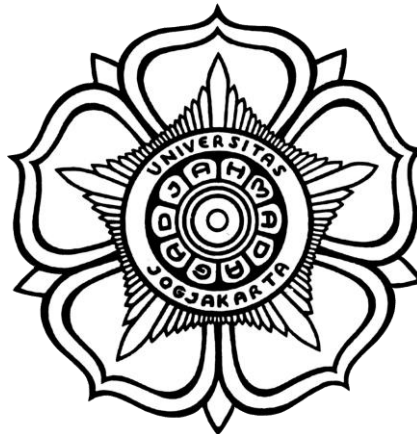


**RANCANG BANGUN SISTEM *PULTRUSION*
TERINTEGRASI ELEMEN PEMANAS
BERBASIS LIMBAH PLASTIK *POLYETHYLENE TEREPHTHALATE***

SKRIPSI

untuk memenuhi sebagian persyaratan
untuk memperoleh derajat Sarjana
Program Studi Teknik Fisika



Diajukan oleh

ARISTO BIMA

20/463268/TK/51260

Kepada

DEPARTEMEN TEKNIK NUKLIR DAN TEKNIK FISIKA

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS GADJAH MADA

YOGYAKARTA

2024



PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Aristo Bima
NIM : 20/463268/TK/51260
Tahun terdaftar : 2020
Program Studi : Teknik Fisika
Fakultas : Teknik

menyatakan bahwa dokumen ilmiah skripsi ini tidak terdapat bagian dari karya ilmiah lain yang telah diajukan untuk memperoleh gelar akademik di suatu lembaga Pendidikan Tinggi, dan juga tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang/lembaga lain, kecuali yang secara tertulis disitasi dalam dokumen ini dan disebutkan sumbernya secara lengkap dalam daftar pustaka.

Dengan demikian saya menyatakan bahwa dokumen ilmiah ini bebas dari unsur-unsur plagiasi dan apabila dokumen ilmiah Skripsi ini di kemudian hari terbukti merupakan plagiasi dari hasil karya penulis lain dan/atau dengan sengaja mengajukan karya atau pendapat yang merupakan hasil karya penulis lain, maka penulis bersedia menerima sanksi akademik dan/atau sanksi hukum yang berlaku.

Yogyakarta 28-06-2024



Aristo Bima

NIM. 20/463268/TK/51260



HALAMAN PENGESAHAN

SKRIPSI

**Rancang Bangun Sistem *Pultrusion*
Terintegrasi Elemen Pemanas
Berbasis Limbah Plastik *Polyethylene Terephthalate***

Nama Mahasiswa : Aristo Bima

Nomor Mahasiswa : 20/463268/TK/51260

Pembimbing Utama : Dr. Nur Abdillah Siddiq, S.T.

Pembimbing Pendamping : Dr. Dwi Joko Suroso, S.T., M.Eng.

Skripsi ini telah dipertahankan di depan Tim Penguji
pada tanggal 19 Juni 2024

Ketua Sidang : Dr. Nur Abdillah Siddiq, S.T.

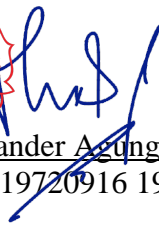
Penguji Utama : Dr. Ir. Haryono Budi Santosa, M.Sc.

Anggota Penguji : Dr. Andang Widi Harto, M.T., IPU

Skripsi ini telah diterima dan dinyatakan memenuhi
syarat kelulusan pada tanggal 19 Juni 2024

Ketua Departemen Teknik Nuklir dan Teknik Fisika
Fakultas Teknik UGM




Dr. Ir. Alexander Agung, S.T., M.Sc., IPU
NIP. 19720916 199803 1002



UNIVERSITAS
GADJAH MADA

**RANCANG BANGUN SISTEM PULTRUSION TERINTEGRASI ELEMEN PEMANAS BERBASIS LIMBAH
PLASTIK POLYETHYLENE
TEREPHTHALATE**

ARISTO BIMA, Dr. Ir. Nur Abdillah Siddiq, S.T., IPP. ; Dr. Dwi Joko Suroso, S.T., M.Eng.

Universitas Gadjah Mada, 2024 | Diunduh dari <http://etd.repository.ugm.ac.id/>



... Karya ini kupersembahkan untuk kemajuan ilmu pengetahuan umat manusia ...



“What phrase make you happy to hears from other?”

“My three favourites are : “

“Thank you” ,

“You did your best” ,

and “I like/love you”



KATA PENGANTAR

Pertama-tama, penulis menyampaikan puja dan puji syukur kepada Allah SWT atas rahmat, taufik, dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan judul “Rancang Bangun Sistem *Pultrusion* Terintegrasi Elemen Pemanas Berbasis Limbah Plastik *Polyethylene Terephthalate*”. Skripsi ini diajukan sebagai syarat kelulusan dari program studi S-1 Teknik Fisika, Departemen Teknik Nuklir dan Teknik Fisika, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini tidak mungkin terselesaikan tanpa adanya dukungan, bantuan, bimbingan, dan nasehat dari berbagai pihak selama penyusunan skripsi ini. Pada kesempatan ini penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Orang Tua tercinta, Bapak Bambang Susilo yang selalu mendoakan dan memberikan semangat kepada penulis dan Almarhumah Ibu Fitri Septariani Astuti yang melahirkan penulis dan penulis bersyukur telah dilahirkan, dibesarkan dan didik oleh mereka.
2. Bapak Dr. Nur Abdillah Siddiq, S.T., selaku dosen pembimbing utama yang telah membimbing, memotivasi, dan memberikan masukan kepada penulis.
3. Bapak Thomas Oka Pratama, S.T., M.Eng., selaku pembimbing yang telah membimbing, memotivasi dan memberikan masukan kepada penulis.
4. Bapak Dr. Dwi Joko Suroso, S.T., M.Eng., selaku dosen pembimbing pendamping yang telah membimbing, memotivasi, dan memberikan masukan kepada penulis.
5. Seluruh dosen dan tenaga kependidikan di Departemen Teknik Nuklir dan Teknik Fisika, Universitas Gadjah Mada yang telah banyak membagi ilmu dan membimbing penulis selama masa perkuliahan.
6. Almarhumah Athaya Fairuz selaku adik penulis tercinta.
7. Mama Ika Dian Swanasari selaku ibu tiri dan keluarga tercinta yang selalu mendoakan dan semangat kepada penulis.



8. Rekan-rekan Teknik Fisika Angkatan 2020 yang banyak membantu dalam penulisan skripsi ini.
9. Sahabat dan teman-teman yang memberikan semangat dalam proses pengerjaan skripsi.

Akhir kata, penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada semua pihak yang turut mendukung penulis, meskipun tidak dapat dijabarkan satu per satu. Kesempatan ini digunakan untuk mengakui bahwa penelitian ini memiliki berbagai kekurangan yang penulis sadari. Oleh karena itu, segala saran dan kritik yang diberikan dianggap sangat berharga bagi penulis guna meningkatkan kualitas penelitian di masa mendatang. Semoga hasil penelitian ini dapat memberikan kontribusi yang signifikan pada perkembangan riset di Indonesia. Terima kasih atas dukungan dan kerjasama yang telah diberikan.

Yogyakarta, 10 Juni 2024

Penulis



DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME.....	ii
HALAMHALAMAN.....	v
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR TABEL.....	xi
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR LAMBANG DAN SINGKATAN	xiv
INTISARI.....	xvii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
I.1. Latar Belakang.....	1
I.2. Perumusan Masalah	3
I.2.1. Batasan Masalah	4
I.3. Tujuan Penelitian	4
I.4. Manfaat Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
II.1. Mesin <i>Recycle</i> Botol Plastik menjadi <i>Filament</i>	6
II.2. Uji Material <i>3D Printing</i>	10
BAB III DASAR TEORI	16
III.1. Mesin <i>Pultrusion</i>	16
III.2. Elemen Pemanas	17
III.3. <i>Power Supplay AC to DC Converter</i>	17
III.4. Instrumentasi	20
III.5. Motor Stepper.....	21
III.6. Relay	24
III.7. PET.....	24
III.8. Teknologi <i>3D Printing</i>	25
III.9. <i>Additive Manufacturing</i>	26
III.10. ASTM D638.....	26
III.11. Kekuatan Tarik (<i>Tensile Strength</i>).....	27



III.12. Pengukuran Daya Listrik	31
BAB IV PELAKSANAAN PENELITIAN	32
IV.1. Alat dan Bahan Penelitian.....	32
IV.2. Tata Laksana Penelitian	41
IV.3. Prosedur Pembuatan Sistem <i>Pultrusion</i> Terintegrasi Elemen Pemanas Berbasis Limbah Plastik Polyethylene Terephthalate	42
IV.3.1. Prosedur Desain Sistem <i>Pultrusion</i> Terintegrasi Elemen Pemanas Berbasis Limbah Plastik Polyethylene Terephthalate	42
IV.3.2. Prosedur Print 3D Komponen yang diperlukan	43
IV.3.3. Prosedur Pembuatan <i>Filament</i>	44
IV.3.4. Prosedur Menyiapkan <i>Speciment</i>	44
IV.3.5. Prosedur Melakukan Uji Tarik	47
IV.3.6. Prosedur Melakukan Pengukuran Daya Mesin <i>Pultrusion</i>	49
IV.4. Rencana Analisis Hasil Penelitian	49
BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN.....	51
V.1. Hasil Rancang Bangun Sistem <i>Pultrusion</i> Terintegrasi Elemen Pemanas Berbasis Limbah Plastik Polyethylene Terephthalate	51
V.1.1. Hasil Pembuatan Elemen Pemanas	52
V.1.2. Hasil Pembuatan Mesin <i>Pultrusion</i>	54
V.1.3. Hasil Pembuatan <i>Filament</i>	58
V.1.4. Hasil Pembuatan <i>Speciment</i> Uji tarik.....	62
V.2. Analisis Hasil Uji Tarik.....	62
V.3. Analisis Hasil Pengukuran Penggunaan Energi	70
BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN	76
VI.1. Kesimpulan	76
VI.2. Saran	76
DAFTAR PUSTAKA	77
LAMPIRAN	80
LAMPIRAN A	81
Video Demonstrasi pada Mesin <i>Pultrusion</i> yang di buat	81



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Penelitian <i>recycle</i> botol plastik menjadi <i>filament</i> terdahulu	7
Tabel 2.2. Hasil uji tarik ASTM D 638 <i>type V</i> penelitian lainnya.....	14
Tabel 4.1. Alat penelitian.....	32
Tabel 4.2. Sistem operasi yang digunakan.....	34
Tabel 4.3. Perangkat lunak yang digunakan	35
Tabel 4.4. Bahan penelitian.....	35
Tabel 5.1. Massa <i>filament</i>	61
Tabel 5.2. Hasil uji tarik.....	63
Tabel 5.3. Rata-Rata hasil uji tarik setiap variasi <i>speciment</i>	63
Tabel 5.4. Perbandingan dengan <i>filament</i> jenis lainnya.....	69
Tabel 5.5. Penggunaan energi elemen pemanas menuju set point.....	71
Tabel 5.6. Penggunaan energi elemen pemanas 1 jam setelah <i>set point</i>	71
Tabel 5.7. Penggunaan energi <i>pultrusion</i> menuju <i>set point</i>	72
Tabel 5.8. Penggunaan energi <i>pultrusion</i> 1 jam setelah <i>set point</i>	72



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Hasil uji tarik dari <i>filament</i> PC , PMMA , PEEK oleh Avila dkk. ...	11
Gambar 2.2. Hasil uji tarik dari <i>filament</i> PLA oleh Vidaskis dkk.	12
Gambar 2.3. Hasil uji tarik dari <i>filament</i> ABS oleh Vidaskis dkk.	12
Gambar 2.4. Hasil uji tarik dari <i>filament</i> PETG oleh Vidaskis dkk.	13
Gambar 2.5. Hasil uji tarik dari <i>filament</i> PA6 oleh Vidaskis dkk.	13
Gambar 2.6. Hasil uji tarik dari <i>filament</i> PP oleh Vidaskis dkk.	14
Gambar 3.1. Mesin <i>Pultrusion</i> dalam industri	16
Gambar 3.2. <i>Power Supply</i>	18
Gambar 3.3. Rangkaian di dalam <i>power supply</i>	18
Gambar 3.4. Gelombang pada <i>Smoothing</i>	19
Gambar 3.5. <i>Elemens of a measuring system</i>	20
Gambar 3.6. <i>Elemens of a simple closed-loop control system</i>	21
Gambar 3.7. <i>Connection Bipolar Stepper</i>	22
Gambar 3.8. <i>Connection Unipolar Stepper</i>	23
Gambar 3.9. <i>Wiring diagram</i> pada <i>stepper</i>	23
Gambar 3.10. <i>Relay</i>	24
Gambar 3.11. Penerapan <i>additive manufacturing</i> pada <i>3D print</i> cangkir	26
Gambar 3.12. Ukuran Standar ASTM D 638	27
Gambar 3.13. <i>Universal Testing Machine</i> (UTM).....	28
Gambar 3.14. Kurva uji tarik tegangan regangan	29
Gambar 4.1. Alur penelitian.....	41
Gambar 4.2. Desain komponen di autocad	42
Gambar 4.3. Gambar Desain 3D di Fusion 360	43
Gambar 4.4. Menyiapkan Creality	43
Gambar 4.5. <i>Setting</i> Creality	44
Gambar 4.6. Desain ASTM D 638 Tipe V	45
Gambar 4.7. <i>Clicer Speciment</i>	46
Gambar 4.8. Proses <i>3D Printing speciment</i>	46
Gambar 4.9. <i>Spesiment standard</i> ASTM 638 D tipe V	47
Gambar 4.10. Memasukkan <i>speciment</i> ke mesin uji tarik	47
Gambar 4.11. <i>Speciment</i> yang putus setelah uji tarik	48
Gambar 4.12. Hasil uji tarik pada komputer	48
Gambar 4.13. Pengukuran daya yang digunakan mesin <i>pultrusion</i>	49
Gambar 5.1. Skema pembuatan <i>filament</i>	51
Gambar 5.2. (a) Elemen pemanas dan (b) <i>Wiring</i> elemen pemanas	52
Gambar 5.3. Bagian dalam elemen pemanas	53
Gambar 5.4. Perbedaan botol yang dihaluskan menggunakan elemen pemanas (atas) dengan tidak di haluskan (bawah).....	54
Gambar 5.5. <i>Mesin pultrusion</i>	55
Gambar 5.6. Pemotong botol plastik.....	56



