

Metode Pencegahan *Warping* dan Cacat Kualitas Permukaan Produk *Fused Deposition Modelling* (FDM)

Danindra Brian Kusuma^{1*}, Muslim Mahardika¹, Juan Pratama¹, Urip Agus Salim¹, Sukmaji Indro Cahyono¹, Budi Arifvianto¹

¹Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada

*Email korespondensi : danindra.brian@mail.ugm.ac.id

Received Feb 14, 2022; Accepted Feb 24, 2022; Published Mar 8, 2022

Abstrak Keunggulan *3D printing* FDM (*Fused Deposition Modelling*) yang mampu membuat *prototype* dengan bentuk kompleks dalam waktu yang singkat menjadikan salah satu proses manufaktur utama dalam perindustrian otomotif, *aerospace*, bidang kesehatan dan masih banyak lagi. Terlepas dari kelebihan yang dimiliki FDM, proses ini memiliki kekurangan, yaitu kualitas permukaan hasil cetak yang buruk. Salah satu penyebab dari kekurangan ini adalah terjadinya fenomena *warping* dan cacat permukaan setelah pengambilan produk dari *platform*. Pada penelitian ini, dilakukan analisa pengaruh *platform temperature* dan penggunaan *raft* terhadap fenomena *warping* yang terjadi pada produk hasil cetak FDM. Variasi parameter cetak yang digunakan adalah *platform temperature* (*non-heated* dan 60°C), *raft air gap* (0,2 dan 0,4 mm), dan *raft top layer* (1, 2, dan 3 buah). Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan *platform temperature* mempengaruhi fenomena *warping* yang sering terjadi pada produk cetak FDM dan penggunaan *raft* dapat meminimalisir cacat permukaan ketika pengambilan produk dari *platform* FDM. Parameter cetak optimal dengan produk cetak yang sempurna dihasilkan saat penggunaan *platform temperature* 60°C, *raft air gap* 0,4 mm, dan 1 *raft top layer*.

Kata Kunci : *Fused Deposition Modelling* (FDM), *Warping*, *Raft*, *Platform Temperature*

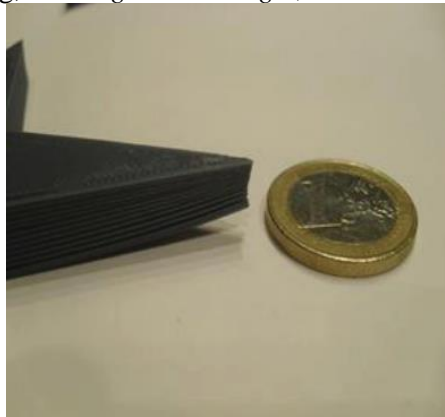
1. Pendahuluan

Additive manufacturing (AM) atau *3D printing* merupakan salah satu teknologi yang mendapat perhatian tinggi oleh masyarakat luas karena mampu memberikan keuntungan yang mampu membuat *prototype* dengan bentuk kompleks [1]. Proses *additive manufacture* atau *3D printing* pada umumnya menggunakan jenis material *thermoplastic* seperti PLA (*polylactic acid*), ABS, PEEK (*polyetheretherketon*), *polycarbonate*, dan *poly (methylemethacrylate)* (PMMA) [2].

Perkembangan teknologi tiga dimensi menjadi salah satu proses manufaktur utama dalam perindustrian otomotif, *aerospace*, kesehatan dan masih banyak lagi. Terdapat beberapa klasifikasi teknologi *3D printing* yang telah berkembang sampai saat ini, salah satunya adalah FDM (*Fused Deposition Modelling*) dimana prosesnya berbasis ekstrusi material. FDM (*Fused Deposition Modelling*) merupakan teknologi pencetakan 3D dengan sistem kerja ekstrusi filamen polimer melewati nosel yang bersuhu tinggi hingga berubah fase semi cair kemudian didepositkan pada permukaan *build plate*. *Build plate* akan bergerak turun searah sumbu Z setelah satu layer *printing* terbentuk sejauh ketebalan tiap layer yang ditentukan [3]. Proses ini dilakukan berulang kali sampai bentuk 3D yang diinginkan terpenuhi.

