

Optimasi Parameter Pada Proses Cetak Model Peraga Medis Menggunakan Material PETG Dengan Teknik *Fused Deposition Modeling* (FDM)

1st Muhammad Alim Safa'at
Program Studi Teknik Industri
Telkom University Purwokerto
Purwokerto, Indonesia
21106024@ittelkom-pwt.ac.id

2nd Aiza Yudha Pratama, S.T., M.Sc.
Program Studi Teknik Industri
Telkom University Purwokerto
Purwokerto, Indonesia
aizayp.telkomuniversity.ac.id

3rd Dina Rachmawaty, S.T., M.T.
Program Studi Teknik Industri
Telkom University Purwokerto
Purwokerto, Indonesia
dina@ittelkom-pwt.ac.id

Abstrak—Penelitian ini menganalisis pengaruh parameter terhadap transparansi objek yang dihasilkan menggunakan teknologi 3D Printing berbahan polietilen tereftalat glikol (PETG) dengan metode Fused Deposition Modeling (FDM). Parameter yang dioptimalkan mencakup print speed, layer high, suhu nozzle, dan infill angle menggunakan pendekatan Design of Experiments (DOE) metode Taguchi dengan kriteria "larger is better" untuk meningkatkan transparansi cetakan. Analisis ANOVA juga diterapkan untuk menentukan kontribusi signifikan masing-masing parameter dan level.

Hasil menunjukkan kombinasi parameter paling berpengaruh adalah print speed 15 mm/s, diikuti layer high, suhu nozzle, dan infill angle dengan parameter optimal masing-masing yang didapatkan dalam pengujian penelitian ini. Penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi pada pengembangan teknologi 3D Printing di bidang medis melalui pendekatan optimalisasi yang efisien dan akurat.

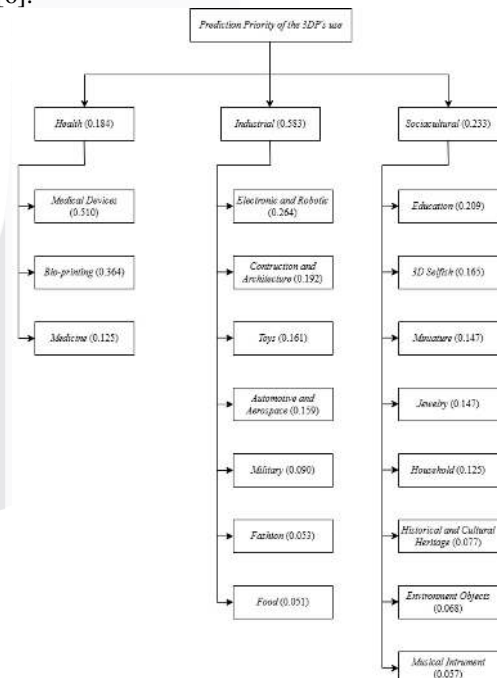
Kata kunci— 3D Printing, FDM, PETG, Taguchi, Transparansi.

I. PENDAHULUAN

Mesin 3D *print* (*three-dimensional printing*) atau pencetakan 3D adalah teknologi manufaktur terkini yang digunakan untuk membuat objek tiga dimensi dari model digital [1]. Teknologi ini pertama kali dikembangkan pada tahun 1980-an oleh Charles Hull, seorang insinyur dari Amerika Serikat [2]. Perkembangan mesin 3D *print* terus berlanjut hingga saat ini. Mesin 3D *print* modern telah dilengkapi dengan berbagai fitur baru, seperti kemampuan untuk mencetak objek *custom* dengan bahan dan ukuran yang berbeda-beda [3].

Kemampuan atau metode yang sering digunakan dalam mesin 3D *print* dalam mencetak objek secara custom biasa disebut juga dengan teknik *Fused Deposition Modeling* (FDM) yang mana salah satu fungsinya adalah membuat objek model atau *prototyping* sebuah produk [4]. Teknik FDM memiliki prinsip kerja dengan cara mencetak objek yang diinginkan menggunakan filament yang dipanaskan oleh *heater nozzle* lapis demi lapis pada permukaan *bottom plate* atau *heatbed* [5].

Dewasa ini, perkembangan dan pemanfaatan 3D ada di berbagai bidang dengan persentase yang berbeda-beda meliputi bidang manufaktur, kesehatan, industri, dan sosiokultural. Hal ini tertera dalam penelitian yang dilakukan oleh Ismianti dalam *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* yang berjudul "Adoption of 3D Printing in Indonesia and Prediction of Its Application in 2025", [6].



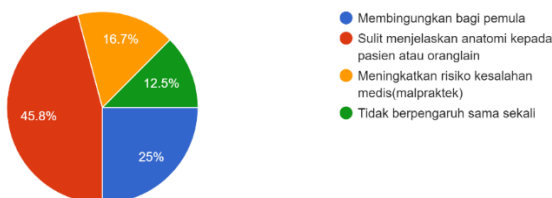
Gambar 1. 1 Perkembangan Penggunaan 3D Printing (sumber: Ismianti dan Herianto, 2020)

Berdasarkan **gambar 1.1** terlihat perbedaan presentase prediksi prioritas tiap bidangnya di Indonesia dan dunia dimana khusus pada penelitian ini akan fokus penggunaan 3D *print* dalam dunia kesehatan atau medis. Hal ini di dasarkan pada perkembangan mesin 3D *print*, bahan-bahan cetak 3D, dan pengaplikasian 3D *print* sangat pesat dalam dunia medis saat ini [8]. Hal ini ditandai dengan kemampuan

3D *print* untuk mencetak peraga medis secara transparan menggunakan jenis filamen *polietilen tereftalat glikol* (PETG). Keunggulan jika peraga medis yang dicetak secara transparan adalah objek dapat dilihat dengan jelas dan bahkan tembus cahaya [8]. Hal ini memungkinkan para praktisi medis untuk mempelajari struktur organ dengan lebih baik, memahami kondisi pasien, dan merencanakan prosedur bedah dengan lebih akurat. Keunggulan tingkat transparansi yang lebih tinggi, detail organ yang sering mengalami penyakit dapat lebih mudah diamati, memberikan kesempatan bagi para dokter untuk memberikan edukasi kepada pasien sebelum prosedur bedah dilakukan [9].

