup>3)</sup> Jurusan Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Tidar, Jl. Kapten Suparman No. 39, Potrobangsari, Magelang 56116

e-mail: [ikhwantaufik26@untidar.ac.id](mailto:ikhwantaufik26@untidar.ac.id).

### ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi suhu nozzle terhadap kekuatan tarik material PLA+ yang dicetak menggunakan mesin 3D printing dual extruder. Spesimen dicetak dengan tiga variasi suhu nozzle, yaitu 214°C, 215°C, dan 216°C. Uji tarik dilakukan sesuai standar ASTM D638 untuk memperoleh nilai Ultimate Tensile Strength (UTS) dan elongation. Hasil pengujian menunjukkan bahwa suhu nozzle berpengaruh nyata terhadap sifat mekanik PLA+. Analisis statistik menggunakan ANOVA satu arah menunjukkan adanya perbedaan signifikan antar kelompok perlakuan ( $p < 0,05$ ). Hasil uji lanjut Tukey HSD menunjukkan bahwa perlakuan dengan nozzle *temperature* 216°C menghasilkan kekuatan tarik yang secara signifikan lebih rendah dibandingkan suhu 214°C dan 215°C, sedangkan perbedaan antara 214°C dan 215°C tidak signifikan sehingga keduanya memiliki performa mekanik yang sebanding.

Kata Kunci: 3D printing, dual extruder, nozzle *temperature*

### ABSTRACT

*This study aims to analyze the effect of nozzle temperature variations on the tensile strength of PLA+ material fabricated using a dual-extruder 3D printer. Specimens were printed at three nozzle temperatures, namely 214°C, 215°C, and 216°C. Tensile tests were conducted according to ASTM D638 to obtain the values of Ultimate Tensile Strength (UTS) and elongation. The results revealed that nozzle temperature had a significant effect on the mechanical properties of PLA+. One-way ANOVA indicated significant differences among the treatment groups ( $p < 0.05$ ). Post-hoc analysis using Tukey HSD showed that specimens printed at 216°C exhibited significantly lower tensile strength compared to those printed at 214°C and 215°C, while the difference between 214°C and 215°C was not significant, indicating relatively comparable mechanical performance.*

Keywords: 3D printing, dual extruder, nozzle *temperature*

### 1. Pendahuluan

Dalam beberapa tahun terakhir, teknologi pencetakan 3D berbasis *Fused Deposition Modeling* (FDM) telah mengalami perkembangan signifikan dalam sektor manufaktur aditif. Salah satunya ditunjukkan melalui penelitian di bidang material komposit maupun polimer, di mana peningkatan sifat mekanik masih menjadi fokus utama dalam pengembangan material cetak 3D [1]. Selain itu, penggunaan *printer* 3D dengan sistem *dual extruder* memungkinkan pencetakan simultan dua jenis material atau warna, serta memberikan presisi termal dan struktural yang lebih baik. Hal ini telah dibuktikan pada studi optimasi multi-

material PLA-ABS menggunakan metode *design of experiment*, di mana kombinasi parameter termasuk suhu nozzle sangat berpengaruh terhadap hasil cetak [2].

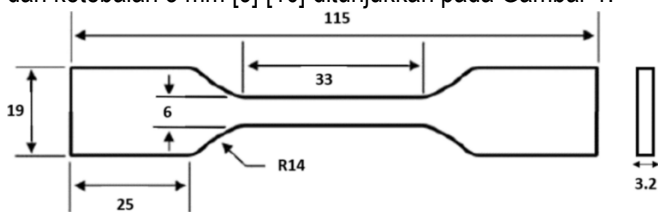
Parameter *nozzle temperature* sendiri menjadi salah satu faktor krusial dalam proses FDM karena mempengaruhi laju pencairan filamen, kualitas adhesi antar lapisan, hingga sifat mekanik hasil cetakan [3]. Penelitian terkini menunjukkan bahwa variasi *nozzle temperature* berpengaruh langsung terhadap kekuatan tarik (*tensile strength*) material PLA dan PLA+, di mana peningkatan suhu hingga titik tertentu mampu meningkatkan *ultimate tensile strength* dan modulus

elastisitas sebelum menurun akibat degradasi termal [4]. Oleh karena itu, memahami hubungan antara *nozzle temperature* dan hasil mekanik menjadi penting untuk mengoptimalkan performa fungsional objek hasil cetak.

