

## OPTIMASI MULTI PARAMETER MESIN 3D PRINTER FDM UNTUK MATERIAL *THERMOPLASTIC POLYURETHANE* GUNA MENGHASILKAN *ERROR* DIMENSI TERKECIL MENGGUNAKAN METODE $2^k$ FACTORIAL DESIGN

Hudan Ahmad Latif<sup>1)</sup>, Ibnu Abdul Rosid<sup>2)</sup>, Grita Supriyanto Dewi<sup>3)</sup>,  
Maria Gratiana Dian Jatningsih<sup>4)</sup>

Program Studi Teknik Industri Universitas Jenderal Achmad Yani Yogyakarta  
e-mail: <sup>1)</sup>hudamad8@gmail.com, <sup>2)</sup>ibnu.arrasheed@gmail.com, <sup>3)</sup>grita1202@gmail.com,  
<sup>4)</sup>mariagratiandian@gmail.com

### ABSTRAK

*Fused Deposition Modeling atau FDM merupakan salah satu teknologi 3D printing yang umum digunakan pada proses manufaktur berbasis Teknologi Additive Manufacturing. Salah satu material yang dapat digunakan pada Mesin FDM adalah thermoplastic polyurethane (TPU). Salah satu ukuran kualitas hasil cetak adalah ketelitian mesin dalam menghasilkan benda kerja yang memiliki error dimensi sekecil mungkin. Sehingga penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan parameter cetak yang paling berpengaruh pada hasil cetak dan mengetahui kombinasi parameter proses cetak pada mesin yang optimal guna menghasilkan error dimensi terkecil untuk material TPU. Metode design of experiment yang digunakan adalah  $2^k$  factorial design dengan menggunakan 4 parameter proses, 2 level, dan 3 respon. Parameter yang digunakan yaitu nozzle temperature, print speed, fill density, dan enclosure box. Hasil optimasi didapatkan kombinasi parameter proses cetak yang optimal guna menghasilkan error dimensi terkecil yaitu nozzle temperature sebesar 210°C, print speed sebesar 30 mm/s, fill density sebesar 100%, dan tidak menggunakan enclosure box.*

**Kata kunci:** FDM, TPU, optimasi, parameter, error dimensi, 3D Printing.

### ABSTRACT

*Fused Deposition Modeling or FDM is a 3D printing technology that is commonly used in manufacturing processes based on Additive Manufacturing Technology. One of the materials that can be used on FDM machines is thermoplastic polyurethane (TPU). One measure of the quality of printed results is the machine's accuracy in producing workpieces that have the smallest possible dimensional error. So this research aims to obtain the printing parameters that have the most influence on print results and find out the optimal combination of printing process parameters on the machine to produce the smallest dimensional error for TPU material. The design of experiment method used is  $2^k$  factorial design using 4 process parameters, 2 levels and 3 responses. The parameters used are nozzle temperature, print speed, fill density, and enclosure box. The optimization results obtained an optimal combination of printing process parameters to produce the smallest dimensional error, namely nozzle temperature of 210°C, print speed of 30 mm/s, fill density of 100%, and not using an enclosure box.*

**Keywords:** FDM, TPU, optimization, parameter, dimensional error, 3D Printing.

## PENDAHULUAN

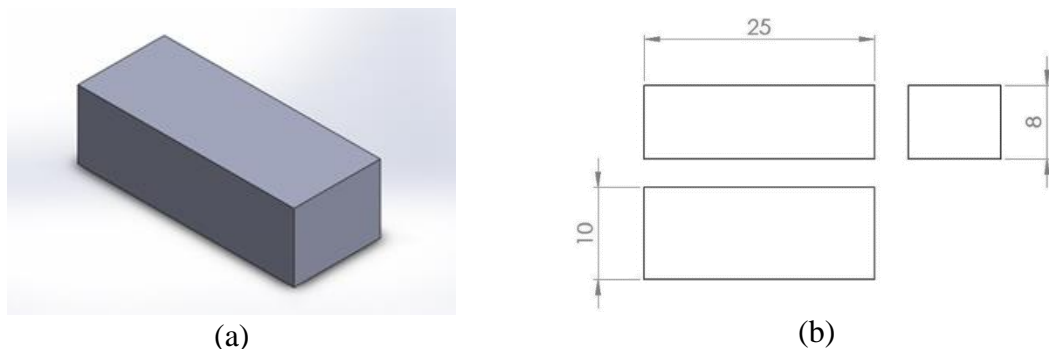
Perkembangan teknologi manufaktur mengalami berbagai kemajuan, salah satunya adalah teknologi *3D printing* atau disebut juga *additive manufacturing* [1]. Teknologi 3D Printing telah digunakan di berbagai bidang seperti industri manufaktur, kesehatan, pendidikan, dan sebagainya [2]. Penggunaan dalam industri manufaktur, *3D Printing* digunakan sebagai sarana untuk membuat purwarupa (*prototype*). Pada pembuatan benda kerja, Teknologi *3D Printing* membuat benda padat tiga dimensi dari suatu desain digital [3]. Terdapat beberapa macam Teknologi 3D Printing, seperti *Fused Depositon Modeling* (FDM), *Stereolithography Apparatus* (SLA), *Selective Laser Sintering* (SLS), dan *Digital Light Processing* (DLP). FDM merupakan salah satu teknologi *3D printing* yang banyak digunakan. Hal tersebut dikarenakan pengoperasiannya yang relatif sederhana, biaya yang relatif murah, serta berbagai jenis material yang dapat diakses di pasar [3]. Proses kerja FDM