Proses cetak model peraga medis menggunakan material PETG dengan teknik *Fused Deposition Modeling* (FDM) secara transparan dapat signifikan meningkatkan kualitas perawatan pasien dan efektivitas prosedur medis [9]. Filamen PETG adalah salah satu jenis filamen yang memiliki tingkat kejernihan yang cukup tinggi. Hal ini menjadikan filamen PETG pilihan ideal untuk aplikasi yang membutuhkan kejernihan visual terutama dalam mencetak peraga organ dalam dunia medis secara transparan. Transparan yang dimaksud mengacu pada kemampuan bahan cetakan 3D untuk menyerap dan mentransmisikan cahaya [10].

Akan tetapi, untuk menghasilkan objek 3D dengan tingkat transparansi tinggi menggunakan teknologi 3D *Printing* FDM bukanlah hal yang mudah. Permasalahan yang sering muncul dalam proses cetak filament PETG transparan meliputi kebutuhan suhu yang tinggi, sulitnya mendapatkan kecepatan cetak yang tepat, dan penyesuaian orientasi *layer* yang rumit karena bentuk peraga medis yang kompleks [11]. Masalah-masalah ini dapat menyebabkan hasil cetak 3D dari filament PETG menjadi kurang transparan atau bahkan kehilangan kejernihan sepenuhnya.



Gambar 1. 2 Pengaruh Jika Peraga Medis Tidak Transparan

Gambar 1.2 menunjukkan hasil pengambilan data dalam penelitian ini terhadap 48 responden tenaga kesehatan dan pelajar atau mahasiswa bidang kesehatan pada tanggal 18 Mei 2024. Hasil data menunjukkan dampak negatif dari peraga yang kurang transparan. Sebanyak 45,8% responden mengeluhkan kesulitan dalam menjelaskan anatomi kepada pasien atau orang lain, 25% menyatakan hal tersebut akan membingungkan bagi pemula, 16,7% mengkhawatirkan peningkatan risiko kesalahan medis (malpraktek), dan 12,5% menyatakan tidak berpengaruh sama sekali. Oleh karena itu, penting untuk memperhatikan dan mengoptimalkan parameter-parameter cetak yang relevan guna memastikan objek yang dicetak memiliki tingkat transparansi yang dibutuhkan.

Beberapa referensi yang melakukan optimasi parameter pada material PETG menggunakan 3D *print* berbasis *Fused Deposition Modeling* (FDM) menemukan terdapat parameter khusus dalam meningkatkan kualitas produk hasil cetakan. Parameter-parameter tersebut adalah *print speed* [12],[13],

layer high [12]–[15], *nozzle temperature* [14], [16]–[18], *infill angle* [10], [12]–[17], [19], [20]. Berdasarkan referensi tersebut, Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis parameter-parameter yang mendukung dalam proses pencetakan dari jenis filament transparan yang mempengaruhi tingkat transparansi dari objek cetak menggunakan teknologi 3D *Printing* FDM.

II. KAJIAN TEORI

Peraga medis yang transparan memiliki peran yang sangat penting dalam dunia medis. Peraga yang transparan dapat memudahkan peserta didik dan para pakar medis memahami proses-proses organ tubuh (Maidawati, dkk., 2022). Terdapat banyak bahan-bahan untuk membuat peraga medis namun bahan yang ideal untuk membuat peraga medis transparan adalah PETG (*Polyethylene Terephthalate Glycol*). PETG adalah bahan plastik yang dikembangkan dari PET (*Polyethylene Terephthalate*) dengan modifikasi *glycol* content-nya. Cukup banyak penelitian yang mencari karakteristik PETG dan kegunaannya dalam peraga medis hal ini didasari oleh pentingnya sifat yang dihasilkan oleh material tersebut yang sesuai dengan kebutuhan medis (Taqqdissillah, dkk., 2022). PETG memiliki sifat transparan yang baik, kuat, mudah diproses, dan tidak beracun. Selain itu, PETG memiliki kekuatan mekanis yang tinggi dan tahan terhadap air dan zat kimia. Oleh karena itu, PETG menjadi pilihan yang tepat untuk digunakan sebagai bahan peraga medis.

Adapun beberapa parameter yang perlu diperhatikan untuk meningkatkan transparansi material PETG. Parameter-parameter yang dimaksud meliputi *print speed*, *layer high*, *nozzle temperature*, dan *infill angle*. Masing-masing parameter ini berperan penting dalam menentukan kualitas transparansi dari objek yang dicetak. Berikut penjelasan lebih lanjut mengenai pengaruh tiap parameter terhadap transparansi hasil cetak 3D dengan PETG (Taqqdissillah, dkk., 2022; Muhammad, dkk., 2022; Mardlotila, dkk., 2022; Zakaria, dkk., 2023).

Penelitian ini mengambil kesimpulan bahwa referensi-referensi sebelumnya lebih banyak melakukan penentuan parameter menggunakan bantuan metode Taguchi. Metode Taguchi adalah teknik yang sering digunakan dalam penelitian untuk mengoptimalkan proses manufaktur, termasuk pencetakan 3D dengan bahan PETG karena kemampuannya dalam merancang eksperimen yang efisien dan efektif. Penggunaan metode Taguchi bertujuan untuk menemukan parameter optimal yang menghasilkan hasil cetak dengan kualitas transparansi yang diharapkan (Petrov, dkk., 2021).

