

# Pengaruh Parameter Cetak Mesin 3D FDM Terhadap Warping Untuk Material PMMA

Ibnu Abdul Rosid<sup>1</sup>, Rama Sahtyawan<sup>2</sup>, Putri Noviana Nih Pratama<sup>3</sup>

<sup>1,3</sup>Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknik dan Teknologi Informasi,  
Univeritas Jenderal Achmad Yani Yogyakarta  
Jl. Siliwangi, Banyuraden, Gamping, Sleman, Indonesia

<sup>2</sup>Program Studi Teknologi Informasi, Fakultas Teknik dan Teknologi Informasi,  
Univeritas Jenderal Achmad Yani Yogyakarta  
Jl. Siliwangi, Banyuraden, Gamping, Sleman, Indonesia  
ibnu.arrasheed@gmail.com

---

---

## Abstrak

Teknologi 3D Printer FDM merupakan salah satu teknologi manufaktur yang berkembang di Era Revolusi Industri 4.0 dan secara umum telah digunakan diberbagai bidang. Salah satu material yang dapat digunakan pada Mesin 3D Printer FDM adalah *Polymethyl Methacrylate* (PMMA), materi tersebut umum digunakan pada bidang medis. Pada proses eksperimen dilakukan analisis *warping* pada Material PMMA yang dicetak menggunakan Mesin 3D Printer FDM. Pendekatan penyusunan dan analisis eksperimen menggunakan  $2^k$  factorial design. Parameter yang digunakan yaitu *nozzle temperatur* dengan nilai *level* yaitu 220°C dan 240°C, *bed temperature* dengan nilai *level* 60°C dan 90°C, *layer height* dengan nilai *level* 0,25 mm dan 0,3 mm serta *first layer height* sebesar 0,4 mm dan 0,8 mm. Pada hasil *generate run time* didapatkan 16 *run time* dengan jumlah replikasi 3 kali, sehingga didapatkan *run time* replikasi sejumlah 48 *run time*. Besar *warping* terkecil sebesar 3,590 mm, terbesar sebesar 5,135 mm serta rata-rata nilai *warping* sebesar 4,915. Pada hasil ANOVA didapatkan P-Value kurang dari *alpha* ( $\alpha = 0,05$ ) yaitu parameter LH, interaksi NT, FLH dan interaksi NT, BT dan LH. Sehingga diperlukan analisis lanjutan terhadap parameter dan nilai *level* untuk mendapatkan parameter dan nilai *level* yang berpengaruh secara signifikan terhadap terjadinya *warping*.

**Kata kunci:** 3D Printer, FDM, filamen, PMMA, parameter

## Abstract

*FDM 3D Printer technology is a manufacturing technology that developed in the Industrial Revolution Era 4.0 and has generally been used in various fields. One of the materials that can be used in FDM 3D printer machines is Polymethyl Methacrylate (PMMA), this material is commonly used in the medical field. In the experimental process, warping analysis was carried out on PMMA material printed using an FDM 3D Printer Machine. The experimental preparation and analysis approach uses  $2^k$  factorial design. The parameters used are nozzle temperature with level values of 220°C and 240°C, bed temperature with level values of 60°C and 90°C, layer height with level values of 0.25 mm and 0.3 mm, and first layer height of 0.4mm and 0.8mm. In the generated run time results, we got 16 run times with 3 replications, so we got a replication run time of 48 run times. The smallest warping value is 3,59'0 mm, the largest is 5,135 mm and the average warping value is 4,915. In the ANOVA results, it was found that the P-value was less than alpha ( $\alpha = 0.05$ ), namely the LH parameters, the interaction of NT, FLH, and the interaction of NT, BT, and LH. So further analysis of parameters and level values is needed to obtain parameters and level values that have a significant effect on the occurrence of warping*

**Keywords:** 3D Printer, FDM, filament, PMMA, parameter

---

---

## I. PENDAHULUAN

Material *Polymethyl Methacrylate* atau PMMA menjadi salah satu material termoplastik yang memiliki titik lebur tinggi [1], [2]., material tersebut umum digunakan di bidang medis [3]–[7]. Pada

penggunaannya, Material PMMA digunakan pada proses restorasi kerusakan tulang (*bone fracture*) [4], [8]–[11]. Selain itu juga digunakan pada dunia industri [12]. Pada umumnya PMMA didapatkan dalam bentuk cairan ataupun serbuk (*powder*) ataupun cairan [12]. Material PMMA umum

digunakan sebagai biomaterial [13]. PMMA memiliki beberapa karakteristik, seperti *low density*, mudah untuk direkayasa, properti mekanik yang dapat direkayasa [6], [10], [14], [15], dapat dikombinasikan dengan material lain (*reinforced*) [6], serta harga yang relatif rendah [2].

