



Optimasi Parameter Proses FDM terhadap Kekuatan Tarik Material *Polypropylene* (PP) Menggunakan Metode *Taguchi L₉*

Optimization of FDM Process Parameters on the Tensile Strength of Polypropylene (PP) Material Using the Taguchi L₉ Method

Pristiansyah^{1,a)}, Idola Brilian¹, Soni Afriansyah¹, Idiar¹

¹Jurusan Rekayasa Mesin, Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung

^{a)}Corresponding Author: pristian_pay@yahoo.com

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi suhu *nozzle* dan ketebalan lapisan (*layer height*) terhadap kekuatan tarik material *Polypropylene* (PP) yang diproduksi menggunakan teknologi *Fused Deposition Modeling* (FDM). Metode *Taguchi L₉ Orthogonal Array* digunakan untuk menentukan kombinasi parameter proses yang paling optimal dengan jumlah percobaan yang efisien. Pengujian kekuatan tarik dilakukan menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM) berdasarkan standar ASTM D638-14 tipe IV. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan suhu *nozzle* berpengaruh signifikan dalam memperkuat ikatan antar-lapisan, sehingga meningkatkan nilai kekuatan tarik material. Sebaliknya, peningkatan ketebalan lapisan menyebabkan penurunan sifat mekanik akibat lemahnya adhesi antar-layer. Kondisi optimum diperoleh pada suhu *nozzle* 250°C dan ketebalan lapisan 0,1 mm, dengan nilai kekuatan tarik rata-rata mencapai 55,7 MPa. Analisis *Signal-to-Noise Ratio* (S/N) menunjukkan bahwa suhu *nozzle* memberikan kontribusi dominan terhadap kestabilan dan kekuatan hasil cetakan. Secara keseluruhan, penelitian ini memberikan kontribusi terhadap optimasi parameter proses FDM berbasis material PP, terutama untuk mendukung peningkatan efisiensi dan performa mekanik pada aplikasi industri manufaktur aditif.

Kata Kunci: FDM; *polypropylene*; *taguchi*; kuat tarik; FDM

Abstract

This study aims to analyze the influence of nozzle temperature and layer thickness variations on the tensile strength of Polypropylene (PP) material fabricated using Fused Deposition Modeling (FDM) technology. The Taguchi L₉ Orthogonal Array method was employed to identify the most optimal combination of process parameters with an efficient number of experimental runs. Tensile testing was performed using a Universal Testing Machine (UTM) following the ASTM D638-14 Type IV standard. The experimental results revealed that increasing the nozzle temperature significantly enhances interlayer bonding, thereby improving the tensile strength of the printed material. In contrast, an increase in layer thickness tends to reduce mechanical performance due to weakened interlayer adhesion. The optimal printing condition was achieved at a nozzle temperature of 250°C and a layer thickness of 0.1 mm, yielding an average tensile strength of 55.7 MPa. Furthermore, the Signal-to-Noise Ratio (S/N) analysis indicated that nozzle temperature had the most dominant contribution to the stability and mechanical performance of the printed specimens. Overall, this research contributes to the optimization of FDM process parameters for PP-based materials, providing valuable insights for improving process efficiency and mechanical performance in additive manufacturing applications.

Keywords: FDM; *polypropylene*; *taguchi*; tensile strength; FDM

PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi pencetakan tiga dimensi (3D *printing*) berbasis *Fused Deposition Modeling* (FDM)

telah menunjukkan pertumbuhan yang sangat pesat dan menjadi salah satu inovasi manufaktur aditif yang paling berpengaruh dalam dekade terakhir. Nilai pasar globalnya diproyeksikan mencapai USD 41 miliar pada tahun 2027

[1]. Begitu juga dengan material pembentuk objek cetak 3D yang disebut filamen. Nilai jual filamen ini bersaing dari sisi harga dan variasinya. Salah satu filamen yang masih jarang diteliti adalah filamen dengan jenis *Polypropylene* (PP) dengan menggunakan teknik *Fused deposition Modelling* (FDM). Metode FDM ini menawarkan keunggulan kompetitif berupa kemampuan memproduksi komponen dengan geometri kompleks, tingkat penyesuaian desain yang tinggi, waktu produksi singkat, serta efisiensi biaya yang signifikan. Hal tersebut menjadikan FDM sebagai teknologi yang ideal untuk aplikasi *rapid prototyping*, produksi skala kecil, hingga pembuatan komponen fungsional [2], [3]. Salah satu material yang memiliki potensi tinggi untuk digunakan dalam proses FDM adalah *Polypropylene* (PP), yaitu polimer termoplastik semi-kristalin dengan rasio kekuatan terhadap berat yang baik, ketahanan kimia tinggi, sifat biokompatibilitas yang unggul, serta resistansi terhadap kelelahan (*fatigue resistance*) yang baik. Selain itu, harga yang ekonomis (sekitar USD 1,2–1,5/kg) menjadikan PP kandidat menarik untuk aplikasi teknik yang memerlukan kombinasi antara kinerja mekanik dan ketahanan kimia [4], [5].