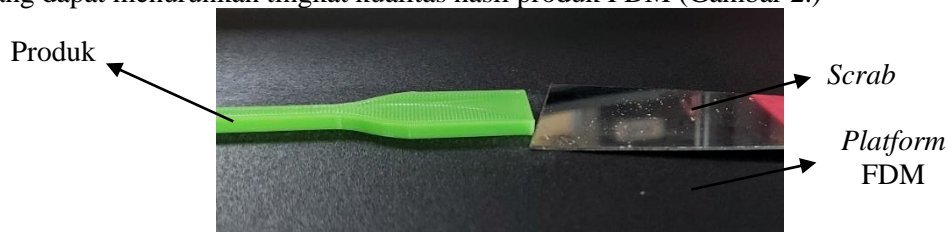
Berdasarkan prinsip kerjanya, FDM memiliki beberapa kelebihan antara lain, proses yang aman dan sederhana [4], tidak membutuhkan banyak biaya [5], tidak menghasilkan limbah [6], proses pencetakan

yang singkat [6], dan penggantian material yang mudah [7]. Terlepas dari kelebihan yang dimiliki FDM, proses ini memiliki kekurangan, yaitu kualitas permukaan hasil cetak yang buruk [8]. Salah satu penyebab dari kekurangan ini adalah terjadinya fenomena *warping* dan cacat permukaan setelah pengambilan produk dari *platform*. *Warping* merupakan deformasi yang disebabkan karena *internal stress* ketika material termoplastik mengalami penyusutan (*shrinkage phase*) akibat perubahan suhu secara linier hingga di bawah fase *glass transition* setelah didepositkan ke *platform* FDM [9],[10]. Pada umumnya, *warping* sering terjadi dibagian sudut produk FDM (Gambar 1) [10]. Beberapa faktor penyebab *warping* adalah jumlah lapisan yang terdeposit, suhu ruang, *stacking section length*, dan koefisien penyusutan material [11].



Gambar 1. Fenomena *Warping* [10]

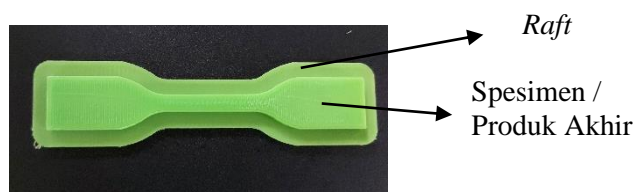
Cacat pada permukaan produk FDM dapat terjadi karena kesalahan operator ketika mengambil produk dari *platform* yang dapat menurunkan tingkat kualitas hasil produk FDM (Gambar 2.)



Gambar 2. Ilustrasi pengambilan produk dari *platform*

Wang, dkk (2007) melakukan penelitian terkait reduksi *warping* yang terjadi pada produk FDM dengan menggunakan material jenis ABS. Penelitian ini menggunakan metode pemodelan matematika untuk mengilustrasikan fenomena *warping* yang terjadi. Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan, fenomena *warping* dapat direduksi ketika semakin panjang filamen yang didepositkan, semakin tinggi suhu ruang yang digunakan, semakin banyak jumlah lapisan yang didepositkan dan semakin kecil nilai koefisien penyusutan material yang digunakan [11]. Selain itu, Guerrero-De-Mier, Dkk (2015) melakukan penelitian terkait reduksi *warping* menggunakan metode membagi produk menjadi beberapa bagian menggunakan material jenis ABS. Produk dibagi menjadi beberapa bagian dalam bentuk *squared* dan *hexagonal*. Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan, prosentase *warping* terkecil sebesar 9% terjadi pada produk yang dibagi kedalam bentuk *hexagonal* sepanjang 15 mm [10]

Pada penelitian ini bertujuan untuk menganalisa metode pencegahan *warping* dan cacat produk hasil cetak FDM dengan penggunaan *raft* dan *platform temperature*. *Raft* merupakan salah satu jenis *adhesion* yang terdapat pada *slicer software* pada saat proses pencetakan (Gambar 3). Penelitian menggunakan material termoplastik jenis *polylactic acid (PLA)* dengan parameter yang divariasikan yaitu *platform temperature* (*Non-heated* dan 60°C), *raft air gap* (0,2 dan 0,4 mm), dan *raft top layer* (1,2, dan 3).



