

Optimasi Multi-Respons Parameter *Fused Deposition Modeling* Menggunakan Integrasi Taguchi–MRSN–TOPSIS untuk Peningkatan Kualitas Produk

Multi-Response Optimization of Fused Deposition Modeling Parameters Using an Integrated Taguchi–MRSN–TOPSIS Approach for Product Quality Improvement

Ali Parkhan, Muchamad Sugarindra*, Muhammad Viery Syahanifadhel

Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta, Indonesia

*Penulis korespondensi, email: sugarindra@uii.ac.id

Abstrak

Fused Deposition Modeling (FDM) merupakan salah satu teknologi *Additive Manufacturing* yang paling luas digunakan, namun kualitas produk sangat dipengaruhi oleh kombinasi parameter proses yang kompleks dan bersifat multi-respons. Penelitian ini bertujuan mengoptimasi parameter proses FDM dengan mempertimbangkan tiga respon kualitas, yaitu kekuatan tarik, kekuatan tekuk, dan kekasaran permukaan. Pendekatan yang digunakan mengintegrasikan metode Taguchi, Multi-Response Signal-to-Noise Ratio (MRSN), serta teknik pengambilan keputusan multikriteria *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)*. Tujuh parameter proses FDM diuji pada dua level menggunakan material PLA dan konfigurasi perangkat FDM yang ditetapkan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi parameter A2 B2 C2 D2 E2 F2 G2—yang merepresentasikan ketebalan lapisan 0,4 mm, suhu printing 220 °C, jumlah dinding 4, pola infill heksagonal, densitas infill 80%, kecepatan printing 80 mm/s, dan diameter nozzle 0,4 mm—merupakan konfigurasi kompromi yang paling optimal. Konfigurasi ini menghasilkan kekuatan tarik 41,865 MPa (kenaikan 25,005 MPa), kekuatan tekuk 87,321 MPa (kenaikan 38,3 MPa), serta kekasaran permukaan 1,688 μm (penurunan 18,73 μm). Peringkatan TOPSIS secara konsisten menempatkan alternatif tersebut pada peringkat tertinggi. Analisis sensitivitas bobot menunjukkan bahwa rekomendasi parameter relatif stabil dalam rentang preferensi yang diuji, sehingga menegaskan bahwa integrasi Taguchi–MRSN–TOPSIS efektif sebagai kerangka optimasi multi-respons yang transparan, terukur, dan replikatif.

Kata kunci: 3D print, *Fused Deposition Model*, MRSN, Taguchi, TOPSIS

Abstract

Fused Deposition Modeling (FDM) is one of the most widely used *Additive Manufacturing* technologies; however, product quality is strongly influenced by complex and inherently multi-response process parameter combinations. This study aims to optimize FDM process parameters by considering three quality responses, namely tensile strength, flexural strength, and surface roughness. The proposed approach integrates the Taguchi method, Multi-Response Signal-to-Noise Ratio (MRSN), and the multicriteria decision-making technique *Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS)*. Seven FDM process parameters were investigated at two levels using PLA material and a predefined FDM system configuration. The results indicate that the parameter combination A2 B2 C2 D2 E2 F2 G2—representing a layer thickness of 0.4 mm, printing temperature of 220 °C, four wall lines, hexagonal infill pattern, 80% infill density, printing speed of 80 mm/s, and nozzle diameter of 0.4 mm—constitutes the most optimal compromise configuration. This configuration yields a tensile strength of 41.865 MPa (an increase of 25.005 MPa), a flexural strength of 87.321 MPa (an increase of 38.3 MPa), and a surface roughness of 1.688 μm (a reduction of 18.73 μm). The TOPSIS ranking consistently places this alternative at the highest position. Sensitivity analysis of the criteria weights demonstrates that the recommended parameter configuration remains relatively stable within the tested preference ranges, confirming that the integration of Taguchi–MRSN–TOPSIS provides an effective, transparent, and reproducible multi-response optimization framework.

Keywords: 3D print, *Fused Deposition Model*, MRSN, Taguchi, TOPSIS

How to Cite:

Parkhan, A., Sugarindra, M. and Syahanifadhel, M.V. (2026) 'Optimasi multi-respons parameter *Fused Deposition Modeling* menggunakan integrasi Taguchi–MRSN–TOPSIS untuk peningkatan kualitas produk', *Journal of Integrated System*, 9(1), pp. 1–12. Available at: <https://doi.org/10.28932/jis.v9i1.13518>.

1. Pendahuluan

Additive Manufacturing (AM) atau *3D Printing* (3DP) berkembang pesat sebagai alternatif proses manufaktur untuk menghasilkan geometri kompleks, mendukung kustomisasi, serta memfasilitasi produksi volume rendah hingga menengah. Pada kategori polimer, *Fused Deposition Modeling* (FDM) menjadi teknologi yang paling luas diadopsi karena kemudahan operasional dan biaya yang relatif rendah, serta telah digunakan secara ekstensif pada beragam aplikasi rekayasa dan material (Cano-Vicent *et al.*, 2021; Ngo *et al.*, 2018). Namun demikian, kualitas produk FDM sangat sensitif terhadap kombinasi parameter proses—misalnya ketebalan lapisan, suhu ekstruder, pola/densitas infill, kecepatan *printing*, dan diameter nozzle—yang secara langsung memengaruhi sifat mekanik dan kualitas permukaan komponen *printing* (Dey and Yodo, 2019; Gaikwad and Jatti, 2018; Wankhede *et al.*, 2019). Tantangan utama dalam optimasi parameter FDM adalah bahwa kebutuhan kualitas di praktik manufaktur umumnya bersifat *multi-respon*. Banyak studi masih berfokus pada optimasi satu karakteristik (*single-response*), padahal industri sering menuntut kompromi simultan atas beberapa respon yang dapat saling bertentangan—misalnya kekuatan mekanik dan kualitas permukaan—sehingga peningkatan pada satu respon berpotensi menurunkan respon lainnya (Hikmat *et al.*, 2021; Nidagundi *et al.*, 2015). Dengan demikian, kesenjangan penelitian yang lebih substantif tidak terletak pada sejauh mana FDM telah diteliti, melainkan pada masih terbatasnya kerangka analitis yang mampu mengoptimasi sekaligus memeringkat kombinasi parameter proses secara sistematis ketika beberapa respon kualitas dievaluasi secara simultan. Kebutuhan ini menjadi semakin signifikan pada skenario pengaturan proses yang menuntut pengambilan keputusan berbasis *trade-off multi-respon*. Dalam studi ini, kekuatan tarik, kekuatan tekuk, dan kekasaran permukaan dipilih sebagai respon evaluasi karena ketiganya merepresentasikan indikator kualitas yang paling umum digunakan untuk menilai kinerja mekanik dan integritas permukaan komponen hasil *printing* FDM.