Namun demikian, penerapan PP sebagai filamen dalam FDM menghadapi tantangan teknis yang cukup kompleks. Material ini memiliki koefisien muai termal tinggi ($80\text{--}100 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) yang mengakibatkan *warping tendency* signifikan, *adhesi* antar lapisan yang lemah, serta menghasilkan anisotropi mekanik hingga 40–60%. Selain itu, sifat mekaniknya sering kali tidak konsisten karena sangat bergantung pada interaksi *non-linear* antar parameter proses [6], [7]. Akibatnya, prediksi dan pengendalian sifat mekanik komponen hasil cetak PP menjadi sulit, menyebabkan tingkat produk cacat (*reject rate*) mencapai 15–25% dalam aplikasi industri dan membatasi penerapan luas PP dalam *additive manufacturing* [8]. Sifat mekanik produk hasil FDM sangat dipengaruhi oleh parameter proses utama, seperti temperatur ekstrusi (*nozzle temperature*), kecepatan pencetakan (*print speed*), ketebalan lapisan (*layer height*), temperatur *bed*, kepadatan *infill*, dan arah raster [9], [10]. Temperatur ekstrusi berperan penting dalam mengatur viskositas lelehan polimer serta kualitas ikatan antar lapisan, dimana PP memiliki rentang proses sempit (210–240°C) yang harus dioptimalkan untuk menyeimbangkan antara *flowability* dan stabilitas termal [11].

Sementara itu, kecepatan pencetakan mempengaruhi *residence time* material pada *nozzle* serta laju pendinginan, yang berdampak langsung terhadap kristalinitas dan kekuatan antar lapisan [12]. Di sisi lain, ketebalan lapisan mempengaruhi jumlah antarmuka antar lapisan per satuan tinggi serta kekasaran permukaan, yang berkorelasi dengan anisotropik dan kekuatan tarik [13], [14].

Kompleksitas interaksi antar parameter tersebut menuntut pendekatan optimasi yang sistematis untuk mengidentifikasi kombinasi parameter terbaik dengan jumlah eksperimen minimal. Rancangan percobaan penuh (*full factorial design*) untuk tiga faktor dengan tiga level, misalnya, memerlukan 27 kali percobaan, yang relatif tidak efisien dari segi waktu dan biaya [15]. Berbagai penelitian terdahulu telah meneliti pengaruh parameter proses FDM terhadap sifat mekanik berbagai jenis polimer. Rajpurohit et al. (2021) menggunakan *Response Surface Methodology* (RSM) untuk material ABS dan menemukan bahwa ketebalan lapisan serta arah raster merupakan faktor paling dominan terhadap kekuatan tarik [16]. Rinanto et al. (2021) meneliti orientasi cetak dan pola *infill* pada PLA menggunakan desain faktorial penuh dan melaporkan peningkatan kekuatan tarik hingga 47% [17]. Muhammad et al. (2023) mengkaji efek interaksi antara *temperatur ekstrusi* dan kecepatan pencetakan pada material PC/ABS, menemukan hubungan signifikan terhadap sifat dinamis mekanik [18]. Sementara itu, Sheoran et al. (2020) menerapkan metode *Taguchi L₉* untuk optimasi parameter FDM pada PLA dan berhasil meningkatkan kualitas permukaan hingga 38% hanya dengan sembilan percobaan [19]. Meskipun demikian, mayoritas penelitian tersebut berfokus pada material PLA dan ABS yang memiliki kemudahan proses lebih tinggi dibanding PP. Studi yang secara sistematis mengoptimasi parameter FDM untuk filamen PP dengan pendekatan *Design of Experiments* (DOE) yang efisien masih sangat terbatas [20], [21]. Beberapa penelitian terbaru mulai mengeksplorasi PP dalam konteks FDM dengan fokus berbeda-beda. Srinivasan et al. (2020) menemukan bahwa peningkatan temperatur *bed* dan ruang cetak hingga 80°C mampu menurunkan *warping* hingga 60% [22]. Abas et al. (2022) melakukan penelitian tentang peningkatan *adhesi* antar lapisan melalui modifikasi sistem pendinginan [23], sedangkan Yadav et al. (2020) menunjukkan bahwa variasi parameter proses dapat memengaruhi umur leleh (*fatigue life*) hingga tiga kali lipat [24]. Stojković et al. (2023) juga mengonfirmasi peningkatan kekuatan tarik sebesar 15–20% setelah perlakuan panas (*annealing*) [25]. Namun, pendekatan yang digunakan sebagian besar masih *one-factor-at-a-time* atau memerlukan jumlah eksperimen besar.

Metode *Taguchi L₉* menawarkan efisiensi tinggi karena hanya memerlukan 9 eksperimen untuk tiga faktor pada tiga level (reduksi 67% dari desain penuh), namun tetap mampu mengidentifikasi kombinasi parameter optimal serta menghitung kontribusi persentase tiap faktor melalui *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) [26]. Pendekatan ini sangat relevan untuk aplikasi industri yang menuntut efisiensi waktu dan biaya tanpa mengorbankan akurasi hasil. Sifat khas PP seperti rentang suhu leleh sempit (160–

170°C), indeks alir leleh tinggi (0.5–40 g/10 min), dan kecenderungan penyusutan akibat kristalisasi sehingga memerlukan strategi optimasi yang berbeda dari material FDM konvensional seperti PLA dan ABS [27]. Urgensi penelitian ini didorong oleh kebutuhan industri manufaktur, terutama pada sektor otomotif, alat kesehatan, kemasan, dan produk konsumen, terhadap komponen berbasis PP hasil *additive manufacturing* yang memiliki performansi mekanik terprediksi, akurasi dimensi tinggi, dan biaya produksi rendah [28].