Pertama, metode Taguchi dirancang untuk meminimalkan jumlah eksperimen yang diperlukan guna mengeksplorasi berbagai kombinasi parameter. Dengan menggunakan array ortogonal, metode ini dapat mengidentifikasi pengaruh setiap parameter dan interaksi antarparameter dengan jumlah percobaan yang lebih sedikit dibandingkan metode tradisional. Kedua, metode ini mampu menghasilkan proses yang tahan terhadap variasi. Dalam pencetakan 3D, di mana berbagai faktor seperti suhu lingkungan, kualitas filamen, dan kondisi mesin dapat mempengaruhi hasil cetak, metode Taguchi membantu menemukan parameter yang menghasilkan kualitas cetak optimal yang konsisten meskipun terdapat variasi dalam kondisi operasional. Ketiga, metode Taguchi juga fokus pada analisis variabilitas untuk

meminimalkan penyimpangan dari hasil yang diinginkan, memastikan tingkat transparansi yang konsisten dan dapat diandalkan. Keempat, metode ini memungkinkan peneliti untuk mengidentifikasi faktor-faktor yang paling berpengaruh terhadap hasil akhir, sehingga sumber daya dan upaya dapat difokuskan pada pengoptimalan parameter yang paling signifikan. Kelima, metode Taguchi menawarkan pendekatan sistematis untuk meningkatkan kualitas produk secara bertahap melalui iterasi yang terkontrol dan berbasis data. Terakhir, metode ini membantu menentukan kombinasi parameter optimal dengan biaya dan waktu yang lebih rendah, yang merupakan keuntungan besar dalam penelitian dengan anggaran terbatas (Valvez, dkk., 2022).

Mengoptimalkan keempat parameter tersebut (*print speed*, *layer high*, *nozzle temperature*, dan *infill angle*) diharapkan secara tepat dapat meningkatkan transparansi cetakan 3D menggunakan PETG untuk pendidikan dan penelitian medis.

III. METODE

3.1 Metode Taguchi

Metode Taguchi merupakan teknik optimasi yang bertujuan meningkatkan kualitas proses manufaktur melalui perancangan eksperimen yang sistematis. Dikembangkan oleh Genichi Taguchi, metode ini membantu mengidentifikasi parameter proses yang signifikan serta menentukan kombinasi optimal untuk menghasilkan output yang diinginkan [15]. Dalam pencetakan 3D menggunakan material PETG, metode ini diaplikasikan untuk mengoptimalkan parameter guna mencapai transparansi cetakan yang maksimal.

Faktor adalah variabel yang memengaruhi hasil akhir, seperti suhu nozzle, suhu bed, kecepatan cetak, tinggi layer, infill angle, dan kecepatan kipas pendingin [17]. Setiap faktor memiliki beberapa level, misalnya suhu nozzle diuji pada 220°C, 230°C, dan 240°C. Output berupa transparansi dan kualitas cetak model peraga medis diukur dari eksperimen.

Degree of Freedom (DoF) adalah jumlah variabel independen yang dapat diubah dalam eksperimen, dihitung berdasarkan jumlah faktor dan level. Sebagai contoh, dengan 3 faktor dan 3 level, DoF dihitung sebagai $3 \times (3 - 1)$. Sampel adalah unit individu yang diuji, sedangkan replikasi adalah pengulangan eksperimen untuk memastikan keandalan hasil [15].

Setelah parameter optimal ditentukan, langkah validasi dilakukan dengan uji konfirmasi. Model peraga medis dicetak menggunakan kombinasi parameter optimal yang diperoleh dari analisis Taguchi, dan hasil cetakan dibandingkan dengan ekspektasi untuk memastikan keakuratan optimasi [12].

Melalui penerapan metode Taguchi, penelitian ini mampu mengidentifikasi dan mengoptimalkan parameter signifikan dalam pencetakan 3D dengan PETG. Proses ini mendukung produksi model peraga medis yang transparan dan berkualitas tinggi, sehingga berkontribusi pada aplikasi medis seperti edukasi, perencanaan bedah, dan pelatihan [21].

3.2 Analysis of Variance (ANOVA)

ANOVA merupakan teknik statistik yang digunakan untuk menganalisis perbedaan di antara beberapa kelompok data, dengan tujuan mengidentifikasi faktor-faktor yang berpengaruh signifikan terhadap output. Hasil dari ANOVA menyajikan p-value yang menunjukkan tingkat signifikansi setiap faktor terhadap output [22]. Proses ANOVA

melibatkan beberapa komponen penting seperti hipotesis, uji F, nilai rata-rata, dan Signal to Ratio. Hipotesis berfungsi menentukan ada tidaknya perbedaan antar kelompok, sedangkan uji F digunakan untuk mengukur signifikansi perbedaan. Nilai rata-rata dan Signal to Ratio membantu menilai performa perlakuan, memberikan pemahaman menyeluruh terhadap data [23].

Hasil eksperimen diklasifikasikan secara statistik berdasarkan sumber variansi untuk mengidentifikasi kontribusi dari setiap faktor. Dalam metode eksperimental Taguchi, analisis variansi bertujuan mengidentifikasi faktor-faktor yang memengaruhi performa nilai respons. Sebagai contoh, penelitian yang melibatkan empat faktor, yakni faktor A, B, C, dan D, menggunakan sebaran distribusi F untuk menghitung rasio rata-rata jumlah kuadrat error (MSE) [24]. Perhitungan ini bertujuan mengetahui pengaruh signifikan masing-masing faktor terhadap output.

Kelebihan analisis menggunakan ANOVA, faktor yang memiliki pengaruh terbesar terhadap kualitas output dapat diidentifikasi, memungkinkan perancangan ulang parameter proses yang lebih optimal [25].

3.3 Hipotesis dan analisis variansi

Tabel 2.1 Analysis of Variance (ANOVA)

Source of Variance	Sum of Squares	Degree of Freedom	Mean Square	F-Hitung
A	SS-A	ν_A	MS_A	F-hitung A
B	SS-B	ν_B	MS_B	F-hitung B
C	SS-C	ν_C	MS_C	F-hitung C
D	SS-D	ν_D	MS_D	F-hitung D
Error	SS-Error	ν_E	MS_E	
Total	SS-Total	ν_T		

Keterangan:

$$SS_A = \frac{(total\ A1)^2 + (total\ A2)^2 + (total\ A3)^2}{n} - \frac{T^2}{N}$$

$$SS_B = \frac{(total\ B1)^2 + (total\ B2)^2 + (total\ B3)^2}{n} - \frac{T^2}{N}$$

$$SS_C = \frac{(total\ C1)^2 + (total\ C2)^2 + (total\ C3)^2}{n} - \frac{T^2}{N}$$

$$SS_D = \frac{(total\ D1)^2 + (total\ D2)^2 + (total\ D3)^2}{n} - \frac{T^2}{N}$$

$$SS_E = \sum e_i^2$$

$$SS_{total} = SS_A + SS_B + SS_C + SS_E$$

Hasil analisis variansi tidak menunjukkan adanya perbedaan perlakuan maupun pengaruh faktor dalam

eksperimen. Pembuktian ini dilakukan dengan menggunakan uji distribusi F, yang berfungsi untuk membandingkan variansi yang disebabkan oleh masing-masing faktor dengan variansi error. Variansi error adalah variasi yang terjadi pada setiap individu dalam pengamatan, yang disebabkan oleh faktor-faktor yang tidak dapat dikendalikan [26]. Secara umum, hipotesis yang digunakan dalam pengujian ini adalah:

- H_0 : tidak terdapat perbedaan rata-rata yang signifikan antar perlakuan terhadap variabel yang diukur.
- H_1 : terdapat perbedaan rata-rata yang signifikan antar perlakuan terhadap variabel yang diukur.

