

Pengaruh Parameter Printing dan Durasi Curing Digital Light Processing (DLP) terhadap Akurasi Dimensi Spesimen Uji ASTM D790-03 Menggunakan Desain Faktorial

Reza Azizul Nasa Al Hakim^{*1}, Katon Muhammad², Sakuri Dahlan³, Daru Gilang Kistianto⁴

¹Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Jenderal Soedirman

^{2,4}Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Jenderal Soedirman

³Teknik Mesin, Sekolah Tinggi Teknik Wiworotomo Purwokerto

Email: reza.azizul@unsoed.ac.id

Abstrak

Teknologi *additive manufacturing* terus berkembang, salah satunya melalui metode Digital Light Processing (DLP) yang menawarkan kecepatan proses tinggi dan fleksibilitas desain. Namun, tantangan utama pada teknologi ini adalah pencapaian akurasi dimensi produk cetak yang dipengaruhi oleh parameter printing dan proses pasca-curing. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh curing time, base time, dan layer height, serta durasi curing terhadap akurasi dimensi spesimen uji ASTM D790-03 termodifikasi menggunakan desain faktorial 2^3 . Analisis data dilakukan menggunakan ANOVA, uji lanjut Tukey, dan pendekatan desirability untuk menentukan kombinasi parameter optimal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa base time dan layer height berpengaruh signifikan terhadap akurasi dimensi panjang, layer height berpengaruh signifikan terhadap akurasi dimensi lebar, serta interaksi base time dan layer height berpengaruh signifikan terhadap akurasi dimensi tinggi. Hasil uji Tukey menunjukkan bahwa variasi level layer height memberikan perbedaan signifikan pada dimensi panjang dan lebar, sementara variasi base time tidak menunjukkan perbedaan signifikan pada dimensi panjang. Kombinasi parameter optimal diperoleh pada waktu curing 600 detik, base time 15 detik, dan layer height 200 μm , dengan nilai composite desirability sebesar 69,42%, yang menghasilkan penyimpangan dimensi paling kecil. Hasil ini menunjukkan potensi optimasi parameter DLP untuk meningkatkan kualitas dimensi spesimen uji.

Kata kunci: Desain Faktorial, DLP, Base Time, Layer Height, Durasi Curing.

Influence of Digital Light Processing (DLP) Printing Parameters and Curing Duration on the Dimensional Accuracy of ASTM D790-03 Test Specimens Using a Factorial Design

Abstract

Additive manufacturing technology continues to advance, particularly through Digital Light Processing (DLP), which offers high processing speed and design flexibility. However, achieving high dimensional accuracy remains a key challenge, as it is strongly influenced by printing parameters and post-curing conditions. This study aims to analyze the effects of curing time, base time, and layer height, along with curing duration, on the dimensional accuracy of modified ASTM D790-03 test specimens using a 2^3 factorial design. Data were analyzed using ANOVA, followed by the Tukey post-hoc test, and parameter optimization was performed using the desirability approach. The results indicate that base time and layer height significantly affect dimensional accuracy in length, layer height significantly affects width accuracy, and the interaction between base time and layer height significantly influences height accuracy. Tukey test results show that variations in layer height levels significantly affect length and width dimensions, while variations in base time levels do not significantly affect length accuracy. The optimal parameter combination was achieved at a curing time of 600 s, base time of 15 s, and layer height of 200 μm , yielding a composite desirability value of 69.42% and the smallest dimensional deviation. These findings demonstrate the potential for optimizing DLP process parameters to improve dimensional quality in printed test specimens.

Keywords: Factorial Design, DLP, Base Time, Layer Height, Curing Duration

1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi mendorong perkembangan proses manufaktur dalam hal pengolahan raw material menjadi produk akhir, salah satunya adalah munculnya proses *Additive Manufacturing* (AM). *Additive manufacturing* merupakan salah satu teknologi yang sering digunakan dalam *Rapid Prototyping* (RP) di berbagai industri karena keunggulannya dalam membuat produk dengan cepat berdasarkan pemodelan tiga dimensi yang sudah dibuat sebelumnya menggunakan *Computer Aided Design* (CAD) [1]. *Additive manufacturing* banyak digunakan di industri terutama elektronik, otomotif, medis, aerospace, dan lain-lain [2]. Secara global, pasar 3D printing dilaporkan mengalami pertumbuhan tahunan lebih dari 20%, dan di Indonesia pemanfaatan teknologi ini mulai meningkat seiring dengan pengembangan industri manufaktur berbasis *Industry 4.0*, khususnya pada sektor prototipe fungsional dan komponen presisi skala kecil [3].

Terdapat berbagai macam jenis proses pada *additive manufacturing* salah satunya adalah *digital light processing* (DLP) [4]. Dewasa ini *additive manufacturing* mengalami berbagai tantangan salah satunya adalah akurasi dimensi [5]. Oleh karena itu perlu adanya suatu langkah untuk memastikan bahwa produk yang dihasilkan melalui proses *additive manufacturing* memiliki akurasi dimensi yang baik.

Dalam konteks pengujian mekanik, standar ASTM D790-03 banyak digunakan sebagai acuan spesimen uji lentur. Namun, penerapan standar ini pada proses DLP sering memerlukan modifikasi geometris tertentu agar sesuai dengan keterbatasan volume cetak, karakteristik resin fotopolimer, serta orientasi pencetakan. Oleh karena itu, justifikasi terhadap penggunaan spesimen ASTM D790-03 termodifikasi menjadi penting untuk menjamin relevansi hasil pengujian terhadap kondisi proses aktual [6]. Penelitian yang dilakukan oleh [7] untuk meminimasi eror dimensi pada mesin 3D printing jenis *Digital Light Processing* (DLP) pada material *Thermoplastic Polyurethane* (TPU) dengan spesimen uji bending American Society for Testing and Material (ASTM) D790-03 menunjukkan bahwa *Layer Thickness* (LT) memiliki pengaruh yang signifikan terhadap eror dimensi panjang dan tinggi, sedangkan *Layer Thickness* (LT), *Exposure Time* (ET), dan interaksi *Layer Thickness* (LT) dan *Exposure Time* (ET) berpengaruh signifikan terhadap eror dimensi lebar.

Pada penelitian ini akan menggunakan *additive manufacturing* jenis *digital light processing* pada material *photopolymer resin* untuk mengetahui pengaruh parameter *printing* dan durasi *curing* terhadap akurasi dimensi spesimen uji menggunakan metode desain faktorial. Pemilihan *vat photopolymerization* dengan bahan *photopolymer resin* dilakukan karena bahan *polymer* dapat digunakan untuk membuat prototipe dengan cepat, berbiaya murah, dan dapat dikustomisasi [8].