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, maka tujuan penelitian ini adalah untuk mendapatkan nilai level yang optimum dari parameter yang diuji menggunakan metode *Taguchi orthogonal array* L_9 (3^2) dengan 2 parameter dan 3 level. Parameter yang digunakan yaitu, suhu *nozzle* dan *layer height*. Diharapkan penelitian ini menghasikan kuat tarik yang tinggi dari level yang optimum pada parameter yang diuji. Level yang optimum dari parameter yang diuji tersebut akan diuji kembali dalam bentuk uji konfirmasi untuk memastikan nilai kuat tarik tertinggi.

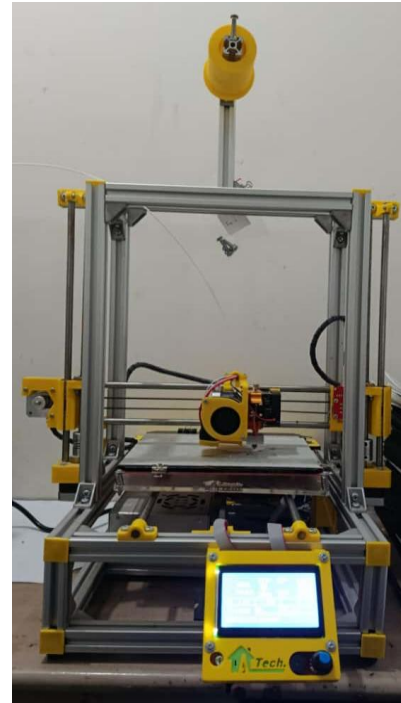
METODE PENELITIAN

Penelitian ini dimulai dengan melakukan studi literatur dari penelitian-penelitian sebelumnya. Studi literatur bersumber dari artikel serta jurnal-jurnal yang terkait dengan penelitian yang akan dilakukan dan menjadi dasar untuk menentukan gap pada penelitian. Filamen yang digunakan pada penelitian ini adalah filamen *Polypropylene* (PP). Proses pencetakan dilakukan menggunakan printer 3D *Haltech H-01* ditampilkan pada Gambar 1, sedangkan spesimen uji pada penelitian ini dirancang mengacu pada standar ASTM D638-14 tipe IV yang ditampilkan pada Gambar 2. Dengan memanfaatkan perangkat lunak *SolidWorks*, model tiga dimensi spesimen yang telah digambar kemudian diekspor dalam format *STL* agar dapat diproses lebih lanjut pada perangkat lunak *slicer Ultimaker Cura* untuk mengatur parameter pencetakan. Proses eksperimen dilakukan dengan mengombinasikan beberapa level dari masing-masing parameter proses yang telah ditetapkan, yaitu suhu *nozzle* dan ketebalan lapisan (*layer height*). Rincian level dari setiap parameter proses yang digunakan ditampilkan pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Parameter Proses Penelitian

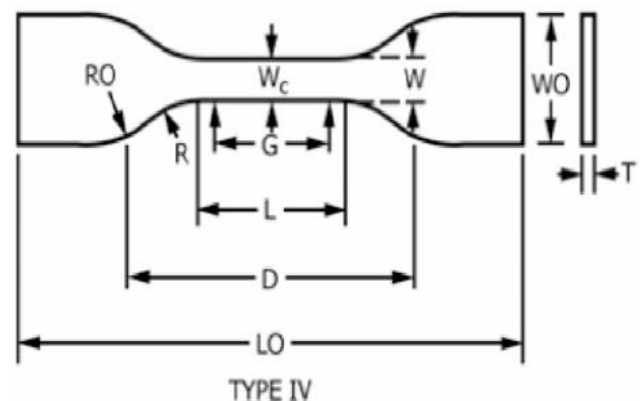
Faktor	Parameter Proses	Level 1	Level 2	Level 3
C1	Nozzle Temp (°C)	230	240	250
C2	Layer Height (mm)	0,1	0,2	0,3

Parameter dan level pada Tabel 1 dipilih berdasarkan dari penelitian-penelitian sebelumnya, agar unsur kebaruan dari penelitian ini tetap terjaga.



Gambar 1. printer 3D Haltech H-01

Gambar 2 menunjukkan mesin 3D printer yang digunakan untuk mencetak spesimen uji, sedangkan Gambar 3 menunjukkan desain spesimen uji tarik dengan standar ASTM D638-14 tipe IV.



Gambar 2. Bentuk Spesimen

Spesifikasi bentuk spesimen ditunjukkan oleh Tabel 2.

Tabel 2. Spesifikasi Spesimen

Dimensi	Panjang (mm)	Toleransi (mm)
<i>W</i> = Width of narrow section	6	± 0.5
<i>L</i> = Length of narrow section	33	± 0.5
<i>W0</i> = Width overall	19	+ 6.4
<i>L0</i> = Length overall	115	No max
<i>G</i> = Gage Length	25	± 0.13
<i>D</i> = Distance between grips	65	± 5
<i>R</i> = Radius of fillet	14	± 1
<i>R0</i> = Outer radius	25	± 1

Penelitian ini menerapkan desain eksperimen *Taguchi Orthogonal Array* L_9 , yang melibatkan dua faktor utama, yaitu suhu *nozzle* dan ketebalan lapisan (*layer height*), masing-masing dikaji pada tiga level variasi untuk memperoleh kombinasi parameter proses yang optimal secara efisien. Setiap eksperimen dicetak sebanyak 3 replikasi kemudian diuji kuat tariknya menggunakan mesin uji tarik. Tabel 3 merupakan desain percobaan metode *Taguchi Orthogonal Array* L_9 (3^2).