menggunakan material polimer berbentuk filamen, kemudian filamen dipanaskan dan diekstrusi melalui *nozzle* pada meja printer secara lapis demi lapis hingga terbentuk objek tiga dimensi sesuai dengan desain objek tiga dimensi [4]. Salah satu material yang dapat digunakan pada Mesin 3D Printer FDM adalah *Thermoplastic Polyurethane* (TPU) [5]. Material TPU digunakan pada berbagai bidang, diantaranya pertambangan [6]. Akurasi hasil cetak Mesin 3D Printer menjadi salah satu aspek kualitas cetak [2]. Untuk mendapatkan hasil cetak yang optimal diperlukan analisis terhadap parameter untuk mendapatkan kombinasi yang menghasilkan hasil cetak yang optimal [2,7–9]. Metode *Design of Experiment* (DoE) merupakan metode yang dapat digunakan untuk pengembangan proses atau pemecahan masalah proses untuk meningkatkan kinerja proses atau untuk mendapatkan proses yang kuat [10].  $2^k$  factorial design menjadi salah satu pendekatan yang dapat digunakan sebagai metode optimasi [2,11]. Metode Faktorial design dapat digunakan untuk penelitian yang bertujuan untuk mengetahui kemungkinan kombinasi nilai *level* parameter [12,13,14]. Oleh karena itu, pada penelitian ini dilakukan analisis mengenai nilai *level* dan parameter Mesin 3D Printer FDM untuk material TPU menggunakan pendekatan  $2^k$  factorial design untuk mendapatkan kesalahan (*error*) dimensi terkecil.

## METODE PENELITIAN

### Spesimen

Desain spesimen berbentuk balok dengan dimensi 25 mm x 10 mm x 8 mm (Gambar 1). Desain spesimen dirancang dengan menggunakan *Computer Aided Design* (CAD). Hasil dari CAD disimpan dalam bentuk *File Stereolithography* (STL). File STL kemudian dikonversi menjadi *file gcode* dengan menggunakan *Software Slicer Cura*. Pada proses *slicing* tersebut ditentukan nilai *level* dan parameter cetak.



Gambar 1. Desain Spesimen (a) dan Dimensi Spesimen (b)

### Level dan Parameter

Penentuan parameter didasarkan pada penelitian terdahulu. Parameter yang digunakan adalah *nozzle temperature*, *print speed*, *fill density*, dan *enclosure box*. Parameter *nozzle temperature* berpengaruh terhadap hasil cetak untuk material TPU [15]. Selain itu parameter *print speed* dan *fill density* digunakan sebagai parameter yang digunakan untuk didapatkan nilai *level* parameter cetak untuk mesin 3D Printer FDM [2,16]. Parameter lain yang digunakan yaitu penggunaan *enclosure*, penggunaan *enclosure* dapat dimasukkan dalam pengujian parameter mesin 3D Printer FDM untuk mengoptimalkan hasil cetak [17]. Adapun nilai *level* didasarkan pada *pilot study*.

