

RANCANG BANGUN MESIN *PULTRUSION* UNTUK PEMANFAATAN LIMBAH BOTOL PLASTIK *POLYETHYLENE TEREPHTHALATE (PET)* MENJADI *FILAMENT 3D PRINTER*

Rady Purbakawaca^{1*}, Mustain Bilah¹, Rahmat Wijaya², Angga Setiawan², Irwan Mustajab²

¹*Agroekoteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Sultan Agung Tirtayasa, Serang, Banten, 42163, Indonesia*

²*Teknik Mesin, Fakultas Sains dan Teknologi, Institut Sains dan Teknologi Al-Kamal, Kebon Jeruk, Jakarta Barat, 11520, Indonesia*

*email: dr.rady@untirta.ac.id

ABSTRAK

Akumulasi limbah botol plastik polyethylene terephthalate (PET) yang terus meningkat belum diimbangi dengan teknologi konversi yang efisien. Penelitian ini bertujuan untuk merancang mesin pultrusi sebagai solusi rekayasa dalam mengonversi limbah PET menjadi filament printer 3D. Mesin ini mengintegrasikan mikrokontroler Arduino dengan sensor thermocouple MAX6675, cartridge heater, dan motor stepper yang dilengkapi transmisi compound gear untuk optimasi torsi penarikan. Metode pengujian dilakukan melalui variasi kecepatan penarikan pada temperatur konstan 205 °C untuk mengevaluasi karakteristik fisik filament. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kondisi operasi optimum dicapai pada kecepatan 45 RPM, yang menghasilkan filament dengan diameter seragam 1,73 mm, permukaan halus, dan tampilan mengkilap. Pada kondisi ini, waktu konversi rata-rata adalah 23 menit per botol PET (1,5 L), dengan estimasi kebutuhan 63 botol untuk menghasilkan 1 kg filament. Sebaliknya, peningkatan kecepatan di atas 45 RPM menyebabkan penurunan kualitas dimensi akibat proses solidifikasi yang tidak sempurna. Penelitian ini membuktikan bahwa sinkronisasi torsi mekanik dan kendali termal yang presisi mampu menghasilkan filament daur ulang berkualitas tinggi yang memenuhi standar bahan baku printer 3D.

Kata Kunci: *Compound Gear; Filament 3D Printer; Perpindahan Panas; Polyethylene terephthalate; Pultrusion*

ABSTRACT

[Title: Design and Development of a Pultrusion Machine for Converting Waste Polyethylene Terephthalate (PET) Bottles into 3D Printing Filaments] The increasing accumulation of polyethylene terephthalate (PET) bottle waste has not been balanced by efficient conversion technology. This study aims to design and develop a pultrusion machine as an engineering solution to convert PET waste into 3D printing filament. The machine integrates an Arduino microcontroller with a MAX6675 thermocouple sensor, cartridge heater, and stepper motor equipped with a compound gear transmission to optimize pulling torque. The testing method involved varying the pulling speed at a constant temperature of 205 °C to evaluate the physical characteristics of the filament. The results showed that the optimum operating condition was achieved at a speed of 45 RPM, producing a filament with a uniform diameter of 1.73 mm, smooth surface, and glossy appearance. Under these conditions, the average conversion time is 23 minutes per PET bottle (1.5 L), with an estimated 63 bottles required to produce 1 kg of filament. Conversely, increasing the speed above 45 RPM leads to a decrease in dimensional quality due to incomplete solidification. This research demonstrates that the synchronization of mechanical torque and precise thermal control can produce high-quality recycled filament that meets 3D printer raw material standards.

Keywords: *3D Printer Filament Machine; Compound Gear; Heat Transfer; Polyethylene terephthalate; Pultrusion Machine*

PENDAHULUAN

Di Indonesia, sampah masih menjadi permasalahan yang belum terselesaikan, sementara jumlahnya terus meningkat seiring pertumbuhan penduduk dan aktivitas manusia (Hidayat & Alvin Chaeruddin, 2019). Dampak lingkungan dari sampah plastik sangat signifikan, terutama karena sifatnya yang sulit terurai secara alami, dengan

waktu degradasi mencapai 100–500 tahun (Taufik et al., 2023). Kondisi ini menunjukkan perlunya upaya pengelolaan limbah yang tidak hanya berfokus pada pengurangan volume, tetapi juga pada peningkatan nilai guna material plastik melalui pendekatan teknologi.

Salah satu jenis plastik yang memiliki potensi tinggi untuk didaur ulang adalah *polyethylene*

terephthalate (PET), yang digunakan secara luas sebagai bahan kemasan makanan dan minuman. PET memiliki stabilitas dimensi, sifat mekanik yang baik, serta kemampuan untuk dilunakkan dan dibentuk ulang, sehingga cocok untuk berbagai aplikasi rekayasa (Al-Sabagh et al., 2016; Ferreira et al., 2021; Gopanna et al., 2019; Romberg et al., 2021). Pemanfaatan limbah PET menjadi produk bernilai ekonomis, seperti *filament* untuk pencetakan 3D, merupakan salah satu alternatif solusi dalam mendukung konsep ekonomi sirkular (Nikam et al., 2024; Putra et al., 2024). Namun demikian, proses konversi limbah PET menjadi produk dengan kualitas yang konsisten masih menghadapi berbagai tantangan teknis, terutama dalam pengendalian proses pembentukan material, seperti stabilitas temperatur, viskositas lelehan atau pelunakan, dan keseragaman dimensi produk (Haq et al., 2025; Straková et al., 2026).

Seiring dengan perkembangan teknologi *additive manufacturing*, khususnya pencetakan 3D (*3D printing*), kebutuhan akan material *filament* dengan kualitas dimensi yang presisi, stabilitas termal, serta konsistensi sifat mekanik semakin meningkat (Kristiawan et al., 2021). Salah satu metode manufaktur kontinu yang berpotensi digunakan untuk menghasilkan produk dengan penampang seragam adalah *pultrusion*, yaitu proses pembentukan material melalui kombinasi pemanasan dan penarikan secara simultan (Minchenkov et al., 2021). Metode ini memungkinkan kontrol yang lebih baik terhadap dimensi produk dan kestabilan proses, sehingga relevan untuk diaplikasikan dalam konversi limbah PET menjadi *filament* 3D printer.

Dalam sistem *pultrusion* berbasis termoplastik, kualitas produk sangat ditentukan oleh interaksi antara transfer panas, aliran material, dan mekanisme penarikan. Proses pelunakan atau pelelehan material terjadi akibat perpindahan panas dari elemen pemanas menuju material melalui mekanisme konduksi. Secara matematis, perpindahan panas pada sistem *pultrusion* dianalisis menggunakan pendekatan konduksi satu dimensi pada kondisi tunak (*steady-state*) berdasarkan persamaan 1 sebagai berikut:

$$\dot{Q} = kA \frac{(T_1 - T_2)}{L} \quad (1)$$

dimana Q adalah laju perpindahan panas (W), k adalah konduktivitas termal material (W/mK), A adalah luas penampang perpindahan panas (m^2), $(T_1 - T_2)$ adalah perbedaan temperatur (K), dan L adalah panjang lintasan perpindahan panas (m).

