

Optimalisasi Logika Fuzzy terhadap Suhu dan Kelembapan pada Filamen PET

Donny Aryo Seno Suwandi¹, Ii Munadhif², Agus Khumaidi³, Afif Zuhri Arfianto⁴

e-mail: donnysuwandi4000@gmail.com, iimunadhif@ppns.ac.id, aguskhumaidi@ppns.ac.id, afif@ppns.ac.id

^{1,2,3,4} Jurusan Teknik Kelistrikan Kapal, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Indonesia

Informasi Artikel

Riwayat Artikel

Diterima 8 Maret 2025

Direvisi 27 Mei 2025

Diterbitkan 31 Mei 2025

Kata kunci:

PET
Suhu
Kelembapan
Fuzzy

Keywords:

PET
temperature
Humidity
Fuzzy

Penulis Korespondensi:

Donny Aryo Seno Suwandi
Jurusan Teknik Otomasi,
Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya,
Jl. Teknik Kimia, Keputih, Kec. Sukolilo, Surabaya, Jawa Timur 60111.
Email: donnysuwandi4000@gmail.com
+62 895-4229-64534

ABSTRAK

Penelitian ini mengevaluasi pengaruh suhu dan kelembapan terhadap kualitas mekanik filamen PET hasil proses ekstrusi daur ulang, serta mengoptimalkan parameter proses menggunakan logika *fuzzy* Sugeno. Latar belakang penelitian ini berangkat dari kebutuhan akan filamen daur ulang yang memiliki sifat mekanik kompetitif dengan produk komersial. Metode yang digunakan melibatkan variasi suhu 210–225°C dan kelembapan 55–65% pada 18 sampel, dengan pengujian gaya tarik maksimum, modulus elastisitas, dan kelenturan. Hasil terbaik diperoleh pada suhu 220°C dan kelembapan 60%, dengan gaya tarik maksimum 134,26 N, modulus elastisitas 176 MPa, dan tegangan putus 3,86 MPa. Sementara itu, kelembapan tinggi meningkatkan kelenturan hingga 18% pada suhu 215°C, namun berdampak negatif terhadap kekuatan tarik dan kekakuan material. Optimasi berbasis *fuzzy* Sugeno terbukti mampu menyeimbangkan parameter proses secara otomatis, menghasilkan filamen dengan karakteristik mekanik yang setara atau bahkan lebih baik dari filamen PET komersial.

ABSTRACT

This study evaluates the influence of extrusion temperature and ambient humidity on the mechanical properties of recycled PET filament, and optimizes the process parameters using Sugeno-type fuzzy logic. The research is motivated by the growing demand for recycled filament with mechanical performance comparable to commercial products. Experiments were conducted by varying extrusion temperatures from 210°C to 225°C and humidity levels from 55% to 65% across 18 samples, with measurements of maximum tensile strength, elastic modulus, and elongation. The best performance was achieved at 220°C and 60% humidity, yielding a maximum tensile force of 134.26 N, an elastic modulus of 176 MPa, and a fracture stress of 3.86 MPa. Higher humidity increased flexibility up to 18% at 215°C, but had a negative impact on tensile strength and stiffness. The application of Sugeno fuzzy logic enabled automatic optimization of process parameters, producing filament with mechanical properties comparable to, or even exceeding, those of commercial PET filament.

1. PENDAHULUAN

Sampah plastik merupakan ancaman serius bagi lingkungan karena memiliki waktu dekomposisi yang sangat lama, mencapai ratusan tahun. Berdasarkan laporan PlasticsEurope, Indonesia menghasilkan sekitar 12,87 juta ton sampah plastik pada tahun 2023, namun hanya 10–15% yang berhasil didaur ulang. Sisanya sebagian besar



berakhir di tempat pembuangan akhir (TPA) atau mencemari ekosistem perairan [1]. Dari lima jenis plastik yang paling banyak digunakan yaitu Polyethylene Terephthalate (PET), Polypropylene (PP), High-Density Polyethylene (HDPE), Low-Density Polyethylene (LDPE), dan Polystyrene (PS), sampah PET merupakan salah satu yang paling jarang didaur ulang di tingkat rumah tangga [2]. Permasalahan ini menunjukkan perlunya solusi inovatif dalam pengelolaan limbah plastik, salah satunya melalui pemanfaatan teknologi 3D printing dengan bahan filamen berbasis plastik daur ulang.

PET (Polyethylene Terephthalate) memiliki potensi besar sebagai bahan filamen 3D printing karena sifatnya yang kuat, tahan lama, dan relatif ramah lingkungan. Menurut Schneevogt et al. [3], penggunaan recycled PET (*rePET*) tidak hanya mengurangi limbah plastik, tetapi juga mendukung praktik keberlanjutan dalam industri manufaktur aditif. Dengan titik leleh berkisar antara 220°C hingga 260°C, PET memiliki karakteristik termal yang sebanding dengan bahan filamen populer seperti ABS dan PLA [4].

Namun, proses ekstrusi PET menghadapi tantangan teknis utama, terutama sensitivitas terhadap kelembapan. PET bersifat higroskopis, sehingga paparan kelembapan tinggi dapat menurunkan kekuatan mekanik filamen yang dihasilkan [5]. Guna mengatasi hal ini, penelitian ini menerapkan sistem kendali berbasis logika *fuzzy* Sugeno untuk mengontrol suhu ekstruder dan kelembapan lingkungan secara adaptif. Pendekatan *fuzzy* ini memungkinkan pengaturan parameter proses yang lebih fleksibel dan responsif dibandingkan metode konvensional, serta mampu mengontrol kecepatan tarik motor yang memengaruhi diameter dan homogenitas filamen.

Metode pengujian dilakukan dengan mencetak spesimen uji yang dibuat berdasarkan standar ASTM D638 menggunakan printer 3D serta dilakukan pengujian kelenturan dan pengujian tarik. Spesimen tersebut dicetak dari model yang dirancang menggunakan perangkat lunak *CAD* dan dikonversi ke dalam format *STL* [6]. Proses pencetakan menggunakan teknologi *Fused Deposition Modeling (FDM)*, di mana mesin 3D bekerja dengan melelehkan material dan membentuk objek secara bertahap (*layer by layer*) berdasarkan perintah gerakan yang diatur dalam *G-Code* [7]. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh suhu dan kelembapan terhadap karakteristik mekanik filamen PET hasil ekstrusi serta mengoptimalkan parameter proses ekstrusi menggunakan logika *fuzzy* Sugeno agar diperoleh filamen daur ulang dengan kualitas yang kompetitif terhadap produk komersial.