Tabel 3. Rencana Pengujian

Eksp. No	Nozzle Temperature (°C)	Layer Height (mm)
1	1	1
2	1	2
3	1	3
4	2	1
5	2	2
6	2	3
7	3	1
8	3	2
9	3	3

Berdasarkan Tabel 3 rancangan kombinasi faktor antara *temperatur nozzle* dan ketebalan lapisan (*layer height*) yang digunakan dalam percobaan berdasarkan metode *Taguchi*. Masing-masing faktor memiliki tiga level yang direpresentasikan dengan kode numerik 1, 2, dan 3. Faktor *temperatur nozzle* diatur pada tiga tingkatan, yaitu level 1 (230 °C), level 2 (240 °C), dan level 3 (250 °C), sedangkan *layer height* juga memiliki tiga variasi, yaitu level 1 (0,1 mm), level 2 (0,2 mm), dan level 3 (0,3 mm). Kombinasi yang tersaji pada Tabel 3 menghasilkan 9 variasi kondisi proses pencetakan, dimana setiap baris merepresentasikan satu set percobaan. Rancangan ini memungkinkan analisis pengaruh yang simultan antara perubahan suhu *nozzle* dan *layer height* terhadap sifat mekanik spesimen, sehingga hubungan antar faktor dapat dievaluasi secara lebih terstruktur dan efisien. Pengujian tarik dilaksanakan menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM) untuk memperoleh nilai kekuatan tarik maksimum dari setiap spesimen. Data hasil pengujian kemudian dianalisis melalui perhitungan nilai rata-rata serta *Signal-to-Noise Ratio* (*S/N ratio*) dengan pendekatan *Larger is Better* untuk menentukan parameter dengan performa mekanik tertinggi. Selanjutnya, uji konfirmasi dilakukan menggunakan kombinasi parameter optimum yang diperoleh dari hasil analisis *Taguchi*. Spesimen yang telah dicetak berjumlah 27 yang merupakan hasil dari 3 replikasi untuk 9 kali percobaan yang telah dilakukan. Spesimen tersebut ditampilkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Spesimen Uji Tarik

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Eksperimen

Data hasil uji tarik menggunakan filamen *Polypropylene* (PP) ditampilkan pada Tabel 4. Nilai rata-rata kuat tarik berkisar antara 31,27 sampai 55,7 MPa, menunjukkan bahwa variasi suhu *nozzle* dan *layer height* berpengaruh terhadap sifat mekanik hasil cetakan. Nilai tertinggi diperoleh pada kombinasi suhu *nozzle* 250°C dan *layer height* 0,1 mm dengan rata-rata 16,37 MPa, sedangkan nilai terendah terdapat pada 230°C dan 0,3 mm sebesar 11,35 MPa. Hasil ini menunjukkan peningkatan jika dibandingkan dengan penelitian sebelumnya menggunakan filamen HT-PLA dan PLA [6], filamen PP [7], dan filamen PETG [22].

Peningkatan suhu pencetakan cenderung memperkuat ikatan antarlapisan, sementara peningkatan ketebalan lapisan menurunkan kekuatan tarik akibat berkurangnya *adhesi* antar layer. Secara keseluruhan, parameter pencetakan dengan suhu *nozzle* tinggi dan *layer height* rendah menghasilkan karakteristik mekanik terbaik pada proses FDM berbahan *Polypropylene*.

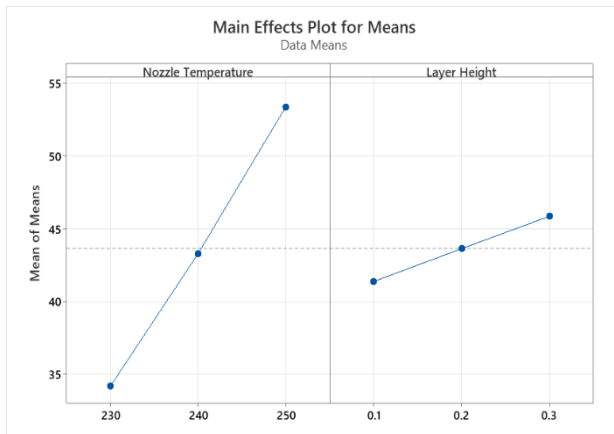
Tabel 4. Hasil Uji Tarik

Exp	Rep 1	Rep 2	Rep 3	Rata-rata (MPa)
1	31,2	32	30,6	31,27
2	34,5	35,1	33,8	34,47
3	36,8	37,5	36,2	36,83
4	41,5	42,1	40,9	41,5
5	43,3	42,8	43,9	43,33
6	45	44,5	45,7	45,07
7	51,4	50,9	51,8	51,37
8	53,2	52,5	53,6	53,1
9	55,8	56,3	55	55,7