Persamaan ini menjadi dasar dalam perancangan unit *heat block–nozzle* untuk memastikan distribusi temperatur yang homogen agar proses pelunakan material dapat PET berlangsung optimal.

Selain aspek termal, sistem mekanik pada *pultrusion* juga memegang peranan penting dalam menjaga kestabilan proses. Mekanisme penarikan *filament* dikendalikan oleh sistem transmisi yang menentukan hubungan antara kecepatan dan torsi. Pada sistem roda gigi majemuk (*compound gear*), rasio transmisi total dapat dinyatakan pada persamaan 2 sebagai berikut:

$$GR = \frac{Z_b}{Z_a} \times \frac{Z_d}{Z_c} \quad (2)$$

dimana Z menyatakan jumlah gigi pada masing-masing roda gigi. Rasio ini secara langsung memengaruhi hubungan antara kecepatan putar dan torsi keluaran, yang secara umum dinyatakan pada persamaan 3 sebagai berikut:

$$T_{out} = GR \cdot T_{in} \quad (3)$$

dimana T_{out} merupakan torsi keluaran yang dihasilkan pada poros akhir sistem transmisi (Nm), sedangkan T_{in} adalah torsi masukan yang berasal dari motor penggerak (Nm), dan GR (*gear ratio*) merupakan rasio transmisi yang ditentukan oleh perbandingan jumlah gigi pada roda gigi yang saling berinteraksi. Hubungan tersebut menunjukkan bahwa peningkatan rasio transmisi akan menghasilkan torsi yang lebih besar dengan konsekuensi penurunan kecepatan putar, menjaga kestabilan gaya tarik *filament* selama proses pembentukan dan pendinginan.

Pemanfaatan limbah plastik PET sebagai bahan baku *filament* merupakan salah satu solusi strategis dalam mendukung konsep ekonomi sirkular. PET memiliki sifat termoplastik yang memungkinkan untuk dilunakkan dan dibentuk ulang, serta telah banyak dikaji sebagai material alternatif untuk *filament* 3D printer (Ferreira et al., 2021; Tylman & Dzierzek, 2020). Namun demikian, konversi langsung limbah PET menjadi *filament* masih menghadapi berbagai kendala teknis, terutama terkait ketidakstabilan temperatur, inkonsistensi aliran material, dan ketidaksesuaian kecepatan penarikan dengan proses solidifikasi, yang berakibat pada kualitas *filament* tidak seragam.

Studi sebelumnya menunjukkan bahwa kualitas produk *pultrusion* sangat dipengaruhi oleh distribusi temperatur dan parameter penarikan selama proses (Morales Méndez et al., 2024; Volk

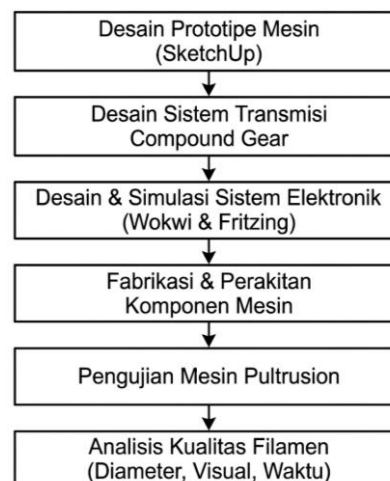
et al., 2021, 2022). Selain itu, pengembangan sistem *extrusion-pultrusion* untuk material termoplastik telah dilakukan dan menunjukkan kinerja yang baik, meskipun masih terdapat ruang untuk peningkatan dalam integrasi sistem mekanik dan (Budyantoro et al., 2021). Pada aplikasi *filament* berbasis PET, penelitian oleh Tylman dan Dzierzek (2020) menunjukkan bahwa sistem sederhana dapat digunakan untuk menghasilkan *filament* dari limbah botol plastik, namun masih memerlukan pengembangan lebih lanjut untuk meningkatkan kualitas dan konsistensi produk. (Ferreira et al., 2021) menekankan pentingnya desain sistem pemanasan dalam menentukan kualitas *filament* termoplastik yang dihasilkan.

Berdasarkan kajian tersebut, dapat diidentifikasi bahwa masih terdapat kesenjangan penelitian pada pengembangan sistem *pultrusion* yang mampu mengintegrasikan analisis termal, desain mekanik, dan sistem kendali dalam satu platform yang stabil dan ekonomis. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk membangun mesin *pultrusion* berbasis limbah PET dengan pendekatan rekayasa terintegrasi, yang meliputi perancangan sistem pemanas berbasis analisis perpindahan panas, pengembangan sistem transmisi *compound gear* untuk optimasi torsi dan kecepatan, dan integrasi sistem kendali berbasis Arduino untuk pengaturan parameter proses secara *real-time*.

Pendekatan ini diharapkan mampu menghasilkan mesin *pultrusion* dengan performa yang stabil, efisien, dan mampu menghasilkan *filament* PET dengan kualitas dimensi dan visual yang memenuhi standar aplikasi *3D printing*, sekaligus memberikan kontribusi dalam pengembangan teknologi daur ulang berbasis rekayasa yang bernilai tambah.

METODE

Tahapan penelitian meliputi desain prototipe mesin, perancangan sistem transmisi, desain dan simulasi sistem elektronik, fabrikasi dan perakitan mesin, pengujian kinerja, serta analisis kualitas *filament*, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alur penelitian

Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah limbah botol plastik PET berkapasitas 1,5 L yang dipotong menjadi pita dengan lebar ± 9 mm sebagai bahan baku *filament*. Proses konversi material dilakukan menggunakan sistem mesin *pultrusion* yang terdiri atas beberapa komponen utama. Sistem pemanas menggunakan *cartridge heater*, *heat block*, dan *nozzle* untuk melunakkan dan membentuk material PET menjadi *filament*. Temperatur proses dikontrol menggunakan sensor *thermocouple* MAX6675 yang terintegrasi dengan sistem kendali berbasis Arduino Uno/Nano. Mekanisme penarikan *filament* digerakkan oleh motor *stepper* NEMA 17 yang dihubungkan dengan sistem transmisi *compound gear* untuk mengatur rasio kecepatan dan torsi. Selain itu, sistem dilengkapi dengan komponen pendukung berupa LCD sebagai media tampilan, *rotary encoder* untuk pengaturan parameter, MOSFET sebagai pengendali daya pemanas, dan kipas pendingin untuk membantu proses solidifikasi *filament*. Tegangan kerja masing-masing komponen disesuaikan dengan kebutuhan operasional sistem dan dirangkum pada Tabel 1.