Tabel 1. Variabel dan Levelnya

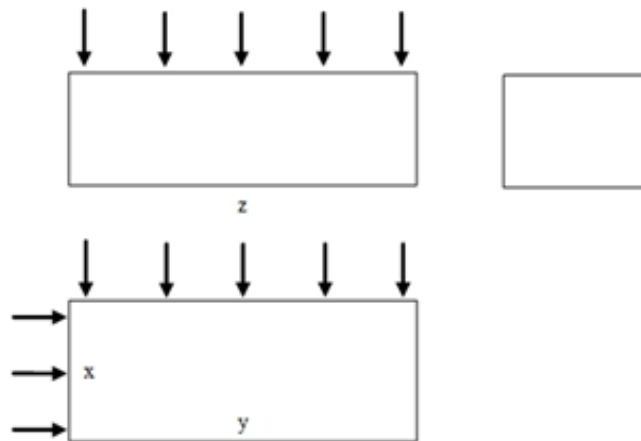
Parameter	Level		Satuan	Keterangan
	+	-		
<i>Nozzle temperature</i>	210	205	°C	Suhu temperatur <i>nozzle</i> saat proses cetak dilakukan
<i>Print speed</i>	40	30	mm/s	Kecepatan gerak ( <i>move</i> ) <i>nozzle</i> saat proses cetak
<i>Fill density</i>	100	80	%	Kerapatan isi ( <i>fill</i> ) pada spesimen
<i>Enclosure</i>	Yes	No	-	Penggunaan <i>enclosure</i> pada saat proses cetak

### Error Dimensi

Error dimensi dapat dihitung dengan menggunakan perhitungan selisih antara dimensi desain ( $D_d$ ) dengan dimensi hasil cetak atau *printing* ( $D_p$ ) dibandingkan dimensi *design* ( $D_d$ ) (Persamaan 1) [2]. Adapun pengukuran menggunakan jangka sorong dengan ketelitian 0,05 mm.

$$\text{Error dimensi (\%)} = \left[ \frac{D_p - D_d}{D_d} \right] \times 100\% \quad (1)$$

Pada tahap pengukuran dilakukan dengan melakukan pengukuran pada beberapa titik, yaitu untuk pengukuran dimensi X sebesar 5 titik, dimensi Y sebesar 3 titik dan dimensi Z sebesar 5 titik (Gambar 2). Hal tersebut bertujuan untuk mendapatkan ukuran dimensi yang lebih presisi.



Gambar 2. Titik Ukur Spesimen

### Design of Experiment

Pada tahap ini dilakukan penentuan nilai parameter dan level pencetakan pada proses cetak mesin 3D *printer* FDM dari hasil *pilot study* serta membuat tabel desain eksperimen dengan metode  $2^k$  *factorial design*. Pembuatan tabel desain eksperimen menggunakan *Software* Minitab dengan 4 parameter dan 2 level yang direplikasi sejumlah 3 kali.

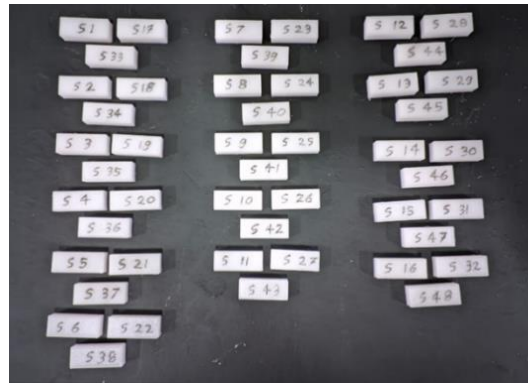
Tabel 2. *Design of Experiment*

RT	NT	PS	FS	EB	RT	NT	PS	FS	EB	RT	NT	PS	FS	EB	RT	NT	PS	FS	EB
1	-1	-1	-1	-1	13	-1	-1	1	1	25	-1	-1	-1	1	37	-1	-1	1	-1
2	1	-1	-1	-1	14	1	-1	1	1	26	1	-1	-1	1	38	1	-1	1	-1
3	-1	1	-1	-1	15	-1	1	1	1	27	-1	1	-1	1	39	-1	1	1	-1
4	1	1	-1	-1	16	1	1	1	1	28	1	1	-1	1	40	1	1	1	-1
5	-1	-1	1	-1	17	-1	-1	-1	-1	29	-1	-1	1	1	41	-1	-1	-1	1
6	1	-1	1	-1	18	1	-1	-1	-1	30	1	-1	1	1	42	1	-1	-1	1
7	-1	1	1	-1	19	-1	1	-1	-1	31	-1	1	1	1	43	-1	1	-1	1
8	1	1	1	-1	20	1	1	-1	-1	32	1	1	1	1	44	1	1	-1	1
9	-1	-1	-1	1	21	-1	-1	1	-1	33	-1	-1	-1	-1	45	-1	-1	1	1
10	1	-1	-1	1	22	1	-1	1	-1	34	1	-1	-1	-1	46	1	-1	1	1
11	-1	1	-1	1	23	-1	1	1	-1	35	-1	1	-1	-1	47	-1	1	1	1
12	1	1	-1	1	24	1	1	1	-1	36	1	1	-1	-1	48	1	1	1	1

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Hasil Cetak

Pada hasil *running* Mesin 3D Printer FDM menggunakan material TPU didapatkan 48 spesimen dengan *setting* parameter sesuai dengan *design of experiment* (Gambar 3). Hasil cetak tersebut dilakukan pengukuran sesuai dengan titik pengukuran.



