

Analisa Parameter Pencetakan Terhadap Sifat Mekanik *Polylactic Acid* Menggunakan Mesin Cetak 3 Dimensi *Fused Deposition Modelling*

Slamet Saefudin*, Dini Cahyandari, Ilham Yustar Afif, Samsudi Raharjo, Muhammad Subri dan Bagus Irawan
Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Semarang
Jl. Kedungmundu Raya No.18 Semarang, Jawa Tengah
*E-mail: slametsaefudin66@unimus.ac.id

Diajukan: 29-11-2022; Direvisi: 12-08-2023; Dipublikasi: 21-08-2023

Abstrak

Additive manufacturing dengan metode *fused deposition modelling* (FDM) banyak diminati dan terus dikembangkan dalam berbagai aplikasi industri. Pada penelitian ini *polylactic acid* (PLA) dicetak menggunakan printer 3 Dimensi (3D) FDM dengan berbagai parameter untuk dijadikan sampel uji tarik. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisa pengaruh parameter pencetakan terhadap sifat mekanik produk hasil cetakan melalui pengujian tarik. Parameter pencetakan meliputi kepadatan isi, tinggi *layer*, suhu cetak, pola isi, sudut cetak dan orientasi untuk mendapatkan dan menentukan hasil kekuatan tarik terbaik. Pencetakan parameter ini dibahas secara rinci. Hasil percobaan pengaruh variasi parameter pencetakan menunjukkan adanya perbedaan kekuatan tarik sampel PLA.

Kata kunci: kekuatan tarik; *polylactic acid*; 3D printer; *fused deposition modelling*; parameter pencetakan

Abstract

Additive manufacturing with the fused deposition modeling (FDM) method is in great demand and continues to be developed in various industrial applications. In this study, polylactic acid (PLA) was printed using an FDM 3D printer with various parameters to be used as a tensile test sample. This study aims to analyze the effect of printing parameters on the mechanical properties of printed products through tensile testing. Printing parameters include infill density, layer height, print temperature, infill pattern, print angle and orientation to obtain and determine the best tensile strength result. Printing parameters are discussed in detail. The experimental results of the influence of variations in printing parameters showed a difference in the tensile strength of PLA samples.

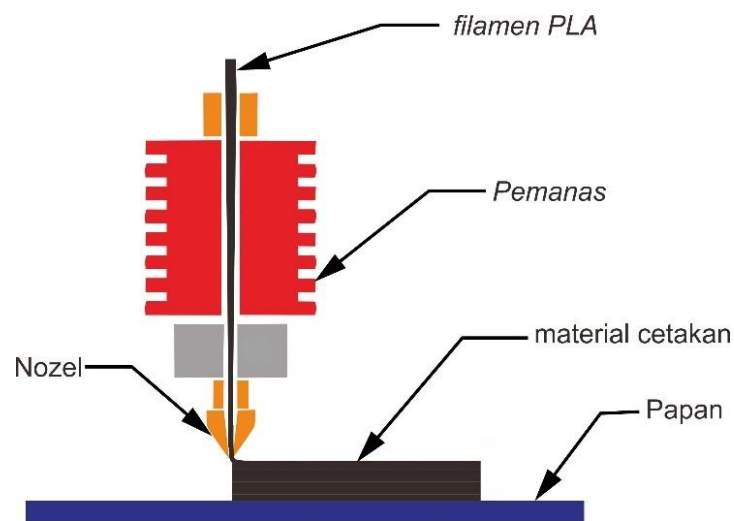
Keywords: Tensile strength; *polylactic acid*; 3D printer; *fused deposition modeling*; printing parameters

1. Pendahuluan

Akhir - akhir ini, teknologi pencetakan 3D sedang banyak diaplikasikan di berbagai bidang teknologi mulai dari pembuatan prototipe ke aplikasi fungsional. Teknologi ini menggunakan proses aditif manufaktur yang berlawanan dengan proses manufaktur subtraktif konvensional. 3D objek dicetak melalui pemodelan virtual tanpa pemotongan tradisional yang menggunakan peralatan mesin mahal sehingga lebih menghemat bahan baku. Dibandingkan dengan metode lain, teknologi ini mendominasi dalam mencetak desain dengan bentuk yang kompleks dan berbagai macam material [1-3]. Metode *fused deposition modelling* (FDM) adalah salah satu teknik pencetakan 3D yang paling banyak diminati karena kemudahan dan biaya operasi yang rendah. Sekarang pencetakan 3D digunakan di berbagai bidang, seperti farmasi [4], bidang kedokteran [5-7], dirgantara, otomotif [8-9] dan yang lainnya.

Teknologi pencetakan 3D FDM dapat mencetak komponen nyata lapis demi lapis sebagai teknologi pembuatan *rapid prototyping*. Seperti ditunjukkan pada Gambar 1, mesin 3D FDM menggunakan filamen untuk membangun objek 3D yang terbuat dari bahan termoplastik. Filamen diekstrusi ke dalam pemanas, diubah menjadi semi-cair dan dikeluarkan melalui nozel. Kemudian bahan semi-cair mengeras dan menempel karena dingin dengan bahan sebelumnya. Filamen yang dipilih dalam karya ini adalah PLA yang merupakan termoplastik industri yang banyak diminati karena berbiaya rendah dalam proses fabrikasi dan ramah lingkungan [10]. Keuntungan tersebut menjadikan pencetakan 3D berbahan PLA memiliki prospek pengembangan yang luas.