Gambar 5.7. Penampungan <i>strip</i>	57
Gambar 5.8. Struktur mesin <i>pultrusion</i>	58
Gambar 5.9. <i>Strip</i> botol PET.....	59
Gambar 5.10. Pembersih <i>strip</i> botol	59
Gambar 5.11. Pemrosesan <i>filament</i> pada mesin <i>pultrusion</i>	60
Gambar 5.12. <i>Filament</i> botol PET	60
Gambar 5.13. Pengukuran massa dari <i>filament</i> (pengukuran massa dikurangi massa solasi)	61
Gambar 5.14. <i>Speciment</i> ASTM D638 yang belum dibersihkan	62
Gambar 5.15. Grafik <i>Tensile Strength Vs Strain</i>	66
Gambar 5.16. Grafik uji tarik <i>speciment</i> temperatur 175°C.....	66
Gambar 5.17. Grafik uji tarik <i>speciment</i> temperatur 185°C.....	67
Gambar 5.18. Grafik uji tarik <i>speciment</i> temperatur 195°C.....	68
Gambar 5.19. Grafik konsumsi energi listrik.....	73



DAFTAR LAMBANG DAN SINGKATAN

Lambang Romawi

<i>Lambang</i>	<i>Kuantitas</i>	<i>Satuan</i>
F	Gaya	Kg . m/s ² (N)
A	Luas Penampang	m ²
L	Panjang Akhir	m
L ₀	Panjang Awal	m
E	Modulus elastisitas	N/m ²
P	Daya	W
V	Tegangan	V
I	Arus	I

Lambang Yunani

<i>Lambang</i>	<i>Kuantitas</i>	<i>Satuan</i>
σ	Tegangan	N/m ²
ε	Regangan	-
θ	Sudut Fase	Derajat

Singkatan

3D	<i>3 Dimensi</i>
3R	<i>Reduce, Reuse, dan Recycle</i>
ABS	<i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i>



AC	<i>Alternating Current</i>
AM	<i>Additive Manufacturing</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BPET	<i>Botol Polyethylene Terephthalate</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
DC	<i>Direct Current</i>
DMT	<i>Dimetil Tereftalat integreted circuit</i>
IC	<i>Integreted circuit</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MEG	<i>Monoetilen Glikol</i>
PA6	<i>Polyamide 6</i>
PC	<i>Polycarbonate</i>
PE	<i>Polietilena</i>
PEEK	<i>Poly(aryl-ether-ether-ketone)</i>
PET	<i>Polyethylene Terephthalate</i>
PET-G	<i>Polyethylene Terephthalate Glycol-modified</i>
PLA	<i>Polylactic Acid</i>
PMMA	<i>Polymethylmethacrylate</i>
PP	<i>Polycarbonate</i>
PS	<i>Polistirena</i>
PTA	<i>Purified Terephthalic Acid</i>
PUR	<i>Poliuretan</i>



PVC	<i>Polivinilklorida</i>
RP	<i>Rapid Prototyping</i>
RPM	<i>Rotations Per Minute</i>
UTM	<i>Universal Testing Machine</i>



Rancang Bangun Sistem *Pultrusion*
Terintegrasi Elemen Pemanas
Berbasis Limbah Plastik *Polyethylene Terephthalate*

Aristo Bima

20/463268/TK/51260

Diajukan kepada Departemen Teknik Nuklir dan Teknik Fisika Fakultas Teknik
Universitas Gadjah Mada pada tanggal 19 Juni 2024
untuk memenuhi sebagian persyaratan untuk memperoleh derajat
Sarjana Program Studi Teknik Fisika

INTISARI

3D printing memungkinkan pembuatan objek fisik dari model digital dengan menumpuk lapisan material. Proses *3D printing* sangat bergantung dengan *filament* karena kualitas *3D printing* bergantung pada jenis dan kualitas *filament*. Penelitian mendaur ulang botol plastik PET menjadi filament bertujuan mengurangi limbah, menyediakan bahan baku murah dan melimpah yang menghasilkan *filament* berkualitas. Penelitian ini juga mengatasi kekurangan pada metode daur botol PET ulang sebelumnya.

Perancangan sistem daur ulang plastik dengan terintegrasi elemen pemanas melibatkan desain dan konstruksi sistem *pultrusion* yang mencakup integrasi elemen pemanas menggunakan limbah plastik PET. Pengaruh temperatur *pultrusion* terhadap kekuatan tarik bahan PET melibatkan eksperimen untuk memahami bagaimana variasi temperatur dalam proses *pultrusion* memengaruhi kekuatan tarik dari bahan PET. Konsumsi daya listrik yang digunakan oleh sistem *pultrusion* yang dibuat akan dianalisis.

Telah dikembangkan sistem *pultrusion* yang mengintegrasikan elemen pemanas menggunakan limbah plastik PET. Temperatur pada pembuatan *filament* memengaruhi kekuatannya, dengan nilai tertinggi mencapai 67,66 MPa pada 195°C disusul 185°C (62,075 Mpa) dan terendah pada 175°C (58,635 MPa). Konsumsi energi rata-rata elemen pemanas adalah 0,203 kWh untuk mencapai *set point*, dan 0,509 kWh setelah satu jam. Mesin *pultrusion* mengkonsumsi 0,00233 kWh hingga *set point*, dan 0,0257 kWh setelah satu jam.

Kata kunci: Uji Tarik , *Polyethylene Terephthalate* , *Filament 3D Printing*, *Daur Ulang Plastik*

Pembimbing Utama : Dr. Nur Abdillah Siddiq, S.T

Pembimbing Pendamping : Dr. Dwi Joko Suroso, S.T., M.Eng.



Design of Heating Element Integrated Pultrusion System Based on Polyethylene Terephthalate Plastic Waste

Aristo Bima

20/463268/TK/51260

Submitted to the Departement of Nuclear Engineering and Engineering Physics
Faculty of Engineering Universitas Gadjah Mada on 19 June 2024
in partial fulfillment of the requirement for the Degree of
Bachelor of Engineering in Engineering Physics

ABSTRACT

3D printing allows for the creation of physical objects from digital models by stacking layers of material. The 3D printing process heavily relies on filament as the quality of 3D printing depends on the type and quality of filament used. Research on recycling PET plastic bottles into filament aims to reduce waste, provide abundant and affordable raw materials that yield high-quality filament. This research also addresses shortcomings in previous methods of PET bottle recycling.

The design of a plastic recycling system with integrated heating elements involves designing and constructing a pultrusion system that includes heating element integration using PET plastic waste. The effect of pultrusion temperature on the tensile strength of PET material involves experiments to understand how temperature variations in the pultrusion process affect the tensile strength of PET material. The electrical power consumption used by the developed pultrusion system is also analyzed.

A pultrusion system integrating heating elements using PET plastic waste has been developed. The temperature during filament production affects its tensile strength, with the highest value reaching 67.66 MPa at 195°C, followed by 185°C (62.075 MPa) and the lowest at 175°C (58.635 MPa). The average energy consumption of the heating element is 0.203 kWh to reach the set point, and 0.509 kWh after one hour. The pultrusion machine consumes 0.00233 kWh to reach the set point and 0.0257 kWh after one hour.

Keywords: *Tensile Testing, Polyethylene Terephthalate, 3D Printing Filament, Plastic Recycling*

Supervisor : Dr. Nur Abdillah Siddiq, S.T

Co-supervisor : Dr. Dwi Joko Suroso, S.T., M.Eng.



BAB I

PENDAHULUAN

I.1. Latar Belakang

Percetakan 3 Dimensi atau *3D printing* melibatkan pengembangan teknologi yang telah mengalami pertumbuhan pesat dalam beberapa dekade terakhir [1]. Teknologi ini memungkinkan pembuatan objek fisik dari model digital dengan cara menumpuk lapisan demi lapisan material berdasarkan data komputer yang dikendalikan secara digital [2]. Dalam melakukan *3D printing*, *filament* digunakan sebagai bahan melakukan percetakan. *Filament* memainkan peran yang sangat penting karena kualitas hasil akhir dari cetakan 3D sangat tergantung pada jenis dan kualitas *filament* yang digunakan [3].

Seiring dengan meningkatnya penggunaan teknologi *3D printing*, kebutuhan akan *filament* berkualitas tinggi juga semakin meningkat. *Filament* dapat terbuat dari berbagai bahan seperti PLA (*Polylactic Acid*), ABS (*Acrylonitrile Butadiene Styrene*), PETG (*Polyethylene Terephthalate Glycol-modified*), dan komposit lainnya, masing-masing memiliki karakteristik unik yang membuatnya cocok untuk aplikasi tertentu [4]. Tantangan utama dalam industri ini adalah menemukan cara untuk memproduksi *filament* yang tidak hanya memenuhi standar kualitas tetapi juga ramah lingkungan dan ekonomis.

Sebagai upaya untuk memenuhi tantangan ini, berbagai penelitian telah dilakukan untuk mengembangkan metode daur ulang material. Salah satu pendekatan yang menjanjikan adalah mendaur ulang botol plastik PET (*Polyethylene Terephthalate*) menjadi *filament* untuk *3D print* [5]. PET adalah bahan yang umum digunakan dalam botol plastik dan memiliki sifat yang cocok untuk digunakan dalam pencetakan 3D setelah didaur ulang. Penggunaan kembali material ini tidak hanya membantu mengurangi limbah plastik tetapi juga menyediakan sumber bahan baku yang murah dan melimpah.

Penelitian mesin untuk mendaur ulang botol plastik PET menjadi *filament* bukan penelitian pertama kali. Saat ini, telah ada beberapa peneliti yang telah



Kualitas *filament* dari botol PET perlu untuk ditingkatkan. Untuk meningkatkan kualitas *filament* dari botol PET, dilakukan variasi temperatur *nozzle* pada *heating block extruder* untuk melelehkan botol plastik menjadi *filament* pada pembuatan *filament*. Hal ini dilakukan untuk melihat kualitas *filament* dari botol plastik PET dengan variasi perbedaan temperatur agar ditemukan temperatur yang tepat untuk mendapatkan kualitas *filament* terbaik. *Filament* yang berkualitas baik cenderung menghasilkan cetakan yang lebih kuat dan tahan lama. Kualitas dari *filament* yang dibuat dapat diketahui dengan cara melakukan uji coba menggunakan metode pengujian tarik bahan [11].

Pengukuran energi listrik yang digunakan pada mesin pultrusion dilakukan dengan memisahkan pengukuran energi pada mesin pultrusion dan elemen pemanas. Pemisahan pengukuran ini dilakukan untuk memisahkan penggunaan apabila hanya digunakan mesin pultrusi saja atau hanya elemen pemanas saja. Dengan diketahuinya konsumsi energi yang digunakan maka akan diketahui biaya listrik yang digunakan. Saat ini pada maret 2024 di Indonesia harga listrik telah mencapai 1444,70/ kWh untuk batas daya 1300VA [12]. Penelitian terhadap konsumsi energi listrik dalam sistem *pultrusion* juga relevan dengan tantangan global dalam mencapai keberlanjutan industri. Dengan menganalisis dan mengoptimalkan penggunaan energi dalam proses *pultrusion*, kita dapat bergerak menuju praktik manufaktur yang lebih ramah lingkungan dan ekonomis.

Dari latar belakang yang ada diperlukan rancang bangun sistem *pultrusion* yang terintegrasi elemen pemanas yang dapat mengubah botol plastik PET menjadi *filament* dengan kualitas uji tarik yang dapat bersaing dengan penggunaan *filament* lainnya yang beredar di pasaran dengan konsumsi energi listrik yang rendah.

I.2. Perumusan Masalah

Perumusan masalah dari penelitian ini antara lain::

1. Bagaimana merancang bangun sistem *pultrusion* yang terintegrasi elemen pemanas?



2. Bagaimana pengaruh temperatur *pultrusion* terhadap kekuatan tarik bahan PET?
3. Berapa konsumsi energi listrik dari sistem *pultrusion*?

I.2.1. Batasan Masalah

Berikut batasan masalah yang digunakan dalam penelitian ini:

1. Temperatur penelitian dilaksanakan di temperatur ruang
2. Analisis terbatas pada botol plastik PET
3. Variabel penelitian hanya terbatas pada temperatur *pultrusion*
4. Spesimen uji yang digunakan adalah ASTM D638 Type V
5. Jenis 3D *printing* yang digunakan adalah Ender V.3

I.3. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian antara lain:

1. Merancang bangun sistem *pultrusion* yang terintegrasi elemen pemanas.
2. Mengetahui pengaruh temperatur *pultrusion* terhadap kekuatan tarik bahan PET.
3. Mengetahui konsumsi energi listrik dari sistem *pultrusion*.

I.4. Manfaat Penelitian

Manfaat untuk masyarakat yang didapatkan pada penelitian yaitu:

1. Meningkatkan harga jual botol plastik dengan mengolah botol plastik menjadi *filament*.
2. Mengurangi pencemaran lingkungan akibat sampah botol plastik.

Manfaat untuk industri yang didapatkan pada penelitian yaitu:



1. Membuka jalan bagi inovasi dalam industri daur ulang plastik, menciptakan potensi pasar baru untuk limbah plastik.

Manfaat untuk akademik yang didapatkan pada penelitian yaitu :

1. Mendapatkan sistem *pultrusion* yang terintegrasi elemen pemanas.
2. Riset ini memberikan pemahaman mendalam tentang karakteristik kekuatan tarik dari *filament* yang dihasilkan.
3. Mengetahui pengaruh temperatur *pultrusion* terhadap kekuatan tarik bahan PET



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

II.1. Mesin *Recycle* Botol Plastik menjadi *Filament*

Reduce, *Reuse*, dan *Recycle* atau 3R merupakan tiga prinsip utama dalam kampanye untuk mengurangi dampak lingkungan dan mengelola sumber daya secara lebih berkelanjutan. *Recycle*, atau daur ulang, adalah proses mengambil bahan bekas atau limbah dan mengubahnya menjadi produk baru. Daur ulang botol plastik menjadi *filament* merupakan salah satu solusi untuk menyelesaikan permasalahan global mengenai banyaknya sampah rumah tangga dan mengurangi kebutuhan akan bahan baku plastik baru [13].