Respon pada setiap eksperimen dapat dimodelkan dalam bentuk:

$$Y_{ijkl} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + \varepsilon_{ijkl}$$

Maka hipotesis yang digunakan dalam pengujian ini adalah:

1. Faktor A

$$H_0 = \alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \dots = \alpha_k = 0$$

$$H_1 = \text{salah satu } \alpha \text{ tidak sama dengan } 0$$

2. Faktor B

$$H_0 = \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \dots = \beta_k = 0$$

$$H_1 = \text{salah satu } \beta \text{ tidak sama dengan } 0$$

3. Faktor C

$$H_0 = \gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3 = \dots = \gamma_k = 0$$

$$H_1 = \text{salah satu } \gamma \text{ tidak sama dengan } 0$$

4. Faktor D

$$H_0 = \delta_1 = \delta_2 = \delta_3 = \dots = \delta_k = 0$$

$$H_1 = \text{salah satu } \delta \text{ tidak sama dengan } 0$$

Gagal menolak atau penolakan terhadap hipotesis nol (H_0) didasarkan pada nilai F hitung yang dihitung menggunakan rumus berikut:

$$\text{Faktor A} \rightarrow F_{\text{hitung}} = \frac{MS_A}{MS_E}$$

$$\text{Faktor B} \rightarrow F_{\text{hitung}} = \frac{MS_B}{MS_E}$$

$$\text{Faktor C} \rightarrow F_{\text{hitung}} = \frac{MS_C}{MS_E}$$

$$\text{Faktor D} \rightarrow F_{\text{hitung}} = \frac{MS_D}{MS_E}$$

Penolakan H_0 pada masing-masing dilakukan apabila didapati kondisi seperti berikut ini:

$$\text{Faktor A} \rightarrow F_{\text{hitung}} > F_{\alpha, v_A, v_E}$$

$$\text{Faktor B} \rightarrow F_{\text{hitung}} > F_{\alpha, v_B, v_E}$$

$$\text{Faktor C} \rightarrow F_{\text{hitung}} > F_{\alpha, v_C, v_E}$$

$$\text{Faktor D} \rightarrow F_{\text{hitung}} > F_{\alpha, v_D, v_E}$$

3.4 Uji F

Uji F adalah salah satu metode statistik yang digunakan untuk menentukan apakah terdapat perbedaan yang signifikan antara dua atau lebih kelompok data. Jika nilai F hitung yang diperoleh lebih kecil dari nilai F tabel, maka kita tidak memiliki cukup bukti untuk menolak H_0 [27]. Sebaliknya, jika nilai F hitung lebih besar dari nilai F tabel, maka H_0 dapat ditolak, yang menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan antara perlakuan yang diuji. Selanjutnya dari hasil F Hitung maka masuk dalam uji F untuk menunjukkan adanya perbedaan pengaruh antara masing-masing faktor dalam sebuah percobaan atau eksperimen.

Menurut penelitian terbaru, uji F pada dasarnya menunjukkan apakah semua variabel independen yang dimasukkan ke dalam model memiliki pengaruh secara bersama-sama terhadap variabel dependen [27]. Pengujian ini dilakukan dengan membandingkan variansi yang disebabkan

oleh masing-masing faktor dengan variansi error. Variansi error adalah variasi yang terjadi pada setiap individu dalam pengamatan akibat faktor-faktor yang tidak dapat dikendalikan.

Hipotesis yang digunakan dalam Uji F adalah:

- H_0 : Tidak ada perbedaan rata-rata yang signifikan antar perlakuan terhadap variabel yang diukur.
- H_1 : Terdapat perbedaan rata-rata yang signifikan antar perlakuan terhadap variabel yang diukur.

Menurut sumber terbaru, terdapat dua cara untuk menguji hipotesis uji F ini:

1. Membandingkan nilai F hitung dengan F tabel.

2. Membandingkan nilai signifikansi (sig) dengan α .

Selain itu, perangkat statistik seperti Minitab dapat digunakan untuk membantu perhitungan uji F ini. Jika diketahui nilai p-value $< \alpha$, maka H_0 dapat ditolak. H_0 juga dapat ditolak jika nilai F hitung lebih besar dari 2.

Selain itu, perangkat statistik seperti Minitab dapat digunakan untuk membantu perhitungan uji F ini. Jika diketahui nilai p-value $< \alpha$, maka H_0 dapat ditolak. Menurut Park, H_0 ditolak jika nilai F hitung lebih besar dari 2.

3.5 Rasio Signal to Noise (S/N)

Metode Taguchi memperkenalkan konsep rasio signal to noise (S/N) yang diterapkan dalam percobaan dengan banyak faktor. Perhitungan rasio S/N bergantung pada karakteristik respon yang diukur, yang dapat dikategorikan menjadi tiga jenis: semakin kecil semakin baik, semakin besar semakin baik, atau mengacu pada nilai tertentu yang diinginkan [28]. Oleh karena itu, pemilihan metode perhitungan S/N harus disesuaikan dengan tujuan analisis yang ingin dicapai.

Penelitian ini berfokus pada pendekatan *Larger is better* dalam perhitungan rasio signal to noise (S/N). Pendekatan ini diterapkan ketika tujuan utama adalah memaksimalkan nilai respon yang diukur. Dalam konteks ini, semakin besar nilai respon, semakin baik kualitas yang dihasilkan. Dengan demikian, perhitungan rasio S/N menjadi sangat penting untuk mengevaluasi dan mengoptimalkan hasil dari eksperimen yang dilakukan.