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Digital Light Processing

Teknologi Digital Light Processing (DLP) adalah metode *additive manufacturing* berbasis *vat photopolymerization* yang menggunakan proyeksi cahaya UV untuk mengeras resin fotopolimer secara selektif per lapisan. Parameter utama seperti waktu curing, base time, dan ketebalan lapisan (*layer height*) sangat memengaruhi derajat polimerisasi, penyusutan material, dan stabilitas dimensi hasil cetak. Ketidaksesuaian pengaturan parameter ini dapat menyebabkan distorsi dimensi akibat *over-curing* (polimerisasi berlebih) atau *under-curing* (polimerisasi kurang), terutama pada resin yang sensitif terhadap intensitas dan durasi paparan cahaya [9]. Model teoritis seperti Jacobs working curve membantu memprediksi hubungan antara energi UV yang diserap dan ketebalan lapisan yang mengeras, sehingga dapat mengoptimalkan parameter pencetakan untuk mencapai presisi tinggi [10]. Penambahan bahan penyerap UV dan pengaturan waktu paparan juga dapat mengatur proses *pre-curing* dan *curing* lebih lanjut, meningkatkan efisiensi dan fidelitas cetak tanpa mengorbankan kecepatan produksi [11]. Selain itu, pemantauan curing secara *in-situ* menggunakan interferometri memungkinkan pengendalian *real-time* derajat curing dan dimensi cetakan, yang penting untuk mengurangi cacat dan meningkatkan kualitas produk akhir [12].

2.2. Uji ASTM D790-03

Modifikasi spesimen uji lentur berdasarkan standar ASTM D790-03 sering diperlukan dalam proses *Digital Light Processing* (DLP) karena keterbatasan volume cetak, orientasi pencetakan, dan karakteristik material fotopolimer yang digunakan [13]. Penyesuaian dimensi atau geometri spesimen ini bertujuan untuk memastikan bahwa pengujian tetap valid dan hasilnya dapat dianalisis secara ilmiah, meskipun bentuk spesimen tidak persis sesuai standar asli. Studi pada material komposit berbasis resin yang dicetak dengan metode *vat photopolymerization*, termasuk DLP, menunjukkan bahwa meskipun ada modifikasi, pengujian mekanik seperti uji lentur tetap dapat memberikan data yang relevan untuk mengevaluasi kekuatan dan kekakuan material [14]. Penggunaan lapisan penguat seperti serat kaca juga memengaruhi hasil uji lentur, sehingga modifikasi spesimen

harus mempertimbangkan distribusi dan orientasi penguat untuk mendapatkan hasil yang representatif [13]. Selain itu, orientasi pencetakan dan parameter proses DLP dapat memengaruhi sifat mekanik, sehingga modifikasi spesimen juga harus menyesuaikan dengan karakteristik anisotropi yang mungkin muncul.

2.3. Design of Experiment

Optimasi parameter proses dalam additive manufacturing sering dilakukan menggunakan pendekatan *Design of Experiments* (DoE), khususnya desain faktorial yang memungkinkan analisis pengaruh utama dan interaksi antar faktor secara sistematis. Analisis statistik seperti ANOVA digunakan untuk mengidentifikasi faktor signifikan, sementara uji Tukey membantu mengevaluasi perbedaan antar level faktor, dan desirability function dipakai untuk optimasi multi-respon secara simultan [15]. Metode Taguchi juga populer karena mengurangi jumlah eksperimen dan meningkatkan robustness proses, terbukti efektif dalam optimasi parameter pada teknologi FDM dan SLA untuk meningkatkan kekuatan mekanik dan akurasi dimensi [16]. Pendekatan DoE juga digunakan untuk mengoptimalkan efisiensi proses dan kualitas permukaan, serta mengurangi konsumsi energi dan limbah, yang penting untuk produksi berkelanjutan dalam additive manufacturing.

3. METODE PENELITIAN

Desain spesimen yang digunakan pada penelitian ini mengikuti [7] yang mengacu pada standar American Society for Testing and Material (ASTM) D790-03. Standar tersebut merupakan standar untuk pengukuran sifat lentur plastik tanpa perkuatan dan bahan insulasi listrik. Spesimen uji ini dipilih karena menyesuaikan dengan alat ukur yang digunakan. Adapun alat ukur yang digunakan adalah *digital caliper* dengan ketelitian 0.01 mm.

Penelitian ini akan menggunakan metode perancangan eksperimen desain faktorial. Pemilihan metode desain faktorial dilakukan karena desain faktorial merupakan salah satu tipe eksperimen yang paling efisien [17]. Selain itu Penggunaan desain faktorial memungkinkan peneliti untuk mengetahui hubungan antar faktor terhadap respon yang diamati [17], [18] Desain faktorial yang digunakan adalah desain faktorial 2^3 yang memiliki tiga faktor dan dua level dan akan dilakukan replikasi sebanyak tiga kali. Level pada faktor *curing time* dan *layer height* mengacu pada [19] yang menggunakan *curing time* sebesar 10, 20, 30, dan 40 menit dan *layer thickness* sebesar 0.05; 0.1; 0.15; dan 0,20 mm sedangkan faktor *base time* mengacu pada [20] yang menggunakan *exposure time* sebesar 3, 6, 9, dan 12 detik. Pada penelitian ini nilai level pada faktor *curing time* dan *layer height* diambil dari nilai level terendah dan tertinggi berdasarkan referensi, sedangkan untuk nilai level pada faktor *base time* yang digunakan adalah 6 detik dan 15 detik, nilai tersebut dipilih karena apabila nilai *base time* terlalu rendah maka lapisan tidak akan merekat dengan baik [20]. Berikut merupakan faktor dan nilai level yang digunakan pada penelitian ini:

Tabel 1. Parameter Kontrol

Faktor	Level	
	Rendah	Tinggi
<i>Curing Time</i> (A) (detik)	600	2400
<i>Base Time</i> (B) (detik)	6	15
<i>Layer Height</i> (C) (μm)	50	200

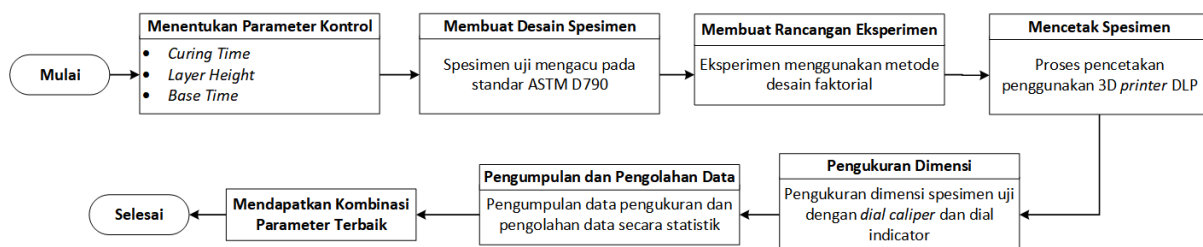
Setelah menentukan faktor dan level yang akan digunakan selanjutnya yaitu membuat matriks desain eksperimen untuk desain faktorial 2^3 dengan 3 replikasi. Berikut merupakan matriks desain eksperimen yang digunakan:

