

IMPLEMENTASI VALUE ENGINEERING DAN FUZZY-BASED TAGUCHI UNTUK MENGOPTIMALKAN PARAMETER FABRIKASI FILAMEN 3D PRINTING RPET

M. Isa Daud¹, Radita Dwi Putera², Reza Azizul Nasa Al Hakim^{*3}

^{1,2,3}Departemen Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Jenderal Soedirman

Email: ¹m.daud@mhs.unsoed.ac.id, ²isadaud123@gmail.com, ³raditadwip@gmail.com

Abstrak

Limbah botol plastik polyethylene terephthalate (PET) merupakan permasalahan lingkungan yang signifikan, termasuk di Indonesia, karena sebagian besar belum terkelola secara optimal. Salah satu pendekatan yang menjanjikan untuk meningkatkan nilai tambah limbah PET adalah pemanfaatannya sebagai filamen 3D printing recycled PET (rPET) melalui proses additive manufacturing. Namun, proses fabrikasi filamen rPET masih menghadapi berbagai tantangan, seperti ketidakstabilan diameter, densitas yang tidak seragam, serta efisiensi waktu pultrusi akibat degradasi material selama proses daur ulang. Oleh karena itu, diperlukan metode optimisasi proses yang mampu menangani karakteristik multirespon dan ketidakpastian data secara sistematis. Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimasi parameter proses fabrikasi filamen rPET melalui integrasi framework Value Engineering (VE) dan metode Design of Experiment (DOE) berbasis FuzzyTaguchi. Parameter proses yang dianalisis meliputi suhu, kecepatan pultrusi, dan lebar strip, sedangkan respon yang dievaluasi adalah waktu pultrusi, diameter, dan densitas filamen. Metode Taguchi digunakan untuk merancang eksperimen secara efisien, sementara logika fuzzy diterapkan untuk menggabungkan beberapa respon kualitas ke dalam satu nilai fuzzy score performa fabrikasi. Analisis statistik lanjutan dilakukan menggunakan Analysis of Variance (ANOVA). Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi parameter optimal diperoleh pada suhu 210 °C, kecepatan pultrusi 9, dan lebar strip 0.8 dengan nilai fuzzy score tertinggi sebesar 0.87139. Hasil ANOVA menunjukkan bahwa faktor suhu memberikan kontribusi terbesar terhadap performa fabrikasi sebesar 55.27%. Integrasi VE dan FuzzyBased Taguchi terbukti mampu memberikan pendekatan optimasi yang terarah, efisien, dan aplikatif dalam meningkatkan konsistensi serta nilai tambah filamen rPET

Kata kunci: additive manufacturing, filamen rPET, fuzzy-based Taguchi, value engineering

IMPLEMENTATION OF VALUE ENGINEERING AND FUZZY-BASED TAGUCHI APPROACH TO OPTIMIZE PROCESS PARAMETERS IN THE FABRICATION OF 3D PRINTING FILAMENTS FROM RECYCLED PET BOTTLES

Abstract

Plastic waste from polyethylene terephthalate (PET) bottles remains a significant environmental issue, particularly in Indonesia, where most PET waste is not properly managed. One promising approach to increasing the value of PET waste is its utilization as recycled PET (rPET) filament for additive manufacturing applications. However, the fabrication process of rPET filament still faces several challenges, including dimensional instability, non-uniform density, and inefficiency in pultrusion time due to material degradation during recycling. Therefore, an optimization approach capable of handling multi-response characteristics and data uncertainty is required. This study aims to optimize the rPET filament fabrication process by integrating the Value Engineering (VE) framework with a Fuzzy-Based Taguchi Design of Experiment (DOE) method. The process parameters investigated include temperature, pultrusion speed, and strip width, while the evaluated responses consist of pultrusion time, filament diameter, and density. The Taguchi method was employed to design experiments efficiently, whereas fuzzy logic was applied to transform multiple quality responses into a single fabrication performance fuzzy score. Further statistical evaluation was conducted using Analysis of Variance (ANOVA). The results indicate that the optimal parameter combination was achieved at a temperature of 210 °C, a pultrusion speed of 9, and a strip width of 0.8, yielding the highest fuzzy score of 0.87139. ANOVA results reveal that temperature is the most influential factor, contributing 55.27% to the variation in fabrication performance. The integration of Value Engineering and Fuzzy-Based Taguchi provides a structured, efficient, and robust optimization framework for improving the consistency and value-added performance of rPET filament fabrication

Keywords: additive manufacturing, fuzzy-based Taguchi, rPET filament, value engineering