Untuk menjawab kebutuhan tersebut, rancangan eksperimen yang efisien sekaligus replikatif merupakan prasyarat metodologis yang penting. Pendekatan *Taguchi* berbasis *orthogonal array* banyak digunakan dalam rekayasa kualitas karena mampu mengurangi jumlah percobaan tanpa mengorbankan kemampuan untuk mengestimasi pengaruh faktor terhadap respon (Mahmood *et al.*, 2018; Ziegel, 1997). Dibandingkan rancangan faktorial penuh, *Taguchi* memungkinkan identifikasi faktor signifikan dan penentuan level yang lebih mendekati optimum dengan kebutuhan sumber daya yang lebih rendah, serta telah terbukti aplikatif pada berbagai domain rekayasa. Pada proses *machining* (Sharifi *et al.*, 2020), bidang kimia dan serat karbon (Hoseinpour-Lonbar *et al.*, 2020) bidang kontruksi dan *welding* (Fakkir Mohamed and Lenin, 2020; Perumal *et al.*, 2021), kerajinan gerabah (Sugarindra and Parkhan, 2019) dan material (Saravanan *et al.*, 2021). Pada konteks FDM, rancangan *Taguchi* telah digunakan untuk pemilihan level faktor yang memengaruhi performa geometrik dan mekanik komponen *printing* (Dey and Yodo, 2019; Gaikwad and Jatti, 2018).

Meskipun demikian, *Taguchi* pada umumnya menghasilkan rekomendasi yang berorientasi *single-response*, atau memerlukan prosedur tambahan ketika beberapa respon harus dipertimbangkan secara simultan. Oleh karena itu, optimasi *multi-respon* menuntut kerangka yang mampu: (i) mengagregasi beberapa metrik kualitas ke dalam suatu ukuran evaluasi gabungan yang konsisten, sekaligus (ii) memberi peringkat alternatif kombinasi parameter secara eksplisit sesuai preferensi pengguna/industri. Dalam konteks ini, integrasi agregasi *multi-respon* dengan metode pengambilan keputusan multikriteria seperti TOPSIS menjadi relevan, karena TOPSIS menyediakan mekanisme pemeringkatan berdasarkan kedekatan terhadap solusi ideal dan kejauhan dari solusi anti-ideal (Ziegel, 1997), serta memungkinkan penggabungan bobot preferensi praktis (Parkhan and Purnomo, 2020; Sugarindra and Parkhan, 2019).

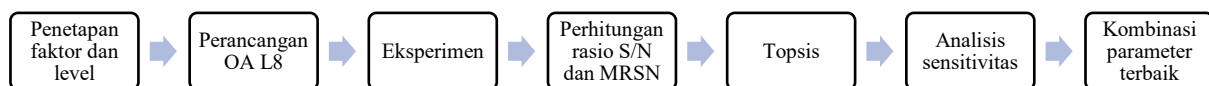
Berdasarkan kesenjangan tersebut, studi ini merancang eksperimen *Taguchi Orthogonal Array L8* untuk mengevaluasi pengaruh tujuh parameter proses *printing* dengan FDM terhadap respon kualitas utama yang ditargetkan, yakni kekuatan tarik, kekuatan tekuk, dan kekasaran permukaan pada spesimen uji/produk *printing*. Berikutnya adalah melakukan agregasi *multi-respon* melalui MRSN sehingga kompromi antar-*respon* dapat dievaluasi secara terukur. Penerapan TOPSIS difungsikan untuk memeringkat alternatif kombinasi parameter serta melengkapi keputusan dengan analisis sensitivitas

bobot agar rekomendasi yang dihasilkan lebih *robust* terhadap variasi preferensi praktisi. Secara keseluruhan, kerangka Taguchi–MRSN–TOPSIS yang diusulkan memadukan efisiensi desain eksperimen dengan transparansi pemeringkatan keputusan multi-kriteria, sehingga dapat direplikasi pada konfigurasi material–perangkat yang sepadan.

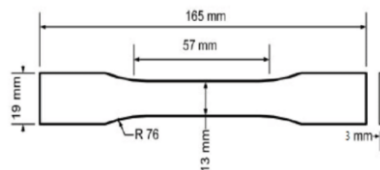
2. Metode

2.1 Objek Penelitian

Penelitian mengikuti alur terstruktur seperti ditunjukkan pada Gambar 1, yang meliputi: penetapan faktor dan level FDM perancangan *Taguchi Orthogonal Array* (OA); pelaksanaan eksperimen dan akuisisi tiga respons kualitas; perhitungan rasio S/N per respons dan agregasi multi-respons ke MRSN; pemeringkatan alternatif dengan TOPSIS; analisis sensitivitas bobot; dan konfirmasi pada kombinasi parameter terbaik. Penelitian ini menggunakan material PLA eSUN (diameter 1,75 mm) dan proses *printing* berbasis *Fused Deposition Modeling* (FDM). *Printing* dilakukan menggunakan printer Creality CR-10S Pro dengan area bidang *printing* 300 mm × 300 mm. Konfigurasi parameter menggunakan perangkat lunak Ultimaker Cura 4.11. *Printing* spesimen benda uji mengacu pada *American Standard and Testing Material* (ASTM) D-638 (lihat Gambar 2) (Bhuiyan and Khanafer, 2025).