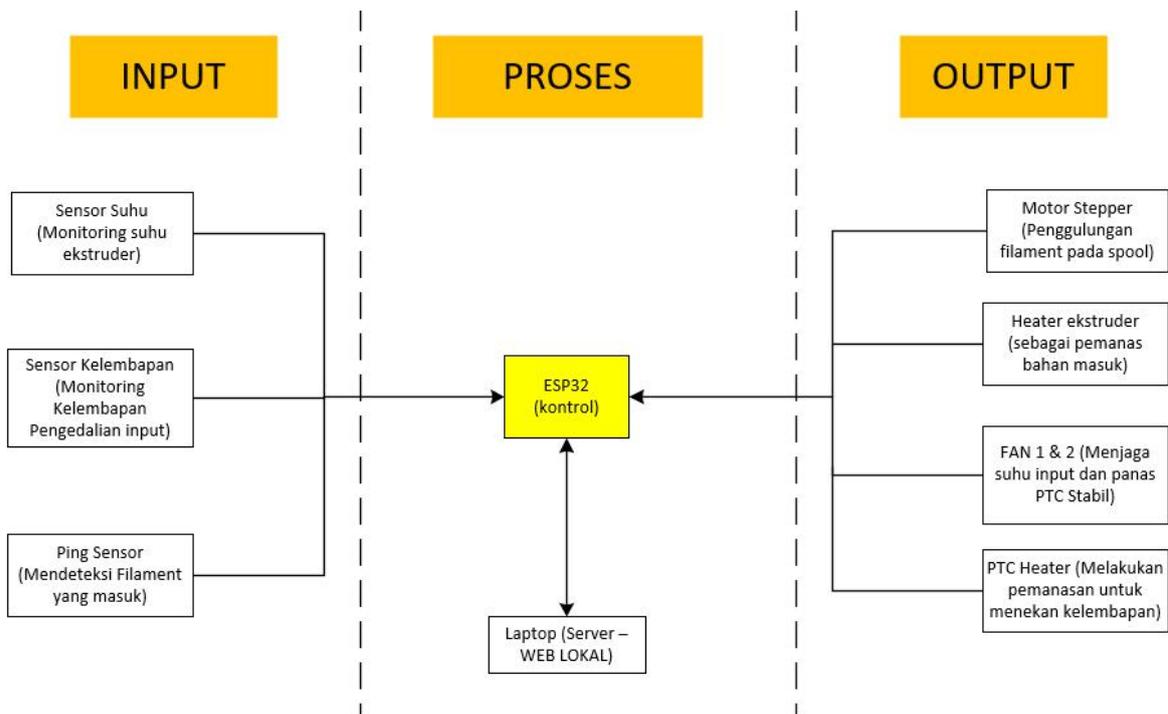
2. METODE PENELITIAN

2.1 PERANCANGAN DIAGRAM BLOK SISTEM

Diagram blok yang ditunjukkan pada Gambar 1 adalah suatu tahap awal perencanaan sistem yang menggambarkan secara umum cara kerja alat mulai dari *input*, proses sampai *output* [8]. Tujuan utama pembuatan diagram blok adalah untuk menyederhanakan proses perancangan dan pengembangan setiap komponen secara terstruktur, sehingga menghasilkan sistem yang terintegrasi dan sesuai dengan spesifikasi yang direncanakan [9]. Sistem ini terdiri dari sensor yang berfungsi sebagai *input* untuk mendeteksi parameter penting, mikrokontroler yang memproses data dari sensor, dan aktuator yang bertindak sebagai *output* untuk mengontrol kecepatan putaran spool serta menjaga kelembapan pada tingkat yang optimal.

Bagian pertama adalah *input*, yang mencakup tiga sensor utama: sensor suhu, yang memantau suhu ekstruder; sensor kelembapan, yang mengawasi kelembapan lingkungan guna mendukung pengendalian proses; dan ultrasonik sensor, yang mendeteksi keberadaan filamen yang masuk ke proses ekstrusi. Sensor-sensor ini berfungsi untuk mengumpulkan data penting yang akan diproses dalam sistem. Bagian kedua adalah proses, yang melibatkan ESP32 sebagai mikrokontroler utama yang mengolah data yang diterima dari sensor-sensor dan mengontrol perangkat keluaran. Selain itu, laptop/server berfungsi sebagai broker lokal untuk pemantauan dan pengendalian berbasis web. Sistem ini memungkinkan pengolahan data secara *real-time*, sehingga parameter proses dan perangkat keluaran dapat dikendalikan secara cepat dan akurat. Bagian terakhir adalah *output*, yang mencakup perangkat pengendali seperti motor stepper, yang mengatur kecepatan penggulungan filamen pada spool; heater ekstruder, yang memanaskan bahan baku sebelum proses pencetakan; kipas 1 dan kipas 2, yang menjaga suhu stabil pada ekstruder dan PTC heater; serta PTC heater, yang memanaskan untuk menurunkan tingkat kelembapan. Alur kerja sistem ini memastikan bahwa proses produksi filamen dapat berjalan dengan kualitas yang terjaga secara otomatis, dari *input* data hingga pengendalian perangkat *output*.