Analisis *Taguchi*

Setelah data kuat tarik dari 9 eksperimen dengan 3 replikasi spesimen didapatkan, maka langkah selanjutnya adalah melakukan analisa menggunakan metode *Taguchi*. Analisa yang dilakukan adalah dengan

menghitung data rata-rata (*mean plot*) dan *S/N ratio* menggunakan *software* analisis. Grafik *main effect plot* untuk suhu *nozzle* dan ketebalan lapisan (*layer height*) berdasarkan data uji kuat tarik yang diberikan ditunjukkan oleh Gambar 4. Terlihat bahwa kekuatan tarik meningkat seiring kenaikan suhu *nozzle*, dengan nilai tertinggi pada 250°C. Kekuatan tarik menurun seiring peningkatan *layer height*, dimana performa terbaik diperoleh pada 0,1 mm. Hasil ini menunjukkan bahwa kombinasi optimal terjadi pada suhu *nozzle* 250°C dan *layer height* 0,1 mm, sesuai prinsip *Larger is Better* dalam metode *Taguchi*. Hasil perhitungan *mean plot* ditunjukkan pada Gambar 1 berikut:



Gambar 4. Grafik Mean Float

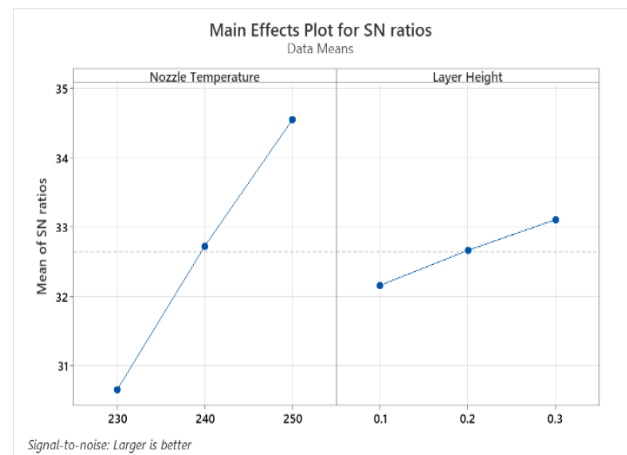
Hasil perhitungan nilai rata-rata (*mean*) untuk masing-masing faktor disajikan pada Tabel 3. Berdasarkan analisis terhadap respon rata-rata, dapat diidentifikasi bahwa suhu *nozzle* memberikan pengaruh paling signifikan terhadap variasi sifat mekanik material. Faktor ketebalan lapisan (*layer height*) juga menunjukkan kontribusi yang cukup berarti, meskipun pengaruhnya relatif lebih kecil dibandingkan dengan suhu *nozzle*.

Tabel 5. Hasil Analisis Rata-Rata (*Mean*) Tiap Faktor

Level	Nozzle Temperature	Layer Height
1	34,19	41,38
2	43,30	43,63
3	53,39	45,87
Delta	19,20	4,49
Rank	1	2

Tabel 3 memperlihatkan hasil analisis nilai rata-rata kuat tarik pada setiap level faktor yang diteliti. Berdasarkan hasil evaluasi, suhu *nozzle* menunjukkan pengaruh paling dominan terhadap perubahan sifat mekanik material, dengan nilai delta sebesar 19,20 MPa dan menempati peringkat pertama. Temuan ini mengindikasikan bahwa peningkatan suhu pencairan material secara signifikan memengaruhi kualitas fusi

antar-lapisan selama proses pencetakan. Faktor *layer height* menempati peringkat kedua dengan delta sebesar 4,49 MPa. Hal ini menunjukkan bahwa kontribusi yang cukup besar terhadap kekuatan tarik hasil cetakan. Lapisan dengan ketebalan lebih kecil menghasilkan ikatan antarlapisan yang lebih padat dan konsisten, sehingga meningkatkan performa mekanik spesimen. Secara umum, hasil analisis ini menegaskan bahwa pengendalian suhu *nozzle* merupakan parameter kunci dalam pembentukan ikatan antarmuka yang kuat, sedangkan pengaturan *layer height* berperan dalam menjaga keseragaman struktur dan stabilitas mekanik produk akhir. Sedangkan grafik *Main Effects Plot for S/N Ratio (Larger-is-Better)* berdasarkan data metode *Taguchi* ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Grafik S/N Ratio

Berdasarkan Gambar 5, grafik *Main Effects Plot for S/N Ratio (Larger-is-Better)* menunjukkan bahwa nilai *S/N Ratio* tertinggi dicapai pada kombinasi suhu *nozzle* 250°C dan *layer height* 0,3 mm. Hal ini menunjukkan kondisi optimal untuk menghasilkan kekuatan tarik maksimum. Peningkatan *layer height* cenderung menurunkan nilai *S/N Ratio* secara signifikan, yang berarti menurunkan kestabilan hasil cetakan dan konsistensi performa mekanik spesimen semakin baik. Sebaliknya, kenaikan nilai *layer height* berbanding terbalik dengan nilai S/N, menandakan bahwa lapisan yang lebih tebal cenderung melemahkan ikatan antarlapisan akibat penurunan adhesi material selama proses deposisi. Kombinasi suhu *nozzle* 250°C dan *layer height* 0,3 mm menunjukkan nilai S/N tertinggi, sehingga dapat dianggap sebagai kondisi pencetakan paling optimal dalam menghasilkan sifat mekanik yang unggul. Secara umum, tren ini menegaskan bahwa suhu *nozzle* merupakan faktor yang paling dominan dalam memengaruhi kekuatan hasil cetakan, sementara *layer height* berfungsi sebagai parameter pendukung yang memengaruhi keseragaman dan kualitas ikatan antar lapisan pada proses pencetakan FDM berbahan *polypropylene* (PP). Tabel 5 menunjukkan

hasil perhitungan parameter yang paling berpengaruh terhadap kekuatan tarik.