Gambar 3. *Raft*

2. Material dan Metode Penelitian

2.1 Material

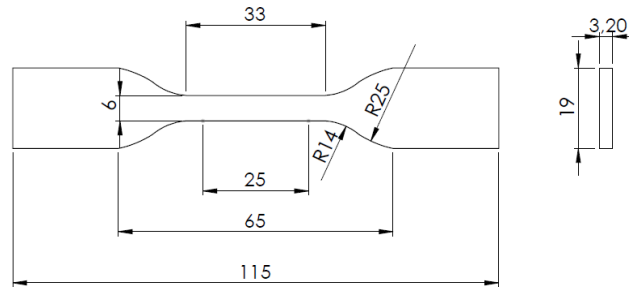
Spesimen pada penelitian ini akan menggunakan material filamen PLA diameter 1,75 mm berwarna *peak green* (Shenzen Esun Industrial, China) dengan sifat mekanik material pada Tabel 1.

Tabel 1. Sifat Mekanik Material PLA [12]

<i>Material Properties</i>	<i>Value</i>
<i>Tensile Strength at Yield (MPa)</i>	0,88
<i>Elastic Modulus, (GPa)</i>	8,6
<i>Flexural Strength, (MPa)</i>	70
<i>Flexural Modulus, (GPa)</i>	3,8
<i>Rockwell Hardness</i>	88
<i>Impact Strength</i>	<i>Poor</i>
<i>Melting Temperature (°C)</i>	130-205
<i>Glass Transition Temperature (°C)</i>	55-65
<i>Thermal Conductivity (×10⁻⁴ cal. cm¹.s¹.C⁻¹)</i>	2,9
<i>Thermal expansion coefficient (×10⁻⁶ °C)</i>	70
<i>Density amorphous (kg.m⁻³)</i>	1250
<i>Density 100% Crystalline (kg.m⁻³)</i>	1490
<i>Crystallinity (%)</i>	0-40

2.2 Pembuatan Spesimen

Desain spesimen mengacu pada standar ASTM D638-IV yang digunakan untuk pengujian tarik material polimer (Gambar 3). Pembuatan spesimen menggunakan mesin 3D *printing* Creality CR-10s Pro dengan *slicer software* UltimateCura 4.13. Parameter pencetakan yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 2.



Gambar 3. Spesimen ASTM D638-IV

Tabel 2. Parameter Pencetakan FDM

Parameter	Keterangan
Diameter Nosel	0,4 mm
<i>Printing Speed</i>	30 mm/s
<i>Printing Temperature</i>	205 °C
<i>Platform Temperature</i>	<i>non-heated</i> dan 60°C
<i>Infill Density</i>	100%
<i>Layer Thickness</i>	0,4 mm
<i>Raster Angle</i>	0°
<i>Build Plate Adhesion</i>	<i>Raft</i>
<i>Raft Extra Margin</i>	6 mm
<i>Raft Air Gap</i>	0,2 dan 0,4 mm
<i>Raft Top Layer</i>	1, 2, dan 3
<i>Raft Print Speed</i>	50 mm/s

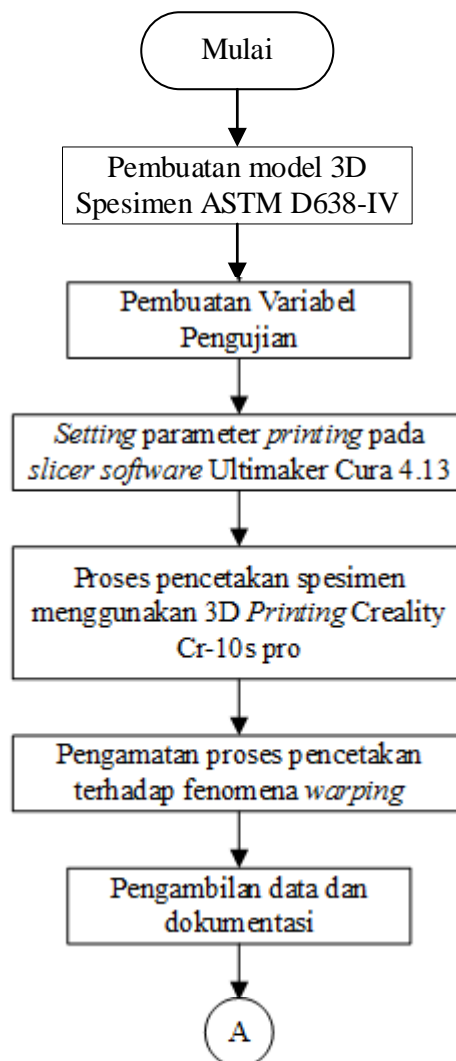
Terdapat dua variasi *platform temperature* yang digunakan, yaitu *non-heated* dan 60 °C dengan variasi *air gap* 0,2 dan 0,4 mm serta variasi jumlah *top layer* 1, 2, dan 3 yang disusun pada Tabel 3. *Diagram of Experiment*. Selama proses pencetakan akan diamati dan didokumentasikan fenomena *warping* yang terjadi pada produk FDM. Selanjutnya, dilakukan pengujian terhadap kemudahan pelepasan *raft* dari produk cetak. *Raft* merupakan salah jenis *adhesion* yang penggunaannya bertujuan untuk meminimalisir