Gambar 1. Alur penelitian



Gambar 2. Spesimen benda uji standar ASTM D-638

2.2 Faktor Proses dan Level

Pemilihan faktor dan level eksperimen didasarkan pada studi pustaka serta justifikasi peneliti sesuai dengan kondisi aktual di lapangan. Tujuh faktor dipilih untuk merepresentasikan parameter proses yang berpengaruh signifikan terhadap kualitas produk FDM, khususnya kekuatan tarik dan kekasaran permukaan, sehingga evaluasi pengaruh parameter dapat dilakukan secara komprehensif (lihat Tabel 1) (Dey and Yodo, 2019; Gaikwad and Jatti, 2018; Wankhede *et al.*, 2019). Setiap faktor ditetapkan pada dua level untuk menjaga relevansi proses sekaligus efisiensi jumlah percobaan. Dengan konfigurasi tujuh faktor pada dua level, rancangan eksperimen menggunakan OA Taguchi L8 (2^7). Secara konvensional, desain penuh dengan 2^7 memerlukan 128 percobaan (Ziegel, 1997), namun penerapan OA Taguchi L8 memungkinkan reduksi menjadi delapan percobaan yaitu *trial* ke 1, 16, 52, 61, 86, 91, 103 dan 106, yang mewakili seluruh kombinasi faktor secara efisien (lihat Tabel 2). Dengan kombinasi dua level dan tujuh faktor, rancangan eksperimen disusun menggunakan OA L8 untuk memastikan efisiensi jumlah percobaan sekaligus menjaga keseimbangan pengaruh setiap faktor (lihat Tabel 3).

Berdasarkan desain parameter pada Tabel 3, proses *printing* dilakukan untuk 8 kombinasi spesimen dengan 2 kali replikasi pada setiap kombinasi. Seluruh benda uji kemudian diuji untuk mengevaluasi kekuatan tarik, kekuatan tekuk, dan kekasaran permukaan sesuai prosedur pengujian yang ditetapkan. Pengujian kekuatan tarik dan kekuatan tekuk dilakukan menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM) untuk memperoleh nilai tegangan maksimum yang mampu ditahan oleh spesimen. Sementara itu, pengukuran kekasaran permukaan dilakukan menggunakan *surface roughness meter* pada area

permukaan spesimen yang representatif. Data hasil pengujian dari ketiga respon tersebut selanjutnya digunakan sebagai dasar analisis statistik dan optimasi multi-respons.

Tabel 1. Parameter dan level

Faktor	Parameter	Level		Dasar Penentuan
		1	2	
A	<i>Layer Thickness</i>	0,2	0,4	(Fadhil Alani <i>et al.</i> , 2008)
B	<i>Suhu printing</i>	190	220	Retang suhu rekomendasi pabrikan
C	<i>Jumlah Shell/wall</i>	2	4	(Nugroho and Mahardika, 2019)
D	<i>Bentuk Infill</i>	<i>Cubic</i>	<i>Hexagonal</i>	(Pandzic <i>et al.</i> , 2019)
E	<i>Kepadatan Infill</i>	20	80	
F	<i>Kecepatan printing</i>	30	80	(Miazio, 2019)
G	<i>Nozzle Diameter</i>	0,2	0,4	Kondisi <i>nozzle</i> pada mesin 3D Printer

Tabel 2. *Fractional Factorial Experiment* (FFE)

		A1								A2								
		B1				B2				B1				B2				
		C1		C2		C1		C2		C1		C2		C1		C2		
		D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	D1	D2	
E1	F1	G1	1	9	17	25	33	41	49	57	65	73	81	89	97	105	113	121
		G2	2	10	18	26	34	42	50	58	66	74	82	90	98	106	114	122
	F2	G1	3	11	19	27	35	43	51	59	67	75	83	91	99	107	115	123
		G2	4	12	20	28	36	44	52	60	68	76	84	92	100	108	116	124
E2	F1	G1	5	13	21	29	37	45	53	61	69	77	85	93	101	109	117	125
		G2	6	14	22	30	38	46	54	62	70	78	86	94	102	110	118	126
	F2	G1	7	15	23	31	39	47	55	63	71	79	87	95	103	111	119	127
		G2	8	16	24	32	40	48	56	64	72	80	88	96	104	112	120	128

Tabel 3. Orthogonal array L8

Percobaan /Trial	<i>Layer Thickness</i> (mm)	<i>Extruder Temp</i> (°C)	<i>Number Shells</i>	<i>Infill Pattern</i>	<i>Infill Density</i> (%)	<i>Print Speed</i> (mm/s)	<i>Nozzle Diameter</i> (mm)
<i>Trial 1</i>	0,2	190	2	<i>Cubic</i>	20	30	0,2
<i>Trial 2</i>	0,2	190	2	<i>Hexagonal</i>	80	80	0,4
<i>Trial 3</i>	0,2	220	4	<i>Cubic</i>	20	80	0,4
<i>Trial 4</i>	0,2	220	4	<i>Hexagonal</i>	80	30	0,2
<i>Trial 5</i>	0,4	190	4	<i>Cubic</i>	80	30	0,4
<i>Trial 6</i>	0,4	190	4	<i>Hexagonal</i>	20	80	0,2
<i>Trial 7</i>	0,4	220	2	<i>Cubic</i>	80	80	0,2
<i>Trial 8</i>	0,4	220	2	<i>Hexagonal</i>	20	30	0,4

2.3 Pengukuran Respon dan Analisis Statistik

Penelitian ini bertujuan untuk memperoleh kualitas hasil cetak terbaik melalui penentuan kombinasi optimal faktor-faktor proses yang memengaruhi kualitas *printing*. Pada komponen hasil FDM, kualitas tidak memadai apabila dinilai hanya berdasarkan satu indikator, karena performa fungsional ditentukan oleh kombinasi sifat mekanik dan kualitas permukaan, yang berkaitan dengan kemampuan menahan beban serta aspek *fit-finish* dan interaksi antarmuka. Literatur menunjukkan bahwa proses FDM kerap menghadapi keterbatasan pada *mechanical properties* dan *surface quality*, yang keduanya sangat dipengaruhi oleh parameter proses dan kualitas ikatan antarlapis (Valvez *et al.*, 2022). Oleh karena itu, penelitian ini memilih kekuatan tarik, kekuatan tekuk, dan kekasaran permukaan sebagai respons utama untuk merepresentasikan performa struktural dan kualitas permukaan secara simultan (Golhin *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2019).