1. PENDAHULUAN

Additive manufacturing (AM), atau yang dikenal dengan teknologi 3D *printing*, adalah proses produksi objek tiga dimensi secara bertahap dengan menambahkan material lapis demi lapis berdasarkan model digital. Penggunaan *additive manufacturing* dalam industri terus berkembang pesat, ditunjukkan oleh peningkatan nilai pasar sebesar 17% pada tahun 2016 yang nilainya sebanding dengan tingkat pertumbuhan tahunan majemuk (CAGR) selama 28 tahun terakhir[1]. Dengan naiknya tren dan pertumbuhan pasar *additive manufacturing* yang solid, sangat banyak peluang manufaktur baru terbuka yang sebelumnya tidak mungkin dicapai lewat *reductive manufacture*[2]. *Additive manufacturing* memungkinkan proses produksi yang lebih fleksibel, efisien, dan dapat dikustomisasi, hal ini mendorong inovasi produk dan desain yang lebih kompleks serta pengurangan limbah bahan baku [3]. Salah satu peluang penting yang kini berkembang pesat adalah pemanfaatan *additive manufacturing* sebagai media daur ulang, khususnya untuk polimer PET (*polyethylene terephthalate*).

Salah satu bentuk pemanfaatan *additive manufacturing* untuk mengurangi limbah botol plastic PET adalah dengan mengolahnya menjadi filamen 3D *printing recycled PET* (rPET) [4]. Filamen 3D *printing* rPET yang dihasilkan melalui proses ini juga terbukti memiliki kualitas mekanik yang menjanjikan, dengan nilai kekuatan tarik dan modulus elastisitas yang kompetitif sehingga mampu bersaing dengan filamen komersial berbahan PET *virgin*, bahkan pada beberapa studi menunjukkan performa yang setara maupun lebih baik setelah proses daur ulang yang tepat [5]. Hal ini menunjukkan bahwa filamen rPET tidak hanya menjadi alternatif penanganan limbah plastik yang *viabile* tetapi juga membuka peluang untuk menghasilkan produk bernilai tambah dari limbah yang sebelumnya tidak termanfaatkan.

Namun beberapa studi menunjukkan bahwa rPET (*recycled polyethylene terephthalate*) cenderung mengalami penurunan viskositas, kekuatan leleh, dan ketahanan terhadap retak akibat degradasi termal selama proses daur ulang, sehingga masih sering terjadi kegagalan dalam proses printing [6]. Beberapa studi terdahulu menunjukkan bahwa meskipun *framework value engineering* secara utuh belum banyak diterapkan dalam penelitian di bidang ini, prinsip-prinsip dasarnya mulai diusulkan, seperti dalam penelitian Toghan (2024) sebagai pendekatan untuk meningkatkan efisiensi biaya, keberlanjutan, serta nilai tambah pada produk filamen daur ulang PET. Sementara itu Ulkir (2025) membuktikan bahwa penggunaan *fuzzy logic* mampu memetakan hubungan antara parameter proses (seperti suhu *nozzle*, kecepatan cetak, *infill*, dan orientasi) dengan kualitas hasil *printing*, sehingga proses optimasi bisa dilakukan tanpa banyak uji coba fisik dan mengurangi bias dalam data.

Meskipun belum banyak studi yang secara eksplisit mengintegrasikan *framework value engineering* dan DOE, beberapa pendekatan baru seperti *flexible scientific value formulation* dan *multi-criteria decision analysis* mulai diterapkan untuk mengukur dan mengoptimalkan nilai dari data eksperimen secara sistematis. Integrasi antara *framework value engineering* dan *fuzzy-based Taguchi* pada penelitian ini diharapkan dapat memberikan pendekatan yang komprehensif dalam meningkatkan nilai tambah, meminimalkan variabilitas proses, serta menghasilkan filamen rPET dengan kualitas yang lebih optimal serta konsisten. Oleh karena itu, penelitian ini berfokus pada pengembangan metode optimasi proses fabrikasi filamen rPET melalui integrasi *value engineering* dan model *fuzzy-based Taguchi* untuk menghasilkan filamen yang berkualitas dan memiliki performa yang konsisten.