Saat ini dunia memasuki Era Revolusi Industri 4.0, salah satu teknologi yang berkembang di Era Revolusi 4.0 adalah Teknologi 3D Printing [16]. Teknologi 3D Printing juga dapat disebut Teknologi Additive Manufacturing [17]–[20] ataupun *rapid prototyping* [21]. Teknologi 3D Printing menghasilkan benda kerja menggunakan prinsip *layer by layer* [22]. Teknologi 3D Printer memiliki berbagai kelebihan, diantaranya kemampuan membuat dengan bentuk yang beragam, *cost effectiveness*, dan akurasi yang relatif tinggi [18]. Terdapat berbagai jenis Teknologi 3D Printer yang diklasifikasikan pada beberapa jenis, salah satunya adalah *material extrusion*, salah satu teknologi berbasis *material extrusion* adalah Teknologi 3D Printer FDM [7], [18], [19] atau dapat disebut dengan *Fused Filament Fabrication* (FFF) [23]. Teknologi tersebut umum menggunakan material berjenis polimer [1]. Teknologi 3D Printer menjadi salah satu teknologi yang tergolong *advanced* [24], serta telah digunakan secara luas [25], seperti kesehatan [4], konstruksi [20], [26], militer [27], *aerospace* [17], otomotif [18] dan kemudahan dalam pembuatan purwarupa [19], selain itu juga merupakan teknologi yang *open source* [7]. 3D Printer FDM berkerja dengan melakukan pemanasan pada *nozzle* (*hot end*) sehingga filamen padat menjadi *liquid* sehingga dapat dicetak pada *bed* [25].

Produk berbahan PMMA dapat dimanufaktur dengan menggunakan Mesin 3D Printer serta menjadi material yang umum digunakan pada Mesin 3D Printer FDM [1], [28]. *Warping* dapat terjadi pada proses manufaktur menggunakan Mesin 3D Printer FDM untuk material berjenis polimer [29], [30]. Pada proses manufaktur berbahan PMMA dapat terjadi *warping* [31]. Sehingga menyebabkan kecacatan cetak pada spesimen hasil cetak Material PMMA. Adapun pendekatan *Design of Experiment* (DoE) dapat digunakan untuk mengetahui pengaruh parameter terhadap hasil cetak pada proses manufaktur menggunakan Mesin 3D Printer, yaitu  $2^k$  *factorial design* [4], [26], [32], [33].

## II. METODE PENELITIAN

### A. Parameter dan Level Cetak

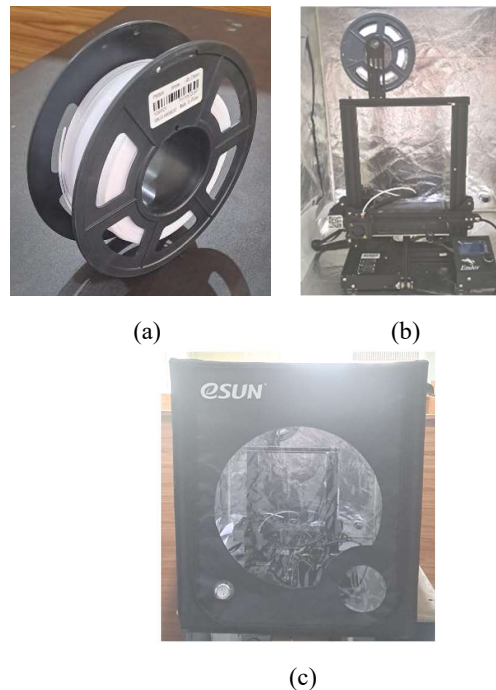
Nilai parameter ditentukan berdasarkan studi pustaka pada penelitian yang telah dilakukan terkait dengan proses cetak Mesin 3D Printer FDM serta penggunaan Material PMMA pada proses cetak.

Parameter yang digunakan yaitu *nozzle temperature* dengan nilai *level* 220 °C dan 240 °C, *bed temperature* dengan nilai *level* 60°C dan 90 °C, *layer height* dengan nilai 0,25 mm dan 0,3 mm dan *first layer height* dengan nilai *level* 0,4 mm dan 0,8 mm (Tabel 1).