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh variasi *nozzle temperature* pada material PLA+ menggunakan mesin 3D printing dual extruder. Evaluasi dilakukan melalui uji tarik sesuai standar ASTM D638 [5]. Analisis statistik dilakukan menggunakan metode ANOVA untuk mengetahui signifikansi pengaruh *nozzle temperature* terhadap kekuatan tarik. Diharapkan hasil penelitian ini dapat memberikan referensi ilmiah dalam pemilihan parameter pencetakan optimal pada aplikasi rekayasa fungsional menggunakan material PLA+.

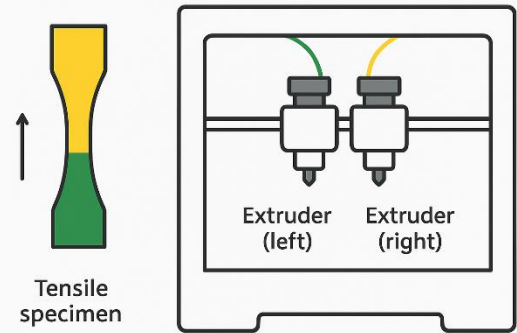
## 2. Metode

Penelitian ini dilakukan untuk mengkaji pengaruh variasi *nozzle temperature* terhadap kekuatan tarik material PLA+ menggunakan teknologi 3D printing Fused Deposition Modeling (FDM) dual extruder [6], [7] Bahan yang digunakan adalah filamen PLA+ berdiameter 1,75 mm dengan warna tunggal, dicetak pada orientasi vertikal [8]. Desain spesimen uji tarik mengacu pada standar ASTM D638 Tipe IV, yang memiliki panjang total 115 mm, lebar bagian sempit 8 mm, dan ketebalan 3 mm [9] [10] ditunjukkan pada Gambar 1.



**Gambar 1.** Dimensi ASTM D638 Tipe IV

Parameter *nozzle temperature* yang divariasikan adalah 214 °C, 215 °C, dan 216 °C, sementara parameter lainnya dibuat tetap, yaitu *bed temperature* 60 °C, print speed 50 mm/s, layer height 0,2 mm, dan infill density 60% [6], [11] Proses pencetakan dilakukan secara vertikal dan dibagi menjadi dua bagian: bagian warna kuning dicetak menggunakan ekstruder kanan dan bagian hijau dicetak menggunakan ekstruder kiri untuk menguji pengaruh ikatan antar lapisan terhadap kekuatan mekanik [12], [13] yang ditunjukkan pada Gambar 2.



**Gambar 2.** Skema proses pencetakan dengan *dual extruder*

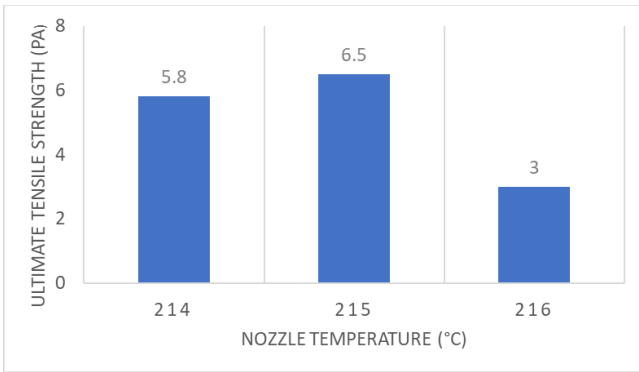
Jumlah total spesimen uji adalah 9 buah, terdiri dari masing-masing 3 spesimen untuk setiap *nozzle temperature* [10]. File desain CAD diekspor dalam format STL (STereoLithography) dan diproses menggunakan perangkat lunak slicing dengan pengaturan suhu sesuai kelompok perlakuan [14]. Setelah proses pencetakan selesai, spesimen dibiarkan selama 24 jam dalam suhu ruang untuk mencapai kestabilan dimensi [15]. Pengujian tarik dilakukan menggunakan Universal Testing Machine (UTM) dengan kecepatan pengujian 5 mm/menit sebagaimana diatur dalam ASTM D638, untuk memperoleh nilai tegangan maksimum, regangan maksimum, dan modulus elastisitas [8],[9].