Tabel 2. Desain Matriks

Std. Run Order	Replikasi	CT (A)	BT (B)	LH (C)	Label	AB	BC	AC	ABC
1	1	-1	-1	-1	(1)	1	1	1	-1
2		1	-1	-1	a	-1	1	-1	1
3		-1	1	-1	b	-1	-1	1	1
4		1	1	-1	ab	1	-1	-1	-1
5		-1	-1	1	c	1	-1	-1	1
6		1	-1	1	ac	-1	-1	1	-1
7		-1	1	1	bc	-1	1	-1	-1
8		1	1	1	abc	1	1	1	1
9	2	-1	-1	-1	(1)	1	1	1	-1
10		1	-1	-1	a	-1	1	-1	1

11		-1	1	-1	b	-1	-1	1	1
12		1	1	-1	ab	1	-1	-1	-1
13		-1	-1	1	c	1	-1	-1	1
14		1	-1	1	ac	-1	-1	1	-1
15		-1	1	1	bc	-1	1	-1	-1
16		1	1	1	abc	1	1	1	1
17		-1	-1	-1	(1)	1	1	1	-1
18		1	-1	-1	a	-1	1	-1	1
19		-1	1	-1	b	-1	-1	1	1
20		1	1	-1	ab	1	-1	-1	-1
21	3	-1	-1	1	c	1	-1	-1	1
22		1	-1	1	ac	-1	-1	1	-1
23		-1	1	1	bc	-1	1	-1	-1
24		1	1	1	abc	1	1	1	1

Secara garis besar alur penelitian ini dapat digambarkan seperti pada diagram alir dibawah ini:



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Tahapan pertama yang dilakukan adalah menentukan parameter kontrol yang akan digunakan. Parameter kontrol adalah variabel yang akan diamati pengaruhnya terhadap variabel respon. Parameter kontrol yang digunakan yaitu *curing time*, *layer height*, dan *base time*. *Curing time* adalah durasi penyinaran ultraviolet pasca pencetakan yang bertujuan untuk mengeraskan polimer yang sudah dicetak sebelumnya, kemudian *layer height* adalah ketebalan antar lapisan polimer saat proses pencetakan, semakin kecil nilai *layer height* maka akan semakin tipis lapisan yang dicetak, dan *base time* adalah durasi penyinaran ultraviolet untuk memadatkan sebuah lapisan *photopolymer* resin saat proses pencetakan.

Setelah menentukan parameter kontrol selanjutnya adalah membuat desain spesimen. Desain spesimen yang digunakan pada penelitian ini mengikuti [7] yang mengacu pada standar American Society for Testing and Material (ASTM) D790-03. Kemudian langkah selanjutnya setelah membuat desain spesimen yaitu membuat rancangan eksperimen dan melakukan proses pencetakan dan *curing* spesimen. Proses pencetakan dilakukan dengan menggunakan mesin 3D printing dengan teknologi *digital light processing* (DLP) buatan Flashforge dengan tipe Hunter dan menggunakan material *photopolymer* resin buatan Anycubic dengan tipe ECO UV resin yang berbahan dasar dari tanaman (*plant based*). Setelah dicetak setiap spesimen akan dicuci dengan menggunakan alkohol 99% selama 120 detik dan di-*curing* dengan menggunakan mesin Anycubic Wash & Cure 2.0.

Langkah selanjutnya yang dilakukan setelah seluruh proses pencetakan spesimen selesai adalah melakukan pengukuran dimensi dengan menggunakan *digital caliper* dengan ketelitian 0.01 mm. Hasil pengukuran dimensi kemudian dikumpulkan menjadi satu-kesatuan data yang nantinya akan dilakukan pengolahan data. Pengolahan data pada penelitian ini menggunakan bantuan perangkat lunak Minitab 19 untuk melakukan perhitungan ANOVA pada tingkat signifikansi 5%. Setelah seluruh data diolah dan dianalisis maka didapatkan kombinasi parameter *printing* dan durasi *curing* yang terbaik. Kombinasi parameter *printing* dan durasi *curing* ini yang kemudian akan menjadi salah satu hasil dari penelitian ini.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Dimensi Awal Spesimen Uji

Dimensi awal spesimen uji ASTM D790-03 yang digunakan pada penelitian ini meliputi dimensi panjang, lebar, dan tinggi. Data dimensi tersebut akan digunakan sebagai acuan untuk menghitung penyimpangan dimensi hasil cetak. Adapun data dimensi awal spesimen uji adalah sebagai berikut:

Tabel 3. Dimensi Awal Spesimen Uji

Dimensi	Ukuran
Panjang	80 mm
Lebar	3.2 mm
Tinggi	12.7 mm

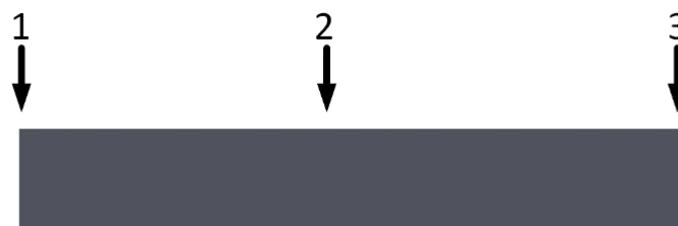
4.2. Dimensi Hasil Cetak Spesimen Uji

Dimensi hasil cetak spesimen uji didapatkan dari hasil pengukuran dengan menggunakan digital caliper dengan ketelitian 0.01 mm. Dimensi hasil cetak spesimen uji akan digunakan dalam perhitungan penyimpangan dimensi. Adapun data dimensi hasil cetak spesimen uji pada ketiga replikasi adalah sebagai berikut:

Tabel 4. Dimensi Hasil Cetak Spesimen Uji

Replikasi Ke-	Std. Order	Curing Time	Base Time	Layer Height	Panjang	Lebar	Tinggi
1	1	600	6	50	79.69	3.39	12.73
	2	2400	6	50	79.74	3.38	12.67
	3	600	15	50	79.87	3.37	12.76
	4	2400	15	50	79.91	3.37	12.81
	5	600	6	200	79.61	3.21	12.61
	6	2400	6	200	79.74	3.19	12.67
	7	600	15	200	79.57	3.23	12.62
	8	2400	15	200	79.58	3.16	12.58
2	9	600	6	50	79.79	3.38	12.68
	10	2400	6	50	79.75	3.34	12.67
	11	600	15	50	79.89	3.36	12.81
	12	2400	15	50	79.87	3.33	12.81
	13	600	6	200	79.65	3.20	12.63
	14	2400	6	200	79.41	3.18	12.51
	15	600	15	200	79.70	3.21	12.67
	16	2400	15	200	79.80	3.22	12.64
3	17	600	6	50	79.73	3.35	12.65
	18	2400	6	50	79.60	3.37	12.64
	19	600	15	50	80.13	3.35	12.82
	20	2400	15	50	79.76	3.36	12.78
	21	600	6	200	79.61	3.22	12.64
	22	2400	6	200	79.62	3.18	12.57
	23	600	15	200	79.61	3.22	12.68
	24	2400	15	200	79.54	3.21	12.60

Dimensi lebar dan tinggi diukur pada 3 bagian spesimen uji yaitu kedua ujung dan tengah (lihat **Error! Reference source not found.**), kemudian hasil pengukuran pada ketiga bagian tersebut diambil rata-ratanya dan dijadikan data dimensi hasil cetak untuk dimensi lebar dan tinggi. Hal tersebut dilakukan untuk melihat apakah penyimpangan dimensi terjadi pada ketiga bagian spesimen uji.



Gambar 2. Bagian Pengukuran Dimensi

4.3. Penyimpangan Dimensi Spesimen Uji

Penyimpangan dimensi spesimen uji dihitung berdasarkan data dimensi hasil cetak spesimen uji. Penyimpangan dimensi lebar dan tinggi dihitung berdasarkan nilai rata-rata dari ketiga bagian pengukuran pada spesimen uji. Adapun data penyimpangan dimensi spesimen uji adalah sebagai berikut:

Tabel 5. Penyimpangan Dimensi Spesimen Uji

Replikasi Ke-	Std. Order	Curing Time	Base Time	Layer Height	Err. Panjang	Err. Lebar	Err. Tinggi
1	1	600	6	50	0.31	0.19	0.03
	2	2400	6	50	0.26	0.18	0.03
	3	600	15	50	0.13	0.17	0.06
	4	2400	15	50	0.09	0.17	0.11
	5	600	6	200	0.39	0.01	0.09
	6	2400	6	200	0.26	0.01	0.03
	7	600	15	200	0.43	0.03	0.08
	8	2400	15	200	0.42	0.04	0.12
2	9	600	6	50	0.21	0.18	0.02
	10	2400	6	50	0.25	0.14	0.03
	11	600	15	50	0.11	0.16	0.11
	12	2400	15	50	0.13	0.13	0.11
	13	600	6	200	0.35	0.00	0.07
	14	2400	6	200	0.59	0.02	0.19
	15	600	15	200	0.30	0.01	0.03
	16	2400	15	200	0.20	0.02	0.06
3	17	600	6	50	0.27	0.15	0.05
	18	2400	6	50	0.40	0.17	0.06
	19	600	15	50	0.13	0.15	0.12
	20	2400	15	50	0.24	0.16	0.08
	21	600	6	200	0.39	0.02	0.06
	22	2400	6	200	0.38	0.02	0.13
	23	600	15	200	0.39	0.02	0.02
	24	2400	15	200	0.46	0.01	0.10

4.4. Main Effect dan Interaction Effect

Main effect dalam desain faktorial digunakan untuk melihat pengaruh suatu faktor independen terhadap variabel respon. Sedangkan *interaction effect* adalah pengaruh suatu dua atau lebih faktor terhadap variabel respon. Adapun perhitungan *main effect* dan *interaction effect* menggunakan persamaan (1) berikut:

$$E(X) = \frac{\bar{Y}_{X+} - \bar{Y}_{X-}}{4n} \quad (1)$$

Dimana $\bar{Y}_{X+}$ adalah rata-rata respon pada faktor X di level tinggi dan $\bar{Y}_{X-}$ adalah rata-rata respon pada faktor X di level rendah, kemudian variabel n adalah jumlah replikasi yang dilakukan. Dengan menggunakan persamaan **Error! Reference source not found.** dan data pada **Error! Reference source not found.**, maka didapatkan nilai *main effect* dan *interaction effect* pada setiap faktor terhadap penyimpangan dimensi panjang, lebar, dan tinggi sebagai berikut:

Tabel 6. Main Effect dan Interaction Effect Dimensi Panjang

	CT (A)	BT (B)	LH (C)	AB	BC	AC	ABC
$\sum Y_+$	3.68	3.03	4.56	3.46	3.90	3.47	3.49
$\sum Y_-$	3.41	4.06	2.53	3.63	3.19	3.62	3.60
$\bar{Y}_+$	0.307	0.252	0.380	0.288	0.325	0.289	0.291
$\bar{Y}_-$	0.284	0.338	0.211	0.303	0.266	0.302	0.300
Effect	0.023	-0.086	0.169	-0.014	0.059	-0.013	-0.009

Berdasarkan **Error! Reference source not found.** maka dapat diketahui bahwa *main effect* pada faktor *base time* dan *layer height* masing-masing adalah sebesar 0.023, -0.086, dan 0.169. Sedangkan untuk *interaction effect* pada faktor *curing time*base time* (AB), *base time*layer height* (BC), *curing time*layer height* (AC), dan *curing time*base time*layer height* (ABC) masing-masing adalah sebesar -0.014, 0.059, -0.013, dan -0.009.

Tabel 7. *Main Effect* dan *Interaction Effect* Dimensi Lebar

	CT (A)	BT (B)	LH (C)	AB	BC	AC	ABC
$\sum Y_+$	1.07	1.07	0.21	1.08	1.14	1.12	1.07
$\sum Y_-$	1.09	1.09	1.95	1.08	1.02	1.04	1.09
$\bar{Y}_+$	0.089	0.089	0.018	0.090	0.095	0.093	0.089
$\bar{Y}_-$	0.091	0.091	0.163	0.090	0.085	0.087	0.091
Effect	-0.002	-0.002	-0.145	0.000	0.010	0.007	-0.002

Berdasarkan **Error! Reference source not found.** maka dapat diketahui *main effect* pada faktor *curing time*, *base time*, dan *layer height* masing-masing adalah sebesar -0.002, -0.002 dan -0.145. Sedangkan untuk *interaction effect* pada faktor *curing time*base time* (AB), *base time*layer height* (BC), *curing time*layer height* (AC), dan *curing time*base time*layer height* (ABC) masing-masing adalah sebesar 0.000, 0.010, 0.007, dan -0.002.