Meskipun berbagai penelitian telah membahas optimasi parameter proses maupun peningkatan kualitas filamen rPET, sebagian besar studi masih memandang aspek teknis dan aspek nilai proses secara terpisah. Pendekatan optimasi umumnya difokuskan pada pencapaian karakteristik fisik atau mekanik tertentu, sementara evaluasi nilai (*value*) yang mempertimbangkan hubungan antara fungsi, kinerja, dan efisiensi proses belum banyak diintegrasikan secara sistematis. Di sisi lain, penerapan *fuzzy logic* dalam penelitian terdahulu lebih sering digunakan untuk memodelkan kualitas hasil pencetakan (*printing outcome*), bukan pada tahap hulu fabrikasi filamen. Berangkat dari celah tersebut, penelitian ini menawarkan pendekatan baru melalui integrasi *Value Engineering* dan metode *Fuzzy-Based Taguchi* dalam satu kerangka optimasi multirespon. Kombinasi ini memungkinkan identifikasi parameter proses optimal sekaligus mengevaluasi peningkatan fungsi dan rasio nilai proses secara menyeluruh. Dengan demikian, kontribusi ilmiah penelitian ini tidak hanya terletak pada optimasi parameter teknis, tetapi juga pada pengembangan model pengambilan keputusan berbasis nilai untuk proses fabrikasi filamen rPET, yang masih jarang dilaporkan dalam literatur.

2. METODE PENELITIAN

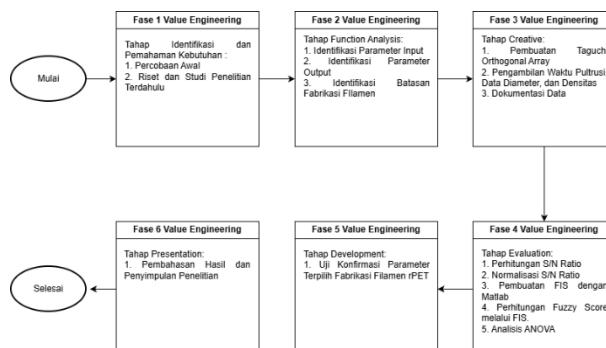
Jenis Data yang digunakan dalam penelitian ini diantaranya adalah data primer dan data sekunder dibawah ini.

1. Data Primer

Data primer yang dikumpulkan sebagai dasar penelitian ini adalah data hasil observasi langsung terhadap faktor respons dari eksperimen fabrikasi filamen rPET yang dilakukan berdasarkan kombinasi parameter proses yang telah disusun menggunakan Taguchi *orthogonal array*.

2. Data Sekunder

Data sekunder yang digunakan dalam penelitian ini adalah data yang diperoleh dari penelitian terdahulu sebagai acuan dalam proses eksperiment.



Adapun tahapan penelitian ini sesuai yang ditunjukkan pada flowchart gambar 1 adalah sebagai berikut :

1) Tahap Identifikasi Masalah

Tahap pertama adalah Identifikasi Masalah, yang diawali dengan kegiatan studi literatur untuk memahami konsep dasar fabrikasi filamen rPET, teknologi 3D printing, serta metode Taguchi dan Fuzzy Logic. Pada tahap ini dilakukan pula analisis kebutuhan penelitian dan identifikasi permasalahan utama melalui studi awal dan perbandingan dengan penelitian terdahulu.

2) Tahap Pengumpulan dan Pengolahan Data

Tahap kedua adalah Pengumpulan dan Pengolahan Data, yang dilakukan dengan mengacu pada kerangka *Value Engineering* fase 1 hingga fase 4. Pada fase ini dilakukan identifikasi parameter input dan output proses fabrikasi filamen rPET, penentuan batasan penelitian, serta penyusunan alternatif solusi melalui tahap kreatif. Pada tahap ini faktor serta level input yang akan digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada tabel 1 berikut.

Tabel 1. Faktor dan Level Eksperimen

Faktor	Level 1	Level 2	Level 3
Tebal Potongan (cm)	0,8	0,9	1,0
Kecepatan Pultrusi	5	8	9
Suhu Pultrusi (°C)	200	210	220

Faktor dan level percobaan kemudian disusun ke dalam *orthogonal array* menggunakan metode Taguchi menggunakan software minitab. Dimana dari proses tersebut didapatkan kombinasi terpilih dari pertimbangan perhitungan *degree of freedom* dan bahwa digunakan model orthogonal array L9 yang ditunjukkan pada tabel 2 berikut.

Tabel 2. Kombinasi Level dan Faktor Taguchi OA L9

	Suhu	Kecepatan Pultrusi	Lebar Strip
Kombinasi 1	200	5	0.8
Kombinasi 2	200	8	0.9
Kombinasi 3	200	9	1
Kombinasi 4	210	5	0.9
Kombinasi 5	210	8	1
Kombinasi 6	210	9	0.8
Kombinasi 7	220	5	1
Kombinasi 8	220	8	0.8
Kombinasi 9	220	9	0.9