Rumus untuk menghitung rasio S/N dalam pendekatan *Larger is better*, seperti yang diusulkan oleh Soejanto (2009) [29], adalah sebagai berikut:

$$S/N = -10 \log_{10} (MSD)$$

Di mana MSD (Mean Squared Deviation) dapat dihitung dengan rumus:

$$S/N = -10 \log_{10} (MSD)$$

$$S/N = -10 \log_{10} \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i} \right)$$

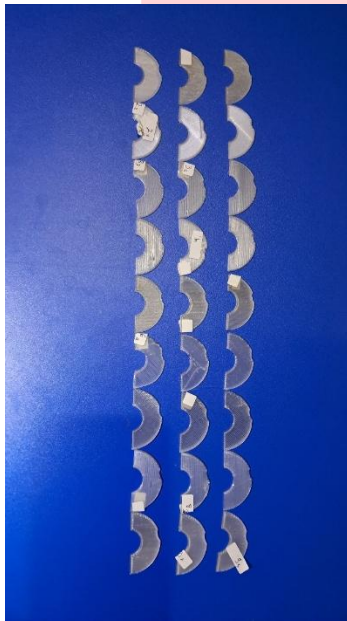
Rumus diatas merupakan nilai respon yang diukur dari setiap percobaan dan diharapkan dapat diperoleh nilai rasio S/N yang mencerminkan seberapa baik suatu perlakuan dalam mencapai hasil yang diinginkan.

Pendekatan *Larger is better* sangat relevan dalam berbagai aplikasi industri, di mana peningkatan kualitas produk atau proses menjadi prioritas utama. Melalui analisis rasio S/N, peneliti dapat mengidentifikasi faktor-faktor yang berkontribusi terhadap peningkatan kualitas dan melakukan penyesuaian yang diperlukan untuk mencapai hasil yang optimal. Faktor dengan p-value yang rendah dianggap memiliki pengaruh yang signifikan. Interpretasi hasil dilakukan dengan menganalisis data yang diperoleh dari eksperimen dan ANOVA [21].

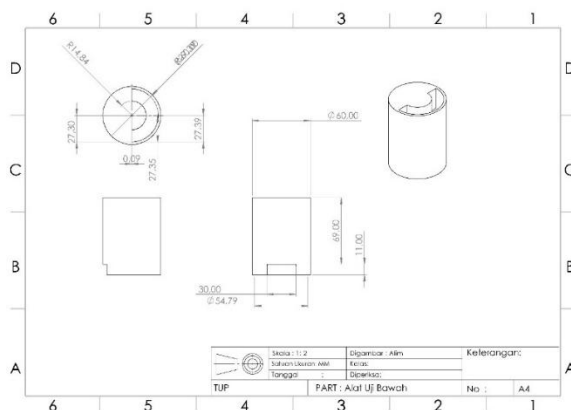
"*larger is better*" berarti nilai optimal yang diinginkan untuk setiap faktor untuk mencapai hasil terbaik. Untuk material PETG, interpretasi hasil mencakup penentuan suhu *nozzle*, suhu bed, kecepatan cetak, tinggi *layer*, *infill angle*, dan kecepatan kipas yang optimal untuk mencapai transparansi tinggi [30].

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengujian transparansi dilakukan menggunakan alat khusus yang dirancang untuk meminimalkan gangguan cahaya luar dan memastikan akurasi hasil. Alat ini terdiri atas tiga bagian utama: silinder bawah yang terhubung ke lux meter, sekat tengah berbahan clay untuk menopang sampel, dan silinder atas yang digunakan untuk menempatkan sumber cahaya. Cahaya dari senter diarahkan untuk menembus sampel, kemudian diukur intensitasnya oleh lux meter di bagian bawah.



Gambar 4.1 Sampel



Gambar 4.2 Lembar Kerja Alat Uji



Gambar 4.3 Proses Uji Sampel

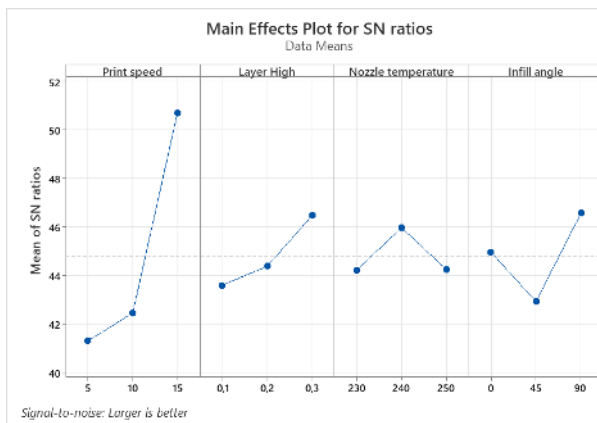
Alat uji didesain berwarna gelap dan pengujian dilakukan di ruangan tanpa cahaya untuk mengurangi noise. Nilai lux dari setiap sampel dicatat untuk memastikan data yang reliabel. Hasil uji menunjukkan variasi nilai lux signifikan. Sampel 1 hingga 3 memiliki nilai rendah (95–161 lux), sedangkan sampel 8 dan 9 menunjukkan nilai tertinggi (370–486 lux), mengindikasikan kualitas cetakan terbaik. Replikasi pengujian menunjukkan konsistensi hasil, meskipun terdapat variasi kecil, terutama pada sampel dengan nilai lux tinggi.