Tabel 1. Nilai *level* parameter

Parameter	Level		Satuan	Ref.
	-1	1		
NT	220	240	°C	[20], [22]
BT	60	90	°C	[19], [20]
LH	0,25	0,3	mm	[19]–[22]
FLH	0,4	0,8	mm	[20], [21]

Pada proses cetak yang dilakukan, digunakan *enclosure*, hal tersebut dikarenakan pada proses manufaktur berbahan polimer dapat menyebabkan cacar *warping* [34].

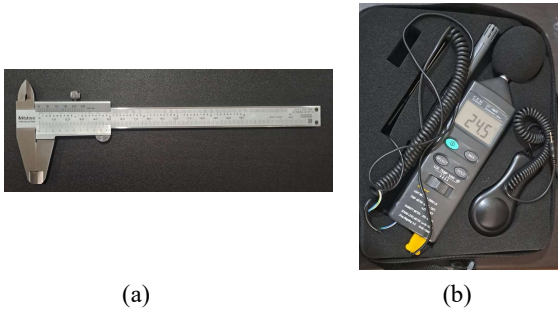


Gambar 1. Material PMMA (a), Mesin 3D Printer FDM (b) dan *enclosure* (c)

Material PMMA yang digunakan berbentuk filamen dengan diameter 1,75 mm (Gambar 1a). Mesin yang digunakan adalah Mesin 3D Printer FDM dengan kemampuan dimensi cetak sebesar 220x220x250 mm, *print speed* sebesar 30 – 180 mm/s, *printing precision* sebesar  $\pm 0,1$  mm, serta suhu *bed* maksimal sebesar 100°C (Gambar 1b). Adapun *enclosure* yang digunakan memiliki dimensi sebesar 650x760x720 mm dengan lapisan aluminium foil dan *silicone desiccant* (Gambar 1c). Spesifikasi alat ukur suhu menggunakan *envirometer* dengan kemampuan ukur suhu sebesar -20-750°C (Gambar 2a), sedangkan jangka sorong

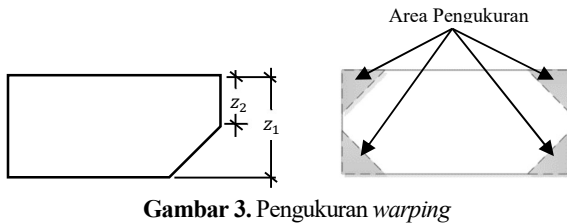
Ibnu Abdul Rosid : Pengaruh cetak mesin ...

yang digunakan menggunakan jangka sorong dengan ketelitian sebesar 0,02 (Gambar 2b).



Gambar 2. Jangka sorong (a) dan envirometer (b)

Pada analisis terjadinya *warping* dilakukan analisis terhadap ketebalan (*z-dimension*) untuk mendapatkan ketinggian sebagai pembanding nilai *warping* yang dihitung dari besar bagian terangkat ( $Z_1$ ) dengan besar sisi terbentuk ( $Z_2$ ).



Gambar 3. Pengukuran *warping*

Pengukuran dilakukan pada spesimen sejumlah 4 titik (Gambar 3). Spesimen untuk pengujian *warping* dapat menggunakan spesimen dengan bentuk balok, adapun ukuran rancangan spesimensi yang digunakan yaitu 25x15x6 mm. Pengukuran *warping* dilakukan dengan mengukur ketinggian area yang mengalami *warping* dengan jumlah pengukuran untuk setiap spesimen sejumlah 3 titik pengukuran dengan pengukuran mengacu pada (1).

$$\text{Warping Deformation } (z) = z_1 - z_2 \quad (1)$$

Generate kombinasi cetak dilakukan berdasarkan  $2^k$  factorial design dengan menggunakan 4 parameter dengan 2 level untuk setiap parameter (Tabel 2).

Tabel 2. Kombinasi level parameter cetak

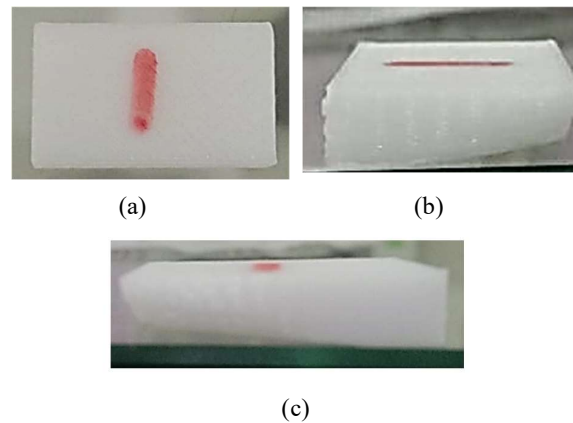
RT	LH	ID	RW	PS
1	-1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1	1
3	-1	1	-1	1
4	1	1	-1	-1
5	-1	-1	1	1
6	1	-1	1	-1
7	-1	1	1	-1