Selanjutnya dilakukan proses pembuatan filamen berdasarkan kombinasi parameter yang telah ditentukan dan pengambilan data respon waktu pultrusi, densitas dan juga diameter. Hasil percobaan digunakan untuk perhitungan nilai *Signal-to-Noise Ratio* dan normalisasi nilai S/N. Nilai yang diperoleh selanjutnya diproses menggunakan *Fuzzy Inference System* berbasis MATLAB untuk menghasilkan *fuzzy score* sebagai indikator

performa keseluruhan. Analisis *Analysis of Variance* (ANOVA) dilakukan untuk menentukan parameter yang paling berpengaruh secara signifikan. Kemudian akan dilakukan percobaan konfirmasi hasil parameter terpilih pada fase 5 dan pembahasan hasil serta penyimpulan di fase 6.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Hasil Pengumpulan Data

Pengambilan data waktu proses dilakukan untuk mengetahui durasi yang dibutuhkan mesin Filamini untuk melakukan proses pultrusi pada strip rPET yang sudah ditandai tiap 10 cm dengan bantuan *stopwatch* dan tiap kombinasi yang direplikasi sebanyak 3 kali. Pengambilan data densitas filamen r-PET dilakukan untuk mengetahui tingkat kerapatan material hasil proses fabrikasi. Pengujian densitas dilakukan menggunakan metode Archimedes, dengan cara menimbang massa filamen di udara seperti, massa air dan beker tanpa filamen pada, serta massa ketika filamen terendam seperti yang ditunjukkan pada gambar 1. Setelah itu densitas dapat dihitung dengan persamaan (1).

$$\text{Densitas} = \frac{\text{Massa Kering}}{\text{Massa Kering} - \text{Massa Terendam}} \times \text{massa jenis air} \quad (1)$$



Gambar 1. Proses Pengukuran Densitas Filamen

Pengambilan data diameter filamen dilakukan untuk mengevaluasi kestabilan ukuran filamen yang dihasilkan selama proses fabrikasi. Diameter filamen diukur menggunakan alat ukur presisi pada beberapa titik pada tiap 10 cm sepanjang filamen untuk memperoleh nilai rata-rata diameter. Hasil rekap data yang didapatkan ditunjukkan pada tabel 3

Tabel 3. Rekapitulasi Pengambilan Data

	Replikasi	Rata Rata Waktu Pultrusi Per Meter	Rata Rata Diameter	Densitas Filamen
Kombinasi 1	1	331.68	1.738538613	1.305594406
	2	341.73	1.7396	1.324285714
	3	326.8	1.737366702	1.339105339
Kombinasi 2	1	220.27	1.746593995	1.345263158
	2	213.7	1.7455	1.347054649
	3	215.05	1.747	1.336370007
Kombinasi 3	1	186.43	1.7416	1.346909091
	2	189.94	1.743	1.354532164
	3	182.48	1.745	1.337184116
Kombinasi 4	1	306.48	1.7466	1.399694889
	2	313.52	1.747	1.403018868

	Replikasi	Rata Rata Waktu Pultrusi Per Meter	Rata Rata Diameter	Densitas Filamen
Kombinasi 5	3	315.37	1.7462	1.393207547
	1	220.25	1.7452	1.384615385
	2	222.63	1.7456	1.372213967
Kombinasi 6	3	222.62	1.745	1.389266818
	1	202.98	1.7362	1.311557789
	2	196.8	1.736	1.319211103
Kombinasi 7	3	211.78	1.7356	1.315484805
	1	352.88	1.743	1.372363636
	2	346.16	1.7424	1.42007722
Kombinasi 8	3	342.6	1.7428	1.432474629
	1	239.16	1.735	1.339985218
	2	249.54	1.7346	1.325818182
Kombinasi 9	3	228.68	1.7358	1.33259587
	1	187.75	1.7438	1.338450292
	2	186.45	1.7454	1.35640648
	3	189.44	1.745	1.321912919

3.2. Hasil dan Pembahasan

Tabel 4 Rekapitulasi Perhitungan S/N menyajikan nilai *Signal-to-Noise Ratio* (S/N) untuk setiap kombinasi percobaan berdasarkan tiga respon utama, yaitu waktu proses, densitas filamen, dan diameter filamen. Nilai S/N digunakan untuk merepresentasikan kualitas kinerja setiap respon dengan mempertimbangkan stabilitas terhadap variasi. Respon waktu menggunakan karakteristik *smaller-the-better*, sehingga nilai S/N cenderung bernilai negatif, sedangkan densitas dan diameter merepresentasikan karakteristik kualitas yang diharapkan mendekati kondisi optimal. Variasi nilai S/N pada masing-masing kombinasi menunjukkan adanya pengaruh perubahan parameter proses terhadap kestabilan performa fabrikasi filamen rPET. Namun demikian, karena skala dan arah preferensi tiap respon berbeda, nilai S/N tersebut belum dapat langsung digabungkan dalam analisis multirespon