Tabel 8. *Main Effect* dan *Interaction Effect* Dimensi Tinggi

	CT (A)	BT (B)	LH (C)	AB	BC	AC	ABC
$\sum Y_+$	1.05	1.00	0.98	0.90	0.63	1.02	0.91
$\sum Y_-$	0.74	0.79	0.81	0.89	1.16	0.77	0.88
$\bar{Y}_+$	0.087	0.083	0.082	0.075	0.052	0.085	0.076
$\bar{Y}_-$	0.062	0.066	0.068	0.074	0.097	0.064	0.073
Effect	0.026	0.018	0.014	0.001	-0.044	0.021	0.002

Berdasarkan **Error! Reference source not found.** maka dapat diketahui bahwa *main effect* pada faktor *curing time*, *base time*, dan *layer height* masing-masing adalah sebesar 0.026, 0.018, dan 0.014. Sedangkan untuk *interaction effect* pada faktor *curing time*base time* (AB), *base time*layer height* (BC), *curing time*layer height* (AC), dan *curing time*base time*layer height* (ABC) masing-masing adalah sebesar 0.001, -0.044, 0.021, dan 0.002.

4.5. Analysis of Variance (ANOVA)

Analisis menggunakan ANOVA dilakukan untuk melihat *Sum of Square* (SS), *Mean Square* (MS), dan nilai F pada masing-masing faktor dan interaksi antar faktor. Nilai F akan digunakan untuk menentukan area penerimaan hipotesis pada tingkat signifikansi 5% ($\alpha=0.05$). Adapun hipotesis awal yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

Tabel 9. Hipotesis Awal

Faktor	Hipotesis
<i>Curing Time</i> (A)	H_0 : Tidak terdapat pengaruh faktor <i>curing time</i> (CT) terhadap akurasi dimensi spesimen uji
	H_1 : Terdapat setidaknya satu faktor CT yang berpengaruh terhadap akurasi dimensi spesimen uji
<i>Base Time</i> (B)	H_0 : Tidak terdapat pengaruh faktor <i>base time</i> terhadap akurasi dimensi spesimen uji
	H_1 : Terdapat setidaknya satu faktor <i>base time</i> yang berpengaruh terhadap akurasi dimensi spesimen uji
<i>Layer Height</i> (C)	H_0 : Tidak terdapat pengaruh faktor <i>layer height</i> terhadap akurasi dimensi spesimen uji
	H_1 : Terdapat setidaknya satu faktor <i>layer height</i> yang berpengaruh terhadap akurasi dimensi spesimen uji
Interaksi antar faktor	H_0 : Tidak terdapat pengaruh interaksi antar faktor terhadap akurasi dimensi spesimen uji
	H_1 : Terdapat setidaknya satu interaksi antar faktor yang berpengaruh terhadap akurasi dimensi spesimen uji

Setelah menentukan hipotesis awal yang digunakan selanjutnya yaitu melakukan analisis dengan menggunakan ANOVA. Berikut merupakan tabel ANOVA untuk penyimpangan pada dimensi panjang, lebar, dan tinggi:

Tabel 10. ANOVA Penyimpangan Dimensi Panjang

Source	DF	SS	MS	F Value	Keputusan
Curing Time (A)	1	0.003038	0.003038	0.36	H ₀ diterima
Base Time (B)	1	0.044204	0.044204	5.19	H ₀ ditolak
Layer Height (C)	1	0.171704	0.171704	20.14	H ₀ ditolak
Curing Time*Base Time (AB)	1	0.001204	0.001204	0.14	H ₀ diterima
Curing Time*Layer Height (AC)	1	0.000938	0.000938	0.11	H ₀ diterima
Base Time*Layer Height (BC)	1	0.021004	0.021004	2.46	H ₀ diterima
Curing Time*Base Time*Layer Height (ABC)	1	0.000504	0.000504	0.06	H ₀ diterima
Error	16	0.136400	0.008525		
Total	23	0.378996			

Berdasarkan **Error! Reference source not found.** dapat diketahui nilai F hitung untuk faktor *curing time*, *base time*, *layer height*, interaksi *curing time* dan *base time*, interaksi *curing time* dan *layer height*, interaksi *base time* dan *layer height*, dan interaksi *curing time*, *base time*, dan *layer height* masing-masing adalah sebesar 0.36, 5.19, 20.14, 0.14, 0.11, 2.46, dan 0.06. Nilai F hitung akan dibandingkan dengan nilai F tabel dengan melihat tabel distribusi F pada $F_{(0.05,1,16)}$ sehingga didapatkan nilai F tabel sebesar 4.494. Dengan membandingkan nilai F hitung dengan F tabel apabila nilai F hitung > nilai F tabel maka H₁ diterima sedangkan H₀ ditolak begitupun sebaliknya. Berdasarkan perbandingan nilai F hitung dengan F tabel untuk setiap faktor maka diketahui bahwa faktor *base time* dan *layer height* memiliki nilai F hitung > nilai F tabel yang berarti bahwa H₁ diterima sedangkan H₀ ditolak. Hal tersebut menunjukkan bahwa faktor *base time* dan *layer height* memiliki pengaruh yang signifikan terhadap penyimpangan dimensi panjang.

Tabel 11. ANOVA Penyimpangan Dimensi Lebar

Source	DF	SS	MS	F Value	Keputusan
Curing Time (A)	1	0.000017	0.000017	0.07	H ₀ diterima
Base Time (B)	1	0.000017	0.000017	0.07	H ₀ diterima
Layer Height (C)	1	0.126150	0.126150	540.64	H ₀ ditolak
Curing Time*Base Time (AB)	1	0.000000	0.000000	0.00	H ₀ diterima
Curing Time*Layer Height (AC)	1	0.000267	0.000267	1.14	H ₀ diterima
Base Time*Layer Height (BC)	1	0.000600	0.000600	2.57	H ₀ diterima

Tabel 11. ANOVA Penyimpangan Dimensi Lebar (lanjutan)

Source	DF	SS	MS	F Value	Keputusan
Curing Time*Base Time*Layer Height (ABC)	1	0.000017	0.000017	0.07	H ₀ diterima
Error	16	0.003733	0.000233		
Total	23	0.130800			

Berdasarkan **Error! Reference source not found.** dapat diketahui nilai F hitung untuk faktor *curing time*, *base time*, *layer height*, interaksi *curing time* dan *base time*, interaksi *curing time* dan *layer height*, interaksi *base time* dan *layer height*, dan interaksi *curing time*, *base time*, dan *layer height* masing-masing adalah sebesar 0.07, 0.07, 540.64, 0.00, 1.14, 2.57, dan 0.07. Dengan membandingkan nilai F hitung dengan F tabel apabila nilai F hitung > nilai F tabel maka H₁ diterima sedangkan H₀ ditolak begitupun sebaliknya. Berdasarkan perbandingan nilai F hitung dengan F tabel untuk setiap faktor maka diketahui bahwa hanya faktor *layer height* yang memiliki nilai F hitung > nilai F tabel yang berarti bahwa H₁ diterima sedangkan H₀ ditolak. Hal tersebut menunjukkan bahwa faktor *layer height* memiliki pengaruh yang signifikan terhadap penyimpangan dimensi lebar.