Gambar 3. Spesimen Hasil Cetak

Pengukuran spesimen hasil cetak didapatkan nilai *error* dimensi yang bervariasi pada setiap dimensi dan setiap spesimen. Adapun jumlah data pengukuran sebesar 48 data (Tabel 3).

Tabel 3. Hasil Pengukuran Error Dimensi

Run Time	Error Dimensi			Run Time	Error Dimensi			Run Time	Error Dimensi		
	X	Y	Z		X	Y	Z		X	Y	Z
1	0,0061	0,0056	0,005	17	0,0072	0,0016	0,0005	33	0,0056	0,0016	0,0015
2	0,0059	0,0044	0,0025	18	0,0067	0,0048	0,0035	34	0,0085	0,0036	0,0035
3	0,0101	0,0092	0,0015	19	0,0093	0,0076	0,0015	35	0,0096	0,0048	0,0005
4	0,0104	0,0100	0,001	20	0,0096	0,0076	0,004	36	0,0099	0,0072	0,004
5	0,0067	0,0052	0,0065	21	0,0067	0,0032	0,0005	37	0,0069	0,0048	0,0035
6	0,0061	0,0016	0,002	22	0,0075	0,0012	0,0015	38	0,0064	0,0012	0,0025
7	0,0072	0,0092	0,0075	23	0,0075	0,0072	0,004	39	0,0075	0,0068	0,0055
8	0,0096	0,0080	0,0015	24	0,0088	0,0080	0,0015	40	0,0093	0,0092	0,0015
9	0,0096	0,0048	0,002	25	0,0088	0,0096	0,0005	41	0,0088	0,0060	0,0015
10	0,0099	0,0076	0,0015	26	0,0091	0,0088	0,0015	42	0,0075	0,0076	0,0005
11	0,0109	0,0144	0,0005	27	0,0115	0,0136	0,0025	43	0,0115	0,0136	0,002
12	0,0109	0,0132	0,0005	28	0,0107	0,0116	0,004	44	0,0117	0,0124	0,003
13	0,0112	0,0124	0,0015	29	0,0109	0,0120	0,004	45	0,0107	0,0104	0,005
14	0,0112	0,0132	0,002	30	0,0112	0,0144	0,0015	46	0,0112	0,0140	0,003
15	0,0107	0,0136	0,0165	31	0,0112	0,0136	0,003	47	0,0109	0,0140	0,0075
16	0,0109	0,0136	0,0025	32	0,0115	0,0124	0,0005	48	0,0109	0,0120	0,001
Rata-rata					0,0092	0,0086	0,0028				

Pada saat proses cetak dilakukan pengamatan terhadap kondisi area cetak, yaitu suhu (*temperature*) dan kelembaban. Pada hasil pengamatan didapatkan suhu rata-rata suhu dan kelembaban rata-rata yang bervariasi.

### Analysis of Variance

Berdasarkan hasil ANOVA untuk *error* dimensi X (Tabel 4) menunjukkan bahwa *P-value* kurang dari  $\alpha$  adalah parameter *print speed*, parameter *enclosure box*, interaksi antara *print speed* dan *fill density*, interaksi antara *print speed* dan *enclosure box*, interaksi antara *fill density* dan *enclosure box*, sehingga secara statistik dinyatakan signifikan terhadap respon *error* dimensi X. Untuk variabel lainnya didapatkan *P-Value* lebih besar dari  $\alpha = 0,05$ , yang artinya variabel lainnya tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap respon *error* dimensi X.

Tabel 4. ANOVA Error Dimensi X

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	15	0,000154	0,000010	27,79	0,000
Linear	4	0,000124	0,000031	83,81	0,000
NT	1	0,000001	0,000001	3,84	0,059
PS	1	0,000037	0,000037	98,60	0,000
FD	1	0,000000	0,000000	0,48	0,492
EB	1	0,000086	0,000086	232,32	0,000