Tabel 4.1 Output Data

Print speed	Layer High	Nozzle temperature	Infill angle	Cetak 1	Cetak 2	Cetak 3	MEAN	SNRA
5	0.1	230	0	95	97	96	96	39.64448
5	0.2	240	45	96	113.2	98	102.4	40.13723
5	0.3	250	90	160	162	161.5	161.1667	44.14514
10	0.1	240	90	160.9	160.7	161.7	161.1	44.14182
10	0.2	250	0	120	121	119.5	120.1667	41.59533
10	0.3	230	45	120.9	118.9	122.3	120.7	41.6324
15	0.1	250	45	225	223.4	224	224.1333	47.01002
15	0.2	230	90	370	372	372.5	371.5	51.39907
15	0.3	240	0	486	469	485.5	480.1667	53.62426

Tabel diatas menunjukkan data pengaruh parameter proses cetak 3D terhadap nilai keluaran hasil cetak berupa rata-rata (MEAN) dan rasio sinyal terhadap noise (SNRA). Empat parameter yang dikaji meliputi kecepatan cetak (Print Speed), tinggi lapisan (Layer Height), suhu nozzle (Nozzle Temperature), dan sudut pengisian (Infill Angle). Nilai rata-rata diperoleh dari tiga kali pengulangan cetak, yang masing-masing dicatat sebagai "Cetak 1," "Cetak 2," dan "Cetak 3". Hasil akhir SNRA dihitung untuk menentukan tingkat stabilitas dan kualitas proses berdasarkan prinsip "lebih besar lebih baik".

Hasil analisis menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan cetak memiliki pengaruh signifikan terhadap nilai SNRA. Nilai SNRA tertinggi dicapai pada kecepatan cetak 15 mm/s dengan rata-rata 53.62, menunjukkan bahwa parameter ini memberikan kualitas cetak terbaik. Sebaliknya, kecepatan cetak terendah (5 mm/s) menghasilkan nilai SNRA yang lebih kecil, yaitu 39.64, yang mencerminkan hasil cetak dengan kualitas kurang optimal. Stabilitas hasil cetak meningkat dengan penambahan kecepatan, menunjukkan bahwa parameter ini menjadi salah satu faktor utama yang harus diperhatikan.



Gambar 4.2 Main Effects Plot for SN Ratios

Grafik "Main Effects Plot for SN Ratios" menunjukkan pengaruh utama dari setiap parameter terhadap nilai SNRA. Kecepatan cetak (Print Speed) terlihat memiliki dampak paling besar dibandingkan dengan parameter lainnya. Peningkatan tajam pada nilai SNRA terjadi seiring bertambahnya kecepatan cetak. Parameter lainnya, seperti tinggi lapisan (Layer Height) dan sudut pengisian (Infill Angle), memberikan pengaruh yang lebih kecil terhadap nilai SNRA. Pola grafik untuk kedua parameter ini cenderung datar, menandakan pengaruhnya tidak signifikan.

Suhu nozzle (Nozzle Temperature) memberikan dampak yang moderat terhadap nilai SNRA. Grafik menunjukkan adanya fluktuasi kecil yang mengindikasikan bahwa parameter ini memiliki pengaruh yang stabil namun tidak sebesar kecepatan cetak. Pengaruh parameter suhu nozzle memerlukan perhatian lebih untuk menentukan rentang optimal yang dapat meningkatkan hasil cetak secara keseluruhan. Data ini menunjukkan bahwa suhu nozzle dapat dikategorikan sebagai faktor yang memerlukan pengkajian lebih lanjut.

Hasil yang ditampilkan memberikan wawasan yang sangat penting untuk optimalisasi proses cetak 3D. Kecepatan cetak terbukti menjadi parameter paling krusial yang perlu dikelola secara cermat. Penyesuaian kecepatan cetak dapat membantu menghasilkan produk dengan kualitas yang konsisten dan lebih baik. Sementara itu, tinggi lapisan dan sudut pengisian dapat diperlakukan sebagai faktor tambahan yang dapat diatur sesuai kebutuhan desain tanpa memberikan dampak besar pada hasil cetak.

Simpulan dari analisis ini mendukung pengambilan keputusan berbasis data dalam proses cetak 3D. Kecepatan cetak menjadi prioritas utama yang harus diperhatikan dalam perancangan pengaturan mesin. Pengaruh parameter lainnya, seperti tinggi lapisan, sudut pengisian, dan suhu nozzle, meskipun tidak dominan, tetap harus dipertimbangkan untuk memastikan hasil cetak sesuai dengan standar yang diharapkan. Kajian ini memberikan landasan yang kuat untuk perbaikan berkelanjutan baik dalam konteks penelitian maupun penerapan praktis pada industri cetak 3D.

Tabel 4.2 Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Print speed	2	107649	53824	8,80	0,016
Error	6	36709	6118		
Total	8	144358			

Keterangan:

Source (Sumber): Menunjukkan sumber variasi, yaitu "Factor" (antar kelompok) dan "Error" (dalam kelompok).

DF: Degrees of Freedom

Adj SS: Adjusted Sum of Squares

Adj MS: Adjusted Mean Square

F-Value: F-Statistic atau F-Hitung

P-Value: Probability Value

Tabel "Analysis of Variance (ANOVA)" memberikan gambaran hasil analisis statistik untuk mengevaluasi pengaruh parameter kecepatan cetak (Print Speed) terhadap variabel respon yang diukur dalam penelitian. Tabel ini terdiri dari beberapa elemen utama, yaitu derajat kebebasan (DF), jumlah kuadrat yang telah disesuaikan (Adj SS), rata-rata kuadrat yang telah disesuaikan (Adj MS), nilai F (F-Value), dan nilai probabilitas (P-Value). Hasil menunjukkan bahwa parameter kecepatan cetak memiliki nilai F sebesar 8,80 dan P-Value sebesar 0,016, yang mencerminkan adanya pengaruh signifikan secara statistik.

Nilai P-Value sebesar 0,016 berada di bawah batas signifikansi standar, yaitu 0,05. Kondisi ini mengindikasikan bahwa hipotesis nol (H_0), yang menyatakan bahwa kecepatan cetak tidak memberikan pengaruh signifikan, dapat ditolak. Sebaliknya, hipotesis alternatif (H_1), yang menyatakan bahwa kecepatan cetak memberikan pengaruh signifikan, dapat diterima. Berdasarkan hasil ini, dapat disimpulkan bahwa variasi dalam parameter kecepatan cetak secara statistik memberikan dampak yang berarti terhadap variabel respon.