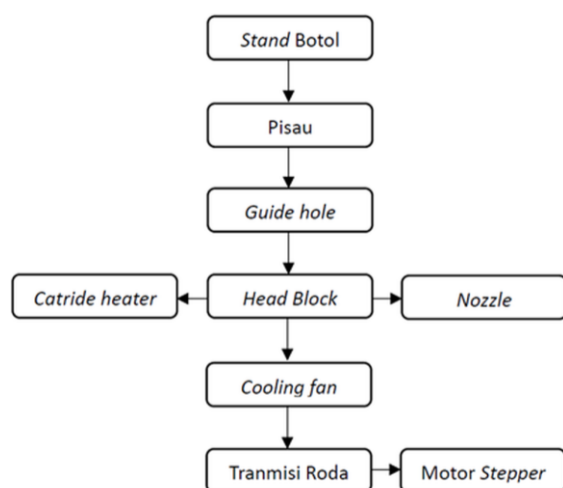
Tabel 1. Spesifikasi bahan dan komponen pada sistem mesin *pultrusion*

No	Komponen	Spesifikasi Utama	Tegangan Kerja
1	Limbah PET	Botol plastik PET, dipotong pita ± 9 mm	-
2	Arduino Uno/ Nano	Mikrokontroler ATmega328P 16 MHz	5 VDC
3	MAX6675 Module	Sensor suhu digital, resolusi 0.25°C , interface SPI	3.0–5.5 VDC
4	Thermocouple Tipe K	Sensor suhu hingga $\pm 1000^{\circ}\text{C}$	-
5	Motor Stepper NEMA 17	Step angle 1.8° , torsi $\pm 40\text{--}50\text{ N}\cdot\text{cm}$	12 VDC

6 Driver Stepper (A4988/DRV8825)	<i>Microstepping driver motor stepper</i>	8–35 VDC
7 Cartridge Heater	Elemen pemanas, daya 40–100 W	12 VDC / 220 VAC
8 Heat Block (Aluminium)	Media distribusi panas	-
9 Nozzle	Diameter keluaran ±1.75 mm (kuningan)	-
10 MOSFET (IRF52)	Pengendali daya pemanas	5–12 VDC
11 LCD 20×4 (I2C)	Tampilan parameter sistem	5 V DC
12 Rotary Encoder	Input pengaturan parameter	5 VDC
13 Kipas Pendingin	Pendinginan <i>filament</i>	12 VDC
14 Power Supply	Catu daya <i>switching</i>	12–24 VDC

Perancangan mesin *pultrusion* pada penelitian ini difokuskan pada integrasi tiga sub sistem utama, yaitu mekanik, termal, dan kendali, untuk menghasilkan proses pembentukan *filament* yang stabil dan kontinu. Pendekatan perancangan dilakukan dengan mempertimbangkan keterkaitan antar parameter proses, khususnya hubungan antara temperatur pemanasan, viskositas lelehan material, dan gaya tarik selama proses penarikan, yang secara langsung memengaruhi keseragaman dimensi dan kualitas *filament* (Volk et al., 2021, 2022).

Alur proses sistem *pultrusion* yang dirancang ditunjukkan pada Gambar 2, yang menggambarkan tahapan konversi limbah botol PET menjadi *filament* melalui proses pemotongan, pemanasan, pembentukan, pendinginan, dan penarikan. Diagram ini menunjukkan hubungan antar komponen utama dalam sistem dan urutan proses secara kontinu.



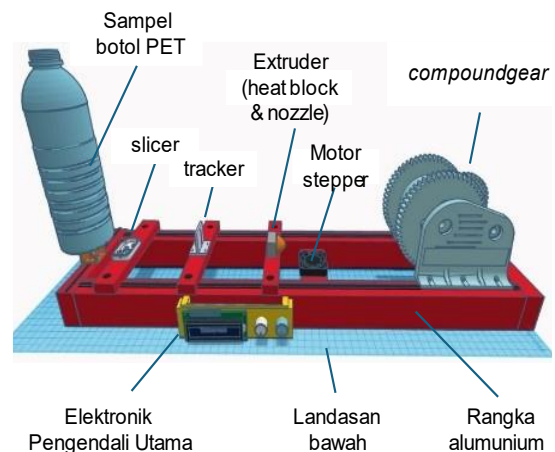
Gambar 2. Tahapan rancang bangun desain mesin *pultrusion* 3D *filament*

Perancangan Subsistem Mekanik

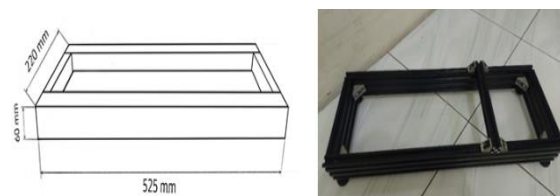
Subsistem mekanik dirancang untuk memastikan kestabilan pergerakan material selama proses *pultrusion*. Desain keseluruhan mesin ditunjukkan pada Gambar 3, yang memperlihatkan konfigurasi rangka, sistem pemotongan, jalur material, serta posisi unit pemanas dan mekanisme penarikan *filament*.

Rangka utama mesin berfungsi sebagai penopang seluruh komponen agar tetap stabil selama operasi. Desain dan realisasi rangka ditunjukkan pada Gambar 4, yang memperlihatkan struktur mekanik yang digunakan untuk menjaga keselarasan posisi antar komponen. Stabilitas struktur ini penting untuk menghindari getaran yang dapat memengaruhi kualitas *filament*.

Mekanisme penarikan *filament* merupakan bagian kritis dalam subsistem mekanik. Untuk itu digunakan sistem transmisi *compound gear* yang berfungsi meningkatkan torsi dan mengatur kecepatan penarikan secara lebih presisi. Pengaturan rasio transmisi ini memungkinkan gaya tarik yang lebih konstan, sehingga fluktuasi diameter *filament* dapat diminimalkan (Budiyantoro et al., 2021).



Gambar 3. Konsep dan desain rancangan mesin *pultrusion* 3D *filament*



Gambar 4. Desain dan hasil rangka (*frame*) mesin

Perancangan Subsistem Termal

Subsistem termal dirancang untuk memastikan proses pelunakan material PET berlangsung secara merata sebelum pembentukan *filament*. Sistem pemanas terdiri atas *cartridge heater*,

heat block, dan *nozzle* yang berfungsi sebagai zona pelunakan dan pembentukan material.