Lanjutan Tabel 4. ANOVA Error Dimensi X

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
2-Way Interactions	6	0,000027	0,000005	12,24	0,000
NT*PS	1	0,000000	0,000000	1,16	0,290
NT*FD	1	0,000001	0,000001	1,44	0,238
NT*EB	1	0,000001	0,000001	3,84	0,059
PS*FD	1	0,000011	0,000011	30,28	0,000
PS*EB	1	0,000005	0,000005	13,00	0,001
FD*EB	1	0,000009	0,000009	23,72	0,000
3-Way Interactions	4	0,000002	0,000000	1,20	0,328
NT*PS*FD	1	0,000001	0,000001	2,50	0,124
NT*PS*EB	1	0,000000	0,000000	1,16	0,290
NT*FD*EB	1	0,000000	0,000000	0,00	0,950
PS*FD*EB	1	0,000000	0,000000	1,16	0,290
4-Way Interactions	1	0,000001	0,000001	3,36	0,076
NT*PS*FD*EB	1	0,000001	0,000001	3,36	0,076
Error	32	0,000012	0,000000		
Total	47	0,000166			

Berdasarkan hasil ANOVA untuk *error* dimensi y (Tabel 5) menunjukkan bahwa P-Value parameter *print speed*, parameter *fill density*, parameter *enclosure box*, interaksi antara *print speed* dan *fill density*, interaksi antara *fill density* dan *enclosure box*, interaksi *nozzle temperature*, *print speed*, dan *enclosure box*, interaksi antara *print speed*, *fill density*, dan *enclosure box* lebih kecil dari  $\alpha$ , sehingga secara statistik parameter tersebut signifikan terhadap respon *error* dimensi Y.

Tabel 5. ANOVA Error Dimensi Y

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	15	0,000749	0,000050	30,63	0,000
Linear	4	0,000639	0,000160	98,02	0,000
NT	1	0,000000	0,000000	0,10	0,754
PS	1	0,000181	0,000181	111,02	0,000
FD	1	0,000019	0,000019	11,50	0,002
EB	1	0,000439	0,000439	269,47	0,000
2-Way Interactions	6	0,000049	0,000008	5,04	0,001
NT*PS	1	0,000001	0,000001	0,74	0,397
NT*FD	1	0,000002	0,000002	1,28	0,267
NT*EB	1	0,000000	0,000000	0,10	0,754
PS*FD	1	0,000013	0,000013	8,12	0,008
PS*EB	1	0,000007	0,000007	4,52	0,041
FD*EB	1	0,000025	0,000025	15,48	0,000
3-Way Interactions	4	0,000056	0,000014	8,64	0,000
NT*PS*FD	1	0,000002	0,000002	1,28	0,267
NT*PS*EB	1	0,000017	0,000017	10,31	0,003
NT*FD*EB	1	0,000007	0,000007	4,52	0,041
PS*FD*EB	1	0,000030	0,000030	18,46	0,000
4-Way Interactions	1	0,000004	0,000004	2,51	0,123
NT*PS*FD*EB	1	0,000004	0,000004	2,51	0,123
Error	32	0,000052	0,000002		
Total	47	0,000801			

Berdasarkan hasil ANOVA untuk *error* dimensi Z (Tabel 6) menunjukkan bahwa P-value parameter *nozzle temperature*, parameter *fill density*, interaksi antara *nozzle temperature* dan *fill density*, interaksi antara *nozzle temperature*, *print speed*, dan *fill density* lebih kecil dari  $\alpha$ , sehingga secara statistik parameter tersebut signifikan terhadap respon *error* dimensi Z.

Tabel 6. ANOVA Error Dimensi Z

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	15	0,000185	0,000012	2,50	0,014
Linear	4	0,000061	0,000015	3,09	0,029
NT	1	0,000024	0,000024	4,88	0,034
PS	1	0,000008	0,000008	1,69	0,203
FD	1	0,000029	0,000029	5,78	0,022
EB	1	0,000000	0,000000	0,00	0,949

Lanjutan Tabel 6. ANOVA Error Dimensi Z

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
2-Way Interactions	6	0,000096	0,000016	3,25	0,013
NT*PS	1	0,000009	0,000009	1,86	0,182
NT*FD	1	0,000061	0,000061	12,30	0,001
NT*EB	1	0,000005	0,000005	1,08	0,306
PS*FD	1	0,000007	0,000007	1,37	0,251
PS*EB	1	0,000007	0,000007	1,37	0,251
FD*EB	1	0,000008	0,000008	1,52	0,226
3-Way Interactions	4	0,000026	0,000006	1,29	0,293
NT*PS*FD	1	0,000023	0,000023	4,59	0,040
NT*PS*EB	1	0,000003	0,000003	0,51	0,480
NT*FD*EB	1	0,000000	0,000000	0,07	0,797
PS*FD*EB	1	0,000000	0,000000	0,00	1,000
4-Way Interactions	1	0,000003	0,000003	0,51	0,480
NT*PS*FD*EB	1	0,000003	0,000003	0,51	0,480
Error	32	0,000158	0,000005		
Total	47	0,000343			

### Model Regresi

Hasil pada analisis statistik didapatkan Model Regresi untuk setiap respon penelitian. Pada regresi didapatkan hubungan secara model matematis antara setiap respon dengan parameter ataupun kombinasi parameter penelitian.