Gambar 1: Diagram Blok

2.2 LOGIKA FUZZY

Logika *fuzzy* adalah suatu pengaplikasian sistem kendali yang berlandaskan pada sistem logika guna peneliti mengambil keputusan [10]. Metode *fuzzy* terbukti efektif dalam mengatasi ketidakpastian dan kompleksitas dalam pengambilan keputusan. Di dalam dunia produksi, metode ini memungkinkan para pengambil keputusan untuk memodelkan serta menginterpretasikan informasi yang bersifat samar atau tidak pasti, dengan melakukan pemetaan pada suatu *input* menjadi *output* yang jelas [11]. Dengan menggunakan metode *fuzzy*, proses pengambilan keputusan dapat dilakukan secara lebih fleksibel, karena dapat mempertimbangkan berbagai variabel yang tidak pasti dan memberikan solusi yang lebih adaptif terhadap perubahan kondisi [12], selain itu diungkapkan juga bahwa keunggulan logika *fuzzy* terletak pada kemampuan untuk melakukan penalaran berbasis bahasa. Dengan demikian, dalam penyusunan logika tidak memerlukan persamaan matematis yang rumit untuk mengontrol objek yang dimaksud [13]. Melalui hal tersebut menunjukkan bahwa logika *fuzzy* merupakan proses gabungan yang dapat diterapkan tidak hanya pada dunia nyata, tetapi juga pada mesin atau alat yang diteliti. *Fuzzy* harus memenuhi minimal dua *input* sebagai kontrol utama.

Penerapan logika *fuzzy* juga terbukti efektif dalam sistem pengendalian dunia nyata, termasuk dalam mesin atau alat yang diteliti. Sistem ini membutuhkan minimal dua *input* sebagai kontrol utama untuk mengoptimalkan proses dan menghasilkan keputusan yang lebih baik. Oleh karena itu, logika *fuzzy* tidak hanya relevan dalam teori, tetapi juga dalam implementasi praktis di berbagai bidang industri. Tujuan dari kajian ini adalah untuk mengeksplorasi aplikasi logika *fuzzy* dalam pengendalian sistem dan mengidentifikasi bagaimana metode ini dapat meningkatkan efektivitas pengambilan keputusan dalam kondisi ketidakpastian. Metode logika *fuzzy* terdiri dari beberapa tahapan utama yang saling terhubung.

a. Fuzzifikasi

Proses mengubah bilangan crisp (nilai masukan) menjadi nilai keanggotaan dalam himpunan *fuzzy*, nilai crisp sendiri tidak boleh ambigu dan harus jelas sehingga dapat dibentuk dalam pengolahan algoritma yang tegas. Proses ini mengonversi nilai numerik yang pasti menjadi derajat keanggotaan yang menunjukkan sejauh mana suatu nilai termasuk dalam himpunan *fuzzy* tertentu, memberikan fleksibilitas dalam analisis dan pemrosesan dalam sistem berbasis logika *fuzzy*.

b. Fuzzy Interface Sistem



Proses pengambilan kesimpulan dan keputusan. Sistem ini menginterpretasikan nilai keanggotaan *fuzzy* dan menerapkan aturan-aturan logika *fuzzy* untuk menghasilkan *output* yang berguna. Dengan pendekatan berbasis aturan, *fuzzy inference* sistem dapat menangani ketidakpastian dan memberikan keputusan yang lebih realistis, terutama dalam situasi yang kompleks dan tidak pasti. Nilai keanggotaan *fuzzy* sendiri berdasarkan nilai yang telah diteliti lalu dilakukan pengelompokan baik literatur maupun pengujian kesesuaian seperti kestabilan atau konsistensi.

c. *Fuzzy Rules*

Knowledge base memainkan peran krusial dalam mendukung pengambilan keputusan dengan menyediakan aturan-aturan yang umumnya ditulis dalam format IF (THEN). Aturan-aturan ini menggambarkan hubungan antara kondisi tertentu dan hasil yang diharapkan, sehingga memungkinkan pemrosesan informasi yang efisien dan penerapan logika untuk menghasilkan respons yang tepat berdasarkan kondisi yang diobservasi.

d. Defuzzifikasi

Proses ini mengubah nilai *output fuzzy* menjadi nilai crisp yang dapat dipergunakan dalam aplikasi nyata. Tujuan dari defuzzifikasi adalah untuk mengonversi hasil yang disampaikan dalam bentuk *fuzzy* menjadi nilai numerik yang jelas dan spesifik. Proses ini memastikan bahwa hasil dari analisis *fuzzy* dapat diterapkan dengan tepat dan tegas dalam situasi praktis.

2.3 FUZZY SUGENO

Metode Sugeno adalah salah satu metode dalam logika fuzzy yang menggunakan fungsi output berupa konstanta (orde 0) atau fungsi linear (orde 1) [14]. Metode ini dirancang untuk memproses data yang bersifat tidak pasti atau ambigu melalui pengelompokan data berdasarkan *input* yang diberikan, serta menerapkan aturan-aturan tertentu untuk menghasilkan *output* yang sesuai dengan harapan [15]. Metode Sugeno menggunakan pendekatan matematis untuk mengelola proses inferensi berbasis aturan IF-THEN, di mana hasilnya dapat berupa nilai tetap (konstanta) atau model fungsi linear. Dengan kemampuan ini, *Fuzzy Sugeno* sering digunakan dalam aplikasi pengambilan keputusan dan sistem kontrol yang membutuhkan hasil yang lebih presisi, seperti dalam bidang otomasi, prediksi, dan optimasi [16]. Keunggulan utama dari metode ini adalah fleksibilitasnya dalam menangani variabel *input* yang kompleks sekaligus kemampuannya untuk menghasilkan *output* yang terukur dan dapat diimplementasikan secara langsung. Terdapat dua persamaan orde pada *fuzzy sugeno* antara lain.

a. Rumus Orde 0 (Output berupa konstanta)

Jika suatu variabel X termasuk dalam himpunan *fuzzy A*, maka nilai *output (Z)* adalah sebuah konstanta (k).
Contoh: Jika suhu tinggi dan kelembapan rendah, maka kecepatan motor = 60.

b. Rumus Orde 1 (Output berupa fungsi linear)

Jika suatu variabel X termasuk dalam himpunan *fuzzy A* dan variabel Y termasuk dalam himpunan *fuzzy B*, maka nilai *output (Z)* dihitung menggunakan fungsi linear berupa $Z = pX + qY + r$, di mana p , q , dan r adalah konstanta yang digunakan dalam konsekuensi.

Contoh: Jika suhu sedang dan kelembapan sedang, maka kecepatan motor = $Z = pX + qY + r$.