Analisis lebih mendalam terhadap nilai Adj SS dan Adj MS menunjukkan bahwa kecepatan cetak memberikan kontribusi yang besar terhadap total variasi dalam data. Nilai Adj SS untuk kecepatan cetak sebesar 107649 secara signifikan lebih tinggi dibandingkan nilai error sebesar 36709. Hal ini menandakan bahwa perubahan pada parameter kecepatan cetak menjadi salah satu penyebab utama variabilitas dalam hasil. Rasio antara Adj MS kecepatan cetak dan error juga memberikan dukungan tambahan terhadap kesimpulan ini, seperti yang tercermin dari nilai F-Value yang relatif tinggi.

Hasil analisis ANOVA ini memberikan bukti kuat bahwa kecepatan cetak merupakan faktor yang signifikan dalam menentukan hasil penelitian. Informasi ini dapat digunakan sebagai dasar untuk mengoptimalkan proses cetak dengan memfokuskan pada parameter kecepatan cetak. Sementara itu, error atau variabilitas lainnya yang tidak dijelaskan oleh kecepatan cetak dapat menjadi fokus untuk penelitian lanjutan guna mengevaluasi faktor-faktor lain yang mungkin berkontribusi terhadap hasil akhir.

V. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil melakukan optimasi parameter pencetakan model peraga medis dengan menggunakan material PETG melalui teknik Fused Deposition Modeling (FDM). Melalui eksperimen Taguchi, ditemukan kombinasi parameter optimal yang meliputi kecepatan cetak sebesar 15 mm/s, tinggi lapisan 0,3 mm, suhu nozzle 240°C, dan sudut infill 90°. Kombinasi parameter tersebut mampu menghasilkan tingkat transparansi yang lebih baik pada model peraga medis, yang telah divalidasi dan dievaluasi oleh tenaga kesehatan. Hasil penelitian ini menunjukkan potensi peningkatan kualitas visualisasi model medis menggunakan teknologi pencetakan 3D, sehingga dapat mendukung kebutuhan tenaga kesehatan dalam bidang medis dengan lebih efektif. Saran untuk penelitian lebih lanjut mencakup

beberapa hal. Pertama, meskipun penelitian ini telah berhasil mencetak model peraga medis menggunakan parameter tertentu yang diperoleh dari literatur, penelitian ini terbatas pada empat parameter dan level yang telah ditentukan. Oleh karena itu, disarankan agar problem owner mempertimbangkan penggunaan parameter dan level lain yang lebih variatif untuk meningkatkan tingkat transparansi dan kualitas model peraga medis. Kedua, penelitian ini dapat dijadikan referensi bagi problem owner dalam memanfaatkan perangkat lunak CAD dan teknik FDM sebagai alternatif dalam pembuatan model peraga medis. Harapannya, penelitian ini menjadi landasan yang bermanfaat untuk pengembangan lebih lanjut di bidang pencetakan 3D untuk aplikasi medis.