Seluruh data uji tarik dianalisis menggunakan metode statistik ANOVA satu arah guna mengetahui pengaruh signifikan dari variasi *nozzle temperature* terhadap kekuatan tarik. Hasil analisis ini menjadi dasar untuk menentukan suhu optimal dalam pencetakan vertikal material PLA+ menggunakan mesin 3D printing *dual extruder*.

## 3. Hasil dan Pembahasan

### 3.1 Hasil pertama

Hubungan antara *nozzle temperature* dengan nilai ultimate tensile strength (UTS) spesimen uji tarik PLA+. Terlihat bahwa peningkatan suhu *nozzle* dari 214°C ke 215°C menghasilkan kenaikan UTS dari 5,8 MPa menjadi 6,5 MPa. Namun, ketika suhu dinaikkan lebih lanjut menjadi 216°C, nilai UTS justru menurun drastis hingga 3 MPa. Hal ini mengindikasikan bahwa terdapat suhu optimum proses pencetakan, yaitu pada 215°C, yang memberikan kekuatan tarik tertinggi yang ditunjukkan Gambar 3.



**Gambar 3.** Diagram Hasil Kekuatan Tarik

Pengujian tarik terhadap sembilan spesimen menunjukkan adanya perbedaan nilai kekuatan tarik pada masing-masing kelompok *nozzle temperature*. Rata-rata nilai kekuatan tarik tertinggi diperoleh pada *nozzle temperature* 215°C, yaitu sebesar 6,79 MPa, diikuti oleh suhu 214°C sebesar 5,69 MPa, dan terendah pada suhu 216°C sebesar 1,95 MPa. Nilai UTS terbesar pada suhu 215 °C disebabkan oleh kondisi pencetakan yang optimal, di mana suhu tersebut mampu menghasilkan ikatan antar-lapisan (interlayer bonding) yang kuat tanpa menimbulkan degradasi material [7], [16] Pada suhu lebih rendah (214 °C), energi termal yang tersedia tidak cukup untuk melelehkan filamen secara sempurna sehingga ikatan antar-lapisan tidak terbentuk maksimal [6]. Sebaliknya, pada suhu lebih tinggi (216 °C), terjadi potensi degradasi termal pada PLA yang mengakibatkan penurunan sifat mekanik karena kerusakan rantai polimer dan lemahnya struktur mikro [17],[3].

3.2 Hasil Kedua

Untuk mengetahui pengaruh variasi parameter proses pencetakan terhadap kekuatan mekanik material PLA+, dilakukan analisis statistik menggunakan Analysis of Variance (ANOVA) satu arah. Uji ANOVA dipilih karena metode ini umum digunakan untuk menentukan apakah terdapat perbedaan yang signifikan antar kelompok perlakuan dalam penelitian material berbasis 3D printing [6],[11]. Hasil uji ANOVA dapat dilihat pada Tabel 1.