Dalam kerangka evaluasi kualitas, kekuatan tarik dan kekuatan tekuk dikategorikan sebagai karakteristik *larger-the-better* (LTB) karena nilai yang lebih tinggi menunjukkan performa mekanik yang lebih baik, sedangkan kekasaran permukaan dikategorikan sebagai *smaller-the-better* (STB) karena permukaan yang lebih halus merefleksikan kualitas *finishing* yang lebih tinggi. Penentuan kombinasi level faktor optimal dilakukan dengan menganalisis total variasi hasil eksperimen dan mendekomposisikannya ke dalam efek utama serta efek interaksi yang terlokasi dalam OA menggunakan Analisis Variansi (ANOVA). Sebelum ANOVA dilakukan, data terlebih dahulu diuji terhadap asumsi normalitas dan homogenitas ragam. Apabila kedua asumsi terpenuhi, ANOVA digunakan untuk mengevaluasi signifikansi statistik pengaruh faktor terhadap masing-masing respons; ringkasan *p-value*, F-ratio, dan persentase kontribusi disajikan untuk mengidentifikasi faktor dominan serta mendukung penetapan level optimal (Ziegel, 1997).

$$\frac{S}{N} LTB = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right] \quad (1)$$

$$\frac{S}{N} STB = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] \quad (2)$$

Dengan $y_{i,r,k}$ adalah hasil ulangan ke-k untuk respons r pada kombinasi i. Agar multi-respons dapat dibandingkan pada skala seragam, digunakan *quality loss* ternormalisasi. Misalkan $Q_{i,r}$ adalah *normalized quality loss* untuk respons r pada kombinasi i (diturunkan dari S/N atau dari deviasi terhadap target tergantung karakteristik); agregasi *Multi-Response S/N* (MRSN) dihitung sebagai:

$$MRSN = -10 \log \left(\frac{1}{m} \sum_{r=1}^m Q_{i,r} \right) \quad (3)$$

Dengan m menyatakan jumlah respons ($m = 3$), semakin besar nilai MRSN maka semakin baik kinerja gabungan respons (Ziegel, 1997). Nilai MRSN selanjutnya digunakan sebagai salah satu basis skor dalam pemilihan solusi. Untuk melakukan pemeringkatan alternatif, dibangun matriks keputusan $X = [x_{ij}]$ berukuran $8 \times p$, di mana 8 menyatakan jumlah alternatif dan p menyatakan jumlah atribut penilaian. Atribut dasar mencakup nilai MRSN sebagai kriteria benefit dan, apabila relevan, atribut tambahan yang merepresentasikan pertimbangan operasional, seperti waktu *printing* dan konsumsi material, sesuai dengan ketersediaan data. Selanjutnya, pemeringkatan alternatif dilakukan berdasarkan prosedur metode TOPSIS (Parkhan and Purnomo, 2020; Sugarindra and Parkhan, 2019).

- Menghitung *quality loss* (L_{ij}) untuk setiap *trial*

$$LTB : L_{ij} = k \frac{1}{n_i} \sum_{k=1}^{n_i} \frac{1}{y_{ijk}^2} ; STB : L_{ij} = k \frac{1}{n_i} \sum_{k=1}^{n_i} y_{ijk}^2 ; NTB : L_{ij} = k \frac{1}{n_i} \sum_{k=1}^{n_i} (y_{ijk} - m)^2 \quad (4)$$

dengan y_{ijk} = data untuk respon ke-i, *trial* ke-j, replikasi ke-k; m = nilai target; n_i = replikasi untuk respon ke-i; k = koefisien dari *quality loss*.

$$k = A_0 / \Delta^2 \quad (5)$$

Di mana A_0 = selisih biaya yang dibutuhkan; Δ = selisih kualitas.

- Menentukan *rating* ternormalisasi (v_{ij})

$$V_{ij} = W_j \frac{L_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m L_{ij}^2}} \quad , i = 1, 2, \dots, m \text{ dan } j = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

dengan W_i = bobot dari normalisasi respon ke-i.

- Menentukan solusi ideal positif A^+ dan solusi ideal negatif A^-

$$A^+ = \{(\max v_{ij} | j \in J), (\min v_{ij} | j \in J') | i = 1, 2, \dots, m\}$$

$$= \{V_1^+, V_2^+, \dots, V_j^+, \dots, V_n^+\} \quad (7)$$

$$A^- = \{(\min v_{ij} | j \in J), (\max v_{ij} | j \in J) | i = 1, 2, \dots, m\} \\ = \{V_1^-, V_2^-, \dots, V_j^-, \dots, V_n^-\} \quad (8)$$

- Menentukan jarak antara alternatif A_i dengan solusi ideal positif dan positif

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - V_j^+)^2}, i = 1, 2, \dots, m \quad (9)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - V_j^-)^2}, i = 1, 2, \dots, m \quad (10)$$

- Menentukan nilai preferensi untuk setiap alternatif (C_i^*):

$$C_i^* = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-} \quad (11)$$

dengan $i = 1, 2, 3, \dots, m$

Nilai kedekatan TOPSIS (C^*) berada pada rentang 0–1, di mana nilai yang semakin mendekati 1 menunjukkan bahwa alternatif tersebut semakin dekat dengan solusi ideal positif dan semakin jauh dari solusi ideal negatif, sehingga merepresentasikan alternatif yang paling optimal. Peringkat: alternatif diurutkan menurun berdasarkan C_i . Bobot (w_j) ditetapkan sesuai preferensi kinerja pada naskah; analisis sensitivitas dilakukan dengan beberapa skenario bobot untuk menilai ketahanan.

$$W_1 = \frac{0,833}{0,833+0,5+0,166} = 0,5557 ; W_2 = \frac{0,5}{0,833+0,5+0,166} = 0,3336 ; W_3 = \frac{0,166}{0,833+0,5+0,166} = 0,1107 \quad (12)$$

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Data Eksperimen

Delapan kombinasi OA L8 (2^7) telah dijalankan sesuai rancangan. Setiap kombinasi dievaluasi terhadap tiga respons kualitas kekuatan tarik, kekuatan tekuk, dan kekasaran permukaan dengan prosedur pengukuran, lokasi uji, dan jumlah replikasi konsisten antar replikasi (Tabel 4). Nilai yang dilaporkan merepresentasikan rerata pengukuran per kombinasi beserta simpangan baku yang relevan untuk analisis lanjutan. Kelayakan penerapan ANOVA dievaluasi melalui uji *normalitas* dan *homogenitas* ragam pada setiap respons. Seluruh analisis statistik dalam penelitian ini dilakukan menggunakan perangkat lunak SPSS. Hasil pengujian menunjukkan bahwa data respons mekanik memenuhi asumsi normalitas dan keseragaman ragam, sehingga analisis variansi dapat diterapkan secara valid. Dengan demikian, estimasi pengaruh faktor dan pengujian signifikansi yang dihasilkan dapat dipertanggungjawabkan secara statistik.

a. Uji normalitas

Kekuatan tarik, kekuatan tekuk, dan kekasaran permukaan masing-masing memiliki nilai $D_{maks} = 0,1112; 0,1198; \text{ dan } 0,2137 \leq D_{tabel} = 0,327$. Temuan ini mengindikasikan bahwa data eksperimen untuk ketiga variabel respons berdistribusi normal.

b. Uji homogenitas

Kekuatan tarik, kekuatan tekuk, dan kekasaran permukaan masing-masing memiliki $\chi_{hitung}^2 = 10,295; 9,261; \text{ dan } 3,248 \leq \chi_{tabel}^2 = 14,067$. Dengan demikian, varians data untuk ketiga variabel respons adalah homogen.