Hasil pencetakan 3D memiliki keuntungan daya tahan yang tinggi dan akurasi dimensi yang baik pada pencetakan multi objek [11]. Namun, dibandingkan dengan proses manufaktur subtraktif, komponen cetakan 3D memiliki kelemahan *impact*, kekuatan tarik (*tensile strength*) dan *flexural bending* yang tidak seragam [12-13]. Kelemahan ini terjadi karena pola berlapis objek yang dibuat mempunyai sifat tarik anisotropi. Pola cetak objek yang diproduksi FDM mempengaruhi jumlah bahan yang digunakan serta kekuatan tarik tergantung pada kepadatan isi (*infill density*) [14]. Ketika bidang *interlayer* diberikan pembebanan sejajar maka kekuatan tarik meningkat. Sedangkan, kekuatan tarik menurun ketika gaya tegak lurus terhadap bidang *interlayer*. Sifat tarik anisotropi perlu diperhatikan dan harus dipertimbangkan dalam desain pencetakan 3D FDM [15-16]. Oleh karena itu, mempelajari parameter pencetakan 3D FDM sangatlah penting untuk meningkatkan sifat mekanik produk cetakan 3D.



Gambar 1. Skema FDM 3D printer

Di sisi lain, kualitas produk yang dihasilkan dipengaruhi oleh parameter yang diinput kedalam mesin pencetak 3D. Berbagai penelitian telah dilakukan dengan menggunakan variasi parameter input dan mengamati output pencetakan. Ketebalan lapisan memiliki efek yang cukup besar pada output sifat mekanik [17-18]. Pengujian dan karakterisasi meliputi kekuatan tarik, waktu pencetakan, dan kualitas ikatan antar *layer* telah diamati sebelumnya [19–21]. Parameter pola pencetakan dievaluasi melalui percobaan berbagai macam pola yang dibentuk seperti *rectangular*, *triangle*, *honeycomb*, *hexagon* dan *tri-hexagon*. Perbedaan pola cetakan menyebabkan perbedaan nilai kekuatannya [11, 22-23]. Penelitian terdahulu [24] menganalisa kegagalan dan karakterisasi mekanik model ABS melalui 3D FDM dengan parameter ketebalan *layer* dan orientasi pencetakan. Hasil ditemukan bahwa orientasi dengan sudut pencetakan 0° dan jarak *layer* lebih rendah menunjukkan kekuatan tarik tertinggi [24]. Selain itu, pengaruh lubang nozzle untuk mengetahui nilai *pressure drop* dan vibrasi nozzle mempengaruhi struktur permukaan dan kekuatan tarik pada pencetakan 3D FDM berbahan PLA [25-26]. Orientasi pencetakan juga telah diselidiki untuk mengetahui sifat mekanik dari hasil cetakan [27]. Hasilnya menunjukkan bahwa cetakan dengan orientasi horisontal lebih tinggi nilai kekuatan tariknya jika dibandingkan orientasi vertikal. Untuk memperluas dan mempercepat aplikasi pencetakan 3D FDM, penelitian ini dikhususkan untuk mengkaji kekuatan tarik dari hasil pencetakan 3D.

Meskipun teknologi pencetakan 3D memiliki keunggulan dalam produksi bagian yang rumit atau multi-materi [28-29], Prototipe fungsional menuntut sifat mekanik yang dapat diterima, sehingga dibutuhkan metode penggunaan teknologi pencetak 3D untuk membuat objek dengan sifat tarik yang memenuhi kebutuhan industri. Dengan demikian,

penelitian ini memiliki ruang lingkup yang lebih luas dan beragam dalam menganalisis kekuatan tarik hasil cetakan *3D printing* dibandingkan dengan penelitian sebelumnya yang hanya memfokuskan pada beberapa parameter tertentu. Parameter penting tentang pengaruh kepadatan isi, ketinggian *layer*, pola, suhu, orientasi, kecepatan dan sudut pencetakan diamati dari hasil cetakan 3D FDM. Akhirnya, kekuatan tarik didapatkan dari pengujian sampel pada masing-masing parameter pencetakan, sehingga dapat memberikan rekomendasi parameter pencetakan yang tepat untuk menghasilkan cetakan dengan sifat mekanik yang diperlukan.

2. Material dan metodologi

2.1. Pemilihan parameter pencetakan

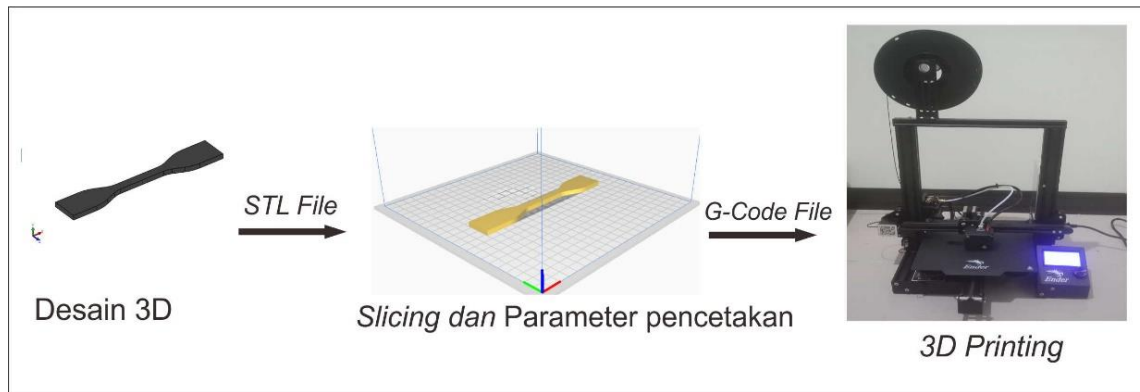
Pemilihan parameter pencetakan pada 3D FDM didasarkan pada berbagai faktor dan pertimbangan yang bertujuan untuk mencapai hasil cetakan yang optimal sesuai dengan kebutuhan dan karakteristik objek yang akan dicetak. Beberapa parameter proses pencetakan yang menyebabkan perubahan signifikan pada sifat mekanik dipilih untuk menyelidiki secara komprehensif dampak dari produk yang dihasilkan. Pemilihan parameter tersebut ditunjukkan seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter pencetakan