**Tabel 1.** Hasil Uji ANOVA satu arah

Sumber Variasi	df	F-hitung	p-value
Antar Kelompok	2	35,64	<0.001
Didalam kelompok	6	-	-
Total	8	-	-

Hasil uji ANOVA satu arah yang ditampilkan pada Tabel 1 menunjukkan bahwa variasi *nozzle temperature* memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kekuatan tarik spesimen PLA+. Nilai *F-hitung* sebesar 35,64 dengan *p-value* < 0,001 memperlihatkan bahwa perbedaan antar kelompok suhu *nozzle* (214 °C, 215 °C, dan 216 °C) lebih besar dibandingkan dengan variasi dalam kelompok. Dengan kata lain, faktor suhu pencetakan merupakan variabel dominan yang menentukan kualitas ikatan antar lapisan dan sifat mekanik material hasil cetakan [6], [11].

Karena nilai *p-value* lebih kecil dari 0,05, maka hipotesis nol (H0) yang menyatakan tidak ada perbedaan antar kelompok ditolak, dan hipotesis alternatif (H1) diterima. Hasil ini menegaskan bahwa perubahan *nozzle temperature* memengaruhi sifat tarik material PLA+, di mana suhu yang terlalu rendah menyebabkan ikatan antar-lapisan kurang optimal, sedangkan suhu yang terlalu tinggi berpotensi menyebabkan degradasi termal material. Temuan ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menyebutkan bahwa parameter suhu cetak memiliki peranan penting dalam menghasilkan ikatan antar-lapisan yang kuat serta kekuatan mekanik yang lebih baik pada material PLA hasil proses FDM [7],[3].

Setelah diketahui adanya perbedaan yang signifikan dari hasil uji ANOVA, dilakukan analisis lanjutan menggunakan uji Tukey HSD untuk mengetahui kelompok mana yang berbeda nyata. Uji Tukey HSD merupakan metode post-hoc yang umum digunakan untuk membandingkan rata-rata antar kelompok perlakuan setelah ANOVA menunjukkan signifikansi [6]. Hasil uji Tukey HSD pada penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 2.

**Tabel 2.** Hasil Uji lanjut Tukey HSD

Perbandingan kelompok	Selisih Rata-rata	HSD	Keterangan
214°C vs 215°C	1,1	1,84	Tidak Signifikan
214°C vs 216°C	3,7	1,84	Signifikan
215°C vs 216°C	4,8	1,84	Signifikan

Hasil uji lanjut Tukey HSD yang ditampilkan Tabel 2 menunjukkan bahwa perlakuan dengan *nozzle temperature* 216 °C menghasilkan nilai kekuatan tarik yang secara signifikan lebih rendah dibandingkan dengan perlakuan pada suhu 214 °C dan 215 °C (p < 0,05). Hal ini mengindikasikan bahwa suhu cetak yang terlalu tinggi dapat menyebabkan

degradasi termal pada material PLA+, sehingga menurunkan kualitas ikatan antar lapisan dan berakibat pada penurunan sifat mekanik [6], [17]

Sementara itu, perbedaan antara nozzle *temperature* 214 °C dan 215 °C tidak signifikan, sehingga keduanya dapat dikatakan memiliki performa mekanik yang relatif sebanding. Temuan ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang melaporkan bahwa terdapat rentang suhu optimum pada proses FDM, di mana peningkatan suhu hingga titik tertentu memperbaiki ikatan antar-lapisan, tetapi suhu yang terlalu tinggi justru merusak sifat tarik akibat degradasi polimer [11], [3].

Pada suhu 216 °C, material PLA+ yang melewati nozzle mengalami pemanasan berlebih sehingga cenderung terjadi degradasi termal. Proses degradasi ini menyebabkan pemutusan rantai polimer (chain scission) yang berakibat pada berkurangnya panjang rantai molekul, sehingga menurunkan kekuatan tarik keseluruhan [17], [6]. Selain itu, suhu yang terlalu tinggi dapat memicu pembentukan gelembung mikro akibat pelepasan gas terperangkap, serta meningkatkan kemungkinan oksidasi, yang keduanya melemahkan ikatan antar-lapisan (interlayer bonding) [18].