Perancangan sistem termal difokuskan pada kestabilan distribusi temperatur untuk menjaga viskositas lelehan material tetap konstan. Ketidakstabilan temperatur dapat menyebabkan variasi aliran material yang berdampak pada kualitas *filament*, seperti ketidaksimetrian diameter dan cacat permukaan (Ferreira et al., 2021).

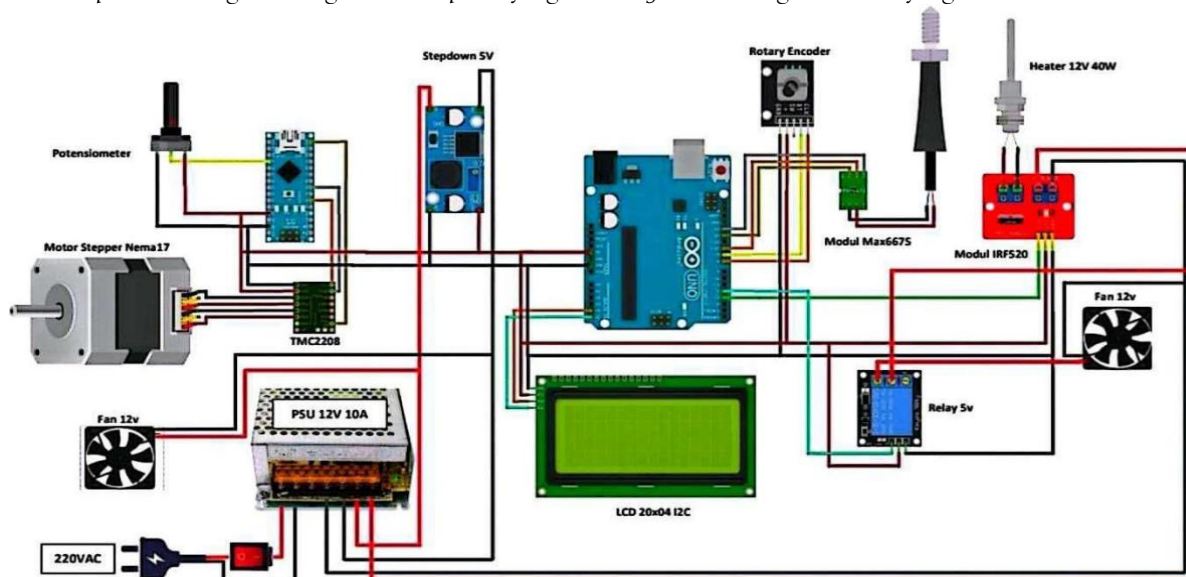
Perancangan Subsistem Kendali

Subsistem kendali dirancang untuk mengatur parameter operasi secara *real-time*, khususnya temperatur pemanasan dan kecepatan penarikan *filament*. Arsitektur sistem kendali ditunjukkan pada Gambar 4, yang menggambarkan hubungan antara sensor temperatur, mikrokontroler, serta aktuator pemanas dan motor penarik.

Pemrograman sistem dilakukan menggunakan Arduino IDE versi 2.3.0. Pengendalian temperatur dilakukan menggunakan mekanisme umpan balik dengan pendekatan kontrol PID (*Proportional-Integral-Derivative*), di mana temperatur aktual yang dibaca oleh sensor *thermocouple* dibandingkan dengan nilai *setpoint* yang

telah ditentukan. Selisih antara temperatur aktual dan *setpoint* digunakan sebagai sinyal kesalahan (*error*) yang diproses oleh pengendali untuk menghasilkan sinyal kendali dalam mengatur daya pemanas secara kontinu. Penggunaan kontrol PID bertujuan untuk meningkatkan kestabilan temperatur dengan meminimalkan fluktuasi serta kesalahan *steady-state* selama proses pemanasan. Parameter pengendali ditentukan melalui proses *tuning* eksperimental untuk memperoleh respon sistem yang stabil sesuai dengan kebutuhan proses.

Selain itu, kecepatan motor *stepper* diatur oleh mikrokontroler untuk mengendalikan laju penarikan *filament*. Pengaturan ini dilakukan dengan mengendalikan frekuensi pulsa yang diberikan ke motor, sehingga kecepatan penarikan dapat disesuaikan dengan kondisi termal sistem. Sinkronisasi antara pengendalian temperatur dan kecepatan penarikan menjadi faktor penting dalam menjaga kestabilan proses *pultrusion*. Dengan pendekatan ini, subsistem kendali mampu menjaga keseimbangan antara proses pelunakan material dan penarikan *filament*, menghasilkan kondisi operasi yang lebih stabil dan mendukung terbentuknya *filament* dengan kualitas yang konsisten.



Gambar 5. Skema rangkaian elektronik sistem kendali mesin *pultrusion* 3D *filament*

Integrasi Sistem

Integrasi antara subsistem mekanik, termal, dan kendali memungkinkan mesin *pultrusion* beroperasi secara kontinu dengan parameter yang terkontrol. Keterkaitan antar subsistem ini menjadi dasar dalam menentukan kondisi operasi yang diuji pada tahap eksperimen. Dengan pendekatan ini, perancangan sistem tidak hanya berfokus pada konfigurasi komponen, tetapi juga pada hubungan

fungsional antar subsistem dalam menghasilkan *filament* PET dengan kualitas yang konsisten.

Variabel dan Prosedur Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh kecepatan penarikan terhadap kualitas *filament* PET yang dihasilkan. Variabel bebas berupa kecepatan penarikan divariasikan pada 15, 30, 45, dan 60 rpm, yang ditentukan berdasarkan rentang

operasi sistem yang mampu dicapai secara stabil. Rentang ini merepresentasikan kondisi penarikan dari kecepatan rendah hingga tinggi untuk mengamati perubahan karakteristik *filament*. Variabel terikat meliputi diameter *filament*, kualitas visual permukaan, dan waktu proses, sedangkan parameter yang dikendalikan mencakup temperatur pemanasan, lebar pita PET, dan jenis material.

Temperatur pemanasan ditetapkan sebesar $\pm 205^{\circ}\text{C}$ berdasarkan sifat termal PET dan karakteristik proses termoplastik, yang umumnya berada pada rentang $190\text{--}260^{\circ}\text{C}$ dalam aplikasi ekstrusi dan pencetakan 3D (Chacón et al., 2017; Ngo et al., 2018). Temperatur ini dipilih untuk memastikan material dapat dilunakkan secara stabil tanpa mengalami degradasi, dan dijaga menggunakan sistem kontrol PID selama proses berlangsung. Lebar pita PET ditetapkan sebesar ± 9 mm sebagai kompromi antara laju suplai material dan kapasitas sistem pemanas, sehingga proses pelunakan berlangsung optimal tanpa menyebabkan kelebihan suplai yang dapat mengganggu kestabilan aliran, dan pengendalian laju material pada proses ekstrusi termoplastik (Chacón et al., 2017).