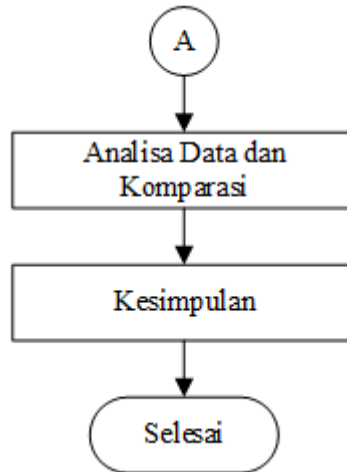
terjadikan cacat permukaan ketika pengambilan produk dari *platform* FDM.

Tabel 3. *Diagram of Experiment*

No.	<i>Platform Temperature</i> (°C)	<i>Raft Air Gap</i> (mm)	<i>Raft Top Layer</i>
1	<i>Non-Heated</i>	0,2	1
2	<i>Non-Heated</i>	0,2	2
3	<i>Non-Heated</i>	0,2	3
4	<i>Non-Heated</i>	0,4	1
5	<i>Non-Heated</i>	0,4	2
6	<i>Non-Heated</i>	0,4	3
7	<i>Non-Heated</i>	Tanpa Raft	
8	60	0,2	1
9	60	0,2	2
10	60	0,2	3
11	60	0,4	1
12	60	0,4	2
13	60	0,4	3
14	60	Tanpa Raft	

Pada Gambar 4. Ditampilkan diagram alir yang mewakili prosedur penelitian yang dilakukan



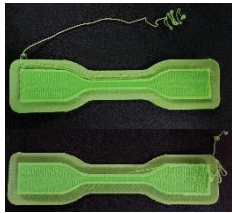
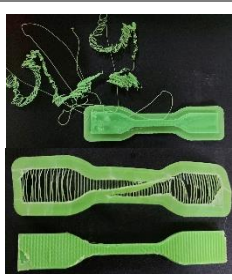
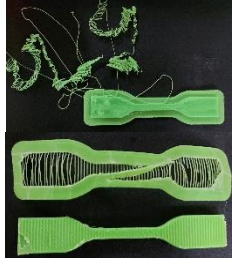











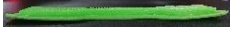




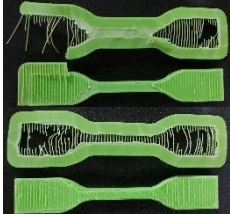






Gambar 4. Diagram alir prosedur penelitian




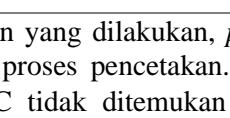

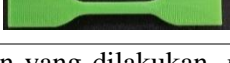
3. Hasil dan Pembahasan

Hasil penelitian mengenai pengaruh *platform temperature* dan penggunaan *raft* terhadap fenomena *warping* yang mempengaruhi kualitas produk FDM ditunjukkan pada Tabel 4. Hasil penelitian dilakukan dengan pemberian nilai terhadap kualitas produk yang dihasilkan. Nilai 0 ketika produk gagal, nilai 1 ketika produk berhasil dicetak tapi terdapat cacat, dan nilai 2 ketika produk berhasil dicetak dengan sempurna.