Rumus ini memungkinkan metode Sugeno menghasilkan keluaran yang lebih presisi berdasarkan model linier atau konstan.

2.4 PENGUJIAN HASIL KETAHANAN FILAMEN PET

Penelitian ini menguji ketahanan filamen PET daur ulang melalui dua metode yaitu uji tarik dan uji kelenturan. Tujuannya adalah mengevaluasi kekuatan dan elastisitas filamen dalam menghadapi beban mekanis, serta menilai kelayakan PET sebagai alternatif filamen komersial yang ramah lingkungan dan murah. Pengujian melibatkan 9 variabel utama sesuai dengan aturan fuzzy dan juga nantinya ada material tambahan berupa ABS dan PLA sebagai pembanding material yang umum digunakan.

a. Uji Kelenturan (Regangan Putus ϵ_B)

Mengukur seberapa besar filamen dapat melentur sebelum patah. Kelembapan material memengaruhi kelenturan, karena air dapat membuat filamen lebih lunak atau getas. Nantinya Proses pengujian kelenturan menggunakan bantuan mesin IMADA dengan *input* berupa filamen berbentuk benang untuk diujikan seberapa panjang perubahan yang terjadi sebelum dan sesudah pengujian.

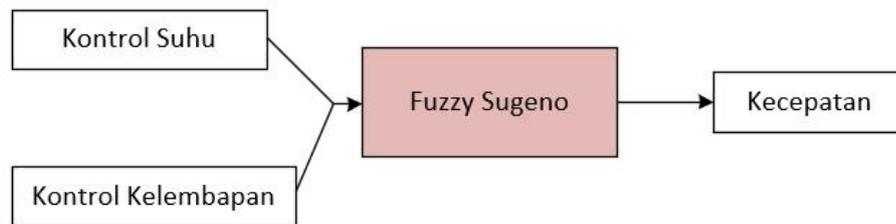
b. Uji Tarik



Mengukur kekuatan maksimum filamen saat ditarik hingga putus. Menggunakan mesin uji dengan load cell dan extensometer untuk mengukur gaya tarik dan perubahan panjang. Hasil pengujian tarik menunjukkan ketahanan terhadap patah, sedangkan hasil kelenturan (modulus kelenturan, satuan MPa) menunjukkan kekakuan material. Pada pengujian Tarik berbeda dengan pengujian kelenturan dimana material pada pengujian tarik dicetak terlebih dahulu dengan bantuan 3D Print dengan pengaturan yang sama serta ukuran standar pengujian mesin Zwick Roell ASTM D638 type V.

Gabungan kedua uji ini memberikan Gambaran menyeluruh tentang kekuatan, kelenturan, dan kekakuan filamen PET daur ulang.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN



Gambar 2: Variabel Fuzzy

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh suhu dan kelembapan terhadap kualitas hasil akhir filamen PET dengan bantuan metode pengendalian *fuzzy*. Pendekatan ini diterapkan untuk meningkatkan presisi kontrol kedua variabel tersebut, yang kemudian diuji melalui uji tarik dan uji kelenturan guna menilai karakteristik mekanis filamen yang dihasilkan. Berikut adalah variabel *fuzzy*, dan nilai linguistik dari setiap variabelnya yang digunakan untuk mengoptimalkan kualitas filamen daur ulang botol PET dengan mempertimbangkan suhu dan kelembapan sebagai *input*, serta kecepatan motor sebagai *output* dalam sistem pengendalian:

A. Variabel *Input*

- Suhu:
 - Rendah (205°C – 215°C)
 - Sedang (210°C – 222°C)
 - Tinggi (215°C – 225°C)
- Kelembapan:
 - Rendah (40% – 60%)
 - Sedang (55% – 65%)
 - Tinggi (60% – 75%)

B. Variabel *Output*

- Kecepatan Motor:
 - Lambat (30 rpm)
 - Sedang (40 rpm)
 - Cepat (50 rpm)

Berikut adalah derajat keanggotaan pada variabel suhu dan kelembapan yang diperoleh melalui batas batas nilai yang telah ditentukan pada point variabel *input*.

A. Suhu

- Himpunan suhu rendah $\mu(x)$
 - o $1; x \leq 210$



- $(215-x) / (215-210); 210 \leq x \leq 215$
 - $0; x \geq 215$
 - Himpunan suhu sedang $\mu(x)$
 - $0; x \leq 210 \parallel x \geq 220$
 - $(x-210) / (215-210); 210 \leq x \leq 215$
 - $(220-x) / (220-215); 215 \leq x \leq 220$
 - Himpunan suhu tinggi $\mu(x)$
 - $0; x \leq 215$
 - $(x-215) / (220-215); 215 \leq x \leq 220$
 - $1; x > 220$
- B. Kelembapan
- Himpunan kelembapan rendah $\mu(x)$
 - $1; x \leq 55$
 - $(60-x) / (60-55); 55 \leq x \leq 60$
 - $0; x \geq 60$
 - Himpunan kelembapan sedang $\mu(x)$
 - $0; x \leq 55 \parallel x \geq 60$
 - $(x-55) / (60-55); 55 \leq x \leq 60$
 - $(65-x) / (65-60); 60 \leq x \leq 60$
 - Himpunan kelembapan tinggi $\mu(x)$
 - $0; x \leq 60$
 - $(x-60) / (65-60); 60 \leq x \leq 65$
 - $1; x > 65$

TABEL I : Aturan Fuzzy

No	Input		Output
	Suhu	Kecepatan	Kelembapan
1	Rendah	lambat	Rendah
2	Sedang	Sedang	Rendah
3	Tinggi	cepat	Rendah
4	Rendah	lambat	Sedang
5	Sedang	Sedang	Sedang
6	Tinggi	cepat	Sedang
7	Rendah	lambat	Tinggi
8	Sedang	Sedang	Tinggi
9	Tinggi	cepat	Tinggi

Variabel-variabel tersebut telah ditentukan berdasarkan pengujian yang relevan serta hasil dari pengujian dilakukan sebelumnya untuk mengoptimalkan kualitas filamen daur ulang botol PET dengan mempertimbangkan suhu, kelembapan, dan kecepatan motor. Berikut adalah suhu dan kelembapan yang diujikan sesuai dengan aturan yang telah disesuaikan pada Tabel 1.