Eksperimen diawali dengan memanaskan sistem hingga mencapai kondisi termal stabil. Material PET kemudian dilunakkan dan dibentuk melalui *nozzle* menjadi *filament*, yang selanjutnya ditarik menggunakan motor *stepper* sesuai variasi kecepatan yang ditetapkan. *Filament* yang terbentuk didinginkan menggunakan kipas untuk mempercepat proses solidifikasi.

Pengambilan data dilakukan dengan mengukur diameter *filament* menggunakan alat ukur presisi, mengamati kualitas visual permukaan secara langsung, serta mencatat waktu proses pada setiap variasi kecepatan. Data yang diperoleh dianalisis secara deskriptif untuk mengidentifikasi pengaruh

kecepatan penarikan terhadap kualitas *filament* serta menentukan kondisi operasi yang optimal.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah seluruh tahapan fabrikasi dan perakitan diselesaikan, diperoleh konfigurasi akhir mesin *pultrusion* yang dirancang untuk memproduksi *filament* 3D printer dari limbah botol plastik PET. Sistem yang dikembangkan merupakan integrasi antara subsistem mekanik, sistem transmisi, dan sistem kendali yang bekerja secara terkoordinasi. Tampilan keseluruhan mesin hasil perancangan ditunjukkan pada Gambar 6.

Analisis Kinerja Sistem Kendali Temperatur

Evaluasi kinerja sistem *pultrusion* diawali dengan menguji respons termal terhadap tiga variasi *setpoint*, yaitu 180°C , 205°C , dan 220°C . Berdasarkan hasil pengujian aktual pada Gambar 7, sistem menunjukkan karakteristik respons transien yang konsisten. Temperatur meningkat dari kondisi awal $28,5^{\circ}\text{C}$ dengan pola non-linear, kenaikan cepat pada fase awal (*heating-up phase*) diikuti perlambatan saat mendekati *setpoint* akibat berkurangnya gradien temperatur hingga mencapai kondisi tunak tanpa osilasi signifikan.

Kinerja ini didukung oleh implementasi pengendali PID dengan parameter $K_p=12.5$, $K_i=0.05$, dan $K_d=35.0$ yang diperoleh melalui proses *tuning* eksperimental. Secara kuantitatif, sistem menunjukkan tingkat lonjakan (*overshoot*) yang sangat rendah (kurang dari 2%), dengan nilai maksimum hanya $2,1^{\circ}\text{C}$ pada *setpoint* 220°C ; $1,5^{\circ}\text{C}$ pada *setpoint* 205°C ; dan $1,2^{\circ}\text{C}$ pada *setpoint* 180°C . Rendahnya *overshoot* ini mengindikasikan bahwa sistem memiliki karakteristik redaman (*damping ratio*) yang memadai untuk menghindari kegagalan termal pada material.



Gambar 6. Tampilan akhir mesin *pultrusion* hasil perancangan

Secara kuantitatif, sistem menunjukkan kinerja pengendalian dengan tingkat lonjakan (*overshoot*) yang rendah, yaitu kurang dari 2% pada seluruh variasi *setpoint*. Nilai *overshoot* maksimum tercatat sekitar $2,1^{\circ}\text{C}$ pada *setpoint* 220°C ; $1,5^{\circ}\text{C}$ pada *setpoint* 205°C ; dan $1,2^{\circ}\text{C}$ pada *setpoint* 180°C . Rendahnya *overshoot* ini mengindikasikan bahwa sistem memiliki karakteristik redaman (*damping ratio*) yang memadai dan mampu menghindari *overcompensation* akibat aksi kontrol.

Pengujian juga mencakup kondisi gangguan berupa *material loading* (pemasukan pita PET 9 mm) pada detik ke-300. Beban termal mendadak ini menyebabkan penurunan temperatur masing-masing menjadi $216,5^{\circ}\text{C}$ (dari 220°C); $201,8^{\circ}\text{C}$ (dari 205°C); dan $176,5^{\circ}\text{C}$ (dari 180°C). Namun, sistem menunjukkan kemampuan *disturbance rejection* yang baik dengan memulihkan suhu kembali ke kondisi tunak dalam waktu kurang dari 60 detik dan mempertahankan deviasi sangat kecil yaitu $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$.

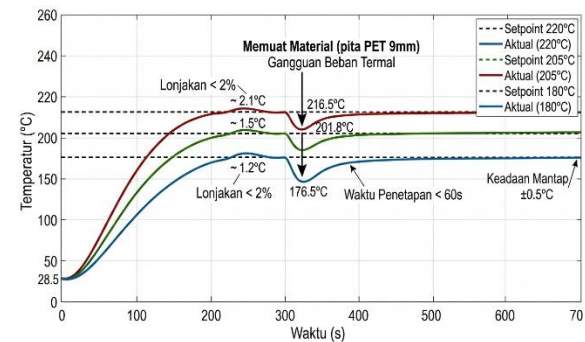
Kinerja sistem termal ini didukung secara fisik oleh konfigurasi *heat block* dan *nozzle* yang dirancang untuk mengoptimalkan perpindahan panas secara konduksi. Berdasarkan analisis termal, laju aliran panas yang dihasilkan sistem mencapai sekitar 132,58 W. Energi ini terbukti cukup untuk mendukung proses pelunakan material PET secara merata hingga mencapai kondisi viskoelastik.

Kestabilan ini disempurnakan oleh sistem transmisi mekanik yang memastikan laju penarikan material tetap konstan (45 RPM). Sinergi antara suplai panas yang stabil dan tarikan transmisi yang seragam sangat krusial, karena fluktuasi pada salah satu aspek tersebut akan langsung memengaruhi distribusi temperatur di dalam *die* dan mengubah konsistensi kualitas produk *filament* yang dihasilkan.

Perbandingan antar *setpoint* menunjukkan bahwa temperatur memengaruhi reologi material PET selama proses penarikan. Pada *setpoint* 180°C , meskipun sistem sangat stabil, viskositas PET yang tinggi menyebabkan aliran material kurang optimal. Sebaliknya, pada 220°C , viskositas yang terlalu rendah meningkatkan risiko deformasi dan fluktuasi temperatur yang relatif lebih besar.