Tabel 4. Rekapitulasi Perhitungan S/N

Kombinasi	Data	S/N
1	Waktu	-50.46092528
	Densitas	36.72621952
	Diameter	61.43987171
2	Waktu	-46.70342801
	Densitas	46.14226214
	Diameter	64.62578729
3	Waktu	-45.40464202
	Densitas	42.51855952
	Diameter	57.75964366
4	Waktu	-49.87782441
	Densitas	47.50821872
	Diameter	70.38073473
5	Waktu	-46.9206994
	Densitas	42.51373348
	Diameter	72.71825017
6	Waktu	-46.19035989
	Densitas	49.54629951
	Diameter	72.69496266

Kombinasi	Data	S/N
7	Waktu	-50.81251517
	Densitas	31.46856196
	Diameter	72.71194161
8	Waktu	-47.57806701
	Densitas	44.25301962
	Diameter	66.67236085
9	Waktu	-45.47764155
	Densitas	36.54399593
	Diameter	64.00786978

Oleh karena itu dilakukan proses normalisasi sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 5 Rekapitulasi Perhitungan Normalisasi S/N. Normalisasi mengubah seluruh nilai S/N ke dalam rentang 0–1, sehingga setiap respon memiliki skala evaluasi yang setara dan dapat dibandingkan secara langsung. Nilai mendekati 1 menunjukkan performa relatif lebih baik pada respon terkait, sedangkan nilai mendekati 0 menunjukkan performa yang kurang baik. Hasil normalisasi ini menjadi dasar dalam proses pemodelan fuzzy, karena memungkinkan seluruh variabel respon diintegrasikan ke dalam sistem inferensi fuzzy tanpa bias skala.

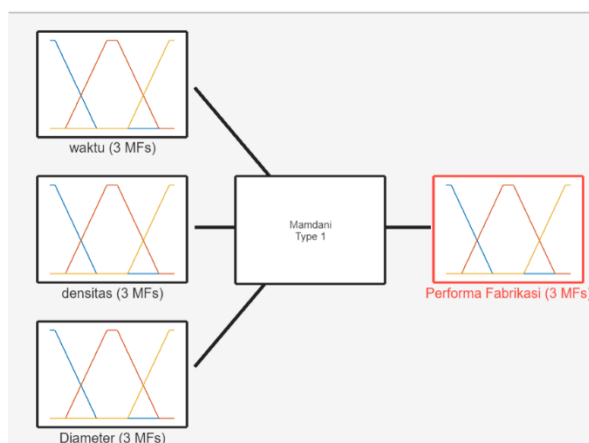
Tabel 5. Rekapitulasi Perhitungan Normalisasi S/N

Kombinasi	Data	Normalized S/N
1	Waktu	0.065014448
	Densitas	0.290836038
	Diameter	0.246027466
2	Waktu	0.759834235
	Densitas	0.811700034
	Diameter	0.459009576
3	Waktu	1
	Densitas	0.61124892
	Diameter	0
4	Waktu	0.172838884
	Densitas	0.887260185
	Diameter	0.843734412
5	Waktu	0.71965737
	Densitas	0.61098196
	Diameter	1
6	Waktu	0.854708524
	Densitas	1
	Diameter	0.998443203
7	Waktu	0
	Densitas	0
	Diameter	0.999578266
8	Waktu	0.598099857
	Densitas	0.707193454
	Diameter	0.595825365
9	Waktu	0.98650125
	Densitas	0.280756038
	Diameter	0.417701082

Membership function pada sistem fuzzy disusun berdasarkan nilai normalisasi Signal-to-Noise Ratio (SNR) yang telah diperoleh sebelumnya. Proses ini diawali dengan penentuan klasifikasi linguistik untuk setiap variabel input, yaitu waktu proses (Cepat, Sedang, Lambat), densitas filamen (Low, Normal, High), dan diameter filamen (Low, Medium, High), yang masing-masing merepresentasikan kondisi relatif terhadap rentang data pengamatan. Klasifikasi ini berfungsi untuk mengonversi data numerik menjadi variabel linguistik sehingga dapat diproses dalam Fuzzy Inference System. Pembentukan membership function untuk setiap variabel input maupun output sistem fuzzy ditunjukkan pada Gambar 2.

