

Pengaruh Pasca-Pemrosesan Annealing Terhadap Sifat Mekanis Polimer Hasil Cetak 3D Fused Deposition Modeling (FDM)

Juan Pratama^{1*}

¹Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Darma Persada

Jl. Taman Malaka Selatan No. 22, Pondok Kelapa, Duren Sawit, DKI Jakarta, Indonesia 13450

*Koresponden: juan_pratama@ft.unsada.ac.id

Abstrak

Pada masa kini, teknologi pencetakan 3-dimensi (3D) dengan jenis Fused Deposition Modeling (FDM) guna pemrosesan material polimer telah banyak dikenal dan digunakan karena kapabilitasnya untuk memproduksi suatu produk dengan bentuk yang kompleks. Meskipun memiliki banyak keuntungan, produk hasil cetak 3D FDM juga memiliki beberapa kekurangan, dimana sifat mekanis yang rendah merupakan salah satu kelemahan utama dari produk hasil cetak 3D FDM yang disebabkan oleh proses pendinginan yang tidak seragam pada material polimer hasil cetak 3D FDM. Pada penelitian ini, pasca pemrosesan annealing dilakukan untuk mengetahui pengaruh pemanasan kembali dan pendinginan seragam terhadap sifat mekanis polylactic acid (PLA) hasil cetak 3D FDM. Spesimen dicetak dengan memvariasikan sudut raster pada parameter cetak. Kemudian, 3 variasi suhu annealing digunakan yaitu 80, 120, dan 150 °C. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pasca pemrosesan annealing tidak memiliki pengaruh signifikan pada kekuatan tarik, elongasi, serta modulus elastisitas dari PLA hasil cetak 3D FDM, terlepas dari sudut raster yang digunakan. Pada akhirnya, penelitian ini dapat mengkonfirmasi salah satu temuan terdahulu dimana pasca pemrosesan annealing merupakan metode yang kurang efektif untuk meningkatkan sifat mekanis hasil cetak 3D FDM, khususnya PLA.

Kata kunci: Fused Deposition Modeling (FDM), Pasca Pemrosesan Annealing, Pencetakan 3D, Sifat Mekanis.

Abstract

Nowadays, 3-dimensional (3D) printing technology using the Fused Deposition Modeling (FDM) type for processing polymer materials is widely known and used because of its capability to produce products with complex shapes. Even though they have many advantages, FDM 3D printed products also have several disadvantages, where low mechanical properties are one of the main weaknesses of FDM 3D printed products caused by the non-uniform cooling process in the FDM 3D printed polymer material. In this research, post-processing annealing was carried out to determine the effect of reheating and uniform cooling on the mechanical properties of polylactic acid (PLA) 3D printed FDM results. The specimens were printed by varying the raster angle in the print parameters. Then, 3 variations of annealing temperature were used, i.e., 80, 120, and 150 °C. The research results show that post-processing annealing does not have a significant effect on the tensile strength, elongation, and elastic modulus of 3D FDM printed PLA, regardless of the raster angle used. In the end, this research can confirm one of the previous findings that post-processing annealing is a less effective method for improving the mechanical properties of FDM 3D printed products, especially PLA.

Keywords: 3D printing, Annealing post-processing, Fused Deposition Modeling (FDM), Mechanical properties.

1. Pendahuluan

Pada masa kini, teknologi pencetakan 3-dimensi (3D) dengan jenis Fused Deposition Modeling (FDM) guna pemrosesan material polimer telah banyak dikenal dan digunakan karena kapabilitasnya untuk memproduksi suatu produk dengan bentuk yang kompleks [1]. Beberapa keuntungan yang dimiliki oleh proses ini antara lain adalah proses fabrikasi yang sederhana namun aman [2], tidak membutuhkan pahat [3], harga mesin yang murah [4-5], pergantian material yang mudah [6], waktu pemrosesan yang singkat [7-8], serta tidak menghasilkan banyak limbah [9]. Meskipun memiliki banyak keuntungan, produk hasil cetak 3D FDM juga memiliki beberapa kekurangan, dimana sifat mekanis yang rendah merupakan salah satu kelemahan utama dari produk hasil cetak 3D FDM [10]. Hal ini salah satunya disebabkan oleh proses pendinginan yang tidak seragam pada material

polimer hasil cetak 3D FDM [11-12]. Pada akhirnya, fenomena ini akan menimbulkan tegangan sisa yang menyebabkan terbentuknya retakan dini, dan berakhir pada kegagalan produk [13].