8	1	1	1	1
9	-1	-1	-1	-1
10	1	-1	-1	1
11	-1	1	-1	1
12	1	1	-1	-1
13	-1	-1	1	1
14	1	-1	1	-1
15	-1	1	1	-1
16	1	1	1	1
17	-1	-1	-1	-1
18	1	-1	-1	1
19	-1	1	-1	1
20	1	1	-1	-1
21	-1	-1	1	1
22	1	-1	1	-1
23	-1	1	1	-1
24	1	1	1	1

Hasil pengukuran nilai *warping* kemudian dianalisis menggunakan ANOVA (*Analysis of Variance*). Pada ANOVA digunakan untuk mendapatkan P-Value, nilai tersebut akan dibandingkan dengan nilai alpha untuk mengetahui signifikansi parameter terhadap respon [35]. Selain itu juga dilakukan analisis nilai R-Square yang digunakan untuk mengetahui tingkat kemampuan model dalam menjelaskan variabilitas dari data [36].

### III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil *running* cetak didapatkan besar *warping* pada Material PMMA yang dicetak menggunakan 3D Printer FDM. Pada visual spesimen didapatkan kasus *warping* pada spesimen hasil cetak dengan beragam besar *warping* (Gambar 4).



Gambar 4. Spesimen hasil cetak

Adapun jumlah data *run time* sejumlah 48 data dengan nilai pengukuran untuk setiap area ukur. Pada hasil ukur didapatkan nilai *warping* yang bervariasi (Tabel 3).

**Tabel 3.** Hasil pengukuran *warping*

RT	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>3</sub>	M <sub>4</sub>
1	5,14	3,08	5,10	5,12
2	5,08	5,10	4,18	5,02
3	5,08	5,10	4,04	4,14
4	3,04	4,06	5,06	5,04
5	2,04	3,08	5,06	4,18
6	5,06	5,08	5,08	5,08
7	5,10	5,08	5,02	5,04
8	5,08	5,10	5,10	5,10
9	4,06	5,02	5,10	5,10
10	5,08	5,02	5,10	5,08
11	5,08	5,10	5,10	5,06
12	5,02	5,02	5,04	5,04
13	5,04	5,06	5,04	5,02
14	5,04	5,06	5,12	5,14
15	5,10	5,10	5,08	5,10
16	4,18	5,06	5,12	5,14
17	5,12	3,10	4,06	5,10
18	5,08	5,02	4,14	4,10
19	5,10	5,08	5,08	5,10
20	5,04	5,08	5,06	5,06
21	4,14	5,08	5,06	5,06
22	5,10	5,10	5,08	5,08
23	5,08	5,06	5,02	5,02
24	5,06	5,06	5,02	5,08
25	5,02	5,08	5,10	5,04
26	5,06	5,08	4,16	5,06
27	5,08	5,04	5,06	5,08
28	4,12	5,02	5,04	5,02
29	5,02	5,04	5,02	5,02
30	4,18	5,18	5,10	5,10
31	4,18	5,10	5,08	5,10
32	5,12	5,12	5,18	5,12
33	5,10	4,12	4,14	5,10
34	5,08	5,10	5,06	5,10
35	5,04	5,02	5,06	5,04
36	5,06	5,06	5,02	5,04
37	5,06	5,06	5,02	5,02
38	5,10	5,10	5,08	5,10
39	5,06	5,06	5,04	5,04
40	5,08	5,06	5,02	5,04
41	5,06	5,08	5,08	5,06
42	5,04	5,06	5,08	5,06

RT	M <sub>1</sub>	M <sub>2</sub>	M <sub>3</sub>	M <sub>4</sub>
43	5,02	5,04	5,04	5,04
44	5,00	4,18	5,04	5,02
45	5,04	5,04	5,02	5,04
46	5,08	4,12	5,12	5,08
47	5,10	5,10	5,08	5,06
48	4,18	5,10	5,10	5,18

Hasil pengukuran dilakukan perhitungan rata-rata besar *warping* untuk setiap *run time* (Gambar 4). Pada hasil perhitungan didapatkan nilai *warping* terkecil sebesar 3,590 mm, terbesar sebesar 5,135 mm serta rata-rata nilai *warping* sebesar 4,915.