Model regresi *error* dimensi X

$$\begin{aligned} \text{Error Dimensi X} = & 0,009217 + 0,000172 \text{ NT} + 0,000872 \text{ PS} + 0,000061 \text{ FD} + \\ & 0,001339 \text{ EB} + 0,000094 \text{ NT*PS} + 0,000106 \text{ NT*FD} - 0,000172 \\ & \text{NT*EB} - 0,000483 \text{ PS*FD} - 0,000317 \text{ PS*EB} + 0,000428 \\ & \text{FD*EB} + 0,000139 \text{ NT*PS*FD} - 0,000094 \text{ NT*PS*EB} + \\ & 0,000006 \text{ NT*FD*EB} - 0,000094 \text{ PS*FD*EB} - 0,000161 \\ & \text{NT*PS*FD*EB} \end{aligned}$$

Model regresi *error* dimensi Y

$$\begin{aligned} \text{Error Dimensi Y} = & 0,008592 + 0,000058 \text{ NT} + 0,001942 \text{ PS} + 0,000625 \text{ FD} + \\ & 0,003025 \text{ EB} - 0,000158 \text{ NT*PS} - 0,000208 \text{ NT*FD} + 0,000058 \\ & \text{NT*EB} - 0,000525 \text{ PS*FD} - 0,000392 \text{ PS*EB} + 0,000725 \\ & \text{FD*EB} + 0,000208 \text{ NT*PS*FD} - 0,000592 \text{ NT*PS*EB} + \\ & 0,000392 \text{ NT*FD*EB} - 0,000792 \text{ PS*FD*EB} - 0,000292 \\ & \text{NT*PS*FD*EB} \end{aligned}$$

Model regresi *error* dimensi Z

$$\begin{aligned} \text{Error Dimensi Z} = & 0,002812 - 0,000708 \text{ NT} + 0,000417 \text{ PS} + 0,000771 \text{ FD} + \\ & 0,000021 \text{ EB} - 0,000437 \text{ NT*PS} - 0,001125 \text{ NT*FD} - 0,000333 \\ & \text{NT*EB} + 0,000375 \text{ PS*FD} + 0,000375 \text{ PS*EB} + 0,000396 \\ & \text{FD*EB} - 0,000687 \text{ NT*PS*FD} - 0,000229 \text{ NT*PS*EB} - \\ & 0,000083 \text{ NT*FD*EB} + 0,000000 \text{ PS*FD*EB} - 0,000229 \\ & \text{NT*PS*FD*EB} \end{aligned}$$

### R-Square

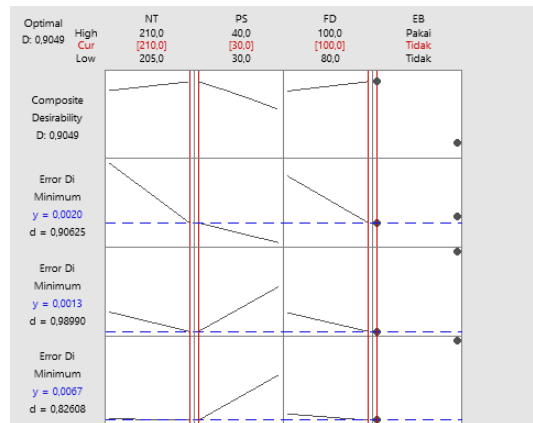
Berdasarkan nilai R-Square (Tabel 7), menunjukkan nilai R-square untuk *error* dimensi x sebesar 92,87%, artinya variabel bebas mempengaruhi respon *error* dimensi x sebesar 92,87%. Nilai R-square untuk *error* dimensi y sebesar 93,46%. Nilai R-square untuk *error* dimensi z sebesar 53,98%.

Tabel 7. Nilai R-Square

Variabel Respon	Nilai R-square
Error dimensi x	92,87%
Error dimensi y	93,49%
Error dimensi z	53,98%

### Optimasi Parameter Cetak

Optimasi kombinasi parameter untuk respon terkecil dilakukan untuk mendapatkan kombinasi parameter yang optimal untuk menghasilkan *error* dimensi terkecil. Hasil optimasi menggunakan *software* Minitab (Gambar 4) didapatkan kombinasi level parameter proses cetak yaitu *nozzle temperature* sebesar 210°C, *print speed* sebesar 30 mm/s, *fill density* sebesar 100%, dan tidak menggunakan *enclosure box*.