Penelitian untuk *merecycle* botol plastik menjadi *filament* sudah pernah dilakukan. Dari penelitian-penelitian yang ada digunakan 2 cara yang berbeda, yaitu *extrusion* dan *pultrusion*. Pada *extrusion* plastik PET, bahan baku berupa plastik yang telah dihancurkan menjadi biji plastik. Mekanisme dasar yang terlibat dalam proses ini melibatkan sekrup yang mengangkat biji plastik mentah dari corong melalui pipa logam pemanas di mana plastik meleleh. Biji plastik mentah disuplai ke sekrup dari corong dengan bantuan gravitasi. Kemudian plastik yang meleleh dipaksa melewati pipa dengan bantuan *nozzel* di ujung pipa untuk membentuk *filament*. Plastik yang diekstrusi yang ditarik dari *nozzel* menentukan diameter akhir *filament* yang ditarik dari *nozzel* [14].

Berbeda dengan mesin *extrusion*, pada *pultrusion* plastik PET dipotong terlebih dahulu dan dibuat menjadi strip. *Strip* ini kemudian dilewatkan melalui *nozzle* yang dipanaskan dan ditarik sehingga memanjang dan berbentuk *filament*. Pemilihan penggunaan metode *pultrusion* digunakan dalam proses pembuatan *filament* ini karena menghasilkan diameter *filament* yang seragam dibanding menggunakan metode *ekstruksi* [15].

Penelitian mengenai *recycle* botol plastik menggunakan *pultrusion* menjadi *filament* sudah pernah dilakukan sebelumnya. Beberapa peneliti mengembangkan



berbagai cara untuk membuat mesin *pultrusion*. Dalam *pultrusion* ada berbagai variable yang dapat mempengaruhi hasil, termasuk kecepatan tarikan dan temperatur *ekstruder* [16].

Tylman dan Dzierżek (2020) membuat mesin *pultrusion* untuk mengubah botol plastik PET menjadi *filament* [6]. Kontruksi pembuatannya dibuat 80% dari hasil *3D printing*. Pada penelitian ini memotong botol plastik manual menjadi *strip* sepanjang 10 mm. Setelah itu, ia memanaskan *nozzle* dengan temperatur 220 °C dan memasukkan *strip* tersebut melalui *nozzle* untuk ditarik menggunakan motor. Kecepatan yang digunakan peneliti ini adalah 0.5-3 RPM (*Revolution per minute*). Sedangkan *nozzle* yang digunakan berdiameter 1,5 mm.

Pada penelitian oleh Taufik dkk. (2023) membuat mesin *pultrusion* dengan botol PET [5]. Ia memotong botol plastik secara manual. Lubang *nozzle* yang Taufik buat berdiameter 1,6 mm dengan temperatur *nozzle* 205 °C dan kecepatan motor 30 RPM. Hasil penelitian yang ia buat menghasilkan *filament* dengan diameter 1,72 mm. Selain itu terdapat juga beberapa penelitian lainnya yang ditunjukkan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Penelitian *recycle* botol plastik menjadi *filament* terdahulu

Referensi	Jenis Plastik dan Test yang Dilakukan	Karakteristik <i>Filament</i>	Keterangan
Filament for a 3D Printer from Pet Bottles Simple Machine (Tylman & Dzierżek, 2020) [6]	Botol <i>polyethylene terephthalate</i> (PET) Dilakukan: <i>Tensile Test</i>	PET-G (<i>Polyethylene Terephthalate Glycol-modified</i>) Et (Young's modulus): 205 MPa σ_Y (<i>yield stress</i>) : 42,1 MPa σ_M (<i>Maximum stress</i>) :42,1 MPa ϵ_M (<i>Maximum</i>	Terdapat <i>control panel Heating Block</i> Terdapat <i>Gear transmission</i> Tidak dilengkapi pisau pemotongan



		<p><i>strain</i>) 5,8% σ_B (<i>Fracture stress</i>) : 8,39 MPa ϵ_B (<i>Fracture strain</i>) : 9,3%</p> <p>PLA <i>(Polylactic Acid)</i> E_t : 267 MPa, σ_Y: 44,1 MPa σ_M : 44,1 Mpa, ϵ_M : 4,5 % σ_B : 16, 5 MPa, ϵ_B :5,8%</p> <p>ABS <i>(Acrylonitrile Butadiene Styrene)</i> E_t : 200 MPa, σ_Y: 32,0 MPa σ_M : 32,0 Mpa, ϵ_M : 5,2% σ_B : 11,2 MPa, ϵ_B : 6,2%</p> <p>BPET <i>(Bottle Polyethylene Terephthalate)</i> E_t : 133 MPa σ_Y : - σ_M : 26,2 MPa' ϵ_M : 5,4 % σ_B : 10,3 MPa ϵ_B : 5,5 %</p>	<p>Tidak terdapat elemen pemanas pada botol</p> <p>Terdapat penampungan <i>strip</i> botol</p> <p>Tidak terdapat pembersih <i>strip</i> botol</p>
<p>Rancang Bangun Mesin Pultrusion Pembuat Filament 3D Printing Berbasis Limbah Plastik Botol PET (Taufik dkk., 2023) [5]</p>	<p>Botol <i>polyethylene terephthalate</i> (PET)</p> <p>Dilakukan: Pengukuran diameter</p>	<p>diameter : 1.72 mm</p>	<p>Terdapat <i>control panel Heating Block</i></p> <p>Terdapat <i>Gear transmission</i></p> <p>Dilengkapi pisau pemotongan tetapi terpisah</p>



			<p>Terdapat pemampungan <i>strip</i> botol</p> <p>Tidak terdapat elemen pemanas pada botol</p> <p>Tidak terdapat pembersih <i>strip</i> botol</p>
Construction Of Plastik Waste Extruding Machine To Produce Filaments Of 3D Printing Machine (Luthfi dkk.,2021) [7]	<p>Botol polyethylene terephthalate (PET) dan cup polypropylene (PP)</p> <p>Dilakukan <i>Test</i> : Kecepatan manufaktur <i>filament</i></p>	<p>Produksi plastik <i>cup</i> polypropylene (PP) : 83,11 gram/jam</p> <p>Produksi kombinasi botol <i>polyethylene terephthalate</i> (PET) dan <i>Cup polypropylene</i> (PP) : 179.84 gram/jam</p> <p>Diameter produk 1.75mm ± 0.25 mm</p>	Mesin yang digunakan merupakan mesin <i>extruding</i>
Design and Fabrication of PET Filament Making Machine (Dhopte dkk., 2022) [8]	<p>Botol polyethylene terephthalate (PET)</p> <p>belum dilakukan test</p>	-	<p>Dilengkapi pemotong botol</p> <p>Terdapat pengatur temperatur</p> <p>Tidak terdapat penampungan <i>strip</i> botol</p> <p>Tidak terdapat elemen pemanas pada botol</p> <p>Tidak terdapat pembersih <i>strip</i></p>
Rancang Bangun Sistem <i>Pultrusion</i> Terintegrasi Elemen	Botol polyethylene terephthalate (PET)	<p>Fmax (N)</p> <p><i>Tensile Strength</i> (Mpa)</p>	<p>Dilengkapi elemen pemanas</p> <p>Dilengkapi pemotong botol</p>



Pemanas Berbasis Limbah Plastik <i>Polyethylene Terephthalate</i> (Penelitian Ini)	Dilakukan Test : <i>Tensile Test</i> , Penggunaan daya	<i>Elongation (%)</i> <i>Modulus (Mpa)</i> <i>Yeild Force (N)</i> <i>Yeild Stress (Mpa)</i> Daya yang digunakan (kWh) BEP pembuatan <i>filament</i>	Dilengkapi pembersih <i>strip</i> botol Dilengkapi penampungan <i>strip</i> botol Terdapat <i>gear transmission</i> kecepatan Terdapat kontrol temperatur
---	--	--	--

II.2. Uji Material 3D Printing

Mesin *pultrusion* yang telah dibuat, dapat digunakan untuk memproduksi *filament*. *Filament* yang telah diproduksi perlu diuji kemampuan materialnya. Pengujian material memungkinkan untuk menentukan ketahanan dan kekuatan *filament* terhadap beban, tekanan, dan gaya lainnya. Informasi ini penting untuk memahami sejauh mana material tersebut dapat bertahan di berbagai kondisi penggunaan atau lingkungan.

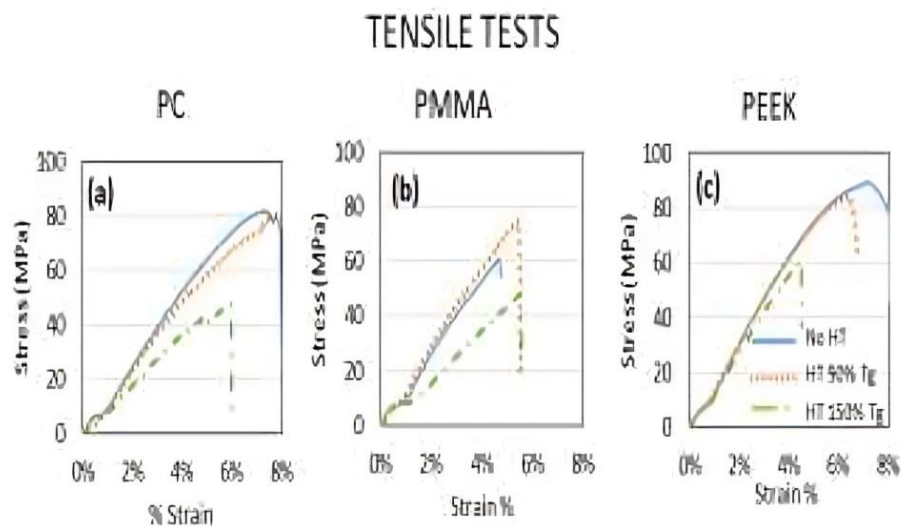
Pengujian material dapat dilakukan melalui berbagai jenis pengujian, diantaranya adalah *tensile test*, *hardness test*, *compression test*. Pengujian *tensile* atau uji tarik merupakan metode pengujian bahan mekanis untuk menentukan karakteristik suatu bahan. Pengujian ini digunakan sebagai metode standar untuk masing-masing kekuatan luluh, tarik dan regangan putus serta sifat material lainnya. Pada pengujian *tensile* benda di uji diregangkan sampai putus. Tingkat regangan yang diterapkan harus rendah, sehingga hasilnya tidak terdistorsi selama uji tarik, gaya dan ekstensi *spesiment* diukur [17].

Pada pengujian uji tarik telah banyak dilakukan penelitian uji tarik hasil dari 3D *print* menggunakan *filament* dengan berbagai standar *speciment*. Pada penelitian Igor Tylman dan Kazimierz Dzierzek (2020) dilakukan pengujian material *filament* dari berbagai material menggunakan *tensile test* [6]. Pada



pembuatan *speciment* pengujian pada *filament* dari BPET dilakukan dengan 3D *printer head* temperatur sebesar 256°C, 3D *printer bed temperature* 85°C, *printing speed* 30mm/s, *nozzle size* 0,2mm dan *infill* 100%. Pengujian dilakukan menggunakan ZWICK/ROELL Z010 *tensile testing machine*.

Pada penelitian Avila dkk. (2019) dilakukan uji tarik *speciment* dengan variasi *temperature print* dan material *print* yang berbeda. Penelitian ini tidak menggunakan *filament* yang dibuat dari botol PET tetapi melakukan uji tarik *speciment* menggunakan ASTM 638 Type V. Material yang Avila gunakan adalah material PC (*Polycarbonate*) , PMMA (*Polymethylmethacrylate*) , dan PEEK (*Poly(aryl-ether-ether-ketone)*). Dari hasil penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 2.1 [9].

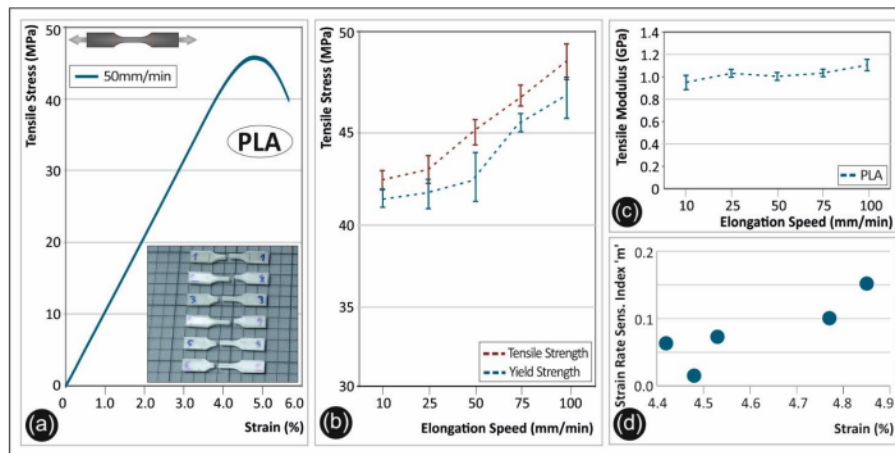


Gambar 2.1. Hasil uji tarik dari *filament* PC, PMMA, PEEK oleh Avila dkk. [9]

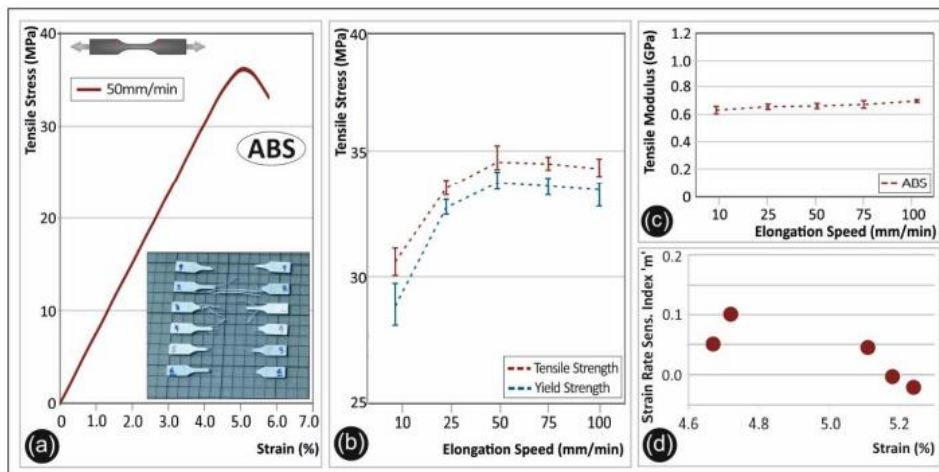
Pada penelitian Vidaskis dkk. (2020) dilakukan uji tarik *speciment* dengan variasi temperatur *print* dan material yang berbeda. Penelitian ini tidak menggunakan *filament* yang dibuat dari botol PET tetapi melakukan uji tarik *specimen* menggunakan ASTM D 638 Type V. Penelitian ini menggunakan material PLA (*Polylactic Acid*), ABS (*Acrylonitrile Butadiene Styrene*), PETG (*Polyethylene Terephthalate Glycol*), PA6 (*Polyamide 6*), PP (*Polycarbonate*).