Berdasarkan analisis ANOVA terhadap rasio *Signal-to-Noise* (S/N), diperoleh bahwa kekuatan tarik (Tabel 5) dipengaruhi oleh *layer thickness* dan *diameter nozzle*, yang menunjukkan kontribusi terbesar dan signifikan terhadap peningkatan performa mekanik. Pengendalian parameter yang berkaitan

langsung dengan mekanisme pembentukan lapisan dan ikatan antar-layer sangat menentukan ketahanan material terhadap beban tarik, serta berperan penting dalam menghasilkan sifat mekanik yang *robust* terhadap variasi proses. Untuk kekuatan tekuk (Tabel 6), faktor yang paling dominan adalah *diameter nozzle*, dengan kontribusi tertinggi dibandingkan parameter lainnya. Dominasi parameter ini menunjukkan bahwa karakteristik aliran material dan luas penampang ekstrusi memiliki peran krusial dalam menahan tegangan lentur, khususnya melalui peningkatan kontinuitas jalur cetak dan kemampuan material dalam mendistribusikan tegangan selama pembebanan tekuk.

Pada variabel respon yang ketiga, kekasaran permukaan (Tabel 7) dipengaruhi oleh kecepatan pencetakan, suhu *printing*, kepadatan *infill*, dan bentuk *infill*. Hal ini mengindikasikan bahwa parameter proses yang mengontrol dinamika *deposisi* material dan stabilitas aliran ekstrusi sangat menentukan terbentuknya topografi permukaan. Kecepatan dan suhu pencetakan yang tidak optimal cenderung meningkatkan fluktuasi aliran material, sehingga memperbesar ketidakteraturan permukaan dan menurunkan kualitas finishing produk cetak. Nilai *p* (*p-value*) pada ANOVA bersifat indikatif karena komponen kesalahan diperoleh melalui prosedur *pooling* pada OA L8. Oleh sebab itu, konfigurasi optimum dikonfirmasi melalui uji konfirmasi untuk memastikan validitas peningkatan kinerja yang direkomendasikan.

Tabel 4. Data hasil pengujian

Percobaan /Trial	Tarik		Tekuk		Kekasaran Permukaan	
	Replikasi 1 (Mpa)	Replikasi 2 (Mpa)	Replikasi 1 (Mpa)	Replikasi 2 (Mpa)	Replikasi 1 (μm)	Replikasi 2 (μm)
Trial 1	16.860	17.086	49,021	36,886	18.73	22.13
Trial 2	28.094	28.418	72,734	71,726	7.00	8.97
Trial 3	26.509	27.357	73,848	71,660	10.77	9.20
Trial 4	18.413	23.561	57,969	53,366	8.37	7.80
Trial 5	36.679	38.679	77,734	79,726	13.73	15.07
Trial 6	37.473	34.152	68,603	62,671	9.17	10.50
Trial 7	28.847	31.089	61,599	63,267	5.63	8.30
Trial 8	37.291	40.193	69,505	71,879	9.87	11.7

Tabel 5. Analisis ANOVA uji tarik

Faktor	SS	Kontribusi %	F	<i>p-value</i>
Layer Thickness (A)	29.449	64.86%	108.62	0.0019
Nozzle Diameter (G)	11.212	24.69%	41.36	0.0076
Kecepatan <i>printing</i> (F)	2.096	4.62%	7.73	0.0690
Bentuk <i>Infill</i> (D)	1.835	4.04%	6.77	0.0803
Error (<i>pooled</i>)	0.813	1.79%	–	–

Tabel 6. Analisis ANOVA uji tekuk

Faktor	SS	Kontribusi %	F	<i>p-value</i>
Nozzle Diameter (G)	12.007	55.14%	20.88	0.0197
Layer Thickness (A)	3.684	16.92%	6.41	0.0853
Kecepatan <i>Printing</i> (F)	2.461	11.30%	4.28	0.1304
Jumlah Shell/Wall (C)	1.900	8.73%	3.30	0.1667
Error (<i>pooled</i>)	1.725	7.92%	–	–

Tabel 7. Analisis ANOVA kekasaran permukaan

Faktor	SS	Kontribusi %	F	<i>p-value</i>
Kecepatan <i>Printing</i> (F)	21.906	34.21%	123.13	0.0016
Suhu <i>Printing</i> (B)	16.629	25.97%	93.47	0.0023
Kepadatan <i>Infill</i> (E)	13.406	20.94%	75.35	0.0032
Bentuk <i>Infill</i> (D)	11.554	18.04%	64.94	0.0040
Error (<i>pooled</i>)	0.534	0.83%	–	–

3.2 Signal to Noise Ratio (SNR) dan Efek Tiap Faktor

Perhitungan SNR dilakukan sesuai karakteristik mutu: LTB untuk tarik dan tekuk, serta STB untuk kekasaran. Peringkat pengaruh faktor (berdasarkan delta S/N) dirangkum pada Tabel 8–11. Secara umum, pada kekuatan tarik teridentifikasi satu hingga dua faktor dengan kontribusi dominan, menandakan sensitivitas yang tinggi terhadap perubahan level pada faktor-faktor tersebut. Untuk kekuatan tekuk, pola dominasi relatif searah dengan tarik namun dengan magnitudo yang tidak identik, mengindikasikan perbedaan mekanisme pembebanan (tarik vs. tekuk). Sementara itu, pada kekasaran permukaan, faktor yang berkaitan dengan pola deposisi dan stabilitas aliran ekstrusi cenderung berperan lebih dominan. Hasil S/N ini menyajikan dasar rasional untuk menyusun kandidat level optimal per respons sebelum agregasi multi-respons. Nilai SNR untuk kedua variabel respons disajikan pada Tabel 8. Berdasarkan hasil NR masing-masing variabel respon pada Tabel 8 diperoleh efek tiap faktor (lihat Tabel 9–11).