Parameter pencetakan	Spesifikasi
Pola isi pencetakan	<i>Line, Grid, Triangle, Tri-Hexagon</i>
Kepadatan/ densitas pencetakan	20%, 40%, 60%, 80%, 100%
Kecepatan pencetakan (mm/s)	40, 50, 60,70
Ketinggian <i>layer</i> (mm)	0.12, 0.16, 0.2
Suhu ekstruder (°C)	190, 200, 210, 220
Suhu papan (°C)	80
Diameter <i>nozzle</i> (mm)	0.4
Ketebalan atas/ bawah (mm)	0.8
Ketebalan dinding (mm)	0.5

2.2. Bahan dan mesin cetak 3D

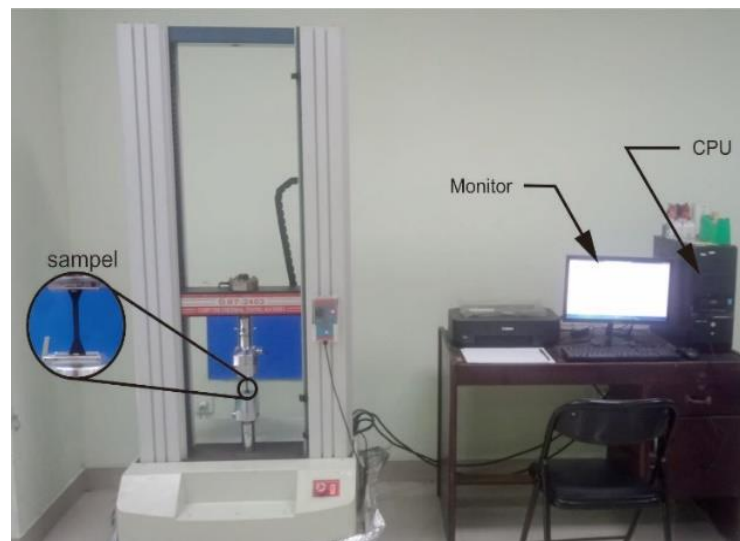
Desain 3D virtual sampel dilakukan menggunakan *software Computer Aided Design (CAD)* untuk membuat desain uji tarik standar *ASTM D 638-IV*. Desain sampel disimpan dalam format *Stereolithography (STL)* untuk kemudian diatur parameter pencetakan dan di-*slicing* dalam *software Cura Ultimaker*. Hasil format file *G-code* dicetak menggunakan mesin bermerk *Creality Ender 3 Pro* dengan filamen berbahan HP ultra PLA berdiameter 1,75 mm. Gambar 2 merupakan skema proses pembuatan sampel uji dari desain 3D sampai pencetakan.



Gambar 2. Proses pembuatan sampel uji

2.3. Pengujian tarik

Untuk menyelidiki sifat mekanik sampel yang telah dibuat, uji tarik dilakukan dalam penelitian ini. Mesin uji tarik universal yang kami gunakan berada di laboratorium pengujian material Universitas Muhammadiyah Semarang. Sampel ditarik dengan kecepatan 3 mm/menit sampai putus. Hasil data yang terekam dalam komputer kemudian diolah. Persiapan pengujian tarik ditunjukkan pada Gambar 3.



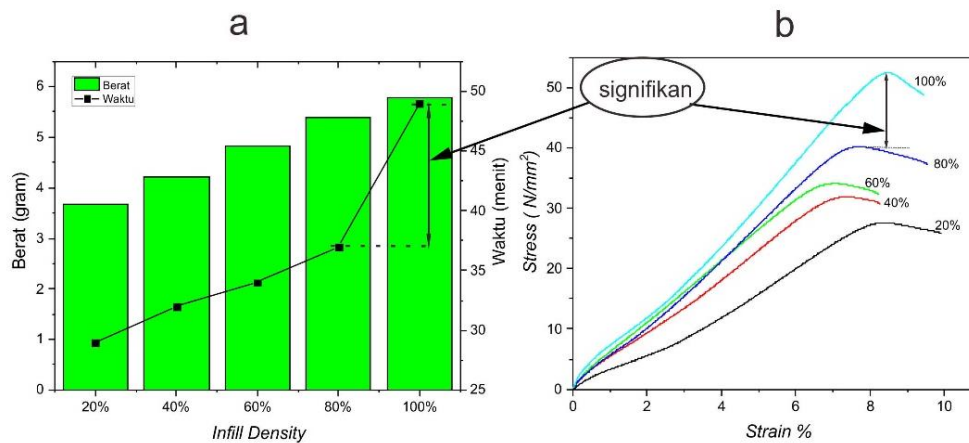
Gambar 3. Tensile test

3. Hasil dan pembahasan

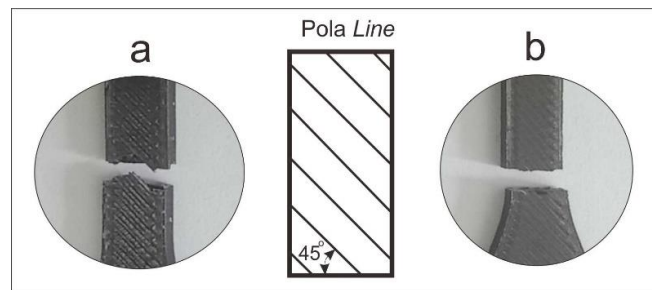
3.1. Pengaruh kepadatan isi (*infill density*)

Kepadatan isi cetakan mengindikasikan kerapatan jarak pencetakan pada sumbu X atau sumbu Y. Semakin meningkat kepadatan isi menyebabkan kekuatan tarik meningkat akan tetapi menambah berat sampel dan menyebabkan durasi pencetakan semakin lama [14,30]. Gambar 4 merupakan grafik hubungan antara kepadatan isi dengan berat dan waktu serta *stress vs strain* pada persentase kepadatan isi. Gambar 4.a menunjukkan durasi pencetakan meningkat secara signifikan pada kepadatan 80% ke 100% dibandingkan 20% sampai 80%. Pada Gambar 4.b, peningkatan secara signifikan pada durasi pencetakan tidak hanya terjadi pada waktu pencetakan tetapi juga pada hasil pengujian tarik

dimana terjadi peningkatan nilai tegangan yang tinggi. Dengan kata lain, mengubah persentase kepadatan isi berarti mengubah kekuatan tariknya [31].