Untuk mencegah masalah ini, pasca pemrosesan annealing merupakan salah satu metode yang dipilih yang dapat digunakan setelah proses pencetakan untuk mencapai pemerataan pemanasan dan laju pendinginan yang seragam di seluruh bagian hasil cetak FDM [14]. Teknik annealing pada dasarnya merupakan proses pemanasan kembali suatu produk hasil cetak sampai dengan suhu tertentu, sehingga selanjutnya proses pendinginan akan terjadi secara bersamaan dan seragam pada setiap bagian dari material. Akan tetapi, belum banyak penelitian yang ditemukan yang difokuskan pada permasalahan ini. Penelitian sebelumnya menyebutkan bahwa Ultimate Tensile Strength (UTS) dari polylactic acid (PLA) hasil cetak FDM setelah proses annealing pada suhu 160 °C selama 30 detik mengalami peningkatan sebesar 5% jika dibandingkan dengan UTS PLA tanpa pemrosesan [14]. Kemudian, dengan menambahkan beban sebesar 19N dan meningkatkan durasi annealing menjadi 120 detik, UTS dari PLA hasil cetak FDM dapat meningkat sampai dengan 10,2% [14]. Sebaliknya, pada penelitian lain ditemukan bahwa pasca pemrosesan annealing pada PLA hasil cetak FDM tidak memiliki efek signifikan pada UTS dan modulus, yang mungkin disebabkan oleh degradasi termal pada molekul material tersebut [15].

Sampai saat ini, belum ditemukan penelitian lebih lanjut yang difokuskan pada pengaruh pasca pemrosesan annealing terhadap sifat mekanis polimer hasil cetak FDM, khususnya PLA. Di sisi lain, kedua penelitian yang ada juga menunjukkan hasil yang bertolak belakang. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh pasca pemrosesan annealing pada material PLA hasil cetak 3D FDM. Pada akhirnya, penelitian ini dapat memberikan informasi lebih lanjut dan dapat mengkonfirmasi salah satu penelitian terdahulu terkait dengan pengaruh pasca pemrosesan annealing pada material PLA hasil cetak 3D FDM.

2. Metodologi

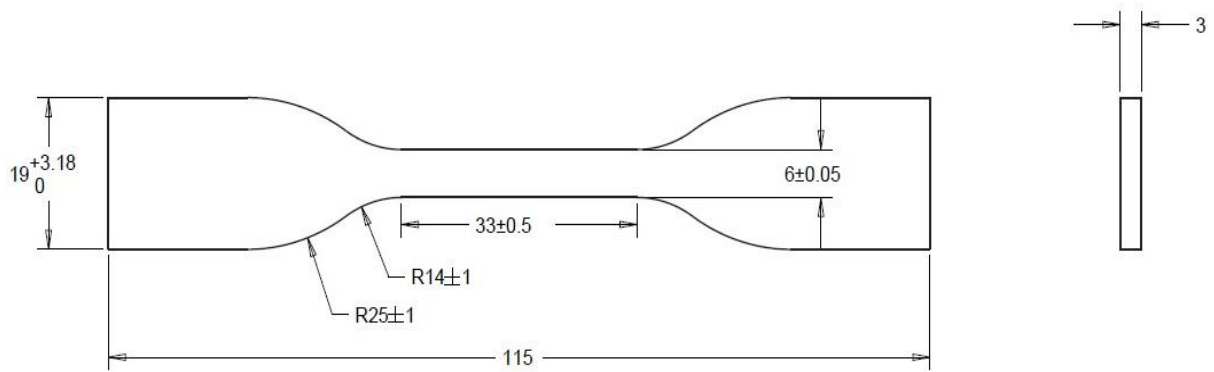
Pada penelitian ini, filamen PLA (Shenzen Esun Industrial Co., Ltd. China) dengan diameter 1,75 mm digunakan untuk membuat spesimen uji tarik yang mengacu pada standar ASTM D638 tipe IV, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1 dalam satuan mm. Spesimen dicetak menggunakan mesin 3D printer Flashforge Creator Pro (Flashforge, China). Parameter pencetakan serta desain eksperimen (DoE) masing-masing ditunjukkan pada Tabel 1 dan 2. Pada Tabel 2, spesimen ‘untreated’ merupakan spesimen tanpa pemanasan ulang yang digunakan sebagai kontrol. Kemudian, proses annealing dilakukan dengan oven konveksi paksa yang dirancang khusus, dimana Gambar 2 menunjukkan skematik oven yang digunakan. Pada penelitian ini, oven hanya digunakan untuk proses annealing atau proses pemanasan ulang, sedangkan meja getaran didalam oven tidak digunakan.