Tabel 6. Hasil Perhitungan *S/N Ratio (Larger-is-Better)*

Level	Nozzle Temperature	Layer Height
1	30,66	32,16
2	32,72	32,66
3	34,54	33,11
Delta	3,89	0,95
Rank	1	2

Analisis *Signal-to-Noise Ratio (S/N)* yang ditampilkan pada Tabel 5 menggunakan pendekatan “*larger is better*” untuk mengidentifikasi faktor yang paling konsisten dalam menghasilkan nilai kuat tarik maksimum. Berdasarkan hasil evaluasi, *nozzle temperature* tercatat sebagai faktor dengan pengaruh paling dominan, menunjukkan nilai delta sebesar 3,89, dan menempati peringkat pertama. Hal ini menegaskan bahwa pengaturan suhu pencairan material memiliki kontribusi signifikan terhadap peningkatan kualitas adhesi antarlapisan serta kestabilan struktur hasil cetakan. Faktor *layer height* menempati peringkat kedua dengan delta sebesar 0,95, yang menunjukkan bahwa variasi ketebalan lapisan juga berperan penting dalam menentukan performa mekanik spesimen. Ketebalan lapisan yang lebih kecil menghasilkan nilai *S/N* yang lebih tinggi, menandakan deposisi material yang lebih seragam serta distribusi tegangan yang lebih stabil pada spesimen hasil pencetakan. Perbandingan nilai delta antar faktor menunjukkan bahwa suhu *nozzle* berperan sebagai variabel utama dalam pengendalian sifat mekanik, sedangkan *layer height* berfungsi sebagai variabel penunjang yang memengaruhi mikrostruktur dan kualitas permukaan. Kombinasi pengaturan kedua faktor ini secara tepat mampu meningkatkan kekuatan tarik spesimen secara signifikan. Proses penentuan parameter optimum dilakukan dengan memilih level faktor yang memiliki nilai *S/N* tertinggi, karena semakin besar nilai tersebut, semakin besar pula kontribusinya terhadap peningkatan respon kuat tarik. Setelah kombinasi parameter optimal diperoleh, uji konfirmasi (*confirmation test*) dilakukan untuk memverifikasi keandalan hasil analisis dan memastikan konsistensi peningkatan sifat mekanik sebagaimana tercantum pada Tabel 6.

Tabel 7. Uji Konfirmasi

Exp	Replikasi 1	Replikasi 2	Replikasi 3	Rata-rata (MPa)
1	55,8	56,3	55	55,7

Berdasarkan Tabel 6, uji konfirmasi dilakukan pada kombinasi parameter optimum, yaitu suhu *nozzle* 250°C dan *layer height* 0,3 mm, yang sebelumnya menunjukkan

performa mekanik tertinggi pada hasil percobaan *Taguchi L9*. Nilai kuat tarik rata-rata yang diperoleh sebesar 55,7 MPa. Hal ini menunjukkan kesesuaian antara hasil prediksi model dan hasil eksperimental aktual. Temuan ini membuktikan bahwa kombinasi parameter tersebut memberikan kondisi termal dan deposisi material yang paling ideal dalam menghasilkan ikatan antarlapisan yang kuat serta kestabilan dimensi yang baik pada spesimen *Polypropylene* hasil proses FDM. Temuan penelitian ini menunjukkan bahwa suhu *nozzle* memiliki pengaruh paling dominan terhadap peningkatan kekuatan tarik material karena berperan langsung dalam mengatur tingkat difusi termal dan kualitas fusi antar-lapisan selama proses pencetakan. Suhu pencetakan yang lebih tinggi memungkinkan terjadinya ikatan antarmolekul yang lebih optimal antara lapisan termoplastik, sehingga menghasilkan peningkatan kekuatan mekanik secara signifikan. Selain itu, kecepatan pencetakan juga berperan dalam menentukan efisiensi proses deposisi material. Meskipun peningkatan kecepatan dapat mempercepat waktu produksi, kondisi ini menuntut pengaturan suhu yang tepat agar aliran material tetap stabil dan tidak terjadi penurunan adhesi antar-layer. Ketidakseimbangan antara suhu dan kecepatan dapat menyebabkan cacat fusi dan menurunkan homogenitas struktur hasil cetakan. Hasil penelitian ini sejalan dengan temuan sejumlah studi terdahulu [2], [5], [7], yang menyatakan bahwa parameter suhu pencetakan merupakan faktor paling berpengaruh terhadap kualitas mekanik spesimen hasil proses FDM. Namun, penelitian ini memberikan kontribusi baru dengan menegaskan konfigurasi optimum khusus untuk material *Polypropylene (PP)*, yaitu pada kombinasi suhu *nozzle* 250°C dan *layer height* 0,3 mm. Kombinasi tersebut terbukti memberikan kondisi termal paling ideal untuk mencapai ikatan antar-lapisan yang kuat serta struktur material yang stabil.