Kondisi optimum dalam penelitian ini ditetapkan pada temperatur 205°C . Pada titik ini, tercapai kompromi terbaik antara kestabilan sistem kendali dan karakteristik aliran material. PET berada pada kondisi viskoelastik yang ideal, memungkinkan aliran yang kontinu sekaligus mempertahankan akurasi dimensi *filament* PET. Penyesuaian kecepatan penarikan pada kondisi ini terbukti menghasilkan *filament* dengan diameter

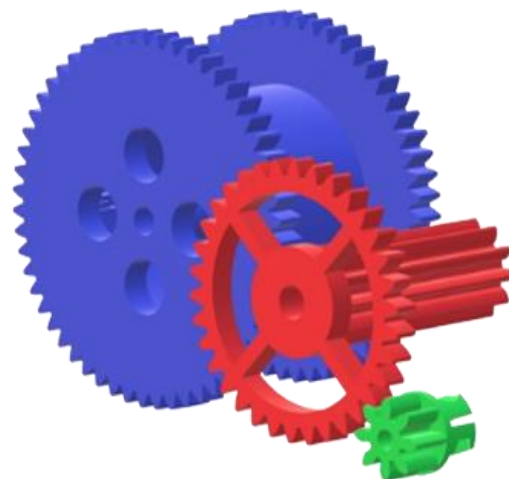
paling konsisten, yang akan dibahas lebih detail pada analisis kualitas fisik di bagian selanjutnya.



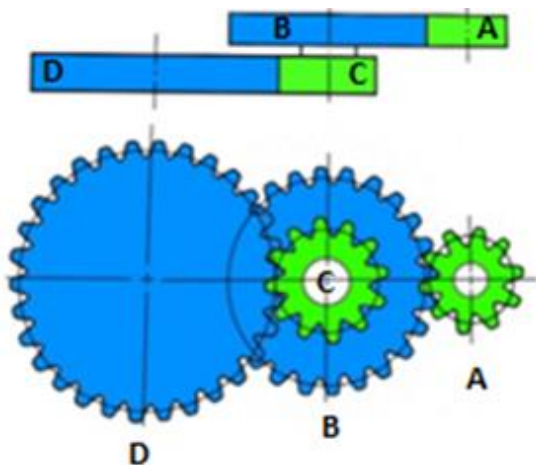
Gambar 7. Respons temperatur sistem pemanas pada proses *pultrusion* PET untuk variasi *setpoint* 180°C , 205°C , dan 220°C .

Analisis Karakteristik Transmisi dan Stabilitas Mekanik

Kestabilan proses *pultrusion* sangat bergantung pada kemampuan sistem transmisi dalam menarik pita PET melewati lubang *nozzle* secara kontinu. Sistem transmisi pada penelitian ini menggunakan konfigurasi *compound gear* yang dihubungkan dengan motor *stepper* yang dirancang untuk menurunkan kecepatan putaran motor (*speed reduction*) sekaligus meningkatkan torsi keluaran. Konfigurasi ini terdiri atas dua tahap reduksi yang melibatkan empat roda gigi utama (Gear A, B, C, dan D) dengan total rasio transmisi sebesar 21,25 sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 8 dan Gambar 9.



Gambar 8. Desain sistem transmisi *compound gear* pada mesin *pultrusion*.



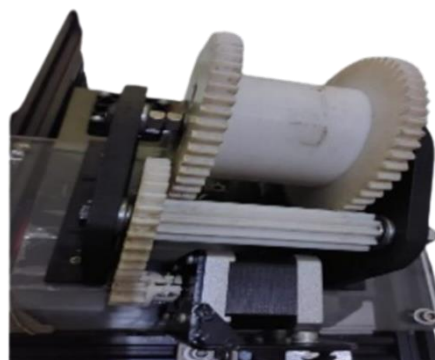
Gambar 9. Konfigurasi *compound gear* pada sistem transmisi (*gear A–D*).

Untuk menentukan batas stabilitas operasional, pengujian karakteristik transmisi dilakukan secara bertahap pada empat tingkatan kecepatan. Prosedur ini bertujuan untuk menganalisis respons mekanis terhadap beban tarik aksial, memastikan bahwa rasio reduksi pada *compound gear* mampu memitigasi fluktuasi kecepatan. Hasil analisis kuantitatif terhadap parameter-parameter tersebut seperti yang disajikan pada Tabel 2.

Berdasarkan hasil pengujian, konfigurasi *compound gear* terbukti secara efektif mampu mentransformasikan kecepatan sudut tinggi dari motor menjadi torsi mekanik yang signifikan melalui reduksi putaran. Hal ini memberikan daya tarik yang stabil untuk mengatasi gaya gesek (friksi) kinetik antara pelunakan material PET dengan dinding internal *heat block*. Penggunaan motor *stepper* memungkinkan pengendalian putaran *step* yang rigid, sehingga fenomena penurunan RPM akibat beban tarik (*load-induced deceleration*) yang umum terjadi pada motor DC konvensional dapat dieliminasi secara total. Implementasi fisik dari sistem ini pada prototipe mesin ditunjukkan pada Gambar 10.

Keandalan mekanik ini memiliki korelasi langsung terhadap efektivitas sistem kendali temperatur PID. Dengan terjaganya stabilitas laju penarikan, profil beban termal yang masuk ke zona pemanasan bersifat stasioner. Hal ini meminimalkan gangguan variabel (*load disturbance*) pada algoritma PID, sehingga osilasi temperatur dapat ditekan pada ambang batas presisi $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Tanpa stabilitas transmisi yang andal, ketidakteraturan laju aliran massa akan menyebabkan fluktuasi serapan panas laten pada material PET, yang berpotensi merusak konsistensi diameter *filament* hasil proses *pultrusion*.

Dalam kondisi operasional penuh, kecepatan 45 RPM diidentifikasi sebagai performa paling andal. Pada titik ini, motor memiliki momentum angular dan torsi dinamis yang cukup (2,89 Nm) untuk menjaga konsistensi tarikan tanpa mengalami *stalling* maupun getaran resonansi yang dapat mengganggu struktur material. Sinergi antara torsi mekanik yang kuat dan laju penarikan yang seragam menjadi fondasi utama dalam menjamin waktu tinggal (*residence time*) material yang konsisten di dalam *die*. Kondisi ini memastikan proses pelunakan dan transisi ke fase viskoelastik PET berlangsung secara homogen, menghasilkan aliran material yang stabil sebelum akhirnya melalui proses ekstrusi akhir pada *nozzle* untuk membentuk *filament* dengan presisi dimensi yang tinggi.



Gambar 10. Prototipe sistem transmisi *compound gear* pada mesin *pultrusion*

Tabel 2. Parameter operasional sistem transmisi motor *stepper*

No.	Speed	Kecepatan Input (rpm)	Kecepatan Output (rpm)	Torsi Awal (Nm)	Torsi Akhir (Nm)
1	Speed 01	15	0.71	0.408	8.67
2	Speed 02	30	1.41	0.204	4.33
3	Speed 03	45	2.12	0.136	2.89
4	Speed 04	60	2.82	0.102	2.17

Pengaruh Kecepatan Penarikan terhadap Kualitas Fisik *Filament*

Kualitas fisik *filament* PET yang dihasilkan sangat dipengaruhi oleh parameter diameter, morfologi permukaan, dan efisiensi waktu proses

yang ditentukan melalui tingkat kecepatan motor *stepper* (*Speed* 1–4). Berdasarkan pengujian pada suhu konstan 205°C, sinkronisasi antara laju penarikan mekanik dan laju pelunakan termal material menjadi faktor penentu utama kualitas akhir. Kecepatan penarikan ini merupakan parameter kritis karena secara langsung menentukan *residence time* material di dalam *die*. Data hasil pengujian yang melibatkan empat variasi kecepatan dirangkum dalam Tabel 3 dan divisualisasikan melalui profil grafis seperti yang ditunjukkan pada Gambar 11.