Tabel II : Nilai Pengujian Aturan Fuzzy

No	Suhu	Kecepatan	Kelembapan
----	------	-----------	------------



1	210	55	30
2	215	55	40
3	220	55	50
4	210	60	30
5	215	60	40
6	220	60	50
7	210	65	30
8	215	65	40
9	220	65	50

3.1 Hasil Ekstruksi

Selanjutnya pada tahap pengujian hasil ekstrusi, dilakukan pengujian menggunakan spesimen dengan karakteristik yang sama. Kedua spesimen ini menggunakan material botol besar yang memiliki ketebalan awal sebesar 1,8 mm sebagai bahan *input* dengan lebar sebesar 7 mm. Tujuan utama dari pengujian ini adalah untuk mengevaluasi kemampuan ekstruder dalam membentuk produk yang sesuai, baik dari segi ketebalan maupun bentuk hasil akhir. Evaluasi ini penting untuk memastikan bahwa proses ekstrusi berjalan sesuai dengan spesifikasi desain dan dapat menghasilkan produk yang memenuhi standar kualitas yang diharapkan. Selanjutnya guna melihat apakah hasil dari ekstruksi filamen PET tersebut sudah sesuai maka perlu dilakukan pengujian, pengujian awal adalah pengujian tarik tanpa adanya pengolahan pada mesin atau raw material guna meminimalisi adanya banyak variabel yang mempengaruhi. Pada pengujian kedua guna melihat apakah filamen secara langsung dapat digunakan maka pengujian akan dilakukan dengan menggunakan 3D printer untuk dicetak sesuai dengan bentuk yang serupa guna melihat hasil yang diperoleh apakah nantinya dapat dibandingkan serta bersaing dengan filamen yang terdapat pada pasaran dan pengujian menggunakan standar ATSM 638. Berikut adalah hasil filamen sesuai dengan 9 aturan yang telah dijabarkan pada Tabel 2.



Gambar 3: Spesimen Pengujian

3.2 Pengujian Kelenturan [Regangan Putus (ϵ_B)]

Pengujian kelenturan pada Gambar 4 berguna untuk melihat seberapa getas atau lentur filamen hasil proses dari mesin yang telah dibuat dan juga dibandingkan dengan filamen PLA, dimana pada metode ini menggunakan alat khusus dimana filamen akan ditarik diantara dua penjepit dengan gaya tekan yang diberikan sampai mencapai daya tarik dan nilai tarik maksimal yang didapatkan.





Gambar 4: Pengujian Kelenturan

Standar pengujian menggunakan filamen sepanjang 30 cm dan dipilih bagian yang terbaik dan sesuai standar, hal ini bertujuan agar hasil yang diberikan tidak mengalami eror, berikut adalah spesimen yang telah dikumpulkan. Pengujian menggunakan 9 sampel ditambah 1 sampel filamen PLA yang telah distandarkan dengan panjang yang sama, banyaknya sampel ini sesuai dengan banyaknya rules *fuzzy* yang telah dibuat sebelumnya, berikut adalah data hasil pengujian yang telah dikumpulkan.

ΔL = Perubahan panjang material setelah ditarik hingga maksimal.

L_0 = Panjang awal material sebelum ditarik.

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100\% \quad (1)$$

Rules	Suhu	Kelembapan	Panjang Awal (L_0)	Perubahan Panjang	ϵ (%)	Beban maksimal (N)	No	Suhu	Kecepatan	Kelembapan
1	210	55	30	33	11	120	1	210	55	30
2	215	55	30	34.5	15	128	2	215	55	40
3	220	55	30	35,7	19	140	3	220	55	50
4	210	60	30	32	6.7	125	4	210	60	30
5	215	60	30	36.2	20.7	142.5	5	215	60	40
6	220	60	30	38.5	28.3	136	6	220	60	50
7	210	65	30	31.5	5	118	7	210	65	30
8	215	65	30	33.5	11.7	126	8	215	65	40
9	220	65	30	34.7	15.7	124	9	220	65	50

TABEL III : Hasil Pengujian Kelenturan

- Pengaruh Suhu Terhadap Beban Maksimal



Beban maksimal cenderung meningkat dengan kenaikan suhu hingga titik tertentu (suhu 215°C). Namun, pada suhu yang lebih tinggi (220°C), beban maksimal mulai menurun. Hal ini disebabkan oleh sifat material PET, di mana suhu yang terlalu tinggi mendekati titik pelelehan menyebabkan material kehilangan kekuatan mekaniknya.

- Pengaruh Kelembapan Terhadap Sifat Mekanik
Kelembapan yang lebih tinggi (65%) menunjukkan penurunan beban maksimal dibandingkan dengan kelembapan lebih rendah (55% dan 60%). Hal ini menunjukkan bahwa kelembapan dapat memengaruhi sifat mekanik PET, terutama karena sifat higroskopisnya.
- Persen Perpanjangan (ϵ) dan Kekuatan Tarik
Persen perpanjangan (ϵ epsilon) memiliki hubungan langsung dengan perubahan panjang (ΔL). Semakin tinggi suhu, perubahan panjang material meningkat hingga suhu tertentu. Namun, peningkatan suhu berlebihan justru menyebabkan pengurangan kemampuan regangan material.

3.3 Pengujian Tarik



Gambar 5: Pengujian Tarik

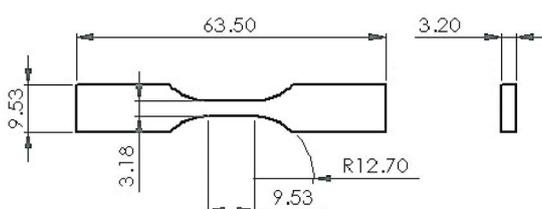
Guna memastikan apakah hasil filamen benar benar memiliki kemampuan yang sesuai sekaligus dapat digunakan secara fungsional sebagai bahan 3D prin maka akan dilakukan pengujian terhadap hasil 3D prin dengan uji tarik yang sudah disesuaikan dengan standar internasional yaitu ASTM D368. Standar ASTM D638 adalah standar yang menjelaskan metode pengujian untuk menentukan sifat tarik plastik yang diperkuat dan *unreinforced*. Pada pengujian ini menggunakan standar ASTM D638 type V, standar ini memiliki ukuran sebagai berikut.