Strategi pembentukan membership function ditentukan melalui kajian literatur dengan mempertimbangkan karakteristik data dan tujuan optimasi. Dari beberapa pendekatan yang tersedia, yaitu *grid partitioning*, *clustering*, dan *optimization of membership function*, penelitian ini menggunakan strategi *grid partitioning* karena sesuai untuk kasus DOE dengan jumlah data terbatas dan struktur eksperimen yang terkontrol. Bentuk fungsi keanggotaan yang dipilih adalah trapesium (*trapezoidal membership function*), yang mampu merepresentasikan

batas toleransi suatu kategori linguistik melalui daerah *plateau* ($\mu = 1$), sehingga variasi kecil pada data tidak langsung mengubah klasifikasi. Rentang membership function ditetapkan pada skala 0–1 sesuai hasil normalisasi SNR, sehingga setiap variabel input (waktu, densitas, diameter) serta variabel output berupa penilaian performa fabrikasi dapat dimodelkan secara konsisten dalam kerangka fuzzy. Pendekatan ini memungkinkan pemodelan hubungan nonlinier antar respon serta integrasi multirespon ke dalam satu indikator kinerja fuzzy yang komprehensif.



Gambar 2. Membership Function FIS

Tabel 6 menyajikan *fuzzy rules* yang dibangun berdasarkan kombinasi kondisi input pada masing-masing membership function. Aturan fuzzy ini dirumuskan untuk merepresentasikan hubungan antara variabel input (respon penelitian) dengan variabel output berupa tingkat performa proses. Setiap rule disusun secara logis dengan pendekatan IF–THEN pada semua skenario input masing-masing faktor dan pengaruhnya terhadap output, sehingga mampu menggambarkan pengaruh simultan beberapa respon terhadap penilaian kinerja keseluruhan. *Fuzzy rules* ini menjadi inti dari proses inferensi fuzzy

Tabel 6. Fuzzy Rule Set

No	Rule
1	If waktu is Lambat and densitas is Low and Diameter is Low then Performa Fabrikasi is Buruk
2	If waktu is Medium and densitas is Low and Diameter is Low then Performa Fabrikasi is Buruk
3	If waktu is Cepat and densitas is Low and Diameter is Low then Performa Fabrikasi is Buruk
4	If waktu is Lambat and densitas is Normal and Diameter is Low then Performa Fabrikasi is Buruk
5	If waktu is Medium and densitas is Normal and Diameter is Low then Performa Fabrikasi is Buruk
6	If waktu is Cepat and densitas is Normal and Diameter is Low then Performa Fabrikasi is Buruk
7	If waktu is Lambat and densitas is High and Diameter is Low then Performa Fabrikasi is Buruk
8	If waktu is Medium and densitas is High and Diameter is Low then Performa Fabrikasi is Cukup
9	If waktu is Cepat and densitas is High and Diameter is Low then Performa Fabrikasi is Cukup
10	If waktu is Lambat and densitas is Low and Diameter is Medium then Performa Fabrikasi is Buruk
11	If waktu is Medium and densitas is Low and Diameter is Medium then Performa Fabrikasi is Cukup
12	If waktu is Cepat and densitas is Low and Diameter is Medium then Performa Fabrikasi is Cukup
13	If waktu is Lambat and densitas is Normal and Diameter is Medium then Performa Fabrikasi is Cukup

No	Rule
14	If waktu is Medium and densitas is Normal and Diameter is Medium then Performa Fabrikasi is Cukup
15	If waktu is Cepat and densitas is Normal and Diameter is Medium then Performa Fabrikasi is Baik
16	If waktu is Lambat and densitas is High and Diameter is Medium then Performa Fabrikasi is Cukup
17	If waktu is Medium and densitas is High and Diameter is Medium then Performa Fabrikasi is Baik
18	If waktu is Cepat and densitas is High and Diameter is Medium then Performa Fabrikasi is Baik
19	If waktu is Lambat and densitas is Low and Diameter is High then Performa Fabrikasi is Buruk
20	If waktu is Medium and densitas is Low and Diameter is High then Performa Fabrikasi is Cukup
21	If waktu is Cepat and densitas is Low and Diameter is High then Performa Fabrikasi is Baik
22	If waktu is Lambat and densitas is Normal and Diameter is High then Performa Fabrikasi is Cukup
23	If waktu is Medium and densitas is Normal and Diameter is High then Performa Fabrikasi is Baik
24	If waktu is Cepat and densitas is Normal and Diameter is High then Performa Fabrikasi is Baik
25	If waktu is Lambat and densitas is High and Diameter is High then Performa Fabrikasi is Baik
26	If waktu is Medium and densitas is High and Diameter is High then Performa Fabrikasi is Baik
27	If waktu is Cepat and densitas is High and Diameter is High then Performa Fabrikasi is Baik

Dengan memasukkan nilai Normalisasi SNR ke fuzzy rule inference pada MATLAB maka didapatkan fuzzy score dari hasil response yang mana Tabel 5 dibawah memuat hasil perhitungan Fuzzy Score yang diperoleh dari proses simulasi menggunakan MATLAB. Nilai-nilai dalam tabel menggambarkan kombinasi antara parameter suhu, kecepatan, dan lebar, yang kemudian diolah melalui sistem logika fuzzy untuk menghasilkan nilai skor (*Fuzzy Score*) sebagai representasi tingkat kinerja atau kualitas dari masing-masing kombinasi parameter.