Sebaliknya, pada suhu optimum (sekitar 215 °C), material cukup cair untuk melekat sempurna antar-lapisan tanpa mengalami degradasi. Hal ini menjelaskan mengapa suhu 216 °C menghasilkan nilai kekuatan tarik yang lebih rendah dibandingkan 214 °C dan 215 °C, meskipun perbedaannya hanya 1 °C [3].

#### 4. Kesimpulan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi *nozzle temperature* berpengaruh terhadap sifat mekanik material PLA+ yang dicetak menggunakan mesin *3D printing dual extruder*. Berdasarkan uji tarik, suhu 215 °C menghasilkan nilai *Ultimate Tensile Strength* (UTS) tertinggi sebesar 6,7 MPa dengan *elongation* sebesar 3,2%, lebih tinggi dibandingkan suhu 214 °C dan 216 °C.

Analisis statistik menggunakan ANOVA satu arah menunjukkan adanya perbedaan signifikan antara kelompok perlakuan ( $p < 0,05$ ). Hasil uji lanjut Tukey menunjukkan bahwa *nozzle temperature* 216 °C bukanlah kondisi yang optimal karena menghasilkan nilai kekuatan tarik terendah dan berbeda signifikan dibandingkan suhu 214 °C dan 215 °C. Sebaliknya, suhu 214 °C dan 215 °C dapat dipertimbangkan sebagai parameter yang lebih stabil, karena keduanya memberikan kekuatan tarik lebih tinggi dan tidak berbeda signifikan satu sama lain.

#### Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Bapak Ikhwan Taufik dan Bapak Julian Anindito Widiatmoko selaku dosen pembimbing, serta seluruh pihak yang telah memberikan dukungan dan bantuan dalam penyelesaian penelitian ini.

#### Daftar Pustaka

- [1] R. A. Irawan dan Y. Winardi, "Pengaruh Volume Serat Aren Terhadap Kekuatan Tarik Dan Struktur Mikro Komposit Bermatrik Resin Polyester," *J. Tek. Mesin*, vol. 4, no. 1, 2024.
- [2] A. A. Al-Tamimi, M. Tlija, M. H. Abidi, A. Anis, dan A. E. E. Abd Elgawad, "Material Extrusion of Multi-Polymer Structures Utilizing Design and Shrinkage Behaviors: A Design of Experiment Study," *Polymers*, vol. 15, no. 12, hlm. 2683, Jun 2023, doi: 10.3390/polym15122683.
- [3] T. Gajjar, R. Yang, L. Ye, dan Y. X. Zhang, "Effects of key process parameters on tensile properties and interlayer bonding behavior of 3D printed PLA using fused filament fabrication," *Prog. Addit. Manuf.*, vol. 10, no. 2, hlm. 1261–1280, Feb 2025, doi: 10.1007/s40964-024-00704-y.
- [4] K. Elhatab, S. B. Bhaduri, dan P. Sikder, "Influence of Fused Deposition Modelling Nozzle *Temperature* on the Rheology and Mechanical Properties of 3D Printed  $\beta$ -Tricalcium Phosphate (TCP)/Polylactic Acid (PLA) Composite," *Polymers*, vol. 14, no. 6, hlm. 1222, Mar 2022, doi: 10.3390/polym14061222.
- [5] D20 Committee, *Test Method for Tensile Properties of Plastics*. doi: 10.1520/D0638-14.
- [6] R. Pang, M. K. Lai, K. I. Ismail, dan T. C. Yap, "The Effect of Printing *Temperature* on Bonding Quality and Tensile Properties of Fused Deposition Modelling 3d-Printed Parts," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1257, no. 1, hlm. 012031, Okt 2022, doi: 10.1088/1757-899X/1257/1/012031.
- [7] M. S. Kumar, M. U. Farooq, N. S. Ross, C.-H. Yang, V. Kavimani, dan A. A. Adediran, "Achieving effective interlayer bonding of PLA parts during the material extrusion process with enhanced mechanical properties," *Sci. Rep.*, vol. 13, no. 1, hlm. 6800, Apr 2023, doi: 10.1038/s41598-023-33510-7.
- [8] J. J. Laureto dan J. M. Pearce, "Anisotropic mechanical property variance between ASTM D638-14 type i and type iv fused filament fabricated specimens," *Polym. Test.*, vol. 68, hlm. 294–301, 2018, doi: https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.04.029.