Hasil penelitian Vidaskis dkk. tercantum pada Gambar 2.2, Gambar 2.3, Gambar 2.4, Gambar 2.5, Gambar 2.6 [10].

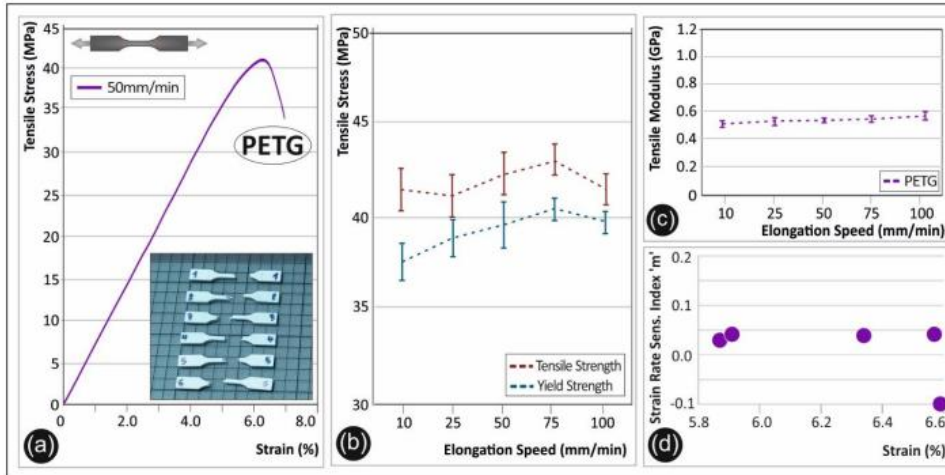


Gambar 2.2. Hasil uji tarik dari *filament* PLA oleh Vidaskis dkk. [10]

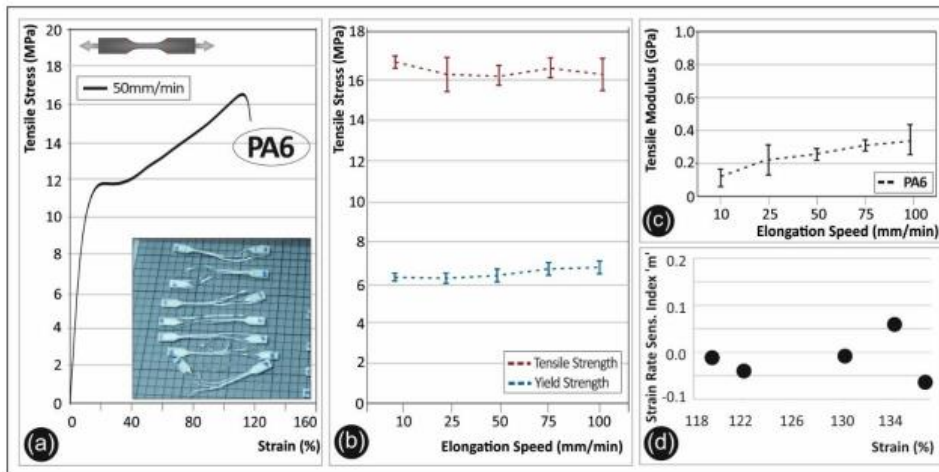


Gambar 2.3. Hasil uji tarik dari *filament* ABS oleh Vidaskis dkk. [10]



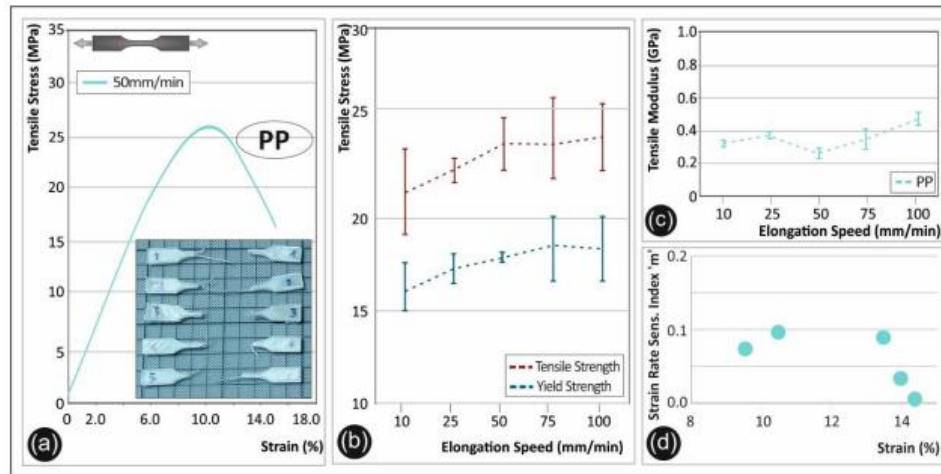


Gambar 2.4. Hasil uji tarik dari *filament* PETG oleh Vidaskis dkk. [10]



Gambar 2.5. Hasil uji tarik dari *filament* PA6 oleh Vidaskis dkk. [10]





Gambar 2.6. Hasil uji tarik dari *filament* PP oleh Vidaskis dkk. [10]

Sebagai perbandingan, hasil penelitian yang dilakukan Avila (2019) dan Vidaskis dkk. (2020) dengan yang peneliti lakukan ditunjukkan pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2. Hasil uji tarik ASTM D 638 *type* V penelitian lainnya

Referensi	Tipe <i>Filament</i> dan Hasil Pengukuran
Heat Treatment Effect on Mechanical Properties of 3D Printed Polymers (Avila dkk., 2019) [9]	PC <i>Tensile Strength</i> : 65 MPa <i>Strain</i> : 8%
	PMMA <i>Tensile Strength</i> : 70 MPa <i>Strain</i> : 6%
	PEEK <i>Tensile Strength</i> : 96 MPa <i>Strain</i> : 8%
On the Strain Rate Sensitivity of Fused Filament Fabrication (FFF) Processed PLA, ABS, PETG, PA6, and PP Thermoplastic Polymers (Vidaskis dkk., 2020) [10]	PLA <i>Tensile Strength</i> : 45 MPa <i>Strain</i> : 6%
	ABS <i>Tensile Strength</i> : 35 MPa <i>Strain</i> : 7%
	PETG



	<p><i>Tensile Strength</i> : 40 MPa <i>Strain</i> : 7%</p> <p>PA6 <i>Tensile Strength</i> : 16 MPa <i>Strain</i> : 120%</p> <p>PP <i>Tensile Strength</i> : 25 MPa <i>Strain</i> : 16%</p>
<p>Rancang Bangun Sistem <i>Pultrusion</i> Terintegrasi Elemen Pemanas Berbasis Limbah Plastik Polyethylene Terephthalate (Penelitian Ini)</p>	<p><i>Filament</i> Botol PET dengan variasi temperatur 175, 185 dan 195 °C pada <i>heating block nozzle</i> ekstruksi pada mesin <i>pultrusion</i>.</p> <p>Dengan parameter yang diukur :</p> <p><i>Fmax</i> (N) <i>Tensile Strength</i> (Mpa) <i>Elongation</i> (%) <i>Modulus</i> (Mpa) <i>Yeild Force</i> (N) <i>Yeild Stress</i> (Mpa)</p>



BAB III

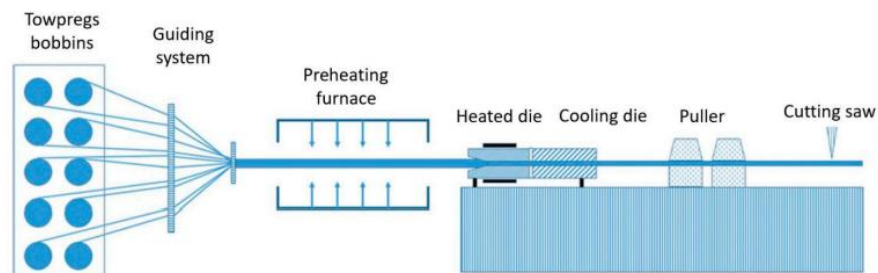
DASAR TEORI

III.1. Mesin *Pultrusion*

Pultrusion adalah proses berkelanjutan untuk pembuatan komposit dengan penampang konstan atau profil struktural yang memiliki panjang signifikan [18]. Prosesnya sekumpulan serat penguat yang diresapi resin ditarik melalui ekstruder yang dipanaskan, dimana proses polimerisasi berlangsung [19].

Cara kerja mesin *pultrusion* pada industri adalah serat pada *towpregs bobbins* ditarik dan disatukan pada *guiding system*. Serat itu kemudian dilakukan *preheating* pada *furnace* sebagai pemanasan awal, setelah itu dilakukan pemanasan lanjutan agar melekat. Setelah dipanaskan serat tersebut akan menjadi melekat. Kemudian dilakukan pendinginan dan ditarik oleh *puller*. Hasil mesin *pultrusion* tersebut dipotong di *cutting saw*.

Meskipun *pultrusion* umumnya digunakan dalam industri konstruksi untuk membuat profil dan struktur berkekuatan tinggi seperti pada Gambar 3.1, mesin *pultrusion* juga dapat diterapkan dalam pengolahan limbah botol plastik menjadi *filament*. Perbedaannya metode ini bekerja dengan cara menarik dan memotong botol menuju *ekstruder* yang dipanaskan untuk diubah menjadi *filament*. Dalam pembuatan *filament*, metode ini menghasilkan tingkat diameter *filament* yang seragam daripada menggunakan metode *ekstrusion* [15].



Gambar 3.1. Mesin *Pultrusion* dalam industri [15]



III.2. Elemen Pemanas

Pembuatan elemen pemanas pada mesin *pultrusion* dibutuhkan untuk menghilangkan pola pada botol plastik, yang menyebabkan ukuran *strip* dari hasil pemotongan botol berubah dan menjadi tidak stabil. Selain itu, *strip* pada botol dapat langsung terputus apabila pola pada botol terlalu tajam. Dibutuhkan elemen pemanas yang dapat memanaskan botol yang dapat menghilangkan pola tersebut.

Elemen pemanas berkeja dengan cara perpindahan kalor. Ketika arus listrik mengalir melalui elemen pemanas, energi listrik diubah menjadi energi panas karena resistansi elektrik dari material elemen. Perpindahan kalor adalah proses di mana energi termal bergerak dari satu daerah ke daerah lainnya karena adanya perbedaan suhu di antara keduanya [20]. Ini terjadi karena energi termal cenderung mengalir dari daerah yang memiliki suhu yang lebih tinggi ke daerah yang memiliki suhu yang lebih rendah. Perpindahan kalor merupakan fenomena alami yang terjadi dalam berbagai sistem, termasuk konduksi, konveksi, dan radiasi. Konduksi melibatkan transfer kalor melalui material padat, konveksi melibatkan transfer kalor melalui aliran fluida, dan radiasi melibatkan transfer kalor melalui gelombang elektromagnetik.

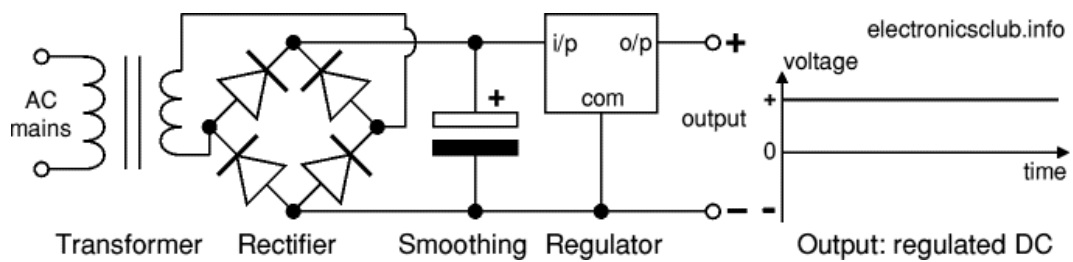
III.3. Power Supply AC to DC Converter

Power supply seperti pada Gambar 3.2 merupakan komponen yang memasok daya menuju beban. Sesuai namanya *Power Supply AC to DC Converter* adalah mengubah arus AC menjadi arus DC. 4 Komponen utama dalam *power supply* adalah *Transformer*, *Rectifier*, *Filter*, *Regulator* dengan rangkaian seperti pada gambar Gambar 3.3 [20].





Gambar 3.2. Power Supply



Gambar 3.3. Rangkaian di dalam power supply [20]

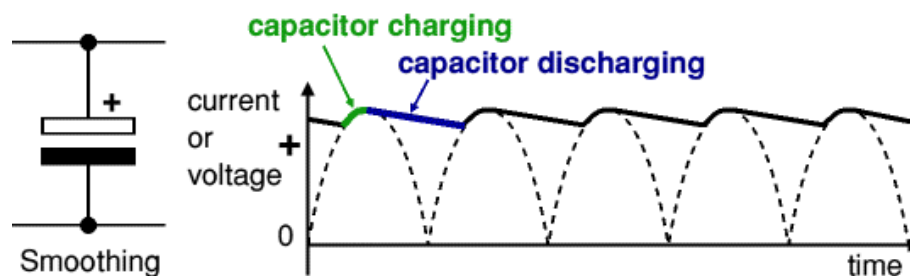
Transformator atau trafo digunakan untuk untuk menaikkan atau menurunkan tegangan AC berdasarkan prinsip induksi tanpa mengubah frekuensinya. Secara sederhana transformator terdiri atas dua kumparan dan satu induktansi mutual. Kumparan primer adalah yang menerima daya, dan kumparan sekunder tersambung pada beban.

Arus bolak-balik (AC) perlu untuk diubah menjadi arus searah menggunakan *rectifier*/penyearah. *Rectifier* dibagi menjadi 2 jenis yaitu setengah gelombang dan gelombang penuh. *Rectifier* setengah gelombang hanya menggunakan satu dioda, yang menyebabkan hanya setengah dari siklus gelombang AC yang diambil atau diubah menjadi arus searah (DC). Ini berarti hanya sisi positif dari gelombang AC yang dilewatkan, sementara sisi negatifnya diblokir atau ditahan [20]. Di sisi lain, *rectifier* gelombang penuh menggunakan



dua atau empat dioda untuk mengubah seluruh siklus gelombang AC menjadi arus searah [20]. Dengan memanfaatkan seluruh siklus gelombang AC, rectifier gelombang penuh lebih efisien dan menghasilkan output DC yang lebih stabil [21].