Tabel 7. Rekapitulasi Fuzzy Score Tiap Kombinasi

Kombinasi	Suhu	Kecepatan	Lebar	Fuzzy Score
1	200	5	0.8	0.39245
2	200	8	0.9	0.66614
3	200	9	1	0.12327
4	210	5	0.9	0.76657
5	210	8	1	0.85755
6	210	9	0.8	0.87139
7	220	5	1	0.11514
8	220	8	0.8	0.5574
9	220	9	0.9	0.6448

Berdasarkan Tabel 7, terlihat bahwa variasi parameter suhu, kecepatan pultrusi, dan lebar strip memberikan pengaruh yang nyata terhadap nilai *Fuzzy Score*. Perubahan kombinasi parameter menghasilkan variasi skor yang cukup besar, menunjukkan sensitivitas performa proses terhadap kondisi operasi. Kombinasi parameter pada suhu 210 °C, kecepatan 9, dan lebar 0,8 menghasilkan *Fuzzy Score* tertinggi sebesar 0,87139, yang mengindikasikan kondisi proses paling optimal dalam konteks evaluasi multirespon. Kondisi ini mencerminkan keseimbangan terbaik antara waktu pultrusi, densitas, dan kestabilan diameter filamen. Sebaliknya, kombinasi pada suhu 220 °C dan kecepatan 5 dengan lebar 1 menghasilkan *Fuzzy Score* terendah sebesar 0,11514, menunjukkan performa

proses yang kurang baik berdasarkan kriteria fuzzy yang digunakan. Nilai skor yang rendah pada kombinasi suhu tinggi dan kecepatan rendah ini mengindikasikan bahwa kondisi tersebut kurang mampu menjaga konsistensi karakteristik filamen. Temuan ini menegaskan bahwa optimasi parameter proses menjadi faktor krusial dalam meningkatkan kualitas fabrikasi filamen rPET.

Tabel 8 Perhitungan ANOVA menyajikan hasil analisis *Analysis of Variance* (ANOVA) untuk mengevaluasi pengaruh masing-masing faktor proses terhadap nilai *Fuzzy Score* pada fabrikasi filamen berbahan *recycled PET* (rPET). Analisis dilakukan terhadap tiga faktor utama, yaitu suhu proses, kecepatan pultrusi, dan lebar strip, yang masing-masing diuji pada tiga level percobaan.

Berdasarkan nilai *mean level*, terlihat bahwa suhu 210 °C menghasilkan rata-rata *Fuzzy Score* tertinggi (0,8318), diikuti oleh lebar strip 9 mm (0,6925) dan kecepatan pultrusi 48 rpm (0,6937). Hal ini menunjukkan bahwa level-level tersebut berkontribusi pada performa proses yang lebih baik dibandingkan level lainnya. Sementara itu, suhu 200 °C dan 220 °C menunjukkan nilai rata-rata yang lebih rendah, yang menandakan bahwa kondisi suhu menengah memberikan kestabilan kualitas filamen yang lebih optimal. Hasil perhitungan persentase kontribusi (% *Contribution*) menunjukkan bahwa faktor suhu merupakan variabel paling dominan dengan kontribusi sebesar 55,27%, diikuti oleh lebar strip (27,44%) dan kecepatan pultrusi (17,29%). Nilai *F-ratio* suhu yang paling tinggi juga mengindikasikan pengaruh statistik yang kuat terhadap variasi *Fuzzy Score*. Dengan demikian, pengendalian suhu proses menjadi parameter paling kritis dalam upaya meningkatkan kualitas dan konsistensi performa fabrikasi filamen rPET berbasis pendekatan optimasi multirespon.

Tabel 8. Perhitungan ANOVA

Faktor	Level	Mean Level	SSF	SST	SSE	MSF	MSE	F Ratio	%Contribution
Suhu (C)	200	0.393953	0.3480	0.66311	0.0334	0.174006428	0.0167	10.400	55.27056
	210	0.8318367	12856	3005	59819		2991	91851	
	220	0.439113							
Kecepatan (RPM)	30	0.42472	0.1088			0.054423176		3.2530	17.28672
	48	0.6936967	46352					46612	
	50	0.5464867							
Lebar (mm)	8	0.60708	0.1727			0.086396989		5.164	27.44272
	9	0.692503	93977					22323	
	10	0.36532							