Kombinasi parameter optimal untuk kekuatan tarik adalah (Tabel 9) A2, B1, C2, D2, E2, F2, G2, kekuatan tekuk adalah (Tabel 10) A2, B1, C2, D2, E2, F2, G2 sedangkan untuk kekasaran permukaan adalah (Tabel 11) A2, B2, C2, D2, E2, F2, dan G2. Karena kombinasi parameter optimal pada masing-masing variabel respon berbeda, maka diperlukan analisis *multi-respon*. Faktor yang berpengaruh terhadap kedua variabel respon secara simultan adalah A, B, C, D, E, F, G sehingga diperlukan analisis terhadap $2^7 = 128$ alternatif kombinasi.

Prediksi nilai setiap variabel respons dilakukan menggunakan model regresi linear berganda. Berdasarkan delapan kombinasi parameter hasil eksperimen *Taguchi*, model regresi dikembangkan untuk mengestimasi kinerja seluruh 128 alternatif kombinasi parameter (2^7) yang mungkin. Persamaan regresi yang dihasilkan digunakan untuk memprediksi nilai respons pada setiap kombinasi alternatif tersebut. Model regresi untuk masing-masing respons disajikan pada Tabel 12–14.

Tabel 8. Hasil SNR

Percobaan	1	2	3	4	5	6	7	8
Tarik	24.595	29.022	28.602	26.243	31.513	31.053	29.515	31.745
Tekuk	32.399	37.174	37.234	34.890	37.921	36.316	35.906	36.984
Kekasaran	-26,235	-18.11	-20.01	-18.15	-23.176	-19.875	-17.015	-20.687

Tabel 9. Efek tiap faktor uji tarik

Faktor	A	B	C	D	E	F	G
Level 1	27.115	29.045	28.719	28.556	28.999	28.524	27.851
Level 2	30.957	29.027	29.353	29.516	29.073	29.548	30.221
Perbedaan	3.842	0.018	0.634	0.960	0.074	1.024	2.370
Optimal	A2	B1	C2	D2	E2	F2	G2
Ranking	1	7	5	4	6	3	2

Tabel 10. Efek tiap faktor uji tekuk

Faktor	A	B	C	D	E	F	G
Level 1	35,424	35,952	35,616	35,865	35,733	35,548	34,878
Level 2	36,782	36,253	36,590	36,341	36,473	36,658	37,328
Perbedaan	1,358	0,301	0,975	0,476	0,739	1,109	2,450
Optimal	A2	B2	C2	D2	E2	F2	G2
Ranking	2	7	4	6	5	3	1

Tabel 11. Efek tiap faktor uji kekasaran permukaan

Faktor	A	B	C	D	E	F	G
Level 1	-20.629	-21.849	-20.512	-21.609	-21.703	-22.065	-20.321
Level 2	-20.189	-18.969	-20.306	-19.209	-19.115	-18.753	-20.497
Perbedaan	0.440	2.880	0.206	2.400	2.588	3.312	0.176
Optimal	A2	B2	C2	D2	E2	F2	G1
Ranking	5	2	6	4	3	1	7

Tabel 12. Regresi uji tarik

Percobaan	Model Regression
1	$Y = -6,9615 + 12,6035 A - 2,0115 B + 1,9955 C + 3,0940 D - 1,5250 E + 2,9200 F + 6,7450 G$
2	$Y = -8,8758 + 11,9228 A + 0,9663 B + 1,7408 C + 3,0283 D + 0,7397 E + 0,3742 F + 7,1898 G$

Tabel 13. Regresi uji tekuk

Percobaan	Model Regression
1	$Y = 14,3098 + 5,9672 A - 1,2928 B + 6,3238 C + 1,6522 D + 2,2648 E + 5,6387 F + 14,1573 G$
2	$Y = -17,1373 + 10,9763 A + 2,2908 B + 5,9163 C + 2,0257 D + 6,2472 E + 6,8668 F + 19,7003 G$

Tabel 14. Regresi uji kekasaran permukaan

Percobaan	Model Regression
1	$Y = 35,3725 - 1,6175 A - 3,4975 B + 0,2025 C - 3,6125 D - 3,4525 E - 4,5325 F - 0,1325 G$
2	$Y = 42,9725 - 0,6325 A - 4,9175 B - 2,1325 C - 3,9325 D - 3,3475 E - 4,9325 F - 0,9475 G$

Berdasarkan alternatif kombinasi pada tabel 2 dan model regresi pada tabel 12 - 14, didapatkan kondisi terbaik untuk kekuatan tarik 42,780 Mpa (naik 25,807 Mpa) diperoleh pada *trial* ke 92 yaitu kombinasi level faktor A2, B1, C2, D2, E1, F2, G2, kekuatan tekuk 87,321 Mpa (naik 44,367 Mpa) diperoleh pada *trial* ke 128 yaitu kombinasi level faktor A2, B2, C2, D2, E2, F2, G2 dan kekasaran permukaan adalah 1,688 μm (turun 18,742 μm) diperoleh pada *trial* ke 128 yaitu kombinasi level faktor A2, B2, C2, D2, E2, F2, G2.

3.3 Penentuan Level Faktor Optimal Menggunakan TOPSIS

Hasil analisis menunjukkan bahwa level faktor optimal untuk masing-masing respons—kekuatan tarik, kekuatan tekuk, dan kekasaran permukaan—tidak identik, sehingga diperlukan pendekatan *Taguchi multi-respons* untuk memperoleh satu konfigurasi kompromi yang paling representatif. Dalam penelitian ini, pendekatan multi-respons diintegrasikan dengan TOPSIS untuk melakukan pemeringkatan alternatif dan menetapkan kondisi optimum secara transparan. Secara konseptual, setiap respons terlebih dahulu ditransformasikan ke skala evaluasi yang sebanding melalui proses normalisasi sehingga dapat dibandingkan secara adil, kemudian informasi dari beberapa respons digabungkan melalui pembobotan sesuai tingkat kepentingannya. Selanjutnya, TOPSIS digunakan untuk menentukan alternatif yang paling dekat dengan solusi ideal, sehingga diperoleh konfigurasi parameter kompromi yang memberikan kinerja keseluruhan terbaik. Untuk merefleksikan preferensi pengambil keputusan, bobot kepentingan tiap respons (w_1, w_2, w_3) ditentukan menggunakan skala linguistik berbasis fuzzy number dan kemudian dikonversi menjadi *crisp score* melalui prosedur *fuzzy scoring*.