Tabel 4. Hasil Pengujian

No.	Hasil	Panjang Filamen (m)	Waktu (Menit)	Skor	Total
1		2,77	50	0	0
		2,77	50	0	
2		3,04	56	0	1
		3,04	56	1	
3		3,32	62	1	2
		3,32	62	1	
4		2,77	50	1	2
		2,77	50	1	

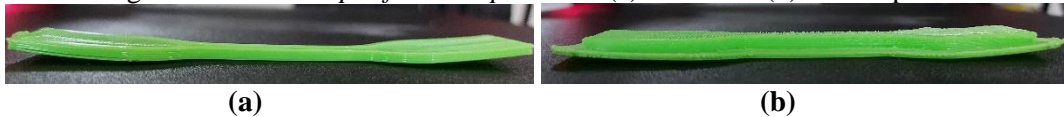
		2,77	50	1	
5		3,04	56	1	2
		3,04	56	1	
	6		3,32	62	1
		3,32	62	1	
7		2,06	35	0	0
		2,06	35	0	
8		2,77	50	1	2
		2,77	50	1	
	9		3,04	56	1
		3,04	56	1	
10			3,32	62	1
		3,32	62	1	
11		2,77	50	2	4
		2,77	50	2	
12		3,04	56	2	4

		3,04	56	2	
13		3,32	62	2	
		3,32	62	2	4
		3,32	62	2	
14		2,06	35	1	
		2,06	35	1	2

Berdasarkan hasil pengujian yang dilakukan, *platform temperature* memberikan efek terhadap fenomena *warping* yang terjadi saat proses pencetakan. Hal tersebut dibuktikan ketika pencetakan menggunakan *platform temperature* 60°C tidak ditemukan fenomena *warping* pada produk hasil cetak, sedangkan fenomena tersebut terjadi ketika tidak menggunakan *platform temperature* (*non-heated*) seperti pada Gambar 5. *Warping* disebabkan karena tegangan sisa yang terjadi akibat distribusi suhu antar lapisan yang tidak merata [10] Hal tersebut diakibatkan karena sifat anisotropik pada struktur hasil cetak FDM yang bersifat berlapis [13], sehingga terjadi perbedaan laju pendinginan dari lapisan yang didepositkan. Lapisan pertama yang terdeposit akan mengalami laju pendinginan lebih cepat dibandingkan lapisan kedua dan seterusnya sampai lapisan terakhir. Selain itu, penggunaan *platform temperature* bertujuan untuk menjaga fase *glass transition* material dan laju pendinginan lapisan yang terdeposit supaya gradien suhu yang terjadi tidak terlalu tinggi. Fenomena *warping* juga dapat tereduksi ketika semakin banyak jumlah material yang terdeposit seperti pada Gambar 6. Hal tersebut sesuai dengan penelitian Guerrero-De-Mier dkk [10].

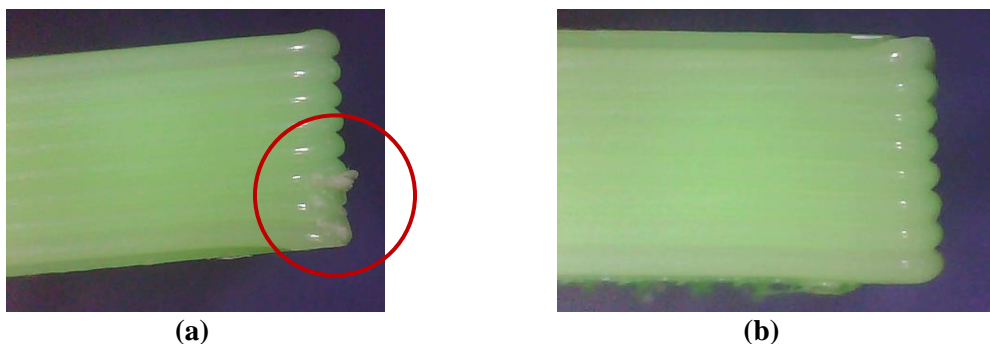


Gambar 5. Pengaruh *non-heated platform temperature* (a) dan 60°C (b) terhadap fenomena *warping*