Setelah diubah menjadi arus searah, arus tersebut masih mungkin memiliki komponen AC yang kecil atau noise. Filter, atau smoothing digunakan untuk menghilangkan atau mengurangi noise ini, sehingga menghasilkan arus searah yang lebih bersih dan stabil. Proses pada filter dilakukan oleh kapasitor elektrolitik bernilai besar yang dihubungkan melalui suplai DC untuk bertindak sebagai *reservoir*, memasok arus ke output ketika tegangan DC yang bervariasi dari *rectifier* [23]. Kapasitor yang ditempatkan setelah penyearah akan mengisi saat tegangan naik dan melepaskan muatan saat tegangan turun, sehingga mengurangi riak tegangan yang dapat dilihat pada Gambar 3.4.



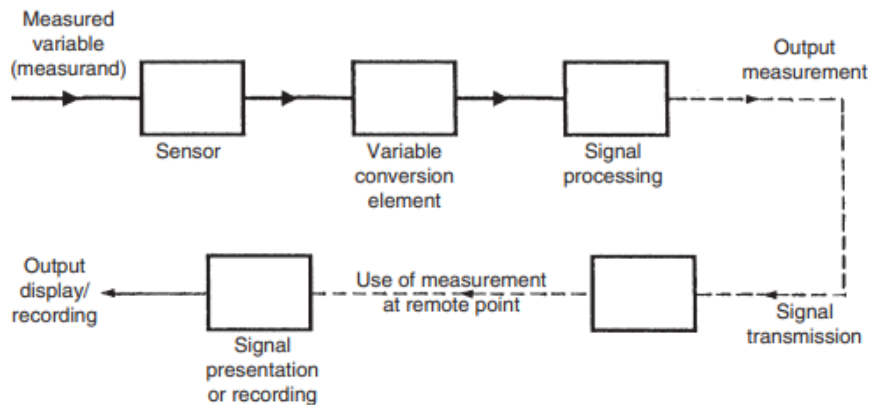
Gambar 3.4. Gelombang pada *Smoothing* [20]

Tegangan keluaran *power supply* perlu untuk dijaga agar tetap stabil dan teratur, terlepas dari fluktuasi tegangan input atau beban yang berubah-ubah menggunakan *regulator*. Rangkaian *regulator* dapat menggunakan *integrated circuit* (IC). Selain menggunakan IC, untuk mengganti *regulator* dapat juga menggunakan dioda zener.



III.4. Instrumentasi

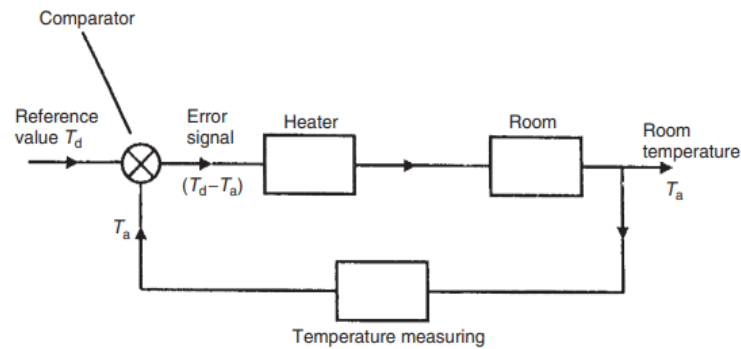
Instrumentasi adalah ilmu pengukuran dan proses kendali. Sebuah sistem pengukuran berfungsi untuk memberikan informasi tentang nilai fisik suatu variabel yang diukur [25]. Seperti pada Gambar 3.5 dalam kasus sederhana, sistem pengukuran dapat terdiri dari satu unit yang memberikan pembacaan output sesuai dengan besarnya variabel yang diukur. Namun, dalam situasi pengukuran yang lebih kompleks, sebuah sistem pengukuran terdiri dari beberapa elemen terpisah.



Gambar 3.5. *Elemens of a measuring system* [22]

Gambar 3.6 menunjukkan diagram blok fungsional dari sebuah sistem pengendalian temperatur sederhana di mana temperature T_a dari sebuah ruangan dipertahankan pada nilai referensi T_d . Nilai dari variabel yang dikendalikan, T_a , seperti yang ditentukan oleh perangkat pengukur suhu, dibandingkan dengan nilai referensi, T_d , dan perbedaannya, e , diterapkan sebagai sinyal kesalahan ke pemanas. Pemanas kemudian mengubah suhu ruangan sampai $T_a = T_d$.





Gambar 3.6. *Elements of a simple closed-loop control system [22]*

Pengendalian tersebut dapat dilakukan menggunakan mikrokontroler atau PID. Menurut (S.F Barrett, 2022) mikrokontroler adalah mesin keadaan sinkron yang kompleks. Ia merespons langkah-langkah program secara berurutan seperti yang ditentukan oleh program yang ditulis pengguna. Mikrokontroler mengurutkan melalui urutan pengambilan decode eksekusi yang dapat diprediksi. Setiap instruksi program bahasa rakitan yang unik mengeluarkan serangkaian sinyal untuk mengontrol perangkat keras mikrokontroler untuk menyelesaikan instruksi terkait operasi [23].

Kontrol PID (Proportional-Integral-Derivative) adalah salah satu skema kontrol yang paling umum diterapkan pada banyak proses industri dan sistem mekanis [24]. Metode ini terdiri dari tiga komponen utama: proporsional (P), integral (I), dan derivatif (D). Proporsional (P) menyesuaikan output proporsional dengan kesalahan saat ini antara setpoint dan variabel yang diukur. Integral (I) menambahkan output berdasarkan total kesalahan selama waktu. Derivatif (D) menghasilkan output berdasarkan laju perubahan kesalahan.

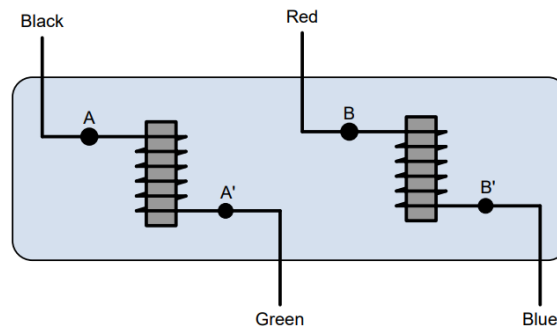
III.5. Motor Stepper

Berdasarkan cara mengontrolnya motor dibagi menjadi motor *servo* dan motor *stepper*. Menurut (M. Scarpino, 2015) perbedaan utama antara *servo* motor dan motor listrik lainnya adalah ketersediaan umpan balik posisi. Sebuah servo mengirimkan sinyal ke pengontrol yang menunjukkan sudut rotasinya dan/atau



kecepatan. Pengontrol menggunakan umpan balik ini untuk menentukan sinyal kontrol yang sesuai. Sedangkan menurut (M. Scarpino, 2015) motor stepper adalah motor yang dimaksudkan untuk berputar pada sudut yang tepat (sudut langkah) dan berhenti. Motor stepper berputar dalam langkah-langkah diskrit yang ditentukan oleh sinyal pulsa yang dikirimkan ke gulungan stator. Masing-masing langkah berhubungan dengan sudut putaran tertentu, dan motor stepper tidak memerlukan umpan balik posisi untuk mengontrol posisi rotor. Torsi biasanya lebih diperhatikan daripada kecepatan, dan torsi yang diberikan untuk mempertahankan posisi rotor disebut *Holding Torque*.

Gambar 3.7 menggambarkan elektromagnet dan fase-fasanya yang sesuai A/A' dan B/B' pada bipolar stepper. Jika arus mengalir dari kabel hitam ke kabel hijau, A akan menjadi kutub utara dan A' akan menjadi kutub selatan. Jika arus mengalir dari hijau ke hitam, A akan menjadi kutub selatan dan A' akan menjadi kutub utara.

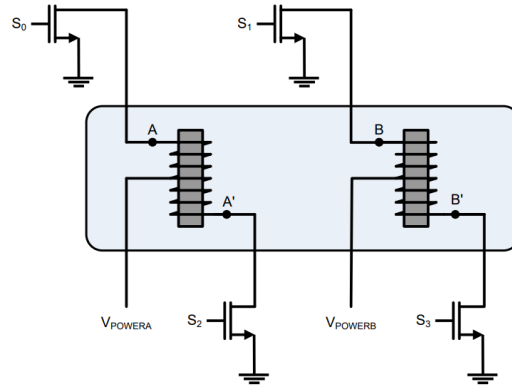


Gambar 3.7. *Connection Bipolar Stepper* [25]

Gambar 3.8 menggambarkan enam kabel yang memasuki stepper unipolar: dua mengalirkan daya (V POWER A dan V POWER B) dan empat terhubung ke A, A', B, atau B'. Keempat kabel terakhir ini masing-masing terhubung ke MOSFET. Ketika tegangan *gate* MOSFET melebihi ambang batasnya, kabel terhubung ke ground. Jika tidak, kabel dibiarkan tidak terhubung. Ketika MOSFET menyala, ujung yang sesuai dari gulungan menjadi kutub selatan. Ujung yang berlawanan dari gulungan menjadi kutub utara. Misalnya, ketika tegangan

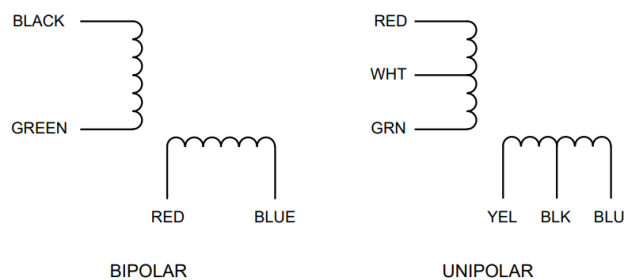


diterapkan pada S1, arus yang dihasilkan membuat B menjadi kutub selatan dan B' menjadi kutub utara.



Gambar 3.8. *Connection Unipolar Stepper* [25]

Wiring diagram pada motor *stepper* dapat dilihat pada Gambar 3.9. Dalam beberapa kasus, motor *stepper* unipolar mungkin hanya memiliki lima kabel daripada enam kabel yang biasanya ditemukan pada *stepper* bipolar. Dalam motor ini, dua kabel pasokan, VPOWERA dan VPOWERB, dihubungkan bersama, sementara empat kabel lainnya tetap tidak berubah.



Gambar 3.9. *Wiring diagram pada stepper* [25]



III.6. Relay

Menurut (V. Gurevich, 2019), Relay merupakan perangkat elektromekanis yang mengontrol arus listrik dengan membuka atau menutup kontakannya berdasarkan sinyal kontrol yang diterima seperti pada Gambar 3.10. Relay diaktifkan oleh sinyal kontrol, seperti tegangan atau arus listrik dari sumber *eksternal*. Sinyal ini mengalir melalui gulungan kawat (koil) di dalam relay, menciptakan medan magnet. Medan magnet yang dihasilkan oleh koil menarik tuas (armature) relay ke arah koil. Ketika tuas ditarik, kontak *relay* berubah posisi, membuka atau menutup hubungan listrik dalam sirkuit utama yang terhubung ke *relay*, memungkinkan arus untuk mengalir atau memutusny. Ketika sinyal kontrol dihilangkan, medan magnet melemah dan tuas kembali ke posisi semula. Kontak relay juga kembali ke posisi awalnya, mengembalikan sirkuit ke keadaan sebelumnya.

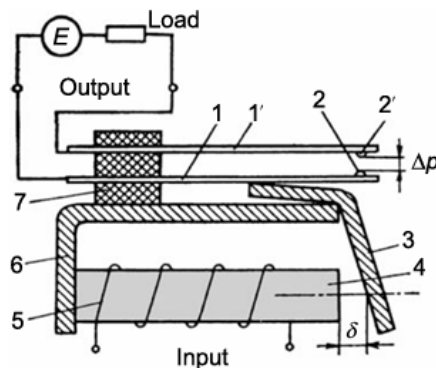


FIGURE 2.1
Construction of a simple electromagnetic relay.
1 — springs; 2 — contacts; 3 — armature; 4 — core;
5 — winding; 6 — magnetic core; 7 — insulator.

Gambar 3.10. Relay [26]

III.7. PET

Polyethylene Terephthalate (PET) adalah salah satu jenis polimer termoplastik yang paling umum digunakan. PET memiliki rumus kimia $(C_{10}H_8O_4)_n$. Polyethylene terephthalate diproduksi dari dua bahan baku utama, yaitu etilen glikol (sering disebut sebagai “MEG” atau monoetilen glikol) dan dimetil tereftalat (DMT) (dengan rumus kimia $C_6H_4(CO_2CH_3)_2$), meskipun



sebagian besar menggunakan asam tereftalat murni (dikenal sebagai “PTA” atau asam tereftalat) [27]. Proses produksi melibatkan reaksi kimia antara etilen glikol dan dimetil tereftalat atau asam tereftalat, yang menghasilkan polimer polietilen tereftalat (PET) [27].

III.8. Teknologi 3D *Printing*

Teknologi 3D *printer* merupakan proses pembuatan objek 3 dimensi dari model digital menggunakan lapisan-lapisan material yang ditambahkan secara bertahap. Cara kerja pergerakan pada mesin 3D *print* menggunakan tiga arah linier, sepanjang sumbu x, y-, dan z, juga dikenal sebagai koordinat Cartesius [28].

Dengan sistem Cartesius yang memberikan posisi linear yang akurat, ekstruder dibutuhkan untuk melelehkan *filament*. *Filament* ditarik masuk ke ekstruder oleh penggerak *filament*, *filament* kemudian disalurkan ke dalam ekstruder. Ketika *filament* mencapai ekstruder, *filament* dipanaskan hingga temperature yang diinginkan, tergantung pada jenis *filament* yang akan diekstrusi. Setelah dalam keadaan setengah cair, *filament* dipaksa melalui *nozzel* cetak dengan lubang berdiameter sekitar 0,35 hingga 0,5 milimeter, sebelum menempelkan ekstrusi panas tipis ini ke *printbed*, menggambar garis-garis yang menguraikan lapisan dari bentuk yang akan dicetak atau mengisi lapisan tersebut menggunakan pola pengisian tertentu [28].