Gambar 4. Plot Kombinasi Parameter

Proses cetak spesimen optimasi menggunakan pengaturan parameter dan level hasil optimasi. Proses cetak dilakukan sejumlah 3 kali pencetakan (replikasi), sehingga didapatkan nilai rata-rata setiap respon *error* dimensi.

Tabel 8. Hasil Pengukuran Spesimen Optimasi

Respon	Replikasi			Rata-rata
	1	2	3	
Error dimensi X	0,0096	0,0088	0,0069	0,0084
Error dimensi Y	0,0044	0,0064	0,0036	0,0048
Error dimensi Z	0,0045	0,0030	0,0005	0,0027

Hasil pengukuran spesimen optimasi didapatkan rata-rata dari 3 kali replikasi proses cetak yaitu *error* dimensi X sebesar 0,0084, *error* dimensi Y sebesar 0,0048, dan *error* dimensi Z sebesar 0,0027. Adapun suhu dan kelembaban selama proses cetak hasil optimasi yaitu rata-rata suhu sebesar 29,84°C dan rata-rata kelembaban sebesar 42,02% (Tabel 8). Hasil perbandingan antara spesimen hasil eksperimen dan spesimen hasil optimasi didapatkan selisih (*gap*) *error* dimensi (Tabel 9).

Tabel 9. Perbandingan Hasil DoE dengan Hasil Optimasi

Respon	Rata-rata hasil DoE	Rata-rata Hasil Optimasi	Gap
Error dimensi X	0,0092	0,0084	0,0008
Error dimensi Y	0,0086	0,0048	0,0038
Error dimensi Z	0,0028	0,0027	0,0001

Didapatkan selisih hasil eksperimen dengan hasil optimasi yaitu pada *error* dimensi X menunjukkan hasil optimasi lebih kecil dari hasil DoE dengan selisih sebesar 0,0008. Pada *error* dimensi Y menunjukkan hasil optimasi lebih kecil dari hasil DoE dengan selisih sebesar 0,0038, sedangkan pada *error* dimensi Z menunjukkan hasil optimasi lebih kecil dari hasil DoE dengan selisih sebesar 0,0001 (Tabel 9).

## KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian didapatkan kesimpulan, terkait dengan signifikansi parameter proses yang berpengaruh signifikan terhadap respon *error* dimensi X adalah parameter *print speed*, parameter *enclosure box*, interaksi antara *print speed* dan *fill density*, interaksi antara *print speed* dan *enclosure box*, interaksi antara *fill density* dan *enclosure box*. Parameter proses yang berpengaruh signifikan terhadap respon *error* dimensi Y adalah parameter *print speed*, parameter *fill density*, parameter *enclosure box*, interaksi antara *print speed* dan *fill density*, interaksi antara *fill density* dan *enclosure box*, interaksi *nozzle temperature*, *print speed*, dan *enclosure box*, interaksi antara *print speed*, *fill density*, dan *enclosure box*. Parameter proses yang berpengaruh signifikan terhadap respon *error* dimensi Z adalah parameter *nozzle temperature*, parameter *fill density*, interaksi antara *nozzle temperature* dan *fill density*, interaksi antara *nozzle temperature*, *print speed*, dan *fill density*. Hasil optimasi didapatkan kombinasi parameter proses cetak yang optimal guna menghasilkan *error* dimensi terkecil yaitu *nozzle temperature* sebesar 210°C, *print speed* sebesar 30 mm/s, *fill density* sebesar 100%, dan tidak menggunakan *enclosure box*. Suhu dan kelembaban selama proses cetak hasil optimasi yaitu rata-rata suhu sebesar 29,84°C dan rata-rata kelembaban sebesar 42,02%. Didapatkan hasil rata-rata optimasi setiap *error* dimensi yaitu *error* dimensi X sebesar 0,0084, *error* dimensi Y sebesar 0,0048, dan *error* dimensi Z sebesar 0,0027 yang menunjukkan bahwa hasil optimasi lebih kecil dari hasil DoE sehingga hasil optimasi lebih baik dibanding dengan hasil DoE.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] I. Akbar, Z.S. Suzen, and Idiar, "Analisis Proses 3D Printing terhadap Pengujian Impak Metode Charpy Pada Material PLA+," *J. Syntax Admiration*, vol. 2, no. 8, pp. 1480–1493, 2021, doi: 10.46799/jsa.v2i8.297.
- [2] 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, p. 188, 2021, doi: 10.31315/opsi.v14i2.5352.
- [3] W.H. Pratama, Hasdiansah, and Husman, "Optimasi Parameter Proses 3D Printing Terhadap Kuat Tarik Material Filamen PLA + Menggunakan Metode Taguchi," *Sprocket J. Mech. Eng.*, vol. 3, no. 1, pp. 39–45, 2021, doi: 10.36655/sprocket.v3i1.568.
- [4] A.W. Nugroho, D. Tohidin, and C. Budiyanoro, "Analisis pengaruh parameter proses terhadap kuat tarik produk 3D Printing dari bahan Polyvinyl Alcohol (PVA)," vol. 9, no. 2, pp. 154–161, 2020.
- [5] P. Ferretti *et al.*, "Application of TPU-sourced 3d printed FDM organs for improving the realism in surgical planning and training," in *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, 2021, pp. 6658–6669.
- [6] M. Mrówka, M. Szymiczek, and J. Lenża, "Thermoplastic Polyurethanes for Mining Application Processing by 3D Printing," *J. Achiev. Mater. Manuf. Eng.*, vol. 95, no. 1, pp. 13–19, 2019, doi: 10.5604/01.3001.0013.7620.
- [7] A.A. Setiawan, "Optimasi Parameter 3D Printing Terhadap Keakuratan Dimensi dan Kekasaran Permukaan Produk Menggunakan Metode Taguchi Grey Relational Analysis," *Proc. Conf. Des. Manuf. Eng. its Appl. Progr.*, no. 2654, pp. 1–5, 2018.
- [8] K. Sharma, K. Kumar, K.R. Singh, and M.S. Rawat, "Optimization of FDM 3D Printing Process Parameters using Taguchi Technique," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1168, no. 1, p. 012022, 2021, doi: 10.1088/1757-899x/1168/1/012022.
- [9] S.C. Nwafo, S.A. Oke, and C.A. Ayanladun, "Factor Analysis Approach-Taguchi-Pareto Method to Casting A356 Alloy Composite for Lightweight Wheel Rim Cover of Vehicles," *J. Keilmuan Tek. dan Manaj. Ind.*, vol. 10, no. 1, pp. 31–47, 2022, doi:



- <https://doi.org/10.24912/jitiuntar.v10i1.9407>.
- [10] D.C. Montgomery, *Introduction To Statistical Quality Control.*, Sixth. Missouri: Wiley, 2009.
  - [11] A.N.Y. Pettalolo, I.A. Rosid, and A.E. Tontowi, “Pengembangan Material Reusable Concrete untuk 3DP Building,” in *Conference SENATIK STT Adisutjipto Yogyakarta*, 2020, vol. 6, pp. 59–66. doi: 10.28989/senatik.v6i0.414.
  - [12] Ahmad, L.L. Salomon, and J. Jessica, “Desain Eksperimen untuk Meningkatkan Kualitas Kekuatan Produk dengan Pendekatan Analisis Desain Faktorial,” *J. Ilm. Tek. Ind.*, vol. 6, no. 3, pp. 209–220, 2019, doi: 10.24912/jitiuntar.v6i3.4247.
  - [13] D.C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, 9<sup>th</sup> ed. Wiley, 2017.
  - [14] L.L. Salomon, W. Kosasih, and S.O. Angkasa, "Perancangan Eksperimen untuk Meningkatkan Kualitas Ketangguhan Material dengan Pendekatan Analisis General Faktorial Design (Studi Kasus: Produk Solid Surface)," *Jurnal Rekayasa Sistem Industri*, vol. 4, no. 1, pp. 20-26, 2015, doi: 10.26593/jrsi.v4i1.1386.20-26.
  - [15] Hasdiansah and Herianto, “Pengaruh Parameter Proses 3D Printing Terhadap Elastisitas Produk yang Dihasilkan,” *Semin. Nas. Inov. Teknol. UN PGRI Kediri*, pp. 187–192, 2018.
  - [16] M. Christiliana, Pristiansyah, and Y. Oktriadi, “Optimasi Parameter Proses pada 3D Printing FDM Terhadap Akurasi Dimensi Filament PLA Food Grade,” *Manutech J. Teknol. Manufaktur*, vol. 13, no. 01, pp. 0–8, 2021.
  - [17] K. Singh, “Experimental study to prevent the warping of 3D models in fused deposition modeling,” *Int. J. Plast. Technol.*, 2018, doi: 10.1007/s12588-018-9206-y.