Tabel 1 Parameter pencetakan 3D FDM

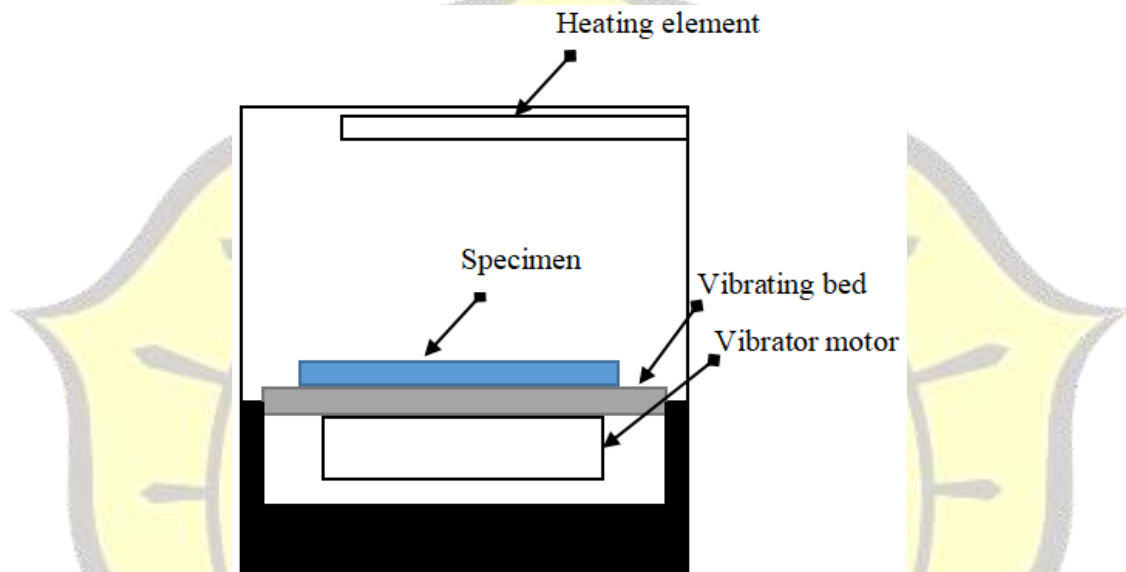
No	Parameter	Unit
1	Suhu ekstrusi	200 °C
2	Raster Angle (RA)	45°/-45° dan 0°/90°
3	Print Speed	35 mm/min
4	Build Orientation	Horizontal
5	Layer Height	0.2 mm
6	Infill Percentage	100%
7	Air Gap	0 mm

Tabel 2 Desain eksperimen (DoE) pada penelitian ini

Material	Raster Angle (RA)	Suhu Annealing	Jumlah Spesimen	Durasi Annealing	Jenis Pengujian
PLA	45°/-45°	Untreated	3	60 detik	Tarik
		80 °C	3		
		120 °C	3		
		150 °C	3		
	0°/90°	Untreated	3	60 detik	Tarik
		80 °C	3		
		120 °C	3		
		150 °C	3		



Gambar 1 Dimensi spesimen uji tarik standar ASTM D638 tipe IV [16]