**Tabel 4.** Rata-rata pengukuran *warping*

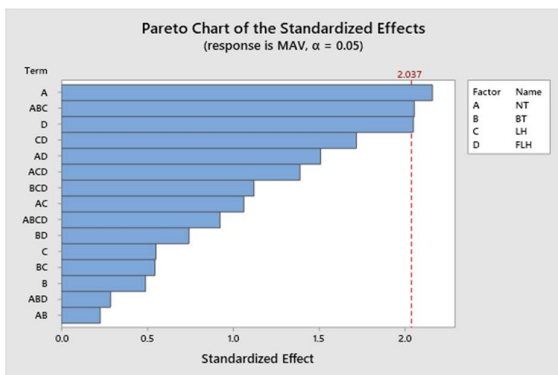
RT	M <sub>AV</sub>	RT	M <sub>AV</sub>
1	4,610	25	5,060
2	4,845	26	4,840
3	4,590	27	5,065
4	4,300	28	4,800
5	3,590	29	5,025
6	5,075	30	4,890
7	5,060	31	4,865
8	5,095	32	5,135
9	4,820	33	4,615
10	5,070	34	5,085
11	5,085	35	5,040
12	5,030	36	5,045
13	5,040	37	5,040
14	5,090	38	5,095
15	5,095	39	5,050
16	4,875	40	5,050
17	4,345	41	5,070
18	4,585	42	5,060
19	5,090	43	5,035
20	5,060	44	4,810
21	4,835	45	5,035
22	5,090	46	4,850
23	5,045	47	5,085
24	5,055	48	4,890

Pada pengamatan suhu area cetak dengan menggunakan *enclosure* didapatkan nilai temperatur yang bervariasi untuk setiap *run time*. Adapun suhu terendah sebesar 30,10 °C, suhu tertinggi sebesar 36,67 °C serta suhu rata-rata sebesar 33,73 °C (Tabel 5).

**Tabel 5.** Temperatur cetak

RT	Temp. (°C)	RT	Temp. (°C)
1	33,83	25	30,10
2	32,60	26	32,37
3	30,73	27	33,30
4	36,30	28	35,50
5	34,23	29	33,90
6	34,67	30	33,80
7	35,00	31	33,43
8	36,57	32	33,97
9	30,57	33	33,97
10	32,90	34	32,47
11	31,90	35	30,63
12	35,53	36	36,23
13	33,63	37	34,30
14	32,27	38	34,90
15	33,23	39	34,97
16	34,87	40	36,40
17	33,87	41	30,70
18	32,67	42	31,73
19	30,67	43	32,83
20	36,23	44	35,43
21	34,37	45	33,43
22	34,50	46	32,93
23	34,93	47	33,57
24	36,67	48	35,20

Pada diagram pareto *standardized effects* didapatkan bahwa tiga *main effect* secara statistik signifikan. Adapun *main effect* berdampak pada respon yaitu NT, Interaksi NT, BT dan LH, serta FLH.



Gambar 4. Pengukuran *warping*

Pada hasil analisis ANOVA didapatkan nilai P-Value untuk setiap parameter dan interaksi parameter. Hasil ANOVA didapatkan nilai P-Value kurang dari 0,05 yaitu NT, FLH, dan Interaksi NT,

BT dan LH. Sehingga didapatkan informasi bahwa parameter berpengaruh secara statistik signifikan terhadap respon yaitu NT, FLH dan interaksi NT\*BT\*LH (Tabel 6).

Tabel 6. ANOVA respon eksperimen

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	15	2.44486	0.162991	1.67	0.110
Linear	4	0.91991	0.229978	2.35	0.075
NT	1	0.45630	0.456300	4.67	0.038
BT	1	0.02341	0.023408	0.24	0.628
LH	1	0.02950	0.029502	0.30	0.586
FLH	1	0.41070	0.410700	4.21	0.049
2-Way Interactions	6	0.70929	0.118215	1.21	0.327
NT*BT	1	0.00500	0.005002	0.05	0.822
NT*LH	1	0.11021	0.110208	1.13	0.296
NT*FLH	1	0.22277	0.222769	2.28	0.141
BT*LH	1	0.02901	0.029008	0.30	0.590
BT*FLH	1	0.05400	0.054002	0.55	0.463
LH*FLH	1	0.28830	0.288300	2.95	0.095
3-Way Interactions	4	0.73233	0.183083	1.87	0.139
NT*BT*LH	1	0.41255	0.412552	4.22	0.048
NT*BT*FLH	1	0.00801	0.008008	0.08	0.776
NT*LH*FLH	1	0.18875	0.188752	1.93	0.174
BT*LH*FLH	1	0.12302	0.123019	1.26	0.270
4-Way Interactions	1	0.08333	0.083333	0.85	0.363
NT*BT*LH*FLH	1	0.08333	0.083333	0.85	0.363
Error	32	3.12537	0.097668		
Total	47	5.57023			