Berdasarkan Gambar 6, terlihat bahwa ukuran antara spesimen contoh dan hasil cetak sudah sesuai, yang menunjukkan bahwa spesimen telah memenuhi standar untuk dilakukan pengujian. Proses pencetakan dilakukan dengan pengaturan suhu nozzle yang distandarkan pada 250°C dan suhu bed pada 70°C. Namun, karena PET adalah salah satu bahan yang memiliki sifat tidak mudah putus, sering terjadi stringing selama proses pencetakan. Untuk mengatasi masalah tersebut, dilakukan penyesuaian pada pengaturan retraction

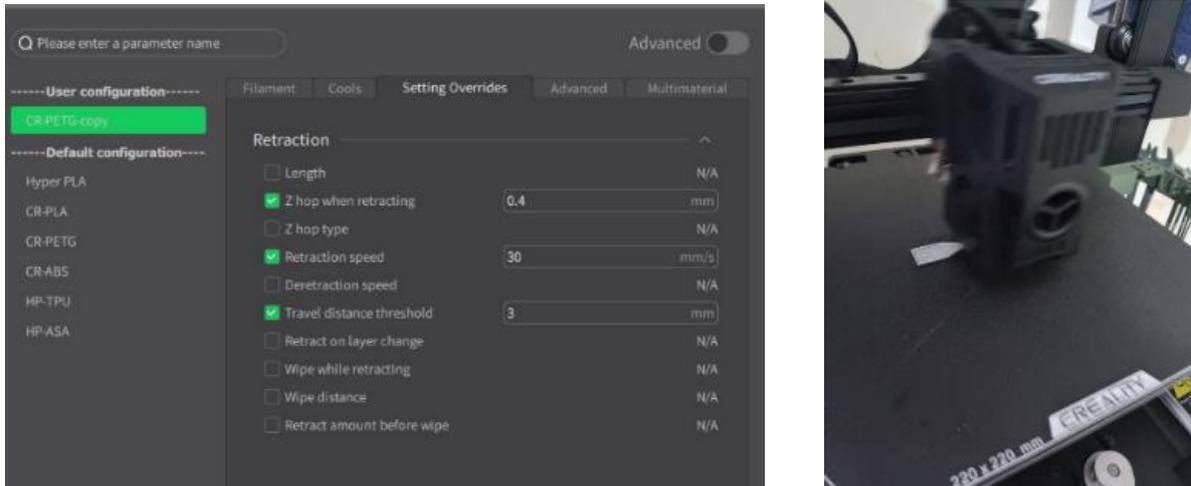
Gambar 6: Ukuran ASTM D368 Type V dan Hasil Jadi 3D Print

sebagai berikut,

p-ISSN: 2356-0533; e-ISSN: 2355-9195

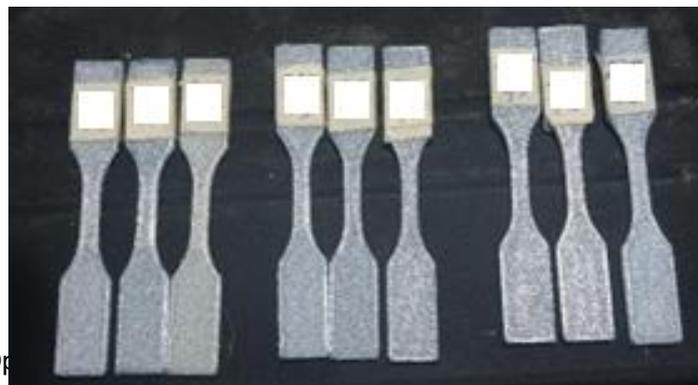


- Z hop When retraction: 0.4 mm
- Retraction speed: 30 mm/s
- Travel distance threshold: 3 mm



Gambar 7: Pengaturan 3D Printer

Penyesuaian ini bertujuan untuk meminimalisir stringing dan memastikan hasil cetakan memiliki kualitas yang lebih baik serta memenuhi spesifikasi yang diinginkan. Selanjutnya guna memastikan Pengujian tarik valid, maka spesimen 3D prin ini dicetak dengan mengikuti aturan *fuzzy* yang telah dijelaskan pada Bab 3, yaitu sebanyak 9 aturan dengan variabel yang berbeda beda pada setiap aturan. Berikut adalah spesimen yang akan digunakan dalam pengujian.



Donny Aryo Seno Suwandi : Op

0533; e-ISSN: 2355-9195

Gambar 8: Spesimen Pengujian Tarik



9 772356 053009

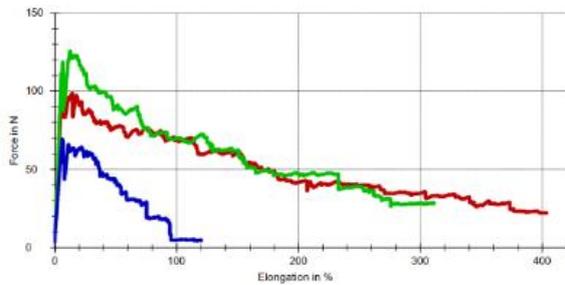
Tensile Test report

Customer : Donny Arjo Seno Suwandi
 Test standard : ASTM D 638 V
 Material : PET (botol Plastik)
 Machine data : Zwick Z020
 Pre-load : 5 N
 Speed, tensile modulus : 10 mm/min
 Test speed : 10 mm/min
 Grip to grip separation at the start position : 25,00 mm

Test results:

Legend	No	Specimen designation	Force N	E _t MPa	σ ₁₀ MPa	σ _{0.2} MPa	σ _b MPa	h mm	b mm
Red	1	210-55	102,41	102	10,7	6,4	2,35	400	3,16
Green	2	210-60	125,20	136	13,8	13	3,12	310	3
Blue	3	210-65	69,46	88,5	7,77	6,4	0,543	120	3

Series graph:



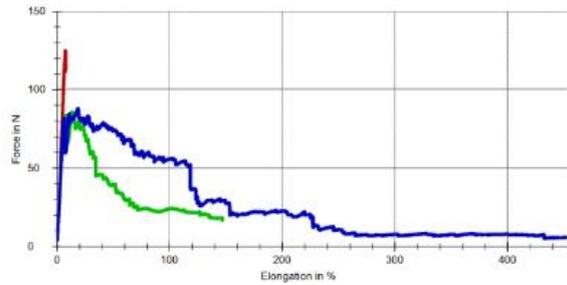
Tensile Test report

Customer : Donny Arjo Seno Suwandi
 Test standard : ASTM D 638 V
 Material : PET (botol Plastik)
 Machine data : Zwick Z020
 Pre-load : 5 N
 Speed, tensile modulus : 10 mm/min
 Test speed : 10 mm/min
 Grip to grip separation at the start position : 25,00 mm

Test results:

Legend	No	Specimen designation	Force N	E _t MPa	σ ₁₀ MPa	σ _{0.2} MPa	σ _b MPa	h mm	b mm
Red	1	215-55	124,40	132	12,9	7,2	12,9	7,2	3,14
Green	2	215-60	85,40	111	9,55	13	1,90	150	2,96
Blue	3	215-65	87,57	113	9,73	18	0,663	450	3

Series graph:



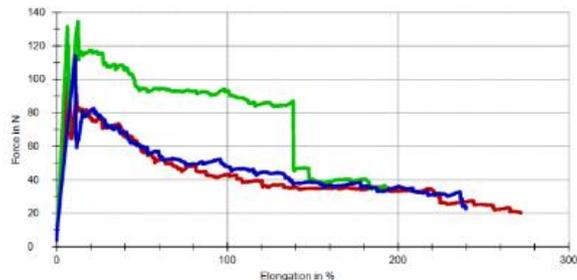
Tensile Test report

Customer : Donny Arjo Seno Suwandi
 Test standard : ASTM D 638 V
 Material : PET (botol Plastik)
 Machine data : Zwick Z020
 Pre-load : 5 N
 Speed, tensile modulus : 10 mm/min
 Test speed : 10 mm/min
 Grip to grip separation at the start position : 25,00 mm

Test results:

Legend	No	Specimen designation	Force N	E _t MPa	σ ₁₀ MPa	σ _{0.2} MPa	σ _b MPa	h mm	b mm
Red	1	220-55	102,25	135	11,4	7,2	2,29	270	2,98
Green	2	220-60	134,26	174	14,8	13	3,86	190	3,02
Blue	3	220-65	113,87	118	12,4	11	2,48	240	3,04

Series graph:



Gambar 9: Hasil Pengujian dengan Standar ASTM D368 Type V

Hasil pengujian menunjukkan bahwa suhu dan kelembapan berpengaruh signifikan terhadap karakteristik mekanis filamen PET. Nilai gaya tarik (Force) rata-rata sebesar 109,56 N, dengan nilai tertinggi 134,26 N pada suhu 220°C dan kelembapan 60%, serta nilai terendah 69,46 N pada suhu 210°C dan kelembapan 65%. Modulus elastisitas rata-rata mencapai 123,4 MPa, dengan spesimen paling kaku (176 MPa) dihasilkan pada kondisi 220-60, sementara kelembapan tinggi menurunkan kekakuan hingga 88,5 MPa. Kekuatan tarik maksimum rata-rata adalah 11,8 MPa, dengan nilai tertinggi 14,8 MPa pada 220-60 dan terendah 7,77 MPa pada 210-65, menunjukkan bahwa kelembapan tinggi cenderung melemahkan filamen. Kelenturan rata-rata mencapai 11,4%, dengan spesimen paling lentur (18%) pada 215-65, meskipun peningkatan kelenturan ini disertai dengan penurunan kekuatan dan kekakuan. Tegangan putus rata-rata berada pada 2,21 MPa, dengan nilai tertinggi 3,86