Tabel 12. ANOVA Penyimpangan Dimensi Tinggi

Source	DF	SS	MS	F Value	Keputusan
Curing Time (A)	1	0.004004	0.004004	3.02	H ₀ diterima
Base Time (B)	1	0.001838	0.001838	1.39	H ₀ diterima
Layer Height (C)	1	0.001204	0.001204	0.91	H ₀ diterima

<i>Curing Time*Base Time</i> (AB)	1	0.000004	0.000004	0.00	H ₀ diterima
<i>Curing Time*Layer Height</i> (AC)	1	0.002604	0.002604	1.97	H ₀ diterima
<i>Base Time*Layer Height</i> (BC)	1	0.011704	0.011704	8.83	H ₀ ditolak
<i>Curing Time*Base Time*Layer Height</i> (ABC)	1	0.000037	0.000037	0.03	H ₀ diterima
Error	16	0.021200	0.001325		
Total	23	0.042596			

Berdasarkan **Error! Reference source not found.** dapat diketahui nilai F hitung untuk faktor *curing time*, *base time*, *layer height*, interaksi *curing time* dan *base time*, interaksi *curing time* dan *layer height*, interaksi *base time* dan *layer height*, dan interaksi *curing time*, *base time*, dan *layer height* masing-masing adalah sebesar 3.02, 1.39, 0.91, 0.00, 1.97, 8.83, dan 0.03. Berdasarkan perbandingan nilai F hitung dengan F tabel untuk setiap faktor maka diketahui bahwa hanya interaksi faktor *base time* dan *layer height* yang memiliki nilai F hitung > nilai F tabel yang berarti bahwa H₁ diterima sedangkan H₀ ditolak. Hal tersebut menunjukkan bahwa interaksi faktor *base time* dan *layer height* memiliki pengaruh yang signifikan terhadap penyimpangan dimensi tinggi.

4.6. Uji Lanjut

Setelah mengetahui faktor-faktor mana saja yang memiliki pengaruh signifikan untuk setiap penyimpangan dimensi panjang, lebar, dan tinggi selanjutnya akan dilakukan uji lanjut (*post hoc test*) dengan menggunakan uji tukey pada tingkat signifikansi 5% ($\alpha=0.05$). Tujuan dari uji tukey adalah untuk mengetahui apakah pemilihan level pada faktor-faktor tersebut memiliki pengaruh terhadap penyimpangan dimensi. Berikut merupakan hasil uji tukey untuk penyimpangan dimensi panjang, lebar, dan tinggi:

Tabel 13. Tukey Test Base Pada Penyimpangan Dimensi Panjang

<i>Difference of Level</i>	<i>Difference of Means</i>	<i>SE of Difference</i>	<i>95% CI</i>	<i>Adjusted P Value</i>
15-6	-0.0858	0.0504	(-0.1903, 0.0186)	0.102

Pada **Error! Reference source not found.** diketahui bahwa perbedaan level pada faktor *base time* memiliki nilai $P > \alpha$, maka dapat disimpulkan bahwa pemilihan level pada faktor *base time* tidak memiliki pengaruh yang signifikan terhadap penyimpangan dimensi panjang, meskipun faktor *base time* secara keseluruhan memiliki pengaruh yang signifikan terhadap penyimpangan dimensi panjang berdasarkan hasil uji ANOVA pada **Error! Reference source not found.** Penyimpangan dimensi panjang yang terjadi antara level tinggi dan level rendah pada faktor *base time* adalah sebesar -0.0858 dan 95% *confidence interval* berada pada -0.1903 sampai 0.0186.

Tabel 14. Tukey Test Layer Height Pada Penyimpangan Dimensi Panjang

<i>Difference of Level</i>	<i>Difference of Means</i>	<i>SE of Difference</i>	<i>95% CI</i>	<i>Adjusted P Value</i>
200-50	0.1692	0.03296	(0.0870, 0.2514)	0.000

Berdasarkan **Error! Reference source not found.** diketahui bahwa perbedaan level pada faktor *layer height* memiliki nilai $P < \alpha$, maka dapat disimpulkan bahwa pemilihan level pada faktor *layer height* memiliki pengaruh yang signifikan terhadap penyimpangan dimensi panjang. Perbedaan rata-rata penyimpangan dimensi panjang yang terjadi antara level tinggi dan level rendah pada faktor *layer height* adalah sebesar 0.1692 dan 95% *confidence interval* berada pada 0.0870 sampai 0.2514.

Tabel 15. Tukey Test Layer Height Pada Penyimpangan Dimensi Lebar

<i>Difference of Level</i>	<i>Difference of Means</i>	<i>SE of Difference</i>	<i>95% CI</i>	<i>Adjusted P Value</i>
200-50	-0.14500	0.00594	(-0.15731, -0.13269)	0.000

Berdasarkan **Error! Reference source not found.** diketahui bahwa perbedaan level pada faktor *layer height* memiliki nilai $P < \alpha$, maka dapat disimpulkan bahwa pemilihan level pada faktor *layer height* memiliki pengaruh yang signifikan terhadap penyimpangan dimensi lebar. Perbedaan rata-rata penyimpangan dimensi lebar yang terjadi antara level tinggi dan level rendah pada faktor *layer height* adalah sebesar -0.14500 dan 95% *confidence interval* berada pada -0.15731 sampai -0.13269.