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengumpulan data, analisis *fuzzy*, serta evaluasi statistik yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa parameter proses fabrikasi filamen rPET memiliki pengaruh signifikan terhadap performa kualitas dan kestabilan hasil produksi. Variasi suhu pultrusi, kecepatan proses, dan lebar strip rPET terbukti memengaruhi waktu pultrusi, densitas, serta konsistensi diameter filamen yang dihasilkan. Integrasi pendekatan *Design of Experiment* berbasis *Fuzzy-Based Taguchi* dengan *Fuzzy Inference System* tipe Mamdani memungkinkan penggabungan berbagai respon kuantitatif tersebut ke dalam satu indikator kinerja yang lebih representatif, yaitu *fuzzy score*, sehingga evaluasi performa proses dapat dilakukan secara komprehensif dengan mempertimbangkan hubungan nonlinier dan trade-off antar respon. Hasil analisis menunjukkan bahwa kombinasi parameter optimal diperoleh pada suhu 210 °C, kecepatan pultrusi 50 rpm, dan lebar strip 8 mm, dengan nilai *fuzzy score* tertinggi sebesar 0.87139. Kondisi ini merepresentasikan keseimbangan terbaik antara efisiensi waktu pultrusi, kestabilan diameter, dan densitas filamen rPET. Analisis ANOVA terhadap nilai *fuzzy score* memperkuat temuan tersebut dengan menunjukkan bahwa suhu proses merupakan faktor paling dominan dengan kontribusi sebesar 55,27%, diikuti oleh lebar strip dan kecepatan pultrusi. Hal ini menegaskan bahwa pengendalian suhu menjadi kunci utama dalam menjaga kualitas dan konsistensi proses fabrikasi.

Dengan demikian, penelitian ini membuktikan bahwa pendekatan *Fuzzy-Based Taguchi* efektif digunakan untuk optimasi proses multirespon pada fabrikasi filamen berbahan daur ulang, serta mampu mendukung pengambilan keputusan parameter proses secara lebih akurat. Secara praktis, hasil penelitian ini dapat menjadi acuan bagi industri kecil dan menengah yang memproduksi filamen daur ulang untuk menetapkan parameter proses yang stabil tanpa memerlukan sistem kontrol yang kompleks, sekaligus membuka peluang penelitian lanjutan terkait integrasi optimasi proses dengan aspek nilai tambah dan efisiensi biaya produksi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. E. Quinlan, T. Hasan, J. Jaddou, and A. J. Hart, "Industrial and Consumer Uses of Additive Manufacturing: A Discussion of Capabilities, Trajectories, and Challenges," *J Ind Ecol*, vol. 21, no. S1, Nov. 2017, doi: 10.1111/jiec.12609.
- [2] A. Al Rashid and M. Koç, "Additive manufacturing for sustainability and circular economy: needs, challenges, and opportunities for 3D printing of recycled polymeric waste," *Materials Today Sustainability*, vol. 24, p. 100529, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.mtsust.2023.100529.
- [3] T. D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K. T. Q. Nguyen, and D. Hui, "Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges," *Compos B Eng*, vol. 143, pp. 172–196, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012.
- [4] M. Nikam, P. Pawar, A. Patil, A. Patil, K. Mokal, and S. Jadhav, "Sustainable fabrication of 3D printing filament from recycled PET plastic," *Mater Today Proc*, vol. 103, pp. 115–125, Jan. 2024, doi: 10.1016/J.MATPR.2023.08.205.
- [5] C. K. Ror, S. Negi, and V. Mishra, "Development and characterization of sustainable 3D printing filaments using post-consumer recycled PET: processing and characterization," *Journal of Polymer Research*, vol. 30, no. 9, pp. 1–11, Sep. 2023, doi: 10.1007/S10965-023-03742-2/METRICS.
- [6] P. Latko-Durałek, K. Dydek, and A. Boczkowska, "Thermal, Rheological and Mechanical Properties of PETG/rPETG Blends," *J Polym Environ*, vol. 27, no. 11, pp. 2600–2606, Nov. 2019, doi: 10.1007/s10924-019-01544-6.
- [7] A. Toghan, O. K. Alduaij, M. M. S. Sanad, and N. A. Eleessawy, "Scalable Engineering of 3D Printing Filaments Derived from Recycling of Plastic Drinking Water Bottle and Glass Waste," *Polymers 2024, Vol. 16, Page 3195*, vol. 16, no. 22, p. 3195, Nov. 2024, doi: 10.3390/POLYM16223195.
- [8] O. Ulkir, G. Akgun, and A. Karadag, "Mechanical Behavior Prediction of 3D-Printed PLA/Wood Composites Using Artificial Neural Network and Fuzzy Logic," *Polym Adv Technol*, vol. 36, no. 2, p. e70103, Feb. 2025, doi: 10.1002/PAT.70103.