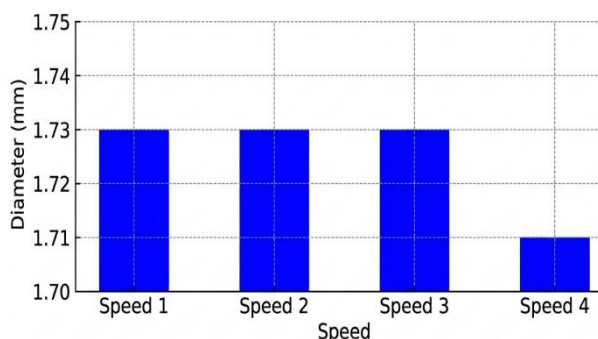
Hasil pengujian yang divisualisasikan pada Gambar 11(a) menunjukkan bahwa pada rentang kecepatan rendah hingga menengah (*Speed* 1–3), sistem mampu menghasilkan diameter *filament* yang sangat stabil dan seragam pada nilai 1,73 mm. Hal ini mengindikasikan adanya keseimbangan yang optimal antara proses pelelehan material, laju penarikan, dan proses pendinginan, sehingga material PET dapat mengalami solidifikasi secara optimal sebelum mengalami deformasi. Sebaliknya, pada kecepatan tinggi (*Speed* 4), terjadi penurunan diameter yang signifikan menjadi 1,71 mm. Fenomena ini disebabkan oleh ketidaksesuaian antara laju penarikan dan waktu pendinginan; material belum sepenuhnya mengeras (*set*) saat ditarik, sehingga memicu tegangan geser (*shear stress*) yang merusak akurasi dimensi.

Dari aspek morfologi permukaan seperti dirangkum pada Tabel 3, *filament* hasil *Speed* 1–3 menunjukkan kualitas visual yang baik dengan karakteristik permukaan halus, mengilap tanpa cacat, dan jernih seperti ditunjukkan pada Gambar 12. Namun, pada *Speed* 4, visual *filament* menjadi kurang baik yang ditandai dengan permukaan yang kasar, sebagai akibat dari deformasi termomekanik saat keluar dari *nozzle*. Meskipun *Speed* 4 menawarkan waktu proses paling cepat (20 menit per 780 mm sampel), kecepatan ini menurunkan kualitas total *filament* PET.

Berdasarkan analisis komprehensif terhadap parameter kualitas dan efisiensi waktu, kecepatan *Speed* 3 (45 RPM) diidentifikasi sebagai kondisi operasional paling optimal. Seperti terlihat pada Gambar 11(b), *Speed* 3 memberikan waktu konversi yang efisien sebesar 23 menit per satu botol PET, dengan tetap mempertahankan diameter jenuh pada 1,73 mm dan kualitas visual yang sangat baik. Secara keseluruhan, pengujian mekanis sederhana menunjukkan bahwa *filament* hasil kondisi optimum ini memiliki sifat lentur yang baik tanpa terjadi patah saat pengujian tekuk (*bending test*), sehingga memenuhi standar spesifikasi sebagai bahan baku pencetakan 3D.

Tabel 3. Pengujian dengan lebar pita PET 9 mm

Kecepatan Tarik	Suhu (°C)	Diameter Filament (mm)	Panjang (mm)	Massa (g)	Waktu (menit)	Visual	Keterangan
<i>Speed</i> 1	205	1.73	780	16	32	Baik	permukaan <i>filament</i> halus
<i>Speed</i> 2	205	1.73	780	16	27	Baik	permukaan <i>filament</i> halus
<i>Speed</i> 3	205	1.73	780	16	23	Baik	permukaan <i>filament</i> halus
<i>Speed</i> 4	205	1.71	780	16	20	Kurang Baik	permukaan <i>filament</i> kasar



(a)



(b)

Gambar 11. Grafik pengujian diameter terhadap variasi kecepatan (a), dan waktu terhadap kecepatan (b)



Gambar 12. Gulungan *filament* hasil Speed 3 (Kondisi Optimal) yang memperlihatkan konsistensi diameter, kejernihan tinggi, dan tidak adanya cacat permukaan (*sharkskin effect*).

Penentuan Kondisi Operasi Optimum

Penentuan kondisi operasi optimum merupakan tahap krusial untuk menjamin replikasi proses *pultrusion* yang stabil dan menghasilkan *filament* dengan standar kualitas industri. Berdasarkan integrasi data karakteristik termal pada dan stabilitas mekanik, penelitian ini menunjukkan bahwa kombinasi temperatur 205°C dan kecepatan penarikan 45 RPM (Speed 3) merupakan parameter operasional terbaik. Pemilihan temperatur 205°C didasarkan pada kebutuhan energi aktivasi yang tepat untuk mencapai transisi fase PET dari padat ke viskoelastik tanpa melewati ambang batas degradasi termal. Secara termodinamika, kondisi ini memastikan viskositas lelehan berada pada rentang yang memungkinkan aliran massa laminar di dalam *die*, sejalan dengan teori reologi polimer yang menyatakan bahwa kontrol suhu yang presisi sangat menentukan homogenitas struktur internal material (Putra et al., 2024).

Dari aspek mekanika penarikan, kecepatan 45 RPM memberikan profil *residence time* yang paling sinkron dengan laju difusi panas yang dihasilkan oleh *heat block*. Stabilitas ini didukung oleh sistem transmisi *compound gear* yang mampu menghasilkan torsi konstan sebesar 2,89 Nm. Menurut penelitian terkait, keseimbangan antara gaya tarik mekanik dan laju pelunakan termal merupakan fondasi dalam mencegah fenomena *melt fracture* yang sering merusak morfologi permukaan *filament* (Lantai et al., 2023). Pada kondisi optimum ini, *filament* tidak hanya mencapai presisi dimensi sebesar 1,73 mm, tetapi juga memiliki integritas struktural yang baik, yang ditunjukkan melalui ketahanan tekuk (*flexibility*) dan kejernihan

optik yang superior dibandingkan dengan variasi kecepatan lainnya.