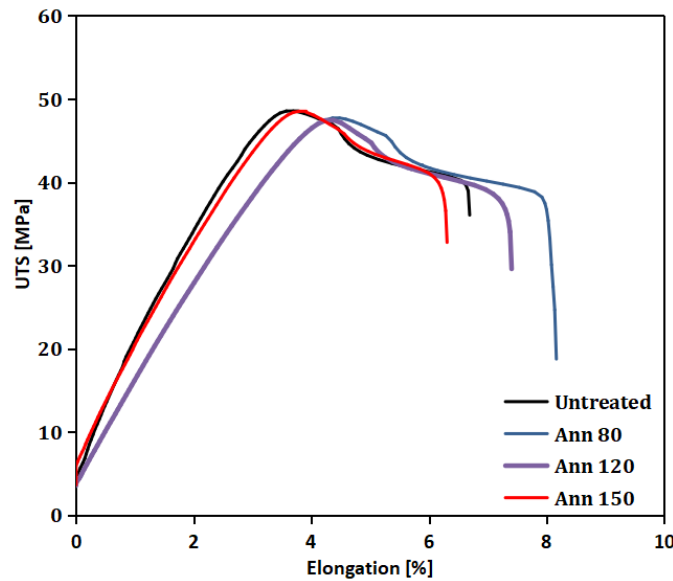


Gambar 2 Skematik oven konveksi paksa yang digunakan pada penelitian ini

Setelah proses annealing selesai dilakukan, spesimen dengan dan tanpa pemrosesan kemudian diuji tarik menggunakan universal testing machine Zwick Roell Z020. Uji tarik dilakukan dengan aplikasi pre-load sebesar 80N dan kecepatan crosshead 5 mm/min sesuai dengan standar ASTM D638 tipe IV.

4. Hasil Dan Pembahasan

Hasil uji tarik berupa kurva tegangan regangan pada spesimen PLA hasil cetak 3D FDM dengan RA 45°/-45° ditunjukkan pada Gambar 3, sedangkan Tabel 3 menunjukkan tabulasi nilai dari hasil pengujian. Hasil pengujian pada PLA hasil cetak FDM dengan RA 45°/-45° menunjukkan bahwa pasca pemrosesan annealing pada suhu 80 dan 120 °C masing-masing menurunkan rata-rata kekuatan tarik PLA dari 48,38 MPa menjadi 47,05 MPa dan 46,99 MPa. Kemudian, kekuatan tarik kembali meningkat menjadi 48,34 MPa setelah mengalami proses annealing pada suhu 150 °C. Meskipun demikian, UTS yang dihasilkan pada spesimen dengan suhu annealing 150 °C tidak memiliki perbedaan signifikan dengan spesimen tanpa pemanasan ulang (untreated). Di sisi lain, juga tidak terlihat perubahan yang signifikan pada elongasi serta modulus elastisitas dari PLA hasil cetak FDM setelah melalui proses annealing. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa pasca pemrosesan annealing tidak memiliki efek signifikan terhadap kekuatan tarik PLA hasil cetak FDM, khususnya yang dicetak dengan RA 45°/-45°.



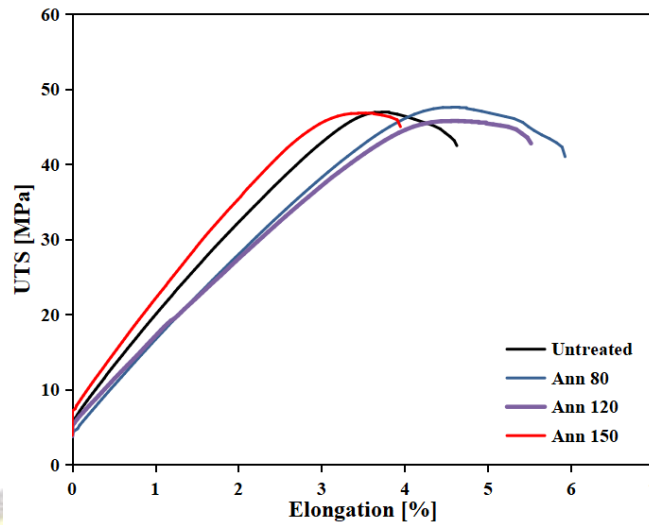
Gambar 3 Kurva tegangan regangan spesimen PLA hasil uji tarik FDM dengan RA 45°/-45°

Tabel 3 Hasil uji tarik spesimen PLA hasil cetak FDM dengan RA 45°/-45°

Spesimen	No	Elongation (mm)	Force (N)	Et (MPa)	σ_M (MPa)	ϵ_M (%)	σ_A
Untreated	1	3.09	921.09	1536.56	48.08	3.15	48.38
	2	3.39	919.90	1270.03	48.48	4.21	
	3	3.56	922.98	1403.33	48.57	3.63	
Annealing 80 °C	1	3.96	938.18	1194.46	47.73	4.42	47.05
	2	2.91	920.67	1175.49	46.40	4.24	
	3	2.63	915.40	1195.98	47.02	4.33	
Annealing 120 °C	1	3.18	930.78	1180.12	46.61	4.30	46.99
	2	3.71	960.30	1192.83	47.48	4.31	
	3	3.11	936.18	1192.01	46.88	4.27	
Annealing 150 °C	1	4.10	931.31	1188.42	46.78	3.48	48.34
	2	3.27	959.61	1296.51	48.51	3.81	
	3	2.44	952.40	1307.61	49.71	3.80	