Gambar 4. Pengaruh persentase kepadatan isi (*infill density*) pada: a. berat dan waktu, b. *stress vs strain*

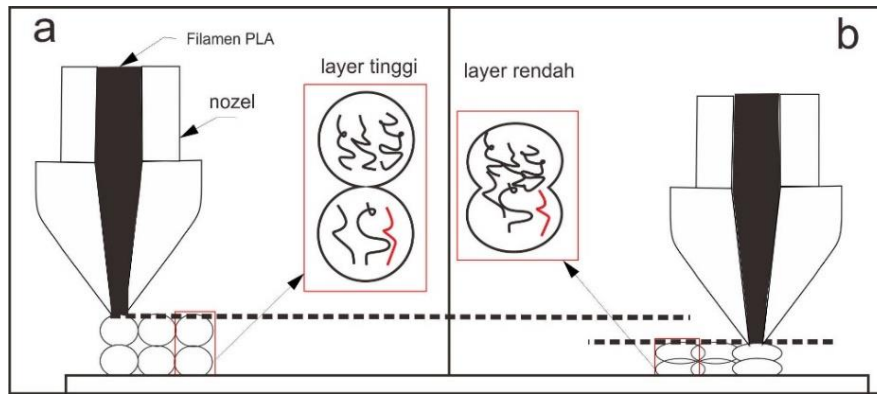


Gambar 5. Pola patahan pengujian tarik dengan persentase kepadatan isi: a. 20%, b. 100%

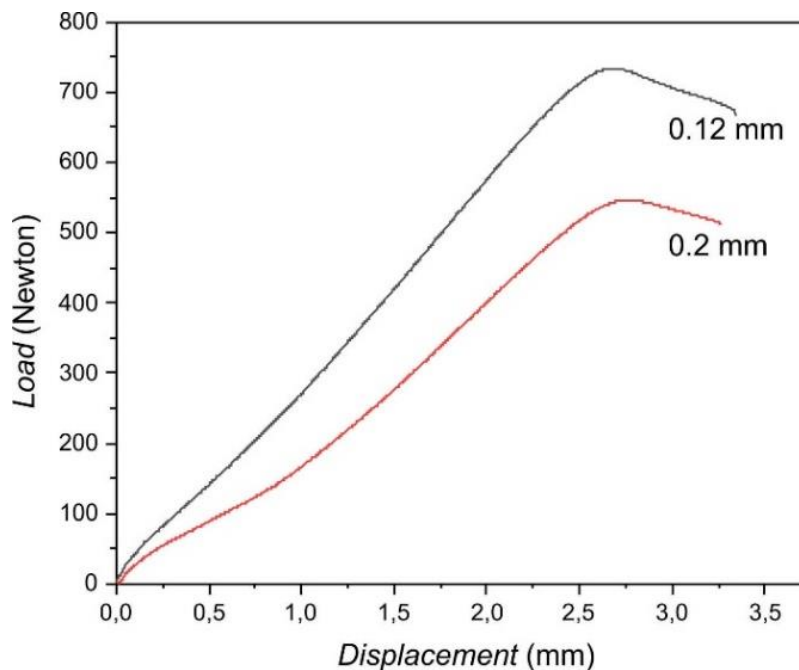
Pengaruh lain dari kepadatan isi pada pengujian tarik adalah perbedaan pola patahan (*fracture*). Pada Gambar 5 sampel dengan pola garis cetakan bersudut 45°, pola *fraktur* pada kepadatan isi 20% lebih mendekati sudut pola garis cetakan jika dibanding kepadatan isi 100% [32-33]. Hasil cetakan dengan persentase kepadatan isi 100% arah fraktur lebih tegak lurus terhadap gaya tarik.

3.2. Pengaruh ketinggian *layer*

Dampak yang disebabkan dari perbedaan tinggi *layer* adalah bentuk dari filamen yang keluar dari nozzle. Seperti ditunjukkan pada Gambar 6 semakin tinggi *layer* maka bentuk filamen cenderung bulat dan ikatan antara *layer* lemah. Semakin rendah *layer* maka bentuk dari filamen akan oval sehingga menutup ruang kosong antar *layer* yang menyebabkan ikatan menjadi kuat karena terbentuknya gabungan filamen yang memungkinkan untuk berdifusi antar molekul [34]. Difusi antar molekul akan meningkat melalui proses pemanasan lanjut [35-36]. Pada Gambar 7 menunjukkan bahwa hasil uji tarik *load vs displacement* dengan tinggi *layer* 0.12 mm lebih kuat menahan beban jika dibanding tinggi *layer* 0.2 mm. Hal ini menandakan bahwa terjadi ikatan yang lebih kuat pada hasil cetakan dengan tinggi *layer* yang lebih rendah.