Nilai kedekatan TOPSIS dihitung untuk seluruh alternatif kombinasi ($n = 128$) dan disajikan pada Tabel 15. Hasil pemeringkatan menunjukkan bahwa alternatif terbaik diperoleh pada *Trial* 128 dengan nilai TOPSIS 0,9960, yang merepresentasikan kombinasi level faktor A2–B2–C2–D2–E2–F2–G2. Kombinasi tersebut berkorespondensi dengan ketebalan lapisan 0,4 mm, suhu *printing* 220°C, jumlah dinding 4, pola *infill* heksagonal, densitas *infill* 80%, kecepatan *printing* 80 mm/s, dan *diameter nozzle* 0,4 mm. Berdasarkan perhitungan respons pada kombinasi terpilih, konfigurasi ini menghasilkan kekuatan tarik 41,865 MPa, kekuatan tekuk 87,321 MPa, dan kekasaran permukaan adalah 1,688 μm . Kondisi ini menunjukkan peningkatan kekuatan tarik sebesar 25,005 MPa dari kondisi awal (kekuatan tarik *trial* 1 = 16,86 MPa), peningkatan kekuatan tekuk sebesar 38,3 MPa dari kondisi awal (kekuatan tekuk *trial* 1 = 49,021 MPa) dan penurunan kekasaran permukaan sebesar 17,042 μm dari kondisi awal (kekasaran permukaan *trial* 1 = 18,73 μm).

Robustness rekomendasi kemudian dievaluasi melalui analisis sensitivitas bobot, dengan memvariasikan bobot preferensi (w_1, w_2, w_3) dalam rentang yang ditetapkan. Hasilnya menunjukkan bahwa:

- ketika w_1 konstan, kondisi optimal sensitif pada $w_2 \geq 0,4173$ atau $w_3 \leq 0,0270$
- ketika w_2 konstan, kondisi optimal sensitif pada $w_1 \geq 0,6471$ atau $w_3 \geq 0,0193$;

- ketika w_3 konstan, kondisi optimal tidak sensitif terhadap variasi w_1 maupun w_2 .
 Temuan ini mengindikasikan bahwa rekomendasi parameter optimal relatif *robust* pada variasi preferensi $w_1 - w_2$, namun perlu dicermati apabila penekanan terhadap kriteria permukaan (w_3) berubah melampaui ambang sensitivitas yang teridentifikasi.

Tabel 15. Nilai TOPSIS

<i>Trial</i> ke	TOPSIS	<i>Trial</i> ke	TOPSIS	<i>Trial</i> ke	TOPSIS	<i>Trial</i> ke	TOPSIS
1	0,1215	33	0,1207	65	0,5573	97	0,5856
2	0,6254	34	0,6492	66	0,7782	98	0,8247
3	0,3456	35	0,3708	67	0,6884	99	0,7108
4	0,7377	36	0,7556	68	0,8681	100	0,9037
5	0,2254	37	0,2449	69	0,6446	101	0,6643
6	0,6838	38	0,6906	70	0,8399	102	0,8764
7	0,4438	39	0,4451	71	0,7579	103	0,7695
8	0,7799	40	0,7817	72	0,9174	104	0,9393
9	0,2941	41	0,3108	73	0,6214	105	0,6453
10	0,7058	42	0,7272	74	0,8354	106	0,8697
11	0,4806	43	0,5000	75	0,7392	107	0,7544
12	0,8038	44	0,8150	76	0,9137	108	0,9338
13	0,3932	45	0,3959	77	0,7026	109	0,7168
14	0,7620	46	0,7679	78	0,8903	110	0,9126
15	0,5649	47	0,5661	79	0,8005	111	0,8071
16	0,8409	48	0,8399	80	0,9541	112	0,9624
17	0,3329	49	0,3498	81	0,6648	113	0,6966
18	0,7096	50	0,7387	82	0,8232	114	0,8747
19	0,5182	51	0,5353	83	0,7759	115	0,7980
20	0,8042	52	0,8231	84	0,9040	116	0,9445
21	0,4288	53	0,4262	85	0,7402	117	0,7614
22	0,7601	54	0,7711	86	0,8801	118	0,9216
23	0,5858	55	0,5834	87	0,8333	119	0,8439
24	0,8381	56	0,8403	88	0,9475	120	0,9736
25	0,4666	57	0,4870	89	0,7227	121	0,7464
26	0,7823	58	0,8055	90	0,8798	122	0,9189
27	0,6199	59	0,6337	91	0,8201	123	0,8331
28	0,8635	60	0,8738	92	0,9489	124	0,9743
29	0,5546	61	0,5559	93	0,7907	125	0,8039
30	0,8289	62	0,8356	94	0,9298	126	0,9570
31	0,6813	63	0,6803	95	0,8692	127	0,8742
32	0,8908	64	0,8888	96	0,9826	128	0,9960

4. Simpulan

Berlandaskan kerangka integratif *Taguchi*–MRSN–TOPSIS, kombinasi tingkat faktor A2, B2, C2, D2, E2, F2, G2 diidentifikasi sebagai solusi kompromi yang optimal. Hasil pemeringkatan TOPSIS secara konsisten menempatkan alternatif/percobaan 128 pada peringkat tertinggi dan selaras dengan indikator agregat *multi-respons* yang digunakan. Kombinasi tersebut merepresentasikan parameter proses: ketebalan lapisan 0,4 mm, suhu *printing* 220°C, jumlah dinding 4, pola *infill* heksagonal, densitas *infill* 80%, kecepatan *printing* 80 mm/s, dan *diameter nozzle* 0,4 mm. Konfigurasi ini menghasilkan kekuatan tarik 41,865 MPa (naik 25,005 MPa), kekuatan tekuk 87,321 MPa (naik 38,3 MPa), serta kekasaran permukaan 1,688 μm (turun 18,73 μm). Temuan ini menegaskan bahwa pendekatan optimasi *multi-respons* yang digunakan mampu menghasilkan rekomendasi pengaturan parameter yang tidak hanya unggul pada satu indikator, tetapi juga mempertimbangkan kompromi antar-respons secara terukur. Pada analisis sensitivitas bobot menunjukkan bahwa, ketika w_1 dipertahankan konstan, kondisi optimal menunjukkan sensitivitas pada $w_2 \geq 0,4173$ atau $w_3 \leq 0,0270$. Ketika w_2 konstan, sensitivitas terjadi pada $w_1 \geq 0,6471$ atau $w_3 \leq 0,0193$. Sementara itu, ketika w_3 konstan, kondisi optimal tidak menunjukkan sensitivitas terhadap variasi w_1 maupun w_2 . Temuan tersebut mengindikasikan bahwa kombinasi parameter terpilih relatif *robust* dalam batas preferensi yang diuji, sehingga layak direplikasi pada konfigurasi material–perangkat yang sepadan dengan prosedur pengujian yang konsisten. Penelitian ini masih memiliki keterbatasan karena hanya mempertimbangkan sejumlah parameter proses

utama dan jenis material yang terbatas. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk menambahkan faktor pengendali lain yang relevan dengan level yang beragam, serta melibatkan berbagai jenis material guna memperluas generalisasi dan memperkuat validitas temuan.