MPa pada 220-60, yang menunjukkan kualitas terbaik secara keseluruhan. Dimensi filamen relatif stabil dengan ketebalan dan lebar rata-rata sekitar 3 mm di seluruh spesimen.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian, suhu dan kelembapan memiliki pengaruh signifikan terhadap karakteristik mekanik filamen PET. Pada suhu 220°C dan kelembapan 60%, gaya tarik maksimum mencapai 134,26 N, modulus elastisitas tertinggi 176 MPa, serta tegangan putus 3,86 MPa, menunjukkan kualitas mekanik terbaik. Sebaliknya, pada suhu 210°C dan kelembapan 65%, gaya tarik menurun hingga 69,46 N, modulus elastisitas turun menjadi 88,5 MPa, dan tegangan putus hanya 2,21 MPa, menunjukkan bahwa kelembapan tinggi mengurangi kekuatan material. Kelenturan rata-rata tercatat 11,4%, dengan nilai tertinggi 18% pada suhu 215°C dan kelembapan 65%, yang menunjukkan bahwa kelembapan tinggi dapat meningkatkan fleksibilitas tetapi mengorbankan kekuatan mekanik. Secara keseluruhan, suhu ekstrusi yang terlalu tinggi menyebabkan degradasi material, sementara kelembapan yang berlebihan menurunkan kekakuan akibat sifat higroskopis PET. Oleh karena itu, penerapan logika *fuzzy* dapat mengoptimalkan parameter suhu dan kelembapan dengan menyeimbangkan kekuatan tarik, modulus elastisitas, dan kelenturan agar filamen memiliki sifat mekanik terbaik tanpa perlu pengaturan manual yang berulang. Guna meningkatkan validitas penelitian, disarankan adanya perbandingan filamen PET hasil eksperimen dengan filamen komersial yang telah beredar di pasaran. Perbandingan ini bertujuan untuk mengevaluasi sejauh mana keberhasilan optimasi logika *fuzzy* dalam menghasilkan filamen dengan karakteristik mekanik yang kompetitif. Pengukuran ulang terhadap gaya tarik, modulus elastisitas, tegangan putus, dan kelenturan pada filamen komersial dapat memberikan referensi mengenai standar kualitas industri. Jika filamen hasil eksperimen memiliki kualitas yang setara atau lebih baik, maka optimasi menggunakan logika *fuzzy* dapat dianggap berhasil. Sebaliknya, jika terdapat perbedaan signifikan, maka parameter *fuzzy* dapat disesuaikan kembali untuk mencapai performa yang lebih optimal.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] PlasticsEurope, "Plastics - the Facts 2023," [Online]. Available: <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2023/>. [Accessed: 15-February-2025].
- [2] M. L. Sonjaya, Mutmainnah, and M. F. Hidayat, "Construction of Plastic Waste Extruding Machine to Produce Filaments of 3D Printing Machine," *Int. J. Mech.*, vol. 16, no. July, pp. 82–90, 2022, doi: 10.46300/9104.2022.16.10.
- [3] H. Schneevoigt, K. Stelzner, B. Yilmaz, B. E. Abali, A. Klunker, and C. Völlmecke, "Sustainability in additive manufacturing: Exploring the mechanical potential of recycled PET filaments," *Compos. Adv. Mater.*, vol. 30, p. 263498332110000, 2021, doi: 10.1177/26349833211000063.
- [4] I. Tylman and K. Dzierzek, "Filament for a 3D Printer from Pet Bottles-Simple Machine," *Int. J. Mech. Eng. Robot. Res.*, vol. 9, no. 10, pp. 1386–1392, 2020, doi: 10.18178/ijmerr.9.10.1386-1392.
- [5] B. A. Setyawan and Y. Ngadiyono, "Analisis Pengaruh Tingkat Kelembaban Filamen PLA Terhadap Nilai Kekuatan Mekanik Hasil Cetak 3D Printing," *J. Din. Vokasional Tek. Mesin*, vol. 7, no. 1, pp. 1–11, 2022, doi: 10.21831/dinamika.v7i1.48259.
- [6] P. Aryanto, M. Zaenudin, Y. Saleh, and N. C. Hidayat, "Pengaruh suhu dan analisis kekuatan material PET (Polyethylene Terephthalate) terhadap ekstrusi pada mesin filamen maker 3D printer," no. 2, pp. 578–583, 2023, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/381578474_Pengaruh_suhu_dan_analisis_kekuatan_material_PET_Polyethylene_Terephthalate_t_erdhadap_ekstrusi_pada_mesin_filamen_maker_3D_printer#fullTextFileContent
- [7] W. H. Pratama, H. -, and H. -, "Optimasi Parameter Proses 3D Printing Terhadap Kuat Tarik Material Filamen PLA + Menggunakan Metode Taguchi," *Sprocket J. Mech. Eng.*, vol. 3, no. 1, pp. 39–45, 2021, doi: 10.36655/sprocket.v3i1.568.
- [8] A. Rifaini, S. Sintaro, and A. Surahman, "Alat Perangkap Dan Kamera Pengawas Dengan Menggunakan Esp32-Cam Sebagai Sistem Keamanan Kandang Ayam," *J. Tek. dan Sist. Komput.*, vol. 2, no. 2, pp. 52–63, 2022, doi: 10.33365/jtikom.v2i2.1486.
- [9] D. Ambarwati and Z. Abidin, "Rancang Bangun Alat Pemberian Nutrisi Otomatis Pada Tanaman Hidroponik," *J. Teknol. dan Sist. Inf.*, vol. 2, no. 1, p. 29, 2021, [Online]. Available: <http://jim.teknokrat.ac.id/index.php/JTISI>
- [10] S. Amalia, R. Andari, and R. Syukriansyah, "Studi Pemodelan Sistem Pengontrolan Suhu Ruangan Berbasis Logika Fuzzy Sugeno," *J. Sains*



dan Teknol. J. Keilmuan dan Apl. Teknol. Ind., vol. 20, no. 2, p. 175, 2020, doi: 10.36275/stsp.v20i2.287.

- [11] N. Musyaffa, B. Rifai, R. Sastra, and E. Yuniarto, "Smart Plant Monitoring Sistem Kelembaban Tanah Menggunakan Metode Fuzzy Logic Pada Tumbuhan Cabai Berbasis IoT," *J. Khatulistiwa Inform.*, vol. 11, no. 1, pp. 35–42, 2023, doi: 10.31294/jki.v11i1.16114.
- [12] B. Wicaksono, A. Febrianto, L. Monika, and S. Arifin, "Sistem Pendukung Keputusan Jumlah Produksi Dengan Metode Fuzzy," *JURIHUM J. Inov. dan Hum.*, vol. 1, no. 1, pp. 105–115, 2023, [Online]. Available: <https://jurnalmahasiswa.com/index.php/jurihum>
- [13] M. Rosdiana, "Analisis Hasil Perbandingan Fuzzy Inference Sistem Metode Mamdani Dan Sugeno Dalam Estimasi Produksi Telur," *Sci. Sacra J. Sains, Teknol. dan Masy.*, vol. 3, no. 4, pp. 63–77, 2023, [Online]. Available: <http://pijarpemikiran.com/index.php/Scientia>
- [14] R. Y. Ramadhani and A. Qoiriah, "Implementasi Algoritma Fuzzy Sugeno sebagai Pendukung Keputusan dalam Penentuan Skor Akhir pada Game Edukasi Simple Nomic," *J. Informatics Comput. Sci.*, vol. 1, no. 01, pp. 48–55, 2019, doi: 10.26740/jinacs.v1n01.p48-55.
- [15] F. R. Hariri, "Penerapan Metode Fuzzy Sugeno Dalam Pendaftaran Siswa Baru di SDN Sonopatik 1 Nganjuk," *Tek. Inform. Univ. Nusant. PGRI Kediri*, vol. 3, no. 1, pp. 41–46, 2016, [Online]. Available: Penerapan Metode Fuzzy Sugeno Dalam Pendaftaran Siswa Baru di SDN Sonopatik 1 Nganjuk
- [16] D. Rifai and F. Fitriyadi, "Penerapan Logika Fuzzy Sugeno dalam Keputusan Jumlah Produksi Berbasis Website," *Hello World J. Ilmu Komput.*, vol. 2, no. 2, pp. 102–109, 2023, doi: 10.56211/helloworld.v2i2.297.