PENUTUP

Simpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa parameter suhu *nozzle* dan ketebalan lapisan (*layer height*) memberikan pengaruh signifikan terhadap kekuatan tarik material *Polypropylene (PP)* hasil proses *Fused Deposition Modeling (FDM)*. Peningkatan suhu *nozzle* menghasilkan ikatan antarlapisan yang lebih kuat karena meningkatnya difusi termal antar-molekul polimer, sedangkan peningkatan ketebalan lapisan menyebabkan penurunan kekuatan tarik akibat melemahnya adhesi antar-layer. Kombinasi parameter optimum diperoleh pada suhu *nozzle* 250°C dan ketebalan lapisan 0,1 mm, dengan nilai kuat tarik rata-rata sebesar 55,7 MPa. Hasil ini menegaskan bahwa suhu *nozzle*

merupakan faktor paling dominan dalam menentukan stabilitas termal dan kualitas fusi material selama proses pencetakan. Selain itu, penerapan metode *Taguchi L9 Orthogonal Array* terbukti efektif untuk mengidentifikasi parameter optimum dengan jumlah eksperimen minimal, sehingga efisien dari segi waktu dan sumber daya penelitian.

Saran

Untuk penelitian selanjutnya, disarankan agar dilakukan pengujian dengan menambahkan parameter proses lain, seperti kecepatan pencetakan, orientasi cetak, kepadatan *infill*, dan temperatur *bed*, untuk memperluas pemahaman mengenai pengaruh multivariat terhadap performa mekanik material PP. Selain itu, perlu dilakukan analisis mikrostruktur dan sifat termal (melalui uji DSC atau TGA) untuk mengamati hubungan antara kondisi pencetakan dengan evolusi kristalinitas material. Penerapan optimasi multi-respons menggunakan metode komputasional seperti *Artificial Neural Network* (ANN), *Response Surface Methodology* (RSM), atau *Genetic Algorithm* (GA) juga direkomendasikan untuk meningkatkan akurasi prediksi dan efisiensi proses. Pada tingkat industri, penelitian lanjutan perlu mempertimbangkan aspek konsistensi dimensi, produktivitas, serta biaya produksi, sehingga hasil optimasi dapat diimplementasikan secara nyata pada aplikasi otomotif, peralatan medis, dan produk kemasan berbasis *Polypropylene* (PP).

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Camposeco-Negrete, "Optimization of printing parameters in fused deposition modeling for improving part quality and process sustainability," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 108, no. 7–8, pp. 2131–2147, 2020.
- [2] V. Cojocaru, D. Frunzaverde, C. O. Miclosina, and G. Marginean, "The influence of the process parameters on the mechanical properties of PLA specimens produced by fused filament fabrication - A review," *Polymers*, vol. 12, no. 4, p. 886, 2020.
- [3] H. K. Dave, N. H. Patadiya, A. R. Prajapati, and S. R. Rajpurohit, "Effect of infill pattern and infill density at varying part orientation on tensile properties of fused deposition modeling-printed poly-lactic acid part," *Proc. Inst. Mech. Eng., Part C: J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 235, no. 10, pp. 1811–1827, 2019.
- [4] A. Díaz, J. Casas, L. Puigjaner, and A. Espuña, "Reducing diabetes work through 3D printing personalization," *Comput. Chem. Eng.*, vol. 155, p. 107513, 2021.
- [5] N. A. Fountas, P. Kostazos, L. Pavlidis, V. Antoniou, D. Manolakos, and N. M. Vaxevanidis, "Experimental investigation and statistical modelling for assessing the tensile properties of FDM fabricated parts," *Procedia Structural Integrity*, vol. 26, pp. 139–146, 2021.
- [6] M. M. Hanon, R. Marczis, and L. Zsidai, "Influence of the 3D printing process settings effect on tensile strength of PLA and HT-PLA," *Period. Polytech. Mech. Eng.*, vol. 65, no. 1, pp. 38–46, 2021.
- [7] F. Knoop, V. Schoeppner, and A. Schutte, "Influence of annealing on the mechanical properties of polypropylene components manufactured by fused filament fabrication," *Polymer Testing*, vol. 108, p. 107519, 2022.
- [8] M. A. Kumar, M. S. Khan, and S. B. Mishra, "Effect of machine parameters on strength and hardness of FDM printed carbon fiber reinforced PETG thermoplastics," *Mater. Today: Proc.*, vol. 27, pp. 975–983, 2021.
- [9] S. Kumar and R. Singh, "Fabrication of biocompatible polypropylene/bio-glass scaffolds for bone tissue engineering applications using 3D printing technology," *Biocybern. Biomed. Eng.*, vol. 40, no. 4, pp. 1540–1555, 2020.
- [10] J. Liao, N. Brosse, A. Pizzi, S. Hoppe, X. Xi, and X. Zhou, "Characterization and 3D printability of poly(lactic acid)/acetylated tannin composites," *Ind. Crops Prod.*, vol. 149, p. 112320, 2019.
- [11] P. K. Mishra, S. Ponnusamy, and M. S. R. Nallamilli, "The influence of process parameters on the impact resistance of 3D printed PLA specimens under water-absorption and heat-treated conditions," *Rapid Prototyp. J.*, vol. 27, no. 2, pp. 283–294, 2021.
- [12] M. A. Morales, A. Maranon, C. Hernandez, A. Porras, and J. A. Baena, "Development and characterization of a 3D printed cocoa bean shell filled recycled polypropylene for sustainable composites," *Polymers*, vol. 13, no. 20, p. 3467, 2021.
- [13] S. D. Nath, S. Nilufar, and S. V. Atre, "Effect of infill pattern and density on mechanical properties of 3D printed ULTEM 1010," *Procedia Manuf.*, vol. 53, pp. 718–728, 2021.
- [14] T. D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K. T. Nguyen, and D. Hui, "Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges," *Compos. Part B: Eng.*, vol. 143, pp. 172–196, 2018.
- [15] D. Popescu, A. Zapciu, C. Amza, F. Baci, and R. Marinescu, "FDM process parameters influence over the mechanical properties of polymer specimens: A review," *Polymer Testing*, vol. 69, pp. 157–166, 2018.