Permukaan tempat cetakan 3D *print* disebut *bedplate* atau *printbed*. *Printbed* digunakan untuk mencegah penyusutan atau retaknya cetakan saat mereka mendingin dan untuk menciptakan adhesi yang lebih baik antara lapisan pertama cetakan dan permukaan *printbed* [28]. Temperatur *Extruder Bed Plate* adalah temperature pada bagian dari mesin 3D printer yang memanaskan dan melelehkan bahan cetak *filament* [29]. Sedangkan *infill* pattern merupakan presentasi ruang dalam rentang 0 % - 100 %, dimana untuk *infill* 0% menandakan ruang kosong sedangkan 100% menandakan solid [30]. Temperatur pada 3D print perlu untuk disesuaikan berpengaruh terhadap perekatan material yang di print [31]. Selain itu, *leveling* atau ketinggian *bed plate* mempengaruhi kualitas cetak komponen



keseluruhan yang di *print* [32]. Dimensional bagian yang dicetak 3D sangat dipengaruhi oleh kecepatan cetak dan suhu ekstrusi [33].

III.9. Additive Manufacturing

Rapid Prototyping (RP) adalah proses untuk cepat menciptakan representasi sistem atau bagian sebelum dilepaskan atau dikomersialkan. Ini bertujuan untuk menciptakan sesuatu dengan cepat dan hasilnya adalah prototipe atau model dasar dari mana model lebih lanjut dan produk akhir akan diperoleh. Istilah “*Additive Manufacturing*” (AM) digunakan sebagai pengganti “*Rapid Prototyping*” karena lebih tepat menggambarkan teknologi tersebut. AM membuat model langsung dari sistem *Computer Aided Design* (CAD) 3D tanpa perencanaan proses yang rumit. Proses AM melibatkan penambahan material dalam lapisan, dengan setiap lapisan adalah potongan tipis dari model asli seperti yang terlihat pada Gambar 3.11. Perbedaan utama antara mesin AM adalah pada bahan yang dapat digunakan, cara pembuatan lapisan, dan cara mengikat lapisan satu sama lain [19].



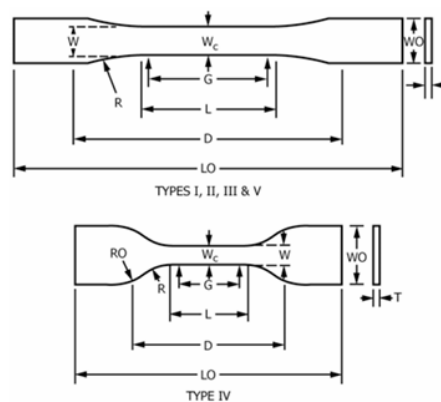
Gambar 3.11. Penerapan *additive manufacturing* pada *3D print* cangkir [19].

III.10. ASTM D638

Standar pengujian uji tarik 3D print yang biasa digunakan adalah standar ASTM D638 dan International Organization for Standardization (ISO) 527. Metode



pengujian ini meliputi penentuan gaya tarik sifat-sifat plastik yang tidak diperkuat dan diperkuat dalam bentuk spesimen uji berbentuk *halter* standar saat diuji di bawah kondisi tertentu dari perlakuan awal, suhu, kelembaban, dan kecepatan mesin pengujian [34]. Standar *specimen American Society for Testing and Materials* (ASTM) D 638 dibagi menjadi 5 tipe yang berbeda dengan ukuran seperti pada Gambar 3.12 [34].



Specimen Dimensions for Thickness, T , mm (in.)⁴

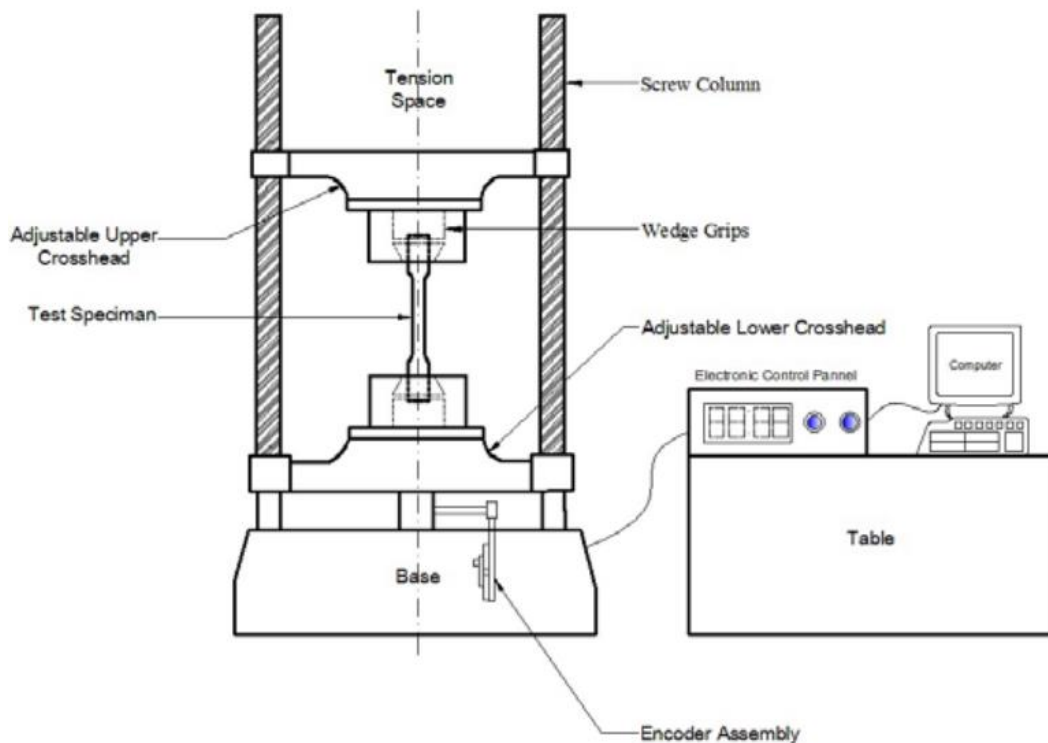
Dimensions (see drawings)	7 (0.28) or under		Over 7 to 14 (0.28 to 0.55), incl	4 (0.16) or under		Tolerances
	Type I	Type II	Type III	Type IV ^B	Type V ^{C,D}	
W —Width of narrow section ^{E,F}	13 (0.50)	6 (0.25)	19 (0.75)	6 (0.25)	3.18 (0.125)	± 0.5 (± 0.02) ^{B,C}
L —Length of narrow section	57 (2.25)	57 (2.25)	57 (2.25)	33 (1.30)	9.53 (0.375)	± 0.5 (± 0.02) ^C
WO —Width overall, min ^G	19 (0.75)	19 (0.75)	29 (1.13)	19 (0.75)	...	+ 6.4 (+ 0.25)
WO —Width overall, min ^G	...	...	...	...	9.53 (0.375)	+ 3.18 (+ 0.125)
LO —Length overall, min ^H	165 (6.5)	183 (7.2)	246 (9.7)	115 (4.5)	63.5 (2.5)	no max (no max)
G —Gage length ^I	50 (2.00)	50 (2.00)	50 (2.00)	...	7.62 (0.300)	± 0.25 (± 0.010) ^C
G —Gage length ^I	...	...	...	25 (1.00)	...	± 0.13 (± 0.005)
D —Distance between grips	115 (4.5)	135 (5.3)	115 (4.5)	65 (2.5) ^J	25.4 (1.0)	± 5 (± 0.2)
R —Radius of fillet	76 (3.00)	76 (3.00)	76 (3.00)	14 (0.56)	12.7 (0.5)	± 1 (± 0.04) ^C
RO —Outer radius (Type IV)	...	...	...	25 (1.00)	...	± 1 (± 0.04)

Gambar 3.12. Ukuran Standar ASTM D 638 [34]

III.11. Kekuatan Tarik (*Tensile Strength*)

Pengujian untuk mengetahui kualitas dari *filament* yang dibuat dilakukan melalui uji tarik bahan menggunakan UTM seperti pada Gambar 3.13. *Universal Testing Machine* (UTM) adalah mesin yang dapat menerapkan gaya geser, kekuatan tarik, atau tegangan lateral pada sampel uji secara berurutan untuk menentukan sifat mekaniknya [38].



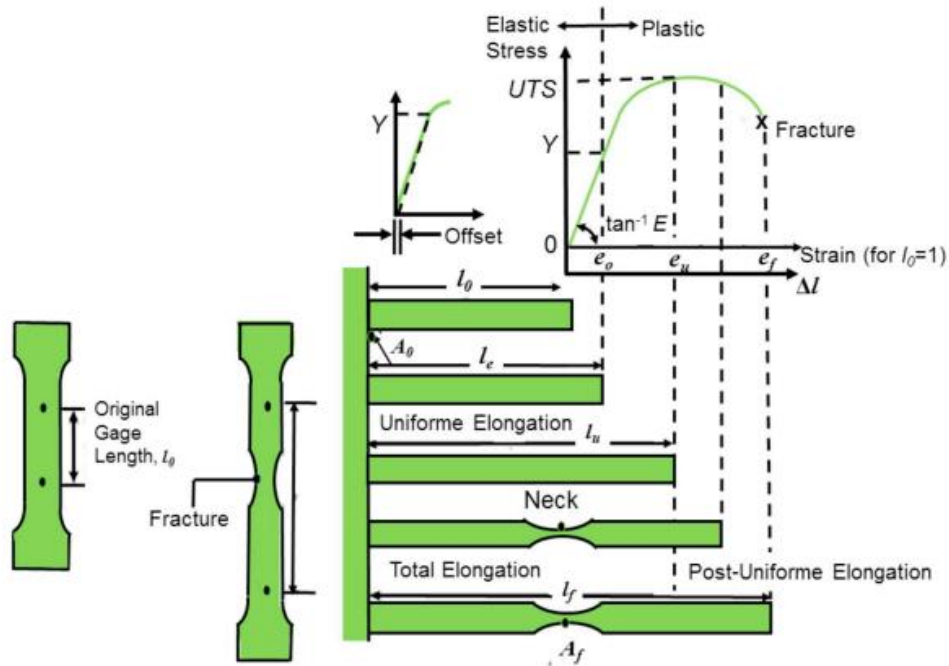


Gambar 3.13. *Universal Testing Machine (UTM)* [35]

Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui tegangan, regangan, modulus elastisitas bahan dengan cara menarik *speciment* sampai putus. Hal tersebut dilakukan untuk mengetahui tingkat kekuatan suatu material dan untuk mengenali karakteristik pada material tersebut [36]

Speciment yang dilakukan penarikan akan semakin memiliki *elongation* (*strain*) yang semakin panjang seiring dengan peningkatan gaya yang diberikan pada *speciment*, hingga *speciment* tersebut putus. Hasil dari pengujian ini akan membentuk sebuah grafik seperti pada Gambar 3.14. Titik UTS (*Ultimate tensile strength*) adalah tegangan maksimum yang material dapat menahan saat sedang diregangkan atau ditarik sebelum akhirnya patah. *Yeild strength*, merupakan tegangan maksimum yang dapat ditahan oleh sebuah material sebelum mulai mengalami deformasi plastis atau perubahan permanen.





Gambar 3.14. Kurva uji tarik tegangan regangan [37]

Tegangan merupakan ukuran dari gaya yang bekerja pada suatu material per satuan luas penampang. Secara matematis, tegangan (σ) didefinisikan sebagai gaya (F) yang bekerja pada suatu benda dibagi dengan luas penampang (A) di mana gaya tersebut diterapkan yang dapat dilihat pada persamaan 1.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

Dimana σ = Tegangan (N/m^2)

F = Gaya (N)

A = Luas Penampang (m^2)

Regangan merupakan ukuran perubahan relatif dalam dimensi suatu benda akibat beban yang diterapkan. Regangan (ϵ) didefinisikan sebagai perubahan panjang (ΔL) suatu benda dibagi dengan panjang aslinya (L) yang dapat dilihat pada persamaan 2.



$$\varepsilon = \frac{L-L_0}{L_0} \quad (2)$$

Dimana ε = Regangan

L = Panjang Akhir (m)

L_0 = Panjang Awal (m)

Modulus elastisitas, juga dikenal sebagai modulus young atau modulus kekakuan, merupakan ukuran dari kekakuan atau kemampuan suatu bahan untuk menahan deformasi elastis saat dikenai gaya. Modulus elastisitas (E) didefinisikan sebagai perbandingan antara tegangan (σ) dan regangan (ε) dalam wilayah linear dari kurva tegangan-regangan yang dapat dilihat pada persamaan 3.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3)$$

Dimana E = Modulus elastisitas (N/m²)

σ = Tegangan (N/m²)

ε = Regangan

Yield point merupakan titik pertama pada kurva tegangan-regangan di mana peningkatan regangan terjadi tanpa peningkatan tegangan [34]. Dimana pada titik ini material mulai mengalami deformasi permanen setelah mencapai batas elastisitasnya. Pada awalnya, material akan berperilaku secara elastis, yaitu akan kembali ke bentuk aslinya setelah beban dihilangkan. Namun, saat tegangan meningkat melebihi batas elastisitasnya, material akan mulai mengalami deformasi permanen atau plastis, di mana perubahan bentuknya akan tetap ada bahkan setelah beban dihilangkan.



III.12. Pengukuran Daya Listrik

Dalam melakukan pengukuran energi pada peralatan elektronik digunakan satuan kWh. Satuan ini merupakan kependekan dari kilowatt-hour, satuan dari besarnya penggunaan listrik dalam kilowatt dikali waktu dalam jam. Kilowatt (kW) mengacu pada satuan daya listrik. Daya listrik merupakan energi yang digunakan atau diproduksi oleh perangkat listrik dalam satu satuan waktu. Daya dapat diukur dengan mengalikan tegangan dengan arus. Perhitungan daya dapat dilihat pada persamaan 4.

$$P = V \times I \times \cos(\theta) \quad (4)$$

Dimana P = daya dalam watt (W),

V = tegangan dalam volt (V),

I = arus dalam ampere (A),

θ = sudut fase antara tegangan dan arus (cosinus sudut fase)

Porsi aliran energi (daya) yang dirata-ratakan sepanjang satu siklus penuh bentuk gelombang AC, menghasilkan perpindahan energi bersih dalam satu arah dikenal sebagai daya nyata [38].