Gambar 6. Pengaruh ketinggian *layer* terhadap ikatan antar filamen



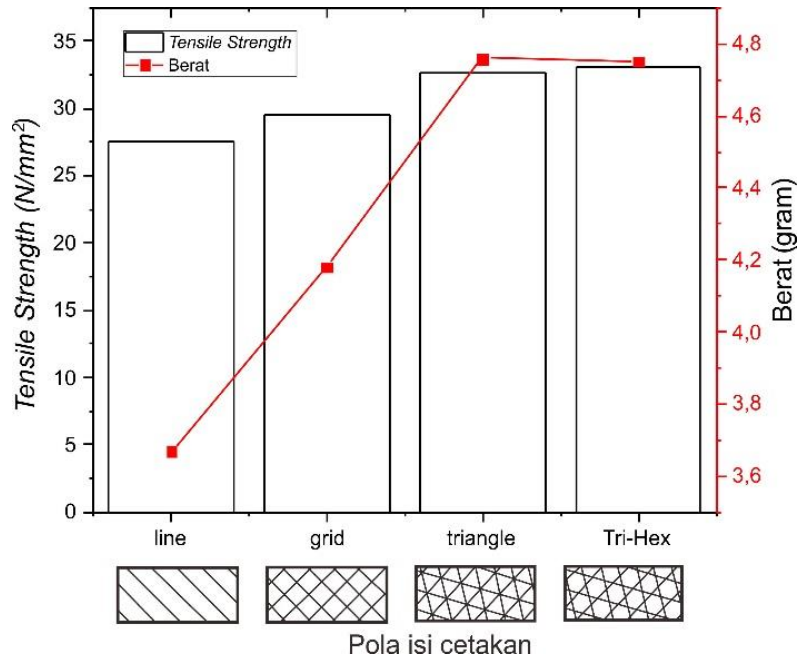
Gambar 7. Pengaruh ketinggian *layer* pada *Load vs Displacement*

3.3. Pengaruh pola pencetakan (*Infill Pattern*)

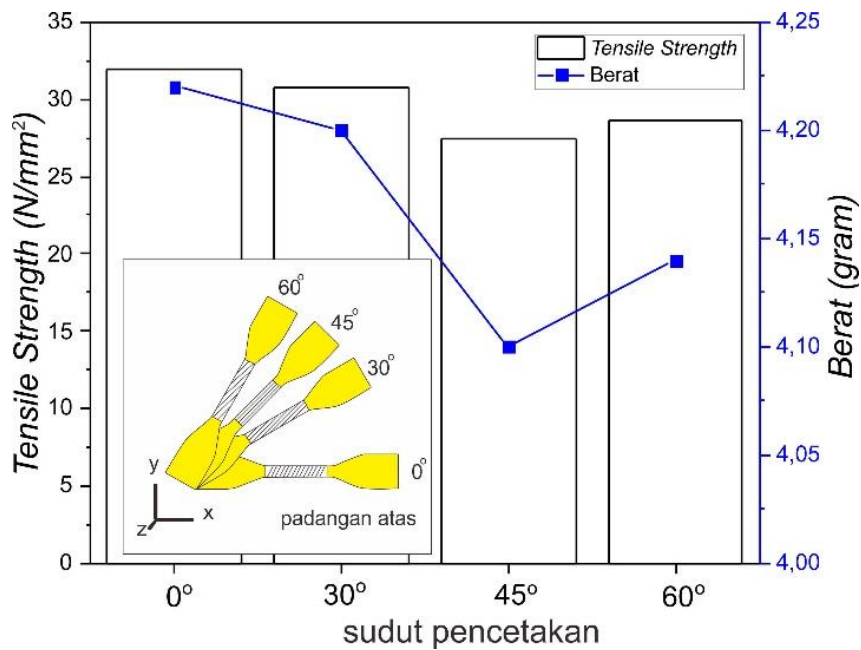
Pola pencetakan (*Infill pattern*) mengontrol pergerakan *nozzle* pada arah X dan Y di daerah cetakan. Gambar 8 menunjukkan bahwa pola pencetakan mempengaruhi kekuatan tarik dan kerapatan dari masing-masing hasil cetakan. Kerapatan pola tersebut juga mengakibatkan peningkatan berat yang berdampak pada peningkatan nilai kekuatan tariknya. Banyaknya kontak poin pada pola *triangle* dan *tri-hex* menyebabkan pengaruh terhadap performa kekuatan tariknya [30,37], sedangkan berat dan kekuatan cenderung sama. Pola garis dengan kerapatan yang rendah memiliki nilai uji tarik yang rendah pula karena sedikit terdapat kontak poin.

3.4. Pengaruh sudut dan orientasi pencetakan

Sudut pencetakan mempengaruhi kemiringan garis pencetakan, pada pencetakan sudut 45° menghasilkan pola cetakan yang lurus. Hal ini menyebabkan nilai kekuatan tarik berkurang karena kepadatan dan beratnya menurun. Hasil pengujian seperti ditunjukkan pada Gambar 9 didapatkan bahwa pencetakan dengan sudut 0° menghasilkan kekuatan tarik yang lebih tinggi dibanding sudut yang lainnya [38].