Hasil uji tarik berupa kurva tegangan regangan pada spesimen PLA hasil cetak 3D FDM dengan RA 0°/90° ditunjukkan pada Gambar 4, sedangkan Tabel 4 menunjukkan tabulasi nilai dari hasil pengujian. Berbeda dengan spesimen yang dicetak dengan RA 45°/-45°, hasil pengujian pada PLA hasil cetak FDM dengan RA 0°/90° menunjukkan bahwa pasca pemrosesan annealing pada suhu 80 °C mengalami sedikit peningkatan dari 47,20 MPa menjadi 47,53 MPa. Lalu pada saat suhu annealing mencapai 120 °C, rata-rata kekuatan tarik PLA mengalami penurunan menjadi 45,57 MPa. Kemudian, kekuatan tarik kembali meningkat menjadi 47,11 MPa setelah mengalami proses annealing pada suhu 150 °C. Namun, UTS yang dihasilkan pada spesimen dengan suhu annealing 150 °C sedikit lebih rendah jika dibandingkan dengan spesimen tanpa pemanasan ulang (untreated). Di sisi lain, juga tidak terlihat perubahan yang signifikan pada elongasi serta modulus elastisitas dari PLA hasil cetak FDM setelah melalui proses annealing. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa pasca pemrosesan annealing

tidak memiliki efek signifikan terhadap kekuatan tarik PLA hasil cetak FDM, khususnya yang dicetak dengan RA 0°/90°.



Gambar 4 Kurva tegangan regangan spesimen PLA hasil uji tarik FDM dengan RA 0°/90°

Tabel 4 Hasil uji tarik spesimen PLA hasil cetak FDM dengan RA 0°/90°

Spesimen	No	Elongation (mm)	Force (N)	Et (MPa)	σM (MPa)	ϵM (%)	σA
Untreated	1	2.37	853.62	1243.72	46.80	3.75	47.20
	2	2.29	896.70	1286.12	46.95	3.70	
	3	2.51	928.58	1226.67	47.84	3.95	
Annealing 80 °C	1	2.63	915.40	1255.42	49.36	4.33	47.53
	2	2.65	851.33	1180.25	45.60	4.33	
	3	2.87	888.65	1172.46	47.60	4.54	
Annealing 120 °C	1	2.93	851.69	1069.74	45.77	4.55	45.57
	2	2.92	857.64	1219.28	46.24	4.24	
	3	2.89	842.35	1172.98	44.68	4.43	
Annealing 150 °C	1	2.26	865.41	1388.66	46.82	3.47	47.11
	2	2.18	884.93	1360.85	47.72	3.57	
	3	2.58	861.85	1312.45	46.78	3.44	

5. Kesimpulan

Pada penelitian ini, pengaruh pasca pemrosesan annealing terhadap sifat mekanis PLA hasil cetak FDM diobservasi. Sifat mekanis dikonfirmasi melalui hasil uji tarik yang dilakukan pada spesimen dengan berbagai variasi parameter pencetakan serta annealing. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, dapat ditarik beberapa kesimpulan, antara lain:

1. Proses annealing tidak memberikan efek signifikan pada kekuatan tarik material PLA hasil cetak FDM, yang akhirnya dapat mengkonfirmasi salah satu penelitian terdahulu [15].
2. Ketidakpastian kekuatan yang dihasilkan kemungkinan dipengaruhi oleh deformasi benda uji yang sedikit melengkung sehingga menyebabkan terjadinya pergeseran garis patahan

3. Penggunaan cetakan selama proses annealing mungkin merupakan faktor penting untuk menahan deformasi spesimen yang disebabkan oleh proses annealing.

Pada akhirnya, penelitian ini dapat mengkonfirmasi salah satu temuan terdahulu dimana pasca pemrosesan annealing merupakan metode yang kurang efektif untuk meningkatkan sifat mekanis hasil cetak 3D FDM, khususnya PLA.

Ucapan Terima kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Fakultas Teknik Universitas Darma Persada, khususnya pada Prodi Teknik Mesin, sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik.