BAB IV

PELAKSANAAN PENELITIAN

IV.1. Alat dan Bahan Penelitian

Alat penelitian yang digunakan dalam “Rancang Bangun Sistem *Pultrusion* Terintegrasi Elemen Pemanas Berbasis Limbah Plastik Polyethylene Terephthalate” tercantum pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1. Alat penelitian.

No.	Alat Penelitian	Spesifikasi	Fungsi
1.	Laptop Acer Nitro 515-46-R8Y	AMD RYZEN 7-6800H	Digunakan untuk melakukan studi literasi, menggambar 3D, pengolahan data, dan penulisan laporan penelitian
		16 GB DDR 5	
		512 GB SSD NVMe	
		RTX 3050 4GB	
2.	<i>Thermal Gun</i>	Range -30 hingga 350 °C	Kalibrasi sensor temperatur
		<i>Temperature minimum display</i> 0.1	
3.	Jangka sorong	Tingkat akurasi 0,1mm	Mengukur panjang dan diameter <i>filament</i> yang dihasilkan
4.	Neraca	Tingkat akurasi 0,1 gram	Mengukur berat <i>filament</i> yang dihasilkan
5.	Mesin 3D <i>Printing</i> Ender V.3	<i>Product Specification :</i>	3D <i>print</i> untuk membuat <i>speciment</i>
		Dimensi : 220 x 220 x 250 mm	
		Screen LCD	
		<i>Power Supplay :</i> 100-120V~, 200-240V, 50/60HZ	



		<p><i>Slicing Software : Cura</i></p> <p><i>Data Input Format : STL, OBJ, JPG</i></p> <p><i>Recommended filament : PLA, TPU, ABS</i></p> <p><i>Nozzle Temperature : $\leq 300^{\circ}\text{C}$</i></p> <p><i>Heatbed Temperature : $\leq 100^{\circ}\text{C}$</i></p>	
6.	Mesin Uji Tarik Bahan : <i>Torsee Universal Testing Machine</i>	<p><i>Type : Amu-5 DE</i></p> <p><i>Produksi : Tokyo, Japan</i></p> <p><i>MFG No. : 20647</i></p> <p><i>Cap : 5 tonf</i></p> <p><i>Grip : Manual Grip</i></p>	Dilakukan untuk melakukan pengujian tarik <i>speciment</i>
7.	Solder	Pengaturan temperatur 100°C , 200°C , 300°C , 400°C	Membantu mencairkan timah untuk menyambungkan kabel
8.	Gerindra	Kecepatan : 12000 RPM	Memotong besi
9.	Bor	13 mm	Melubangi besi
		Kecepatan : 2200-2800 RPM	
10.	Obeng	Berbagai macam pin	Memutar baut dan sekrup
11.	3D Print Tool kit	Berbagai macam peralatan	<i>Cleaning</i> dan perawatan 3D <i>printing</i>



12	Taffware	<i>Power consumption: 0.5 W</i>	Untuk melakukan pengukuran daya
		<i>Operating voltage: 230 VAC</i>	
		<i>Frequency display: 50 HZ</i>	
		<i>Operating current maximum: 16 A</i>	
		<i>Voltage display range: 0 to 9999 V</i>	
		<i>Current display: 0 to 16.000 A</i>	

Sistem Operasi yang digunakan dalam “Rancang Bangun Sistem *Pultrusion* Terintegrasi Elemen Pemanas Berbasis Limbah Plastik *Polyethylene Terephthalate*” tercantum pada tabel Tabel 4.2

Tabel 4.2. Sistem operasi yang digunakan

No	Sistem Operasi	Keterangan
1.	Windows 11 Versi 22H2 for 64x	Digunakan untuk menjalankan perangkat lunak dalam penelitian dan penulisan skripsi

Perangkat lunak yang digunakan dalam “Rancang Bangun Sistem *Pultrusion* Terintegrasi Elemen Pemanas Berbasis Limbah Plastik *Polyethylene Terephthalate*” tercantum pada Tabel 4.3.



Tabel 4.3. Perangkat lunak yang digunakan

No	Perangkat Lunak	Keterangan
1.	Arduino IDE	Digunakan untuk melakukan pemograman motor
2.	AutoCAD 2023	Digunakan untuk menggambar desain 3D
3.	Fusion 360	Digunakan untuk menggabungkan desain 3D
4.	Creality Slicer 3D	Digunakan untuk persiapan desain yang akan di print 3D
5.	Microsoft Word	Digunakan untuk melakukan penulisan skripsi
6.	Microsoft Excel	Digunakan untuk mengolah dan visualisasi data penelitian

Bahan penelitian yang digunakan dalam “Rancang Bangun Sistem *Pultrusion* Terintegrasi Elemen Pemanas Berbasis Limbah Plastik Polyethylene Terephthalate” tercantum pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4. Bahan penelitian.

No.	Bahan Digunakan	Spesifikasi	Fungsi
1.	Botol Plastik	PET	Sebagai bahan utama pembuatan <i>Filament</i>
2.	Thermocouple Tipe K	Temperatur Kerja : 0 sampai 400 ° C	Untuk mengukur temperatur pada Elemen pemanas DC
3.	Elemen Pemanas DC	DC 12 Volt 10 Ampere	Untuk memanaskan <i>ekstruksi strip</i> botol agar menjadi <i>filament</i>



4.	Elemen Pemanas AC	AC 220 Volt,	Untuk memanaskan botol agar botol menjadi halus sehingga mudah dipotong
5.	Arduino Uno	<i>Input Voltage</i> : 6-20V	Kontrol Motor <i>Stepper</i> Nema 17 dan <i>Stepper</i> 38BYJ-48
		<i>Input Voltage Recommended</i> : 7-12 V	
		<i>Operating Voltage</i> : 5V	
		<i>Microchip</i> : Atmega328P	
		Digital I/O Pin : 14 pin	
		<i>Analog Input Pin</i> : 6 pin	
6.	Rex C100	Input Type :	Digunakan untuk mengendalikan temperatur pada elemen pemanas <i>ekstruksi</i> (<i>nozzle</i>)
		Thermocouple: K, J, R, S, B, E, T, N, PLII, W5Re/W26Re, U, L	
		RTD : Pt100, JPt100	
		<i>Voltage</i> : 0 to 5 V DC, 1 to 5 V DC <i>Input impedance</i> : 250 k ohm or more	
		<i>Current</i> : 0 to 20 mA DC, 4 to 20 mA DC <i>Input impedance</i> : Approx. 250 ohm	
		<i>Control method</i> : PID	
		Control output:	



	<p><i>Relay contact output: 250 V AC, 3A (Resistive load)</i></p> <p><i>Electrical life: 300,000 times or more (Rated load)</i></p>
	<p><i>Voltage pulse output: 0/12 V DC (Load resistance 600 ohm or more)</i></p>
	<p><i>Current output: 4 to 20 mA DC (Load resistance 600 ohm or less)</i></p>
	<p><i>Performance:</i></p> <p><i>Display accuracy (at the ambient temperature 23 °C +- 2 °C):</i></p> <p><i>Thermocouple (TC): ± (0.5 % of display value +-1 digit) or +- 3 °C [6 °F] Whichever is greater</i></p>
	<p>Power supply voltage:</p>
	<p>85 to 264 V AC (Power supply voltage range), 50/60 Hz Rating: 100 to 240 V AC</p>
	<p>21.6 to 26.4 V AC (Power supply voltage range), 50/60 Hz Rating: 24 V AC</p>



		<p>21.6 to 26.4 V DC (<i>Power supply voltage range</i>) Rating: 24 V DC</p> <p><i>Power consumption:</i> 6 VA max. (at 100 V AC) 9 VA max. (at 240 V AC) 6 VA max. (at 24 V AC) 145 mA max. (at 24 V DC)</p>	
7.	Termostat XH-W3001	<p>Tegangan : 220 V AC</p> <p>Ukuran 60x45x31 mm</p> <p>Beban <i>Max</i> 1500 W</p>	
8.	NTC 10k	<p>Temperatur kerja - 50 sampai 110 °C</p> <p>Ketelitian 0.1 °C</p>	Digunakan untuk mengukur temperatur udara pada chamber di elemen pemanas AC
9.	Motor Stepper Nema 17 HS4401	<p>Tegangan : 12 Volt DC</p> <p><i>Step Angle</i> : 1,8°</p> <p><i>Motor Length</i> : 40 mm</p> <p><i>Rate Current</i> : 1,7 A</p> <p><i>Phase Resistance</i> : 1,5 ohm</p> <p><i>Phase Inductance</i> : 2,8 mH</p> <p>Holding Torque : 40 N cm Min</p> <p><i>Detent Torque</i> : 2,2 N cm Max</p> <p><i>Rotor Innersia</i> : 54 g cm²</p> <p><i>Lead Wire</i> : 4</p> <p><i>Motor Weight</i> : 280 g</p>	Digunakan untuk menggerakkan gerigi untuk menarik <i>filament</i>



10.	Motor Stepper 38BYJ-48	Tegangan : 5V DC	Digunakan untuk memutar botol pada elemen pemanas
		Diameter : 28 mm	
		Step Angle 5,625 x/64	
		<i>Reduction Ratio</i> 1/64	
		<i>Number Phase</i> :4	
11.	DRV 8825	<i>PWM (Pulse Wave Modulation) Microstepping Stepper Motor Drive</i>	Digunakan untuk mengendalikan motor stepper Nema 17
		<i>Operasi Voltage</i> 8.2-V to 45-V	
		<i>2.5-A Maximum Drive Current</i> at 24 V and	
		<i>Operating Temperatur</i> : -40 °C – 150 °C	
12.	DRV 8825 Shield	-	Shield yang digunakan DRV 8825 agar lebih mudah digunakan
13.	Driver ULN2003	<i>Tegangan</i> : 5-12 V DC	
14.	<i>Solid State Relay</i> 10DD	<i>Rate Current</i> : 10 A	Digunakan untuk mengendalikan pemanas ekstrusion
		<i>Output Voltage</i> : 5-60 VDC	
		<i>Input Voltage</i> : 3-32 VDC	
		<i>Trigger Current</i> :12 mA Max	
		Temperatur kerja - 40 sampai 80 °C	
		Kelembaban kerja 35-85% RH	

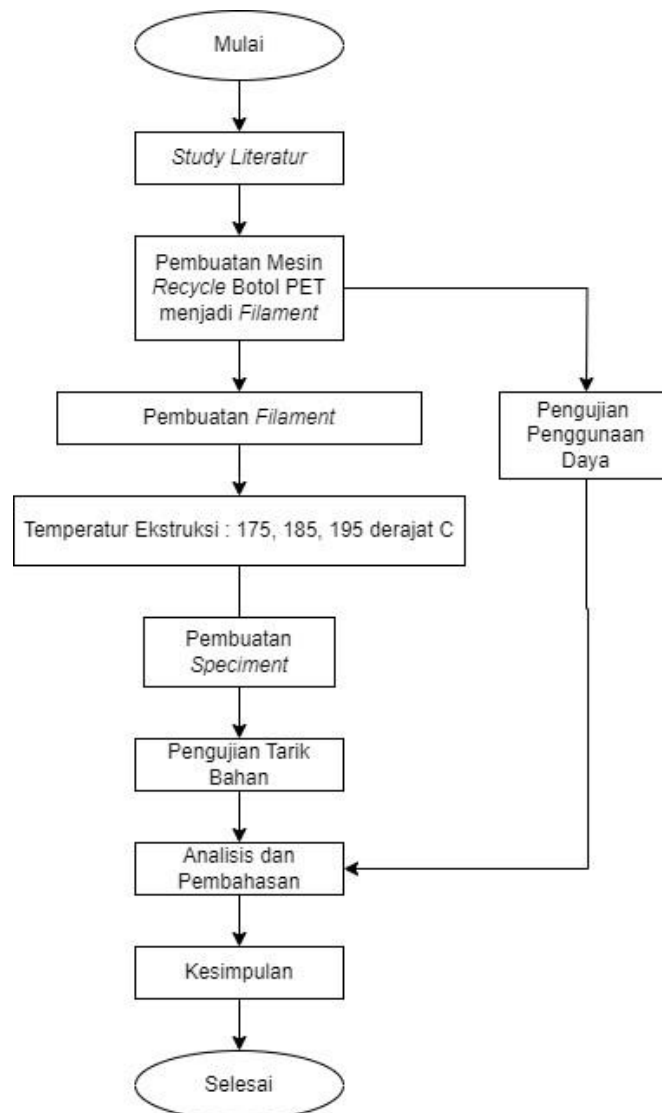


15.	<i>Power Supplay AC to DC</i>	220 Volt AC to 12 Volt DC 10 Ampere	Mengubah tegangan AC menjadi DC
16.	<i>Nozzle</i>	Ukuran jari-jari 0,6 mm	Membentuk strip plastik menjadi <i>filament</i>
17.	Kabel	Serabut dan Pejal	Menghubungkan kelistrikan antar komponen
18.	Galvalum	-	Sebagai media konduktor pada elemen pemanas AC untuk menghaluskan botol plastik
19.	Kotak Besi	40 x 60	Digunakan sebagai tempat menaruh alat beserta komponen hardwarenya
20.	Timah Solder	-	Digunakan untuk menyambungkan kabel
21.	Saklar	DC	Sebagai penghidup dan mematikan motor
22.	Baut	-	Digunakan untuk mengencangkan komponen <i>hardware</i> pada wadah
23.	<i>Bread Board</i>	-	Digunakan untuk merangkai rangkaian tambahan yang diperlukan



IV.2. Tata Laksana Penelitian

Secara umum, penelitian ini mencakup proses pembuatan sistem *pultrusion* terintegrasi elemen pemanas berbasis limbah plastik polyethylene terephthalate. Secara garis besar, alur penelitian ini dijabarkan pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1. Alur penelitian

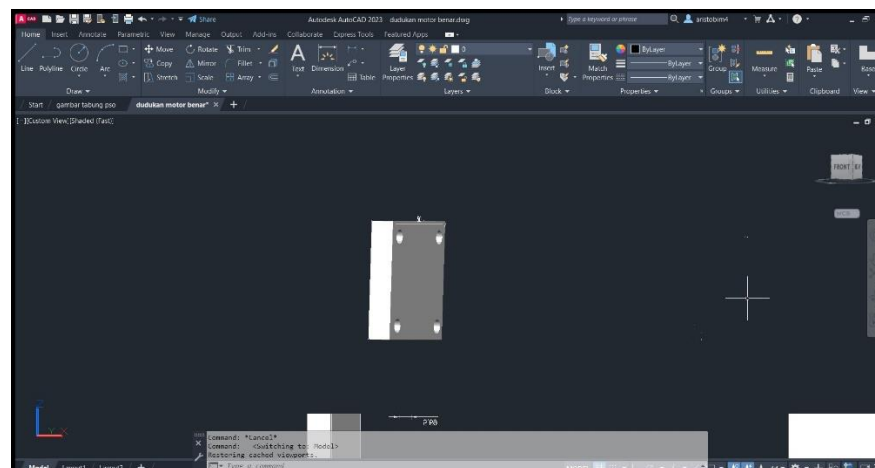


IV.3. Prosedur Pembuatan Sistem *Pultrusion* Terintegrasi Elemen Pemanas Berbasis Limbah Plastik Polyethylene Terephthalate

Berikut ini merupakan prosedur yang dilakukan dalam pembuatan sistem *pultrusion* terintegrasi elemen pemanas.