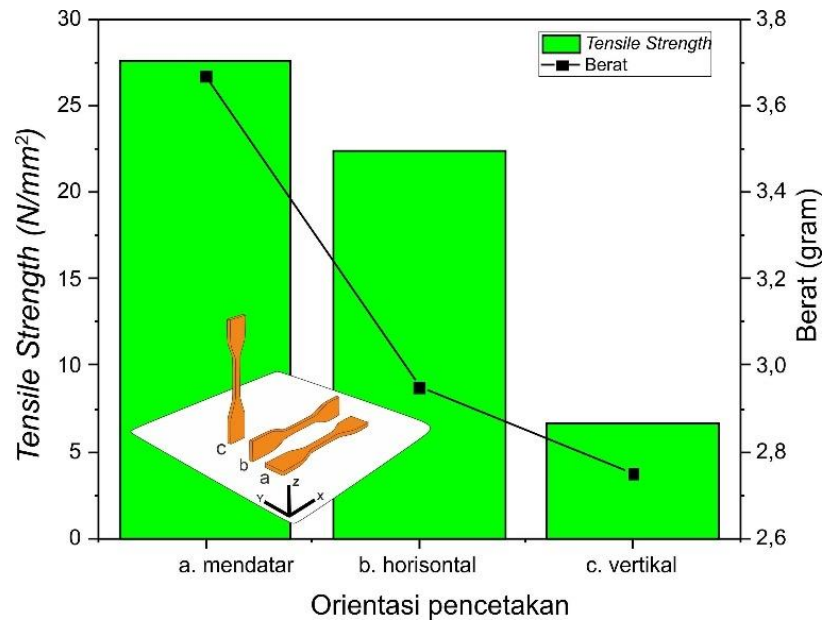


Gambar 8. Pengaruh pola pencetakan pada berat dan kekuatan tarik



Gambar 9. Pengaruh sudut pencetakan terhadap berat dan kekuatan tarik

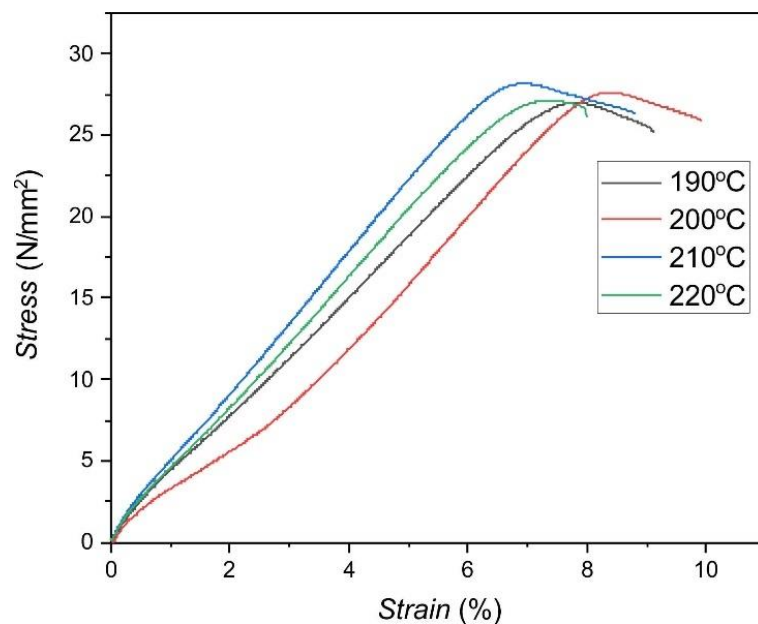
Sedangkan untuk pengaruh orientasi pencetakan seperti ditunjukkan pada Gambar 10, nilai terendah dimiliki dengan pencetakan vertikal yaitu 90⁰ terhadap sumbu Y [39]. Perbandingan antara kekuatan dan berat yang menurun pada pencetakan vertikal yaitu sebesar 2.40 N/mm² per gram sedangkan untuk cetakan mendatar dan horisontal adalah 7.52 dan 7.58 N/mm² per gram. Penurunan kekuatan tarik terjadi karena pola cetakan yang tegak lurus dengan pembebanan pengujian tarik.



Gambar 10. Pengaruh orientasi pencetakan terhadap kekuatan tarik dan berat

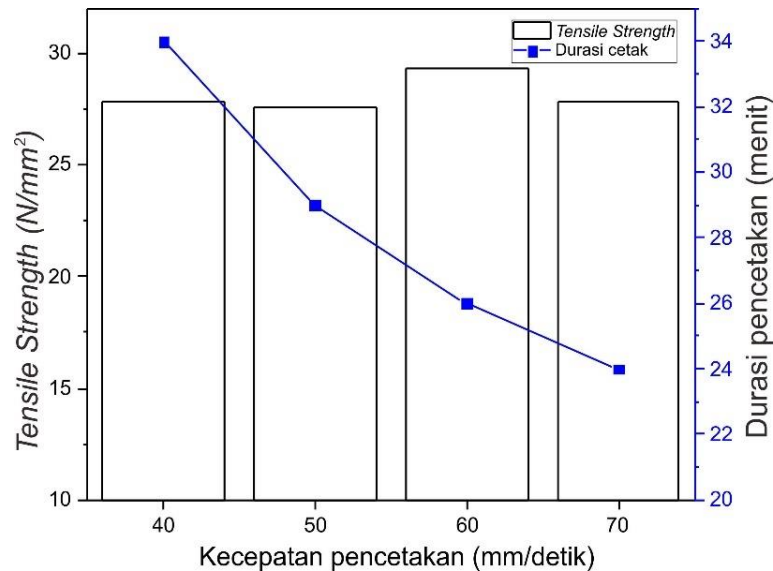
3.5. Pengaruh temperatur dan kecepatan pencetakan

Pada Gambar 11 menunjukkan bahwa pengaruh temperatur terhadap hasil pencetakan didapat hasil tegangan terbaik pada suhu 200 – 210 °C dimana pada pencetakan suhu 200 °C nilai *strain* lebih tinggi. Pada suhu pencetakan 190 °C, filamen hasil ekstrusi yang keluar dari *nozzle* akan lebih cepat mengalami pendinginan karena suhu lebih rendah. Hal ini menyebabkan waktu terjadi difusi antar *layer* semakin terbatas karena filamen dingin dan mengeras. Lemahnya difusi antar *layer* menyebabkan berkurangnya kekuatan mekanik [40]. Selain itu kecepatan pencetakan berpengaruh besar pada durasi pencetakan yang diperlukan. Gambar 12 menunjukkan pengaruh kecepatan pencetakan terhadap durasi waktu dan kekuatan tariknya. Semakin tinggi kecepatan pencetakan, waktu yang diperlukan semakin sedikit tetapi hal ini tidak berlaku untuk kekuatan tariknya. Hasil pengujian pencetakan dengan kecepatan 60 mm/s memiliki kekuatan tarik yang lebih unggul dibanding yang lain.