Adapun model regresi untuk respon penelitian didapatkan persamaan yang menggambarkan hubungan variabel NT, BT, LH, FLH dan interaksi antar variabel tersebut yaitu pada (2).

$$\begin{aligned}
 M_{AV} = & 0,2506 + 0,0975 \text{ NT} + 0,0221 \text{ BT} + & (2) \\
 & 0,0248 \text{ LH} - 0,0925 \text{ FLH} + 0,0102 \\
 & \text{NT*BT} - 0,0479 \text{ NT*LH} - 0,0681 \\
 & \text{NT*FLH} + 0,0246 \text{ BT*LH} - 0,0335 \\
 & \text{BT*FLH} + 0,0775 \text{ LH*FLH} + 0,0927 \\
 & \text{NT*BT*LH} + 0,0129 \text{ NT*BT*FLH} + \\
 & 0,0627 \text{ NT*LH*FLH} - 0,0506 \\
 & \text{BT*LH*FLH} - 0,0417 \\
 & \text{NT*BT*LH*FLH}
 \end{aligned}$$

Adapun untuk nilai R-Square yang didapatkan yaitu 43,89 %, hal tersebut mengindikasikan bahwa kemampuan model dalam menjelaskan data masih rendah (Tabel 7).

Tabel 7. Nilai R-Square

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.312518	43.89%	17.59%	0.00%

#### IV. KESIMPULAN

Analisis *warping* dengan menggunakan  $2^k$  factorial design dengan parameter berupa *nozzle temperatur* dengan nilai *level* yaitu 220°C dan 240°C, *bed temperature* dengan nilai *level* 60°C dan 90°C, *layer height* dengan nilai *level* 0,25 mm dan 0,3 mm serta *first layer height* sebesar 0,4 mm dan 0,8 mm didapatkan 48 *run time*. Hasil pengukuran spesimen didapatkan ilai *warping* terkecil sebesar 3,590 mm, terbesar sebesar 5,135 mm serta rata-rata nilai *warping* sebesar 4,915 mm. Pada hasil analisis ANOVA didapatkan nilai P-Value untuk setiap parameter dan interaksi parameter. Hasil ANOVA didapatkan nilai P-Value kurang dari 0,05 yaitu NT, FLH, dan Interaksi NT, BT dan LH. Sehingga diperlukan penentuan nilai *level* lebih lanjut ataupun penggantian parameter eksperimen terhadap parameter ataupun interaksi parameter dengan nilai P-Value lebih dari 0,05. Adapun pada diagram pareto *standardized effects* didapatkan bahwa tiga *main effect* secara statistik signifikan berdampak pada respon, yaitu NT, Interaksi NT, BT dan LH, serta FLH. Pada nilai R-Square didapatkan bahwa kemampuan model dalam menjelaskan variasi data eksperimen masih tergolong lemah. Berdasarkan hal tersebut disimpulkan bahwa diperlukan analisis lanjutan terhadap parameter dan nilai *level* untuk mendapatkan parameter dan nilai *level* yang berpengaruh secara signifikan terhadap terjadinya *warping* pada Material PMMA yang dicetak menggunakan Mesin 3D Printer FDM. Adapun parameter yang berpengaruh serta interaksinya yang yaitu pada model linear yaitu *nozzle temperatur*, *first layer height* serta untuk model *2-ways interaction* yaitu interaksi *nozzle temperature*, *bed temperature* dan *layer height*.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didanai oleh Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (LPPM) Universitas Jenderal Achmad Yani Yogyakarta.