Daftar Pustaka

- Bhuiyan, M.Z.H. and Khanafer, K. (2025) 'Exploring the nonlinear mechanical characteristics of 3D-printed ABS with varying infill densities', *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 9(3), p.103. Available at: <https://doi.org/10.3390/jmmp9030103>.
- Cano-Vicent, A. *et al.* (2021) 'Fused deposition modelling: current status, methodology, applications and future prospects', *Additive Manufacturing*, 47(September). Available at: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102378>.
- Dey, A. and Yodo, N. (2019) 'A systematic survey of FDM process parameter optimization and their influence on part characteristics', *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 3(3), p.64. Available at: <https://doi.org/10.3390/jmmp3030064>.
- Fadhil Alani, T. *et al.* (2008) 'Influence of layer thickness on impact property of 3D-printed PLA', *International Research Journal of Engineering and Technology*, p.9001. Available at: <https://www.researchgate.net/publication/322952290>.
- Fakkir Mohamed, M. and Lenin, K. (2020) 'Experimental investigation on wire electrical discharge machining parameters for aluminium 6082 T6 alloy using Taguchi design', *Materials Today: Proceedings*, 39, pp.434–437. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.699>.
- Gaikwad, V. and Jatti, V.K.S. (2018) 'Optimization of material removal rate during electrical discharge machining of cryo-treated NiTi alloys using Taguchi's method', *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 30(3), pp.266–272. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2016.04.003>.
- Golhin, A.P. *et al.* (2023) 'Surface roughness of as-printed polymers: a comprehensive review', *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 127(3–4), pp.987–1043. Available at: <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11566-z>.
- Hikmat, M., Rostam, S. and Ahmed, Y.M. (2021) 'Investigation of tensile property-based Taguchi method of PLA parts fabricated by FDM 3D printing technology', *Results in Engineering*, 11, 100264. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2021.100264>.
- Hoseinpour-Lonbar, M., Alavi, M.Z. and Palassi, M. (2020) 'Selection of asphalt mix with optimal fracture properties at intermediate temperature using Taguchi method for design of experiment', *Construction and Building Materials*, 262, 120601. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120601>.
- Mahmood, S., Qureshi, A.J. and Talamona, D. (2018) 'Taguchi based process optimization for dimension and tolerance control for fused deposition modelling', *Additive Manufacturing*, 21(November 2017), pp.183–190. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.03.009>.
- Miazio, Ł. (2019) 'Impact of print speed on strength of samples printed in FDM technology', *Agricultural Engineering*, 23(2), pp.33–38. Available at: <https://doi.org/10.1515/agriceng-2019-0014>.
- Ngo, T.D. *et al.* (2018) 'Additive manufacturing (3D printing): a review of materials, methods, applications and challenges', *Composites Part B: Engineering*, 143(February), pp.172–196. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>.
- Nidagundi, V.B., Keshavamurthy, R. and Prakash, C.P.S. (2015) 'Studies on parametric optimization for fused deposition modelling process', *Materials Today: Proceedings*, 2(4–5), pp.1691–1699. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2015.07.097>.
- Nugroho, A.W. and Mahardika, A.H. (2019) 'Improving the tensile properties of 3D printed PLA by optimizing the processing parameter', *Journal of Energy, Mechanical, Material, and Manufacturing Engineering*, 4(1).
- Pandzic, A., Hodzic, D. and Milovanovic, A. (2019) 'Effect of infill type and density on tensile properties of PLA material for FDM process', *Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium*, 30(1), pp.545–554. Available at: <https://doi.org/10.2507/30th.daaam.proceedings.074>.

- Parkhan, A. and Purnomo, M.R.A. (2020) 'Quality by design of yogurt product using Taguchi multi responses method', *International Journal of Industrial Optimization*, 1(2), p.81. Available at: <https://doi.org/10.12928/ijio.v1i2.2442>.
- Perumal, A. *et al.* (2021) 'Evaluation of EDM process parameters on titanium alloy through Taguchi approach', *Materials Today: Proceedings*, 45, pp.2394–2400. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.737>.
- Saravanan, K.G. *et al.* (2021) 'Parametric optimization of chrome composite through ultrasonic machining using Taguchi approach', *Materials Today: Proceedings*, 45, pp.1975–1978. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.267>.
- Sharifi, E. *et al.* (2020) 'Optimization of high-strength self-consolidating concrete mix design using an improved Taguchi optimization method', *Construction and Building Materials*, 236, 117547. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117547>.
- Sugarindra, M. and Parkhan, A. (2019) 'Optimal design of mechanical and physical quality of pottery using TOPSIS method', in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 673(1), 012104. Available at: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/673/1/012104>.
- Valvez, S., Silva, A.P. and Reis, P.N.B. (2022) 'Optimization of printing parameters to maximize the mechanical properties of 3D-printed PETG-based parts', *Polymers*, 14(13), 2564. Available at: <https://doi.org/10.3390/polym14132564>.
- Wang, P. *et al.* (2019) 'Effects of printing parameters of fused deposition modeling on mechanical properties, surface quality, and microstructure of PEEK', *Journal of Materials Processing Technology*, 271, pp.62–74. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.03.016>.
- Wankhede, V. *et al.* (2019) 'Experimental investigation of FDM process parameters using Taguchi analysis', *Materials Today: Proceedings*, 27, pp.2117–2120. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.09.078>.
- Ziegel, E.R. (1997) 'Taguchi techniques for quality engineering', *Technometrics*, 39(1), pp.109–110. Available at: <https://doi.org/10.1080/00401706.1997.10485460>.