Gambar 11. Pengaruh temperatur terhadap *stress dan strain*

Semua parameter yang telah dilakukan, dibandingkan dan dipilih untuk menentukan parameter terbaik dengan mengamati kekuatan tarik dan berat sampel. Dari hasil uji tarik pada berbagai parameter pencetakan didapat hasil pencetakan dengan nilai kekuatan tarik dan berat sampel. Sehingga didapat kesimpulan untuk rekomendasi pencetakan *FDM 3D printing* seperti ditunjukkan pada Tabel 2.



Gambar 12. Pengaruh kecepatan pencetakan pada durasi pencetakan dan *tensile strength*

Tabel 2. Rekomendasi parameter pencetakan 3D PLA metode FDM

Parameter	Kepadatan (<i>Infill density</i>)	Tinggi <i>layer</i>	Pola pencetakan	Suhu ekstruder	Sudut	Orientasi
Spesifikasi	100%	0.12	<i>Line</i>	210 °C	0°	horisontal
Kekuatan tarik / berat	9.08	9.88	7.52	7.78	7.52	7.59

4. Kesimpulan

Pada penelitian ini, teknologi FDM digunakan untuk membuat sampel 3D dengan beberapa parameter penting untuk sampel uji tarik. Sifat mekanik yang dihasilkan dari model yang dicetak dengan bahan PLA dipelajari untuk memberikan rekomendasi hasil pencetakan yang sesuai. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin besar persentase kepadatan pencetakan maka akan meningkatkan nilai uji tariknya meskipun membutuhkan waktu pencetakan yang lebih lama. Pola pencetakan *line* dengan ketinggian *layer* 0,12 mm pada pencetakan suhu *nozzle* 210 °C akan menghasilkan perbandingan nilai kekuatan tarik dan berat yang tinggi. Sudut pencetakan kami sarankan menggunakan 0° dengan orientasi horisontal.

Daftar Pustaka

- [1] Wang P., Zou B., Ding S., Li L., and Huang C. Effects of FDM-3D printing parameters on mechanical properties and microstructure of CF/PEEK and GF/PEEK. *Chinese J Aeronaut.* 2021; 34: p. 236–46.

- [2] Yang T.C and Yeh C.H. Morphology and mechanical properties of 3D printed wood fiber/polylactic acid composite parts using Fused Deposition Modeling (FDM): The effects of printing speed. *Polymers (Basel)*. 2020; 12: p. 1334.
- [3] Torrado Perez AR, Roberson DA, Wicker RB. Fracture surface analysis of 3D-printed tensile specimens of novel ABS-based materials. *J Fail Anal Prev*. 2014; 14: p. 343–53.
- [4] Saviano M, Bowles BJ, Penny MR, Ishaq A, Muwaffak Z, Falcone G, et al. Development and analysis of a novel loading technique for FDM 3D printed systems: Microwave-assisted impregnation of gastro-retentive PVA capsular devices. *Int J Pharm*. 2022; 613: p. 121386.
- [5] Schieberle P. The Chemistry and Technology of Magnesia. *ACS Symp. Ser.* 2006; 754: p. 262–75.
- [6] Javaid M and Haleem A. Additive manufacturing applications in medical cases: A literature based review. *Alexandria J Med*. 2018; 54: p. 411–22.
- [7] Anggoro paulus W, Winarso R, Ismail R, Jamari J, Bayuseno AP. Application of fused deposition modeling (FDM) on bone scaffold manufacturing process: A review. *SSRN Electron J*. 2022; 8: p. e11701.
- [8] Najmon JC, Raeisi S., and Tovar A. Review of additive manufacturing technologies and applications in the aerospace industry. Elsevier Inc. 2019; p. 7-13.
- [9] Mohanavel V, Ashraff Ali KS, Ranganathan K, Allen Jeffrey J, Ravikumar MM, et al. The roles and applications of additive manufacturing in the aerospace and automobile sector. *Mater Today Proc*. 2021; 47: p. 405–9.
- [10] Qi X, Ren Y and Wang X. New advances in the biodegradation of polylactic acid. *Int Biodeterior Biodegrad*. 2017; 117: p. 215–23.
- [11] Patil P, Singh D, Raykar SJ and Bhamu J. Multi-objective optimization of process parameters of Fused Deposition Modeling (FDM) for printing Polylactic Acid (PLA) polymer components. *Mater Today Proc* . 2021; 45: p. 4880–5.
- [12] Raut NP, Kolekar AB. Experimental analysis of 3D printed specimens with different printing parameters for Izod impact strength. *Mater Today Proc*. 2022; 80: p. 156-162.
- [13] Abas M, Habib T, Noor S, Salah B and Zimon D. Parametric investigation and optimization to study the effect of process parameters on the dimensional deviation of fused deposition modeling of 3D printed parts. *Polymers (Basel)*. 2022; 14(17): 3667.
- [14] Soud W, Baqer I and Ahmed M. Experimental Study of 3D printing Density Effect on the Mechanical Properties of the Carbon-Fiber and Polylactic Acid Specimens. *Eng Technol J*. 2019; 37: p. 128–32.
- [15] Domingo-Espin M, Puigoriol-Forcada JM, Garcia-Granada AA, Llumà J and Borros S, Reyes G. Mechanical property characterization and simulation of fused deposition modeling Polycarbonate parts. *Mater Des*. 2015; 83: p. 670–7.
- [16] Es-Said OS, Foyos J, Noorani R, Mendelson M, Marloth R, et al. Effect of layer orientation on mechanical properties of rapid prototyped samples. *Mater Manuf Process*. 2000; 15: p. 107–22.
- [17] Sikder P, Challa BT, Gummadi SK. A comprehensive analysis on the processing structure property relationships of FDM-based 3D printed polyetheretherketone (PEEK) structures. *Materialia*. 2022; 22: p. 101427.
- [18] Geng P, Zhao J, Wu W, Ye W, Wang Y, Wang S, et al. Effects of extrusion speed and printing speed on the 3D printing stability of extruded PEEK filament. *J Manuf Process*. 2019; 37: p. 266–73.
- [19] Bhosale V, Gaikwad P, Dhere S, Sutar C, Raykar SJ. Analysis of process parameters of 3D printing for surface finish, printing time and tensile strength. *Mater Today Proc*. 2022; 59: p. 841–6.