#### REFERENSI

- [1] N. Shahrubudin, T. C. Lee, and R. Ramlan, "An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications," in *Procedia Manufacturing*, 2019, vol. 35, pp. 1286–1296.
- [2] T. J. Sheng, M. F. Shafee, Z. Ariffin, and M. Jaafar, "Review on Poly-methyl Methacrylate as Denture Base Materials," *Malaysian J. Microsc.*, vol. 14, no. 1, pp. 1–16, 2018.
- [3] A. Oryan, S. Alidadi, A. Bigham-Sadegh, and A. Moshiri, "Healing potentials of Polymethylmethacrylate Bone Cement Combined with Platelet Gel in The Critical-sized Radial Bone Defect of Rats," *PLoS One*, vol. 13, no. 4, pp. 1–17, 2018.
- [4] I. A. Rosid and A. E. Tontowi, "Parameter Optimization of Customized FDM 3D Printer Machine for Biocomposite Material [Sago/PMMA] Using 2k Fractional Factorial Design," *OPSI*, vol. 14, no. 2, pp. 188–196, 2021.
- [5] I. A. Rosid, I. R. Putra, and A. E. Tontowi, "Mechanical Properties of Tensile and Bending Stregth Analysis in Biocomposite [Sagoo/PMMA] Material," in *Seminar Nasional Teknologi Informasi dan Kedirgantaraan*, 2019, vol. V, pp. 507–514.
- [6] M. S. Zafar, "Prosthodontic Applications of Polymethyl Methacrylate (PMMA): An Update," *Polymers (Basel)*, vol. 12, no. 10, pp. 1–35, 2020.
- [7] M. I. Asskhaaf, H. Nurhadi, and D. Kuswanto, "Rancang Bangun Bio 3D Printer Menggunakan Material Biocompatibel Peek," *J. Tek. ITS*, vol. 11, no. 2, pp. 1–6, 2022.
- [8] K. A. Sekarjati and A. E. Tontowi, "The composition of biocomposite [polymethyl methacrylate/ hydroxyapatite] as material for specimen with portabee kit machine," *SINERGI*, vol. 22, no. 3, pp. 169–176, 2018.
- [9] M. Arora, E. K. S. Chan, S. Gupta, and A. D. Diwan, "Polymethylmethacrylate Bone Cements and Additives: A Review of the Literature," *World J. Orthop.*, vol. 4, no. 2, pp. 67–74, 2013.
- [10] S. Ramakrishna and Z.-M. Huang, "Biocomposites," in *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*, no. April 2015, Elsevier Inc., 2016.
- [11] G. C. Sih, G. M. Connelly, and A. T. Berman, "The effect of thickness and pressure on the curing of PMMA bone cement for the total hip joint replacement," *J. Biomech.*, vol. 13, no. 4, pp. 347–352, 1980.
- [12] E. Pawar, "A Review Article on Acrylic PMMA," *ISOR J. Mech. Civ. Eng.*, vol. 13, no. 2, pp. 1–4, 2016.
- [13] P. Spasojevic, M. Zrilic, V. Panic, D. Stamenkovic, S. Seslija, and S. Velickovic, "The Mechanical Properties of a Poly(methyl methacrylate) Denture Base Material Modified with Dimethyl Itaconate and Di-n-butyl Itaconate," *Int. J. Polym. Sci.*, vol. 2015, 2015.
- [14] K. Tappa and U. Jammalamadaka, "Novel Biomaterials Used in Medical 3D Printing Techniques," *Funct. Biomater.*, vol. 9, no. 17, 2018.
- [15] R. D. Almy and A. E. Tontowi, "The Effect of 3D Printing Machine Parameters in Extrusion Process of Biocomposite Materials (PMMA and HA) on Dimensional Accuracy," *SINERGI*, vol. 22, no. 2, pp. 83–90, 2018.
- [16] Kementrian Perindustrian, "Making Indonesia 4.0." Kementrian Perindustrian, pp. 1–8, 2019.
- [17] O. Abdulhameed, A. Al-Ahmari, W. Ameen, and S. H. Mian, "Additive Manufacturing: Challenges, Trends, and Applications," *Adv.*