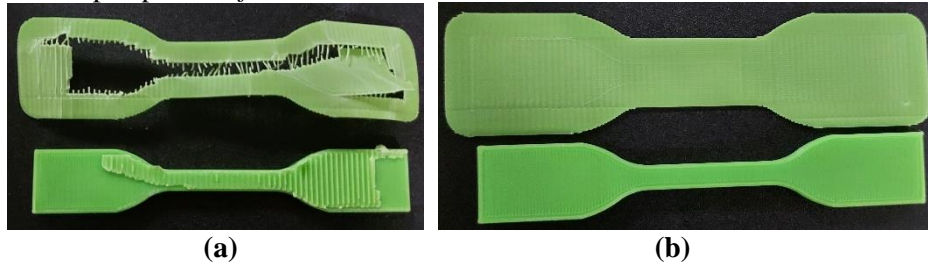


Gambar 6. *Top layer 0* / tanpa *raft* (a) dan *top layer 3* (b)

Penggunaan *raft* saat proses pencetakan dapat meminimalisir terjadinya cacat di permukaan produk cetak pada saat pengambilan dari *platform* FDM. Hal tersebut dapat dilihat pada hasil pengamatan makro diantara kedua permukaan produk cetak dengan dan tanpa penggunaan *raft* (Gambar 7). Produk tanpa penggunaan *raft* memiliki cacat dibagian permukaan yang diakibatkan karena *scrap* langsung bersentuhan dengan permukaan produk akhir ketika pengambilan produk dari *platform* FDM. Sedangkan permukaan produk cetak dengan *raft* tidak memiliki cacat dibagian permukaan, karena *scrap* tidak bersentuhan langsung dengan produk akhir, melainkan pada permukaan *raft*.

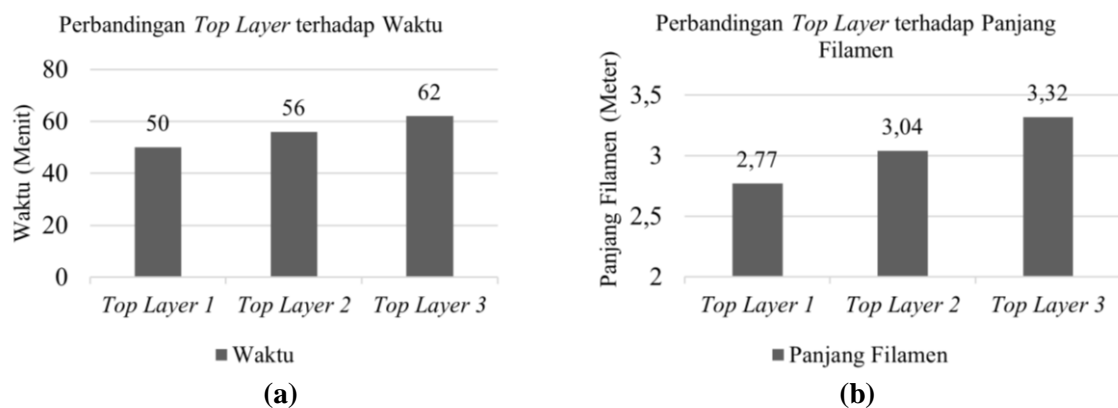


Gambar 7. Pengamatan makro permukaan produk cetak tanpa *raft* (a) dan menggunakan *raft* (b) Kemudahan pemisahan *raft* dari produk akhir ditunjukkan dengan tidak terdapat sisa permukaan *raft* yang menempel pada permukaan produk akhir seperti pada Gambar 8. Faktor utama kemudahan pemisahan *raft* dari produk akhir dipengaruhi oleh parameter *raft air gap* yang digunakan. Semakin besar *raft air gap*, maka semakin mudah pelepasan *raft* dari produk akhir. Parameter *raft top layer* tidak terlalu berpengaruh terhadap kemudahan pelepasan *raft*.