- [16] S. R. Rajpurohit and H. K. Dave, "Impact strength of 3D printed PLA using open source FFF-based 3D printer," *Prog. Addit. Manuf.*, vol. 4, no. 4, pp. 517–529, 2021.
- [17] A. Rinanto, A. Nugroho, Y. Prasetya, and E. Pujiyanto, "Simultaneous optimization of tensile strength, energy consumption and processing time on FDM process using *Taguchi* and PCR-TOPSIS," *J. Tek. Ind.*, vol. 23, no. 1, pp. 1–12, 2021.
- [18] Muhammad, A. R., et al. 2023. "Layer Height, Temperature Nozzle, Infill Geometry and Printing Speed Effect on Accuracy 3D Printing PETG," *R.E.M.(Rekayasa Energi Manufaktur)*, vol. 7, no. 2, 2023. DOI: <https://doi.org/10.21070/r.e.m.v7i2.1649>
- [19] A. J. Sheoran and H. Kumar, "Fused deposition modeling process parameters optimization and effect on mechanical properties and part quality: Review and reflection on present research," *Mater. Today: Proc.*, vol. 21, pp. 1659–1672, 2020.
- [20] Pristiansyah, P., et al. 2021 "Optimasi Parameter Proses Pencetakan 3D Printing terhadap Kebulatan Produk," *J-Proteksion: Jurnal Kajian Ilmiah dan Teknologi Teknik Mesin*, vol. 10, no. 1.
- [21] Rakhmatov, V. B. B., Abdurashidkhon, A. A., and Azizbek, R. A. 2025. , "Fused Deposition Modeling (FDM) in Industrial Manufacturing: Challenges, Economic Aspects, and Prospects," *Texas Journal of Engineering and Technology*, vol. Vol. 42, pp. 20-23. DOI: <https://doi.org/10.62480/tjet.2025.vol42.pp20-23>
- [22] R. Srinivasan, P. Prathap, A. Raj, S. A. Kannan, and V. Deepak, "Influence of fused deposition modeling process parameters on the mechanical properties of PETG parts," *Mater. Today: Proc.*, vol. 27, pp. 1877–1883, 2020.
- [23] Abas, M., et al. 2022. "Parametric Investigation and Optimization to Study the Effect of Process Parameters on the Dimensional Deviation of Fused Deposition Modeling of 3D Printed Parts," *Polymers*, vol. 14, no. 17, p. 3667, DOI:<https://doi.org/10.3390/polym14173667>
- [24] D. Yadav, D. Chhabra, R. K. Garg, A. Ahlawat, and A. Phogat, "Optimization of FDM 3D printing process parameters for multi-material using artificial neural network," *Mater. Today: Proc.*, vol. 21, pp. 1583–1591, 2020.
- [25] Stojković, J. R., et al. 2023. "An Experimental Study on the Impact of Layer Height and Annealing Parameters on the Tensile Strength and Dimensional Accuracy of FDM 3D Printed Parts," *Materials*, vol. 16, no. 13, p. 4574, 2023. DOI: [10.3390/ma16134574](https://doi.org/10.3390/ma16134574)
- [26] Saputra, W. R., Suzen, Z. S., and Pristiansyah, P. 2023. "Pengaruh Parameter Proses terhadap Kuat Tarik Produk Hasil 3D Printing Menggunakan Filamen ASA (Acrylonitrile Styrene Acrylate)," *J-Proteksion: Jurnal Kajian Ilmiah dan Teknologi Teknik Mesin*, vol. 7, no. 2, pp. 73–78, DOI: <https://doi.org/10.32528/jp.v7i2.9285>
- [27] O, Tunçel. Optimization of Charpy Impact Strength of Tough PLA Samples Produced by 3D Printing Using the *Taguchi* Method. *Polymers*, 16(4), 459 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/polym16040459>.
- [28] P. Pristiansyah, Ilham Ary Wahyudie, and R. Rosa, "Pengaruh Parameter Proses pada Pencetakan 3d Printing terhadap Transparansi Filamen Petg Menggunakan Metode *Taguchi*", *j-proteksion. j. kaji. ilm. dan. teknologi. teknik. mesin.*, vol. 9, no. 1, pp. 13–18, Aug. 2024, doi: <https://doi.org/10.32528/jp.v9i1.1695>.