- Mech. Eng.*, vol. 11, no. 2, pp. 1–27, 2019.
- [18] H. Yin, M. Qu, H. Zhang, and Y. C. Lim, “3D Printing and Buildings: A Technology Review and Future Outlook,” *Technol. Archit. Des.*, vol. 2, no. 1, pp. 94–111, 2018.
- [19] F. Safari, A. Kami, and V. Abedini, “3D Printing of Continuous Fiber Reinforced Composites: A Review of The Processing, Pre- And Post-Processing Effects on Mechanical Properties,” *Polym. Polym. Compos.*, vol. 30, no. June, 2022.
- [20] J. H. Jo, B. W. Jo, W. Cho, and J. H. Kim, “Development of a 3D Printer for Concrete Structures: Laboratory Testing of Cementitious Materials,” *Int. J. Concr. Struct. Mater.*, vol. 14, no. 1, 2020.
- [21] N. A. Sukindar, N. M. Samsudin, S. I. S. Shaharuddin, and S. Kamaruddin, “The Effects of FDM Printing Parameters on the Compression Properties of Polymethylmethacrylate (PMMA) using Finite Element Analysis,” *Int. J. Integr. Eng.*, vol. 14, no. 2, pp. 86–92, 2022.
- [22] C. V. Madhav, R. S. N. H. Kesav, and Y. S. Narayan, “Importance and Utilization of 3D Printing in Various Applications,” *J. Cachexia. Sarcopenia Muscle*, vol. 5, no. 3, pp. 199–207, 2016.
- [23] Pristiansyah, Hardiansyah, and Sugiyarto, “Optimasi Parameter Proses 3D Printing FDM Terhadap Akurasi Dimensi Menggunakan Filament Eflex,” *Manutech J. Teknol. Manufaktur*, vol. 11, no. 01, pp. 33–40, 2019.
- [24] K. Haghsefat and L. Tingting, “FDM 3D Printing Technology and Its Fundamental Properties,” *ICIRES - Int. Conf. Innov. Res. Eng. Sci.*, no. June, 2020.
- [25] J. Wu, “Study on optimization of 3D printing parameters,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 392, no. 6, 2018.
- [26] A. N. Y. Pettalolo, I. A. Rosid, and A. E. Tontowi, “Pengembangan Mesin 3D Printing Bangunan Untuk Material Sisa Reruntuhan Bangunan,” *J. Perad. Sains, Rekayasa dan Teknol.*, vol. 10, no. 1, pp. 122–133, 2022.
- [27] M. C. S. S. Thong and M. C. W. Wen, “3D Printing-Revolutionising Military Operations,” *J. Singapore Armed Forces*, vol. 42, no. 2, pp. 35–46, 2016.
- [28] F. J. Al-Gawhari and A. A. M. Ali, “Types of 3D Printers Applied in Industrial Pharmacy and Drug Delivery,” *Tech. Biochem.*, vol. 3, no. 2, pp. 1–14, 2022.
- [29] A. A. Rosli, R. K. Shuib, K. M. Ishak, Z. A. A. Hamid, M. K. Abdullah, and A. Rusli, “Influence of Bed Temperature on Warpage , Shrinkage and,” in *3rd International Postgraduate Conference on Materials, Minerals & Polymer (MAMIP) 2019*, 2020, no. February 2019.
- [30] D. B. Kusuma, M. Mahardika, J. Pratama, U. A. Salim, S. I. Cahyono, and B. Arifvianto, “Metode Pencegahan Warping dan Cacat Kualitas Permukaan Produk Fused Deposition Modelling (FDM),” *Conf. Senat. STT Adisutjipto Yogyakarta*, vol. 7, pp. 47–56, 2022.
- [31] F. Hamedi-Rad, T. Ghaffari, F. Rezaei, and A. Ramazani, “Effect of Nanosilver on Thermal and Mechanical Properties of Acrylic Base Complete Dentures,” *J. Dent.*, vol. 11, no. 5, pp. 495–505, 2014.
- [32] A. E. Tontowi and D. A. Putra, “Effect of Sericin in [ HA / Bioplastic ] Composite Composed by 2k Factorial Design Method on Solidification Time and Tensile Strength,” *Int. J. Eng. Technol.*, vol. 7, no. 5, pp. 1943–1951, 2015.
- [33] H. A. Latif, I. A. Rosid, G. S. Dewi, and M. G. D. Jatningsih, “Optimasi Multi Parameter Mesin 3D Printer FDM untuk Material Thermoplastic Polyurethane Guna Menghasilkan Error Dimensi Terkecil Menggunakan Metode 2k Factorial Design,” *J. Ilm. Tek. Ind.*, vol. 12, no. 1, pp. 41–49, 2024.
- [34] M. R. Arifiyanto, B. D. Siswanto, and B. Hotsan, “Analisa Pengengaruh Temperatur dan Kelembaban Terhadap Perubahan Panjang dan Gugus Fungsi Pada Material Plastik PMMA (Polymethylmethacrylate),” *J. Mech. Eng. Manuf. Energy*, vol. 4, no. 2, pp. 159–173, 2020.
- [35] D. C. Montgomery, *Introduction To Statistical Quality Control*, Sixth. Missouri: Wiley., 2009.
- [36] D. F. Hamilton, M. Ghert, and A. H. R. W. Simpson, “Interpreting Regression Models in Clinical Outcome Studies,” *Bone Jt. Res.*, vol. 4, no. 9, pp. 152–153, 2015.