- [9] S. Anand Kumar dan Y. Shivraj Narayan, "Tensile Testing and Evaluation of 3D-Printed PLA Specimens as per ASTM D638 Type IV Standard," dalam *Innovative Design, Analysis and Development Practices in Aerospace and Automotive Engineering (I-DAD 2018)*, U. Chandrasekhar, L.-J. Yang, dan S. Gowthaman, Ed., dalam Lecture Notes in Mechanical Engineering. , Singapore: Springer Singapore, 2019, hlm. 79–95. doi: 10.1007/978-981-13-2718-6\_9.
- [10] M. K. Akpakpavi, S. M. Sackey, dan M. K. Asante-Afrifa, "Optimisation of Process Parameters on Tensile Strength of 3D Printed Polylactic Acid (PLA) Parts: ASTM D638 Type – IV," *Afr. J. Appl. Res.*, vol. 9, no. 2, hlm. 104–123, Okt 2023, doi: 10.26437/ajar.v9i2.564.
- [11] M. Grasso, L. Azzouz, P. Ruiz-Hincapie, M. Zarrelli, dan G. Ren, "Effect of *temperaturee* on the mechanical properties of 3D-printed PLA tensile specimens," *Rapid Prototyp. J.*, vol. 24, no. 8, hlm. 1337–1346, Nov 2018, doi: 10.1108/RPJ-04-2017-0055.
- [12] D. B. Perez, E. Celik, dan R. L. Karkkainen, "Investigation of Interlayer Interface Strength and Print Morphology Effects in Fused Deposition Modeling 3D-Printed PLA," *3D Print. Addit. Manuf.*, vol. 8, no. 1, hlm. 23–32, Feb 2021, doi: 10.1089/3dp.2020.0109.
- [13] D. Lin, X. Zhang, dan J. Li, "Optimizing 3D printing parameters: Evaluating infill type and layer height effects on tensile fracture force," *J. Emerg. Investig.*, 2021, doi: 10.59720/20-083.
- [14] S. F. Khan, H. Zakaria, Y. L. Chong, M. A. M. Saad, dan K. Basaruddin, "Effect of infill on tensile and flexural strength of 3D printed PLA parts," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 429, hlm. 012101, Nov 2018, doi: 10.1088/1757-899X/429/1/012101.
- [15] T. Letcher dan M. Waytashek, "Material Property Testing of 3D-Printed Specimen in PLA on an Entry-Level 3D Printer," dalam *Volume 2A: Advanced Manufacturing*, Montreal, Quebec, Canada: American Society of Mechanical Engineers, Nov 2014, hlm. V02AT02A014. doi: 10.1115/IMECE2014-39379.
- [16] N. Yu, X. Sun, Z. Wang, D. Zhang, dan J. Li, "Effects of auxiliary heat on the interlayer bonds and mechanical performance of polylactide manufactured through fused deposition modeling," *Polym. Test.*, vol. 104, hlm. 107390, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2021.107390>.
- [17] M. Behzadnasab, A. A. Yousefi, D. Ebrahimibagha, dan F. Nasiri, "Effects of processing conditions on mechanical properties of PLA printed parts," *Rapid Prototyp. J.*, vol. 26, no. 2, hlm. 381–389, Okt 2019, doi: 10.1108/RPJ-02-2019-0048.
- [18] J. Islam, "Characterizing the influence of *Temperaturee* on the short-term mechanical properties of 3D printed PLA".