Implementasi parameter optimum ini juga berdampak signifikan pada efisiensi produksi dengan waktu konversi rata-rata 23 menit per botol PET. Secara keseluruhan, sinergi antara kendali suhu PID yang presisi dan transmisi mekanik yang tereduksi secara tepat menciptakan suatu ekosistem manufaktur yang stabil. Kondisi operasi ini memastikan bahwa *filament* hasil daur ulang limbah botol PET memiliki karakteristik fisik yang setara dengan *filament* komersial, sehingga layak digunakan sebagai bahan baku pada teknologi *Fused Deposition Modeling* (FDM) (Woern et al., 2018)

KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan mesin pultrusi limbah botol PET yang mengintegrasikan sistem transmisi *compound gear* dengan rasio 21,25 dan kendali suhu berbasis PID. Hasil eksperimen menunjukkan bahwa kondisi operasi optimum dicapai pada temperatur 205°C dengan kecepatan penarikan 45 RPM, yang mampu menghasilkan *filament* dengan stabilitas diameter presisi pada 1,73 mm. Sinergi antara torsi mekanik sebesar 2,89 Nm dan *residence time* yang sinkron terbukti efektif menghasilkan karakteristik viskoelastik yang homogen, sehingga *filament* yang dihasilkan memiliki morfologi permukaan halus, jernih, dan memenuhi standar fleksibilitas bahan baku printer 3D FDM. Dengan efisiensi waktu konversi 23 menit per botol, teknologi ini menawarkan solusi manufaktur daur ulang yang produktif, di mana 63 botol PET dapat dikonversi menjadi 1 kg *filament* sepanjang 49,14 m, sekaligus memberikan kontribusi nyata terhadap peningkatan nilai ekonomi limbah plastik melalui pendekatan *distributed manufacturing*.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Sabagh, A. M., Yehia, F. Z., Eshaq, G., Rabie, A. M., & ElMetwally, A. E. 2016. Greener routes for recycling of polyethylene terephthalate. *Egyptian Journal of Petroleum*. 25(1): 53–64.
- Budiyantoro, C., Rochardjo, H. S. B., & Nugroho, G. 2021. Design, manufacture, and performance testing of extrusion–pultrusion machine for fiber-reinforced thermoplastic pellet production. *Machines*. 9(2): 1–17.
- Chacón, J. M., Caminero, M. A., García-Plaza, E., & Núñez, P. J. 2017. Additive

- manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection. *Materials and Design*. 124: 143–157.
- Ferreira, F., Fernandes, P., Correia, N., & Marques, A. T. 2021. Development of a pultrusion die for the production of thermoplastic composite filaments to be used in additive manufacture. *Journal of Composites Science*. 5(5): 1–14.
- Gopanna, A., Rajan, K. P., Thomas, S. P., & Chavali, M. 2019. Polyethylene and polypropylene matrix composites for biomedical applications. *Materials for Biomedical Engineering: Thermoset and Thermoplastic Polymers*. 175–216.
- Haq, R. H. A., Manshoor, B., Ghafir, M. F. A., Hassan, M. F., Bakar, S. A. S. A., Rahman, M. N. A., Aziz, I. A., & Sugianto, W. 2025. Mechanical Properties of Recycled PET/PC/MDI Composite Fabricated by 3D Printing. *Journal of Advanced Research in Applied Mechanics*. 133(1): 24–35.
- Hidayat, G., & Alvin Chaeruddin. 2019. Rancang Bangun Mesin Daur Ulang Limbah Botol Plastik HDPE Menjadi Gagang Pintu Kapasitas 1 kg/jam. *Seminar Nasional Sains Dan Teknologi 2019*. 16.
- Kristiawan, R. B., Imaduddin, F., Ariawan, D., Ubaidillah., & Arifin, Z. 2021. A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: Filament processing, materials, and printing parameters. *Open Engineering*. 11(1): 639–649.
- Lamtai, A., Elkoun, S., Robert, M., Mighri, F., & Diez, C. 2023. Mechanical Recycling of Thermoplastics: A Review of Key Issues. *Waste*. 1(4): 860–883.
- Minchenkov, K., Vedernikov, A., Safonov, A., & Akhatov, I. 2021. Thermoplastic Pultrusion: A Review. *Polymers*. 13(11): 1801.
- Morales Méndez, G., del Cerro Pérez, A., & del Cerro Velázquez, F. 2024. Prototype Pultrusion of Recycled Polyethylene Terephthalate Plastic Bottles into Filament for 3D Eco-Printing. *Sustainability*. 16(19).
- Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T. Q., & Hui, D. 2018. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*. 143: 172–196.
- Nikam, M., Pawar, P., Patil, A., Patil, A., Mokal, K., & Jadhav, S. 2024. Sustainable fabrication of 3D printing filament from recycled PET plastic. *Materials Today: Proceedings*. 103: 297–302.
- Putra, I. R., Bukhori, M. L., Prasetyo, A. B., Robbika, F., & Putra, B. T. 2024. Recycled PET Plastics Filament: Characteristic and Cost Opportunity. *Semesta Teknika*. 27(2): 148–158.
- Romberg, S. K., Islam, M. A., Hershey, C. J., DeVinney, M., Duty, C. E., Kunc, V., & Compton, B. G. 2021. Linking thermoset ink rheology to the stability of 3D-printed structures. *Additive Manufacturing*. 37.
- Straková, M., Hlaváčiková, S., Feranc, J., Suchánková, H., Kramárová, Z., Ďurfina, M., Omaníková, L., et al. 2026. Effects of Repeated Thermo-Mechanical Processing on the Degradation Behavior of Bottle-Grade PET Under Controlled Conditions. *Polymers*. 18(3).
- Taufik, M., Suryani Lubis, G., & Ivanto, M. 2023. Rancang Bangun Mesin Pultrusion Pembuat Filamen 3D Printing Berbasis Limbah Plastik Botol PET. *Jurnal Teknik Mesin*. 4(1).
- Tylman, I., & Dzierzek, K. 2020. Filament for a 3D Printer from Pet Bottles-Simple Machine. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*. 9(10): 1386–1392.
- Volk, M., Wong, J., Arreguin, S., & Ermanni, P. 2021. Pultrusion of large thermoplastic composite profiles up to Ø 40 mm from glass-fibre/PET commingled yarns. *Composites Part B: Engineering*. 227.
- Volk, M., Yuksel, O., Baran, I., Hattel, J. H., Spangenberg, J., & Sandberg, M. 2022. Cost-efficient, automated, and sustainable composite profile manufacture: A review of the state of the art, innovations, and future of pultrusion technologies. *Composites Part B: Engineering*. 246: 110135.
- Woern, A. L., McCaslin, J. R., Pringle, A. M., & Pearce, J. M. 2018. RepRapable Recyclebot: Open source 3-D printable extruder for converting plastic to 3-D printing filament. *HardwareX*. 4: e00026.