- [20] Hasdiansah H dan Suzen ZS. Pengaruh Geometri Infill terhadap Kekuatan Tarik Spesimen Uji Tarik ASTM D638 Type IV Menggunakan Filamen PLA+ Sugoi. *J Rekayasa Mesin*. 2021; 16: p. 140.
- [21] Cahyati S dan Marpaung A. Pengaruh kecepatan putaran kipas pendingin pada mesin 3D printing terhadap kekasaran permukaan produk cetak. *Jurnal Rekayasa Mesin*. 2022; 17: p. 343–50.
- [22] Kumar Mawandiya B, Pancholi K, Shah DB and Joshi SJ. Parametric study on process parameters of FDM 3D printer for thermoplastic materials. *Mater Today Proc*. 2022; 59: p. 373–8.
- [23] Naranjo-Lozada J, Ahuett-Garza H, Orta-Castañón P, Verbeeten WMH and Sáiz-González D. Tensile properties and failure behavior of chopped and continuous carbon fiber composites produced by additive manufacturing. *Addit Manuf*. 2019; 26: p. 227–41.
- [24] Rankouhi B, Javadpour S, Delfanian F, Letcher T. Failure analysis and mechanical characterization of 3D Printed ABS with respect to layer thickness and orientation. *J Fail Anal Prev*. 2016; 16: p. 467–81.
- [25] Sukindar NA, Ariffin MKA, Hang Tuah Baharudin BT, Jaafar CAN and Ismail MIS. Analyzing the effect of nozzle diameter in fused deposition modeling for extruding polylactic acid using open source 3D printing. *J Teknol*. 2016; 78: p. 7–15.
- [26] Chen F, Xu Q, Huang F, Xie Z and Fang H. Effect of nozzle vibration at different frequencies on surface structures and tensile properties of PLA parts printed by FDM. *Mater Lett*. 2022; 325: p. 132612.
- [27] Giri J, Chiwande A, Gupta Y, Mahatme C, Giri P. Effect of process parameters on mechanical properties of 3D printed samples using FDM process. *Mater Today Proc*. 2021; 47: p. 5856–61.
- [28] Tan JC, Tan MC, Low HY, Douarville-Blaise JP, Matroja R and Charnace HG. 3D interfacial geometries for co-optimized capacitance and mechanical properties in multi-material printing. *Mater Today Proc*. 2022; 70: p. 660-665.
- [29] Heidari-Rarani M, Rafiee-Afarani M and Zahedi AM. Mechanical characterization of FDM 3D printing of continuous carbon fiber reinforced PLA composites. *Compos Part B Eng*. 2019; 175: p. 107147.
- [30] Maurya S, Malik B, Sharma P, Singh A and Chalisgaonkar R. Investigation of different parameters of cube printed using PLA by FDM 3D printer. *Mater Today Proc*. 2022; 64: p. 1217–22.
- [31] Fernandez-Vicente M, Calle W, Ferrandiz S and Conejero A. Effect of infill parameters on tensile mechanical behavior in desktop 3D printing. *3D Print Addit Manuf*. 2016; 3: p. 183–92.
- [32] Yao T, Ye J, Deng Z, Zhang K, Ma Y and Ouyang H. Tensile failure strength and separation angle of FDM 3D printing PLA material: Experimental and theoretical analyses. *Compos Part B Eng*. 2020; 188: p. 107894.
- [33] Marşavina L, Vălean C, Mărghiţaş M, Linul E, Razavi SMJ, Berto F, et al. Effect of the manufacturing parameters on the tensile and fracture properties of FDM 3D-printed PLA specimens. *Eng Fract Mech*. 2022; 274: p. 108766.
- [34] Liu Z, Wang Y, Wu B, Cui C, Guo Y and Yan C. A critical review of fused deposition modeling 3D printing technology in manufacturing polylactic acid parts. *Int J Adv Manuf Technol*. 2019; 102: p. 2877–89.
- [35] Garzon-Hernandez S, Garcia-Gonzalez D, Jérusalem A and Arias A. Design of FDM 3D printed polymers: An experimental-modelling methodology for the prediction of mechanical properties. *Mater Des*. 2020; 188: p. 108414.
- [36] Szust A, Adamski G. Using thermal annealing and salt remelting to increase tensile properties of 3D FDM prints. *Eng Fail Anal* 2022; 132: p. 105932.
- [37] Aloyaydi B, Sivasankaran S and Mustafa A. Investigation of infill-patterns on mechanical response of 3D printed poly-lactic-acid. *Polym Test*. 2020; 87: p. 106557.

- [38] Tao Y, Li P and Pan L. Improving tensile properties of polylactic acid parts by adjusting printing parameters of open source 3D printers. *Medziagotyra*. 2020; 26: p. 83–7.
- [39] Hsueh MH, Lai CJ, Chung CF, Wang SH, Huang WC, Pan CY, et al. Effect of printing parameters on the tensile properties of 3d-printed polylactic acid (Pla) based on fused deposition modeling. *Polymers (Basel)*. 2021; 13.
- [40] Abeykoon C, Sri-Amphorn P and Fernando A. Optimization of fused deposition modeling parameters for improved PLA and ABS 3D printed structures. *Int J Light Mater Manuf*. 2020; 3: p. 284–297.