Tabel 16. *Tukey Test* Interaksi *Base Time* dan *Layer Height* Pada Penyimpangan Dimensi Tinggi

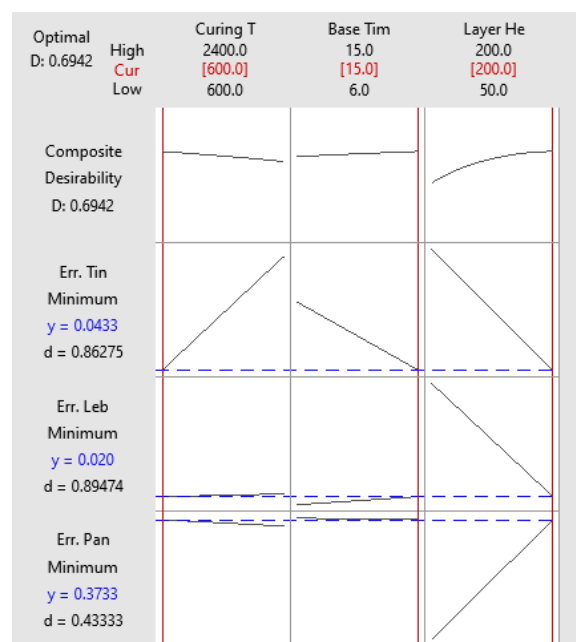
<i>Difference of Level</i>	<i>Difference of Means</i>	<i>SE of Difference</i>	<i>95% CI</i>	<i>Adjusted P Value</i>
1- -1	-0.0125	0.0178	(-0.0493, 0.0243)	0.489

Pada **Error! Reference source not found.** diketahui bahwa perbedaan level pada interaksi faktor *base time* memiliki nilai $P > \alpha$, maka dapat disimpulkan bahwa pemilihan level pada faktor *base time* tidak memiliki pengaruh yang signifikan terhadap penyimpangan dimensi tinggi, meskipun interaksi faktor *base time* dan *layer height* secara keseluruhan memiliki pengaruh yang signifikan terhadap penyimpangan dimensi tinggi berdasarkan hasil uji ANOVA pada **Error! Reference source not found.** Penyimpangan dimensi tinggi yang terjadi antara level tinggi dan level rendah pada interaksi faktor *base time* dan *layer height* adalah sebesar -0.0125 dan 95% *confidence interval* berada pada -0.0493 sampai 0.0243.

4.7. Kombinasi Parameter Terbaik

Tabel 17. Kombinasi Parameter Terbaik

<i>Solution</i>	<i>Curing Time</i>	<i>Base Time</i>	<i>Layer Height</i>	<i>Err. Tinggi Fit</i>	<i>Err. Lebar Fit</i>	<i>Err. Panjang Fit</i>	<i>Composite Desirability</i>
1	600	15	200	0.0433	0.020	0.3733	0.6942

Gambar 3. *Respond Optimizer Plot*

Berdasarkan **Error! Reference source not found.** dan **Error! Reference source not found.** diketahui bahwa kombinasi parameter *printing* yang terbaik untuk mendapatkan penyimpangan dimensi panjang, lebar, dan tinggi terkecil adalah dengan menggunakan *curing time* sebesar 600 detik (level rendah), *base time* sebesar 15 detik (level tinggi), dan *layer height* sebesar 200 μm (level tinggi). Kombinasi parameter tersebut menghasilkan respon penyimpangan dimensi tinggi sebesar 0.0433 mm dengan *desirability* sebesar 0.86275, penyimpangan dimensi lebar sebesar 0.020 mm dengan *desirability* sebesar 0.89474, dan penyimpangan dimensi panjang sebesar 0.3733 mm dengan *desirability* sebesar 0.43333. Kombinasi dari seluruh faktor tersebut menghasilkan *composite desirability* sebesar 0.6942.

Nilai *desirability* pada penyimpangan dimensi tinggi dan lebar dapat dikatakan baik dengan nilai masing-masing sebesar 86.275% dan 89.474% yang berarti bahwa dengan kombinasi parameter tersebut sudah mendapatkan 86.275% dari target minimasi penyimpangan dimensi tinggi dan 89.474% dari target minimasi penyimpangan dimensi lebar. Sedangkan untuk nilai *desirability* pada penyimpangan dimensi panjang dapat dikatakan cukup dengan nilai sebesar 43.333% yang berarti bahwa kombinasi parameter tersebut hanya mampu

menghasilkan nilai penyimpangan dimensi panjang sebesar 43.333% dari target minimasi penyimpangan dimensi panjang. Kombinasi seluruh parameter secara bersama-sama dapat menghasilkan nilai *desirability* sebesar 69.42% dari total target minimasi.

Hasil ini sejalan dengan karakteristik proses DLP, di mana akumulasi kesalahan dimensi cenderung lebih signifikan pada arah panjang spesimen akibat efek penyusutan resin selama proses polimerisasi dan pasca-curing. Selain itu, orientasi pencetakan dan luas area penampang yang lebih besar pada arah panjang dapat memperbesar efek distorsi dimensi.

Meskipun penelitian ini berhasil mengidentifikasi kombinasi parameter optimal, terdapat beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan. Variabilitas sifat photopolymer resin, seperti viskositas, tingkat penyusutan, dan sensitivitas terhadap cahaya UV, berpotensi memengaruhi hasil akurasi dimensi dan belum dievaluasi secara mendalam dalam penelitian ini. Selain itu, penelitian ini dilakukan pada skala laboratorium dengan volume cetak terbatas, sehingga aspek skalabilitas untuk aplikasi industri dengan ukuran komponen yang lebih besar belum dapat disimpulkan secara menyeluruh.

Jika dibandingkan dengan metode additive manufacturing lain, seperti Stereolithography (SLA) dan Fused Deposition Modeling (FDM), DLP umumnya memiliki resolusi dan kecepatan curing yang lebih tinggi dibandingkan FDM, sehingga potensi akurasi dimensinya lebih baik. Namun, dibandingkan dengan SLA, DLP memiliki karakteristik curing berbasis proyeksi area yang dapat menyebabkan variasi intensitas cahaya pada area tertentu, yang berpotensi menimbulkan distorsi dimensi jika parameter proses tidak dikontrol dengan baik. Oleh karena itu, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa optimasi parameter printing dan durasi curing menjadi aspek krusial dalam memaksimalkan keunggulan DLP dibandingkan metode lainnya.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pendekatan desain faktorial yang dikombinasikan dengan analisis ANOVA, uji Tukey, dan metode *desirability* efektif digunakan untuk mengidentifikasi parameter proses yang berpengaruh signifikan serta menentukan kombinasi parameter optimal. Temuan ini diharapkan dapat menjadi referensi awal bagi pengembangan proses DLP yang lebih stabil dan aplikatif, khususnya dalam pembuatan spesimen uji dan komponen presisi berbahan photopolymer resin.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengolahan dan analisis data penelitian yang telah dilakukan, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Parameter yang memiliki pengaruh signifikan terhadap penyimpangan dimensi panjang adalah *base time* dan *layer height*, kemudian parameter yang memiliki pengaruh signifikan terhadap penyimpangan dimensi lebar adalah *layer height*, dan parameter yang memiliki pengaruh signifikan terhadap penyimpangan dimensi tinggi adalah interaksi *base time* dan *layer height*. Tetapi pemilihan level parameter *base time* tidak memiliki pengaruh yang signifikan terhadap penyimpangan dimensi panjang sedangkan pada parameter *layer height* pemilihan level memiliki pengaruh terhadap penyimpangan dimensi panjang dan lebar. Kemudian pemilihan level pada interaksi *base time* dan *layer height* tidak memiliki pengaruh yang signifikan terhadap penyimpangan dimensi tinggi.
2. Kombinasi parameter terbaik untuk menghasilkan penyimpangan dimensi panjang, lebar, dan tinggi yang terkecil adalah dengan menggunakan *curing time* sebesar 600 detik (level rendah), *base time* sebesar 15 detik (level tinggi), dan *layer height* sebesar 200 μm (level tinggi). Seluruh kombinasi parameter tersebut menghasilkan penyimpangan dimensi panjang, lebar, dan tinggi terkecil sebesar 0.3733, 0.020, dan 0.0433 mm dengan nilai *composite desirability* sebesar 0.6942 atau 69.42%.

6. UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada LPPM Universitas Jenderal Soedirman untuk pendanaan program penelitian Riset Peningkatan Kompetensi tahun anggaran 2025 dengan nomor: 14.534/UN23.34/PT.01/V/2025.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] I. Gibson, D. Rosen, and B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies*, 2nd ed. New York, NY: Springer New York, 2015. doi: 10.1007/978-1-4939-2113-3.
- [2] H. Bikas, P. Stavropoulos, and G. Chrysosolouris, "Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 83, no. 1–4, pp. 389–405, Mar. 2016, doi: 10.1007/s00170-015-7576-2.

-
- [3] H. Mastriswadi, M. K. Herliansyah, W. P. Sari, A. E. Tontowi, and H. Herianto, "The Bibliometric Analysis of 3D Printer Research Development and Opportunities in Indonesia," *International Journal of Technology*, vol. 16, no. 3, p. 865, May 2025, doi: 10.14716/ijtech.v16i3.6059.
- [4] International Organization for Standardization, "ISO/ASTM 52900:2021." Accessed: Feb. 29, 2024. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/74514.html>
- [5] P.-H. Lee, H. Chung, S. W. Lee, J. Yoo, and J. Ko, "Review: Dimensional Accuracy in Additive Manufacturing Processes," in *Volume 1: Materials; Micro and Nano Technologies; Properties, Applications and Systems; Sustainable Manufacturing*, American Society of Mechanical Engineers, Jun. 2014. doi: 10.1115/MSEC2014-4037.
- [6] S. Kumar, I. Singh, S. S. R. Kooroor, D. Kumar, and M. Y. Yahya, "On Laminated Object Manufactured FDM-Printed ABS/TPU Multimaterial Specimens: An Insight into Mechanical and Morphological Characteristics," *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 19, p. 4066, Sep. 2022, doi: 10.3390/polym14194066.
- [7] S. Arief, "Minimasi Error Pada Mesin 3D Printing dengan Parameter Mesin," *Buana Ilmu*, vol. 8, no. 1, pp. 269–282, Nov. 2023, doi: 10.36805/bi.v8i1.6022.
- [8] P. Stavropoulos and P. Foteinopoulos, "Modelling of additive manufacturing processes: a review and classification," *Manuf. Rev. (Les Ulis)*, vol. 5, p. 2, Mar. 2018, doi: 10.1051/mfreview/2017014.
- [9] S. M. Montgomery, C. M. Hamel, J. Skovran, and H. J. Qi, "A reaction–diffusion model for grayscale digital light processing 3D printing," *Extreme Mech. Lett.*, vol. 53, p. 101714, May 2022, doi: 10.1016/j.eml.2022.101714.
- [10] Y. Li, Q. Mao, J. Yin, Y. Wang, J. Fu, and Y. Huang, "Theoretical prediction and experimental validation of the digital light processing (DLP) working curve for photocurable materials," *Addit. Manuf.*, vol. 37, p. 101716, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.addma.2020.101716.
- [11] Y. Li *et al.*, "High-fidelity and high-efficiency additive manufacturing using tunable pre-curing digital light processing," *Addit. Manuf.*, vol. 30, p. 100889, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.addma.2019.100889.
- [12] Y. Zhang, H. Zhang, and X. Zhao, "In-situ interferometric curing monitoring for digital light processing based vat photopolymerization additive manufacturing," *Addit. Manuf.*, vol. 81, p. 104001, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.addma.2024.104001.
- [13] A. D. Nugraha *et al.*, "Experimental, numerical, and DIC analysis of high-performance VPP composites with multilayer glass fiber reinforcement," *Sci. Rep.*, vol. 15, no. 1, p. 41081, Nov. 2025, doi: 10.1038/s41598-025-25027-y.
- [14] Z. Golubović *et al.*, "A Comprehensive Mechanical Examination of ABS and ABS-like Polymers Additively Manufactured by Material Extrusion and Vat Photopolymerization Processes," *Polymers (Basel)*, vol. 15, no. 21, p. 4197, Oct. 2023, doi: 10.3390/polym15214197.
- [15] L. F. C. S. Durão, R. Barkoczy, E. Zancul, L. Lee Ho, and R. Bonnard, "Optimizing additive manufacturing parameters for the fused deposition modeling technology using a design of experiments," *Progress in Additive Manufacturing*, vol. 4, no. 3, pp. 291–313, Sep. 2019, doi: 10.1007/s40964-019-00075-9.
- [16] B. A. Ahmed *et al.*, "Printing Parameter Optimization of Additive Manufactured PLA Using Taguchi Design of Experiment," *Polymers (Basel)*, vol. 15, no. 22, p. 4370, Nov. 2023, doi: 10.3390/polym15224370.
- [17] D. C. Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, 10th ed. Wiley, 2020.
- [18] J. Antony, "Full factorial designs," in *Design of Experiments for Engineers and Scientists*, J. Antony, Ed., Elsevier, 2023, pp. 65–87. doi: 10.1016/B978-0-443-15173-6.00009-3.
- [19] A. Sandi, M. Mahardika, S. I. Cahyono, U. A. Salim, J. Pratama, and B. Arifvianto, "Pengaruh variasi parameter cetak dan post process terhadap tingkat kekerasan spesimen hasil cetak tiga dimensi berbasis stereolithography (SLA)," in *Seminar Nasional Teknologi Informasi dan Kedirgantaraan*, Institut Teknologi Dirgantara Adisutjipto, 2022, pp. 33–46.
- [20] A. Ibrahim, N. Sa'ude, and M. H. I. Ibrahim, "Optimization of Process Parameter For Digital Light Processing (DLP) 3D Printing," *International Journal of Mechanical and Production Engineering*, vol. 5, no. 6, pp. 116–119, Jun. 2017.