REFERENSI

- [1] C. Abdimas *Et Al.*, "Pelatihan Pembuatan Prototype Spare Part Motor Dengan Aplikasi Printer 3d Pada Siswa Siswi Kls Xi Smk Swasta Parulian 3 Medan A B S T R A K Sejarah Artikel," Vol. 1, No. 1, Pp. 37–44, 2021.
- [2] A. V. Kumar, "A Review Paper On 3d-Printing And Various Processes Used In The 3d-Printing," *Interantional J. Sci. Res. Eng. Manag.*, Vol. 06, No. 05, Pp. 538–548, 2022, Doi: 10.55041/Ijsrem13278.
- [3] F. M. Mwema And E. T. Akinlabi, "Basics Of Fused Deposition Modelling (Fdm)," *Springerbriefs Appl. Sci. Technol.*, Pp. 1–15, 2020, Doi: 10.1007/978-3-030-48259-6_1.
- [4] A. Haleem, M. Javaid, R. H. Khan, And R. Suman, "3d Printing Applications In Bone Tissue Engineering," *J. Clin. Orthop. Trauma*, Vol. 11, Pp. S118–S124, 2020, Doi: 10.1016/J.Jcot.2019.12.002.
- [5] A. D. Mazurchevici, D. Nedelcu, And R. Popa, "Additive Manufacturing Of Composite Materials By Fdm Technology : A Review," Vol. 27, No. April, Pp. 179–192, 2020.
- [6] Ismianti Dan Herianto, "Framework Prediksi Penggunaan 3d Printing Di Indonesia Pada Tahun 2030," *Semin. Nas. Ienaco*, Vol. Issn 2337-, No. 2013, Pp. 546–553, 2018.
- [7] Ismianti And Herianto, "Adoption Of 3d Printing In Indonesia And Prediction Of Its Application In 2025," *Iop Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, Vol. 722, No. 1, 2020, Doi: 10.1088/1757-899x/722/1/012028.
- [8] A. Kantaros, E. Soulis, F. Ion, And T. Petrescu, "Advanced Composite Materials Utilized In Fdm / Fff 3d Printing Manufacturing Processes : The Case Of Filled Filaments," No. September, 2023, Doi: 10.3390/Ma16186210.
- [9] M. M. Bengue *Et Al.*, "Evaluation Of A Medical Grade Thermoplastic Polyurethane For The Manufacture Of An Implantable Medical Device : The Impact Of Fdm 3d-Printing And Gamma Sterilization," 2023.
- [10] E. I. Riza *Et Al.*, "Peningkatan Kekuatan Lentur Produk 3d Printing Material Petg Dengan Optimasi Parameter Proses," Pp. 66–75, 2020.
- [11] S. Ghazali, "Comparative Study Of The Sensitivity Of Pla, Abs, Peek, And Petg's Mechanical Properties To Fdm Printing Process Parameters," 2021.
- [12] V. Mehta, S. Vilikkathala Sudhakaran, And S. N. Rath, "Facile Route For 3d Printing Of Transparent Petg-Based Hybrid Biomicrofluidic Devices Promoting Cell Adhesion," *Acs Biomater. Sci. Eng.*, Vol. 7, No. 8, Pp. 3947–3963, 2021, Doi: 10.1021/Acsbiomaterials.1c00633.
- [13] S. Valvez, A. P. Silva, And P. N. B. Reis, "Optimization Of Printing Parameters To Maximize The Mechanical Properties Of 3d-Printed Petg-Based Parts," *Polymers (Basel)*, Vol. 14, No. 13, 2022, Doi: 10.3390/Polym14132564.
- [14] D. Taqdisillah, A. Z. Muttaqin, M. Darsin, D. Dwilaksana, And N. Ilminnafik, "The Effect Of Nozzle Temperature, Infill Geometry, Layer Height And Fan Speed On Roughness Surface In Petg Filament," *J. Mech. Eng. Sci. Technol.*, Vol. 6, No. 2, P. 74, 2022, Doi: 10.17977/Um016v6i22022p074.
- [15] S. Zakaria, R. Stighfarrinata, And A. M. Maghfiroh, "Optimasi Parameter Proses 3d Printing Terhadap Kuat Tarik Filament Petg Menggunakan Metode Taguchi," *Justi (Jurnal Sist. Dan Tek. Ind.)*, Vol. 3, No. 4, P. 538, 2023, Doi: 10.30587/Justicb.V3i4.6150.
- [16] M. J. Mardlotila, M. Trifiananto, D. Dwilaksana, H. A. Basuki, M. N. Kustanto, And I. Hardiatama, "Effect Of Layer Height, Infill Geometry, Nozzle Temperature, And Fan Speed On Tensile Strength Of 3d Printing Petg Specimens," *Invotek J. Inov. Vokasional Dan Teknol.*, Vol. 22, No. 3, Pp. 149–158, 2022, Doi: 10.24036/Invotek.V22i3.1045.
- [17] A. R. Muhammad, R. R. Sakura, D. Dwilaksana, Sumarji, And M. Trifiananto, "Layer Height, Temperature Nozzle, Infill Geometry And Printing Speed Effect On Accuracy 3d Printing Petg," *R.E.M. (Rekayasa Energi Manufaktur) J.*, Vol. 7, No. 2, Pp. 81–88, 2022, Doi: 10.21070/R.E.M.V7i2.1649.
- [18] E. Sirjani, M. Migas, P. J. Cragg, And M. K. Dymond, "3d Printed Uv/Vis Detection Systems Constructed From Transparent Filaments And Immobilised Enzymes," *Addit. Manuf.*, Vol. 33, No. January, P. 101094, 2020, Doi: 10.1016/J.Addma.2020.101094.
- [19] C. E. Lawson *Et Al.*, "Machine Learning For Metabolic Engineering: A Review," *Metab. Eng.*, Vol. 63, No. November 2020, Pp. 34–60, 2021, Doi: 10.1016/J.Ymben.2020.10.005.
- [20] P. Petrov *Et Al.*, "Research Into The Effect Of The 3d-Printing Mode On Changing The Properties Of Petg Transparent Plastic," *Esaform 2021 - 24th Int. Conf. Mater. Form.*, Vol. 13, Pp. 1–11, 2021, Doi: 10.25518/Esaform21.3763.
- [21] T. Sathish *Et Al.*, "Advancement Of Steam Generation Process In Water Tube Boiler Using Taguchi Design Of Experiments," *Case Stud. Therm. Eng.*, Vol. 27, No. May, P. 101247, 2021, Doi: 10.1016/J.Csite.2021.101247.
- [22] S. A. J. E. Waluyo Edy, "Analisis Data Sampel Menggunakan Uji Hipotesis Penelitian Perbandingan Pendapatan Menggunakan Uji Anova Dan Uji T," *Ekon. Dan Bisnis*, Vol. 2, No. 30218365, Pp. 775–785, 2024.
- [23] P. V. Chilbule, L. P. Dhole, And G. R. Chavhan, "Optimization Of Heat Pipe Charged With Cuo

- Nanofluid Using Taguchi Technique,” *Mater. Today Proc.*, No. October, 2023, Doi: 10.1016/J.Matpr.2023.08.343.
- [24] R. Badi’ah And W. Handayani, “Analisis Peramalan Permintaan Produk Garam Konsumsi Beryodium Pada Ud Garam Samudra,” *J. Econ. Dev. Issues*, Vol. 3, No. 2, 2020, Doi: 10.33005/Jedi.V3i2.62.
- [25] D. B. M. A. Ben Taher, U. Pelay, S. Russeil, “A Novel Design To Optimize The Optical Performances Of Parabolic Trough Collector Using Taguchi, Anova And Grey Relational Analysis Methods,” 2023.
- [26] Maidawati, Rina Sepriani, And Ihsanul Fuadi, “The Latest Trend In Utilization Of Organic Fertilizer For Improving Group Productivity Farming,” *J. Teknol.*, Vol. 12, Pp. 62–67, 2022, Doi: 10.35134/Jitekin.V12i2.76.
- [27] H. D. Siregar, M. Wassalwa, Khairina Janani, And I. S. Harahap, “Analisis Uji Hipotesis Penelitian Perbandingan Menggunakan Statistik Parametrika,” *Al Itihadu J. Pendidik.*, Vol. 1, No. 1, P. 3, 2022, [Online]. Available: <https://Jurnal.Asrypersadaquality.Com/Index.Php/A>
- littihadu/Article/View/44%0ahttps://Jurnal.Asrypersadaquality.Com/Index.Php/Alittihadu/Article/Download/44/74.
- [28] N. M. Al Awwaliyah, B. W. Karuniawan, And D. A. Purnomo, “Analisa Pengaruh Parameter 3d Printing Dengan Metode Taguchi – Grey Relational Analysis Terhadap Kekasaran Permukaan Dan Building Time Produk,” *Pros. 4th Conf. Des. Manuf. Its Appl.*, No. 2654, Pp. 252–257, 2020.
- [29] A. Zulkarnain, A. Hammada, And F. Fauzan, “Optimization Of The Cyclone Separator Performance Using Taguchi Method And Multi-Response Pcr-Topsis,” *Int. J. Ind. Optim.*, Vol. 3, No. 1, Pp. 33–46, 2022, Doi: 10.12928/Ijio.V3i1.4272.
- [30] D. Subramaniam, “The Effect Of Varying Infill Densities On Tribiological Properties Of 3d Printed And Annealed Cf-Petg Composites The Effect Of Varying Infill Densities On Tribiological Properties Of 3d Printed And Annealed Cf-Petg Composites,” No. June, 2021.