Gambar 8. *Raft air gap* 0,2 mm (a) dan 0,4 mm (b)

Grafik perbandingan waktu dan banyaknya filamen yang dibutuhkan antara spesimen dengan hasil sempurna ditunjukkan pada Gambar 9. Semakin banyak *raft top layer*, maka semakin banyak waktu dan filamen yang dibutuhkan. Parameter cetak optimal dengan hasil sempurna, tidak banyak waktu yang dibutuhkan dan sedikit filamen yang digunakan, adalah parameter *raft air gap* 0,4 mm, *raft top layer* 1 buah, dan *platform temperature* 60°C



Gambar 9. Grafik Perbandingan antara Waktu (a) dan Panjang Filamen (b) terhadap Jumlah *Top Layer* yang Dihasilkan

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian pada penelitian ini dapat disimpulkan beberapa hal, sebagai berikut,

- 1) Penggunaan *platform temperature* dapat mereduksi fenomena *warping* yang terjadi pada produk cetak FDM.
- 2) Penggunaan *raft* dapat meminimalisir terjadinya cacat permukaan produk hasil cetak pada saat pengambilan dari *platform* FDM.
- 3) Parameter optimal *raft* supaya mudah dipisahkan dari produk hasil, yaitu *raft air gap* 0,4 mm, *top layer* 1, dan *platform temperature* 60°C.
- 4) Semakin banyak jumlah *top layer*, maka semakin banyak waktu dan panjang filamen yang diperlukan.

5. Daftar Pustaka

- [1] J. Pratama et al 2021 *A review on reinforcement methods for polymeric materials processed using fused filament fabrication (Fff) Polymers (Basel)* vol 13 no 22 pp 1–23 doi: 10.3390/polym13224022.
- [2] J. Frketic, T. Dickens, and S. Ramakrishnan 2017 *Automated manufacturing and processing of fiber-reinforced polymer (FRP) composites: An additive review of contemporary and modern techniques for advanced materials manufacturing Additive Manufacturing* vol 14 Elsevier BV pp 69–86 Mar 01 2017 doi: 10.1016/j.addma.2017.01.003

- [3] A. A. Ansari and M. Kamil 2021 *Effect of print speed and extrusion temperature on properties of 3D printed PLA using fused deposition modeling process*. in *Materials Today: Proceedings* vol 45 pp 5462–5468 doi: 10.1016/j.matpr.2021.02.137
- [4] S. H. Masood and W. Q. Song 2004 *Development of new metal/polymer materials for rapid tooling using Fused deposition modelling* *Mater Des* vol 25 no 7 pp 587–594 doi: 10.1016/j.matdes.2004.02.009
- [5] E. Cantı and M. Aydın 2018 *Effects of micro particle reinforcement on mechanical properties of 3D printed parts* *Rapid Prototyp. J.* vol 24 no 1 pp 171–176 doi: 10.1108/RPJ-06-2016-0095
- [6] L. Cheng, P. Zhang, E. Biyikli, J. Bai, J. Robbins, and A. To 2017 *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 doi: 10.1108/RPJ-04-2016-0069
- [7] J. Nsengimana, J. Van der Walt, E. Pei, and M. Miah 2019 *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 doi: 10.1108/RPJ-09-2016-0153
- [8] G. Krolczyk, P. Raos, and S. Legutko 2014 *Experimental analysis of surface roughness and surface texture of machined and fused deposition modelled parts* *Teh Vjesn* vol 21 no 1 pp 217–221
- [9] B. Arifvianto, Y. B. Wirawan, U. A. Salim, S. Suyitno, and M. Mahardika 2021 *Effects of extruder temperatures and raster orientations on mechanical properties of the FFF-processed polylactic-acid (PLA) material* *Rapid Prototyp J* vol 27 no 10 pp 1761–1775 Nov 2021 doi: 10.1108/RPJ-10-2019-0270
- [10] A. Guerrero-De-Mier, M. M. Espinosa, and M. Domínguez 2015 *Bricking: A New Slicing Method to Reduce Warping* *Procedia Eng* vol 132 pp 126–131 doi: 10.1016/j.proeng.2015.12.488
- [11] T. M. Wang, J. T. Xi, and Y. Jin 2007 *A model research for prototype warp deformation in the FDM process* *Int. J. Adv. Manuf Technol* vol 33 no 11–12 pp 1087–1096 doi: 10.1007/s00170-006-0556-9
- [12] R. Auras 2004 *POLY(LACTIC ACID)*
- [13] Ö. Keleş, C. W. Blevins, and K. J. Bowman 2017 *Effect of build orientation on the mechanical reliability of 3D printed ABS* *Rapid Prototyp J* vol 23 no 2 pp 320–328 doi: 10.1108/RPJ-09-2015-0122