Daftar Pustaka

- [1] J. Pratama, S. I. Cahyono, S. Suyitno, M. A. Muflikhun, U. A. Salim, M. Mahardika, and B. Arifvianto, "A Review on Reinforcement Methods for Polymeric Materials Processed Using Fused Filament Fabrication (FFF)," *Polymers (Basel)*, vol. 13, no. 22, p. 4022, Nov. 2021, doi: 10.3390/polym13224022.
- [2] S. H. Masood and W. Q. Song, "Development of new metal/polymer materials for rapid tooling using Fused deposition modelling," *Mater. Des.*, vol. 25, no. 7, pp. 587–594, Oct. 2004, doi: 10.1016/j.matdes.2004.02.009.
- [3] A. K. Sood, R. K. Ohdar, and S. S. Mahapatra, "Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts," *Mater. Des.*, vol. 31, no. 1, pp. 287–295, Jan. 2010, doi: 10.1016/j.matdes.2009.06.016.
- [4] H. Jami, S. H. Masood, and W. Q. Song, "Dynamic Response of FDM Made ABS Parts in Different Part Orientations," *Adv. Mater. Res.*, vol. 748, pp. 291–294, Aug. 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.748.291.
- [5] E. Canti and M. Aydın, "Effects of micro particle reinforcement on mechanical properties of 3D printed parts," *Rapid Prototyp. J.*, vol. 24, no. 1, pp. 171–176, 2018, doi: 10.1108/RPJ-06-2016-0095.
- [6] J. Nsengimana, J. Van der Walt, E. Pei, and M. Miah, "Effect of post-processing on the dimensional accuracy of small plastic additive manufactured parts," *Rapid Prototyp. J.*, vol. 25, no. 1, pp. 1–12, Jan. 2019, doi: 10.1108/RPJ-09-2016-0153.
- [7] I. Durgun and R. Ertan, "Experimental investigation of FDM process for improvement of mechanical properties and production cost," *Rapid Prototyp. J.*, vol. 20, no. 3, pp. 228–235, Apr. 2014, doi: 10.1108/RPJ-10-2012-0091.
- [8] B. Huang, S. H. Masood, M. Nikzad, P. R. Venugopal, and A. Arivazhagan, "Dynamic Mechanical Properties of Fused Deposition Modelling Processed Polyphenylsulfone Material," *Am. J. Eng. Appl. Sci.*, vol. 9, no. 1, pp. 1–11, Jan. 2016, doi: 10.3844/ajeassp.2016.1.11.
- [9] L. Cheng, P. Zhang, E. Biyikli, J. Bai, J. Robbins, and A. To, "Efficient design optimization of variable-density cellular structures for additive manufacturing: theory and experimental validation," *Rapid Prototyp. J.*, vol. 23, no. 4, pp. 660–677, Jun. 2017, doi: 10.1108/RPJ-04-2016-0069.
- [10] J. B. Jones, D. I. Wimpenny, and G. J. Gibbons, "Additive manufacturing under pressure," *Rapid Prototyp. J.*, vol. 21, no. 1, pp. 89–97, Jan. 2015, doi: 10.1108/RPJ-02-2013-0016.
- [11] T. Ke and X. Sun, "Melting behavior and crystallization kinetics of starch and poly(lactic acid) composites," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 89, no. 5, pp. 1203–1210, Aug. 2003, doi: 10.1002/app.12162.
- [12] Q. Sun, G. M. Rizvi, C. T. Bellehumeur, and P. Gu, "Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments," *Rapid Prototyp. J.*, 2008.
- [13] S. Waqar, J. Liu, Q. Sun, K. Guo, and J. Sun, "Effect of post-heat treatment cooling on microstructure and mechanical properties of selective laser melting manufactured austenitic 316L stainless steel," *Rapid Prototyp. J.*, vol. 26, no. 10, pp. 1739–1749, Sep. 2020, doi: 10.1108/RPJ-12-2019-0320.
- [14] W. Jo, O.-C. Kwon, and M.-W. Moon, "Investigation of influence of heat treatment on mechanical strength of FDM printed 3D objects," *Rapid Prototyp. J.*, vol. 24, no. 3, pp. 637–644, Apr. 2018, doi: 10.1108/RPJ-06-2017-0131.
- [15] M. Behzadnasab, A. A. Yousefi, D. Ebrahimbagha, and F. Nasiri, "Effects of processing conditions on mechanical properties of PLA printed parts," *Rapid Prototyp. J.*, vol. 26, no. 2, pp. 381–389, Oct. 2019,

doi: 10.1108/RPJ-02-2019-0048.

- [16] American Society for Testing and Materials, "ASTM D638-14, Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens," *ASTM Int.*, vol. 82, no. C, pp. 1-15, 2016, doi: 10.1520/D0638-14.1.