IV.3.1. Prosedur Desain Sistem *Pultrusion* Terintegrasi Elemen Pemanas Berbasis Limbah Plastik Polyethylene Terephthalate

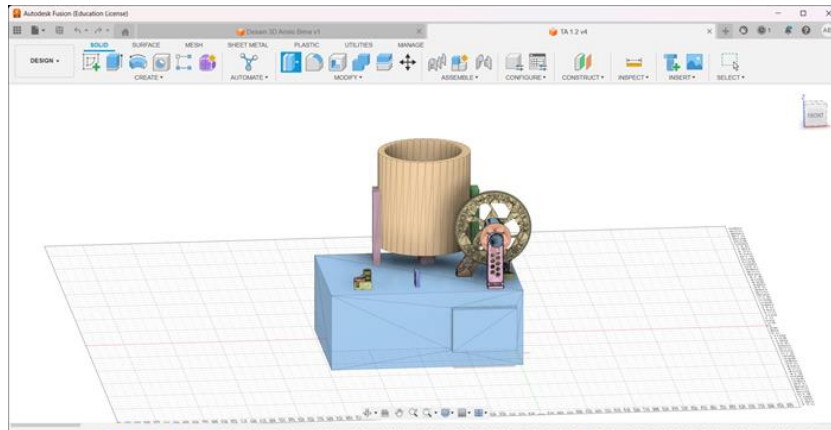
- a) Menyiapkan laptop
- b) Menyiapkan Autocad 2023
- c) Buatlah desain komponen yang dibutuhkan di autocad 2023 seperti pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2. Desain komponen di autocad

- d) Menyiapkan Fusion 360
- e) Gabungkan desain tersebut ke dalam fusion 360 seperti pada Gambar 4.3.

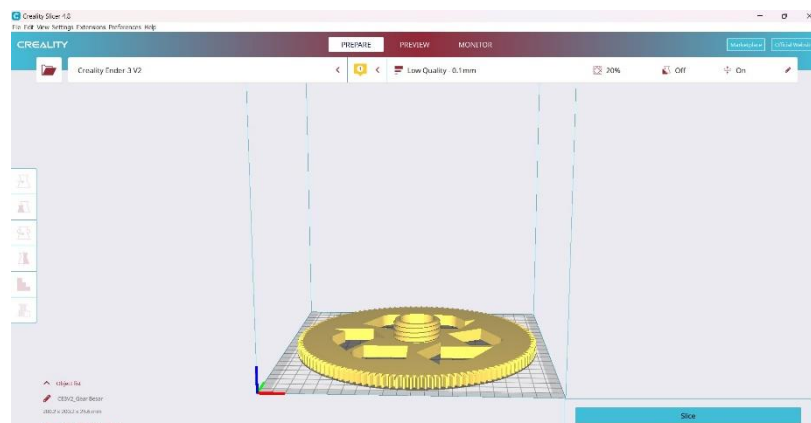




Gambar 4.3. Gambar Desain 3D di Fusion 360

IV.3.2. Prosedur Print 3D Komponen yang diperlukan

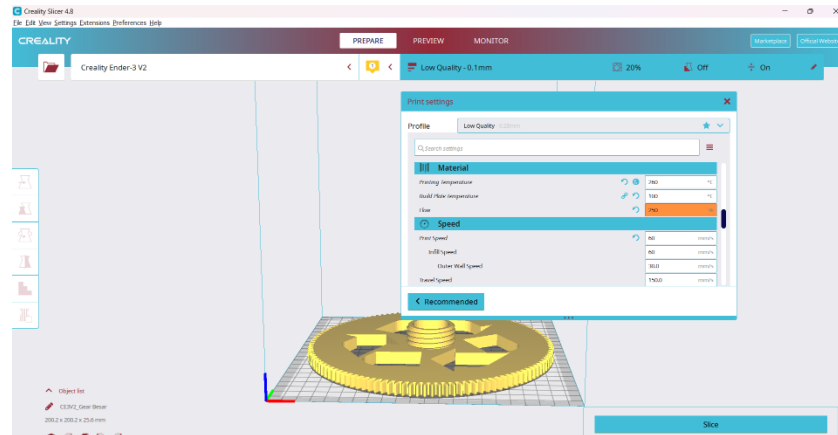
- a) Menyiapkan laptop
- b) Menyiapkan Autocad 2023
- c) Buatlah desain komponen yang dibutuhkan di Autocad 2023
- d) Siapkan Creality Slicer dan buka *file* yang ingin dicetak seperti pada Gambar 4.4



Gambar 4.4. Menyiapkan Creality

- e) Atur *print setting* sesuai dengan keadaan *print* yang diinginkan seperti pada Gambar 4.5.





Gambar 4.5. Setting Creality

- f) Lakukan *Slice* dan file masukkan kedalam memori card
- g) Siapkan 3D *print* dan lakukan *print* terhadap file yang telah disiapkan

IV.3.3. Prosedur Pembuatan *Filament*

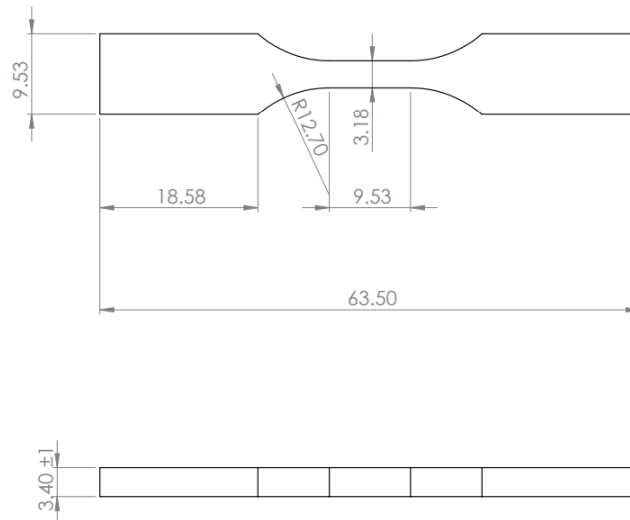
- a) Siapkan botol plastik
- b) Panaskan elemen pemanas hingga mencapai set point 40°C (sekitar 20 menit)
- c) Masukkan botol plastik ke dalam elemen pemanas
- d) Tunggu 15 menit hingga botol menjadi halus dan tidak berpola
- e) Gunting bagian bawah botol dan masukkan ke dalam alat pemotong
- f) Tarik botol hingga menjadi *stripper*
- g) Panaskan *nozzle* hingga mencapai *set point* yang diinginkan
- h) Masukkan *strip* kedalam *nozzle* dan ikatkan pada tali di gear
- i) Nyalakan motor pada *gear*

IV.3.4. Prosedur Menyiapkan *Speciment*

- a) Siapkan *filament* dari botol PET yang telah dibuat dari mesin *pultrusion*
- b) Masukkan *filament* kedalam mesin *3d printing*
- c) Bersihkan *bed plate* dengan alkohol dan lakukan *leveling*



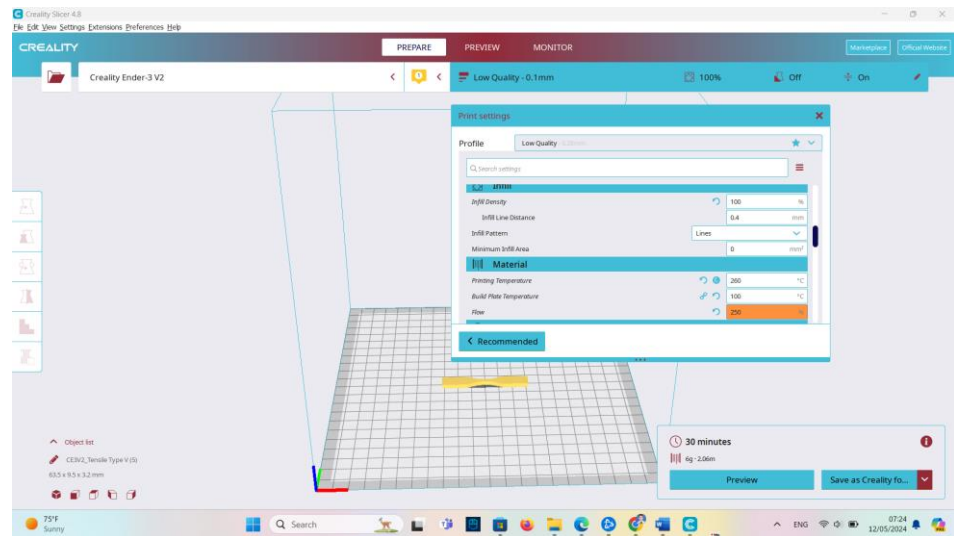
- d) Siapkan file *standard* ASTM 638 D Tipe V, desain dapat dilihat pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6. Desain ASTM D 638 Tipe V

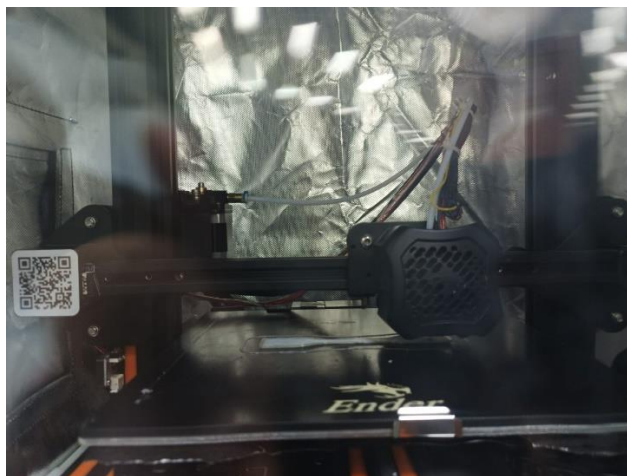
- e) Buka Creality Clicer dan lakukan preparasi
f) *Printing temperature* 260 °C
g) *Build Plate* Temperatur 100 °C
h) *Flow Rate* 250 %
i) *Infill* 100%
j) *Build Plate Addision Brim*
k) Lakukan *Clicer* seperti pada Gambar 4.7 dan masukkan file kedalam kartu sd





Gambar 4.7. *Clicer Speciment*

- 1) Siapkan Printer 3D dan lakukan print seperti yang terlihat pada Gambar 4.8



Gambar 4.8. Proses 3D Printing *speciment*

- m) Tunggu hingga print selesai
- n) Tunggu hingga *bed temperature* mendingin
- o) Angkat *speciment* yang sudah dingin dan bersihkan



IV.3.5. Prosedur Melakukan Uji Tarik

- a) Siapkan *spesiment standard* ASTM 638 D tipe V dan bersihkan seperti pada Gambar 4.9



Gambar 4.9. *Spesiment standard* ASTM 638 D tipe V

- b) Siapkan mesin uji tarik UTM
- c) Mengukur panjang awal (L_0) atau *gage length* dan luas penampang irisan benda uji.
- d) Masukkan *speciment* kedalam mesin dan kencangkan mesin seperti yang terlihat pada Gambar 4.10.



Gambar 4.10. Memasukkan *speciment* ke mesin uji tarik

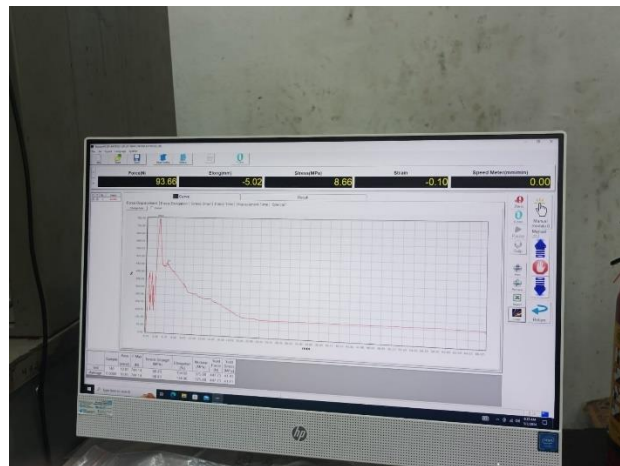


- e) Nyalakan mesin dan tingkatkan daya tariknya sedikit demi sedikit hingga *speciment* putus seperti pada Gambar 4.11.



Gambar 4.11. *Speciment* yang putus setelah uji tarik

- f) Pada komputer akan terbentuk grafik dari daya tarik tersebut dapat dilihat pada Gambar 4.12



Gambar 4.12. Hasil uji tarik pada komputer

- g) Simpan hasil uji tarik di dalam komputer



IV.3.6. Prosedur Melakukan Pengukuran Daya Mesin *Pultrusion*

- a) Pasangkan taffware pengukur daya pada sambungan listrik seperti pada Gambar 4.13 hanya untuk elemen pemanas



Gambar 4.13. Pengukuran daya yang digunakan mesin *pultrusion*

- b) Ukur daya dan waktu yang digunakan menggunakan taffware pada keadaan awal hingga mencapai keadaan tunak
- c) Ukur daya 1 jam setelah keadaan tunak
- d) Ulangi hingga 3x pengukuran
- e) Lakukan pengukuran ulang pada mesin *pultrusion* tanpa elemen pemanas

IV.4. Rencana Analisis Hasil Penelitian

Dalam melakukan analisis hasil penelitian dari data hasil uji tarik dan hasil pengukuran daya adalah sebagai berikut:

- a) Perangkuman hasil penelitian dalam format tabel, gambar, statistik sesuai dengan parameter atau variabel yang dilibatkan dalam penelitian.
- b) Pengujian perbedaan statistik (variabel penelitian).
- c) Pengujian keterkaitan (korelasi) statistik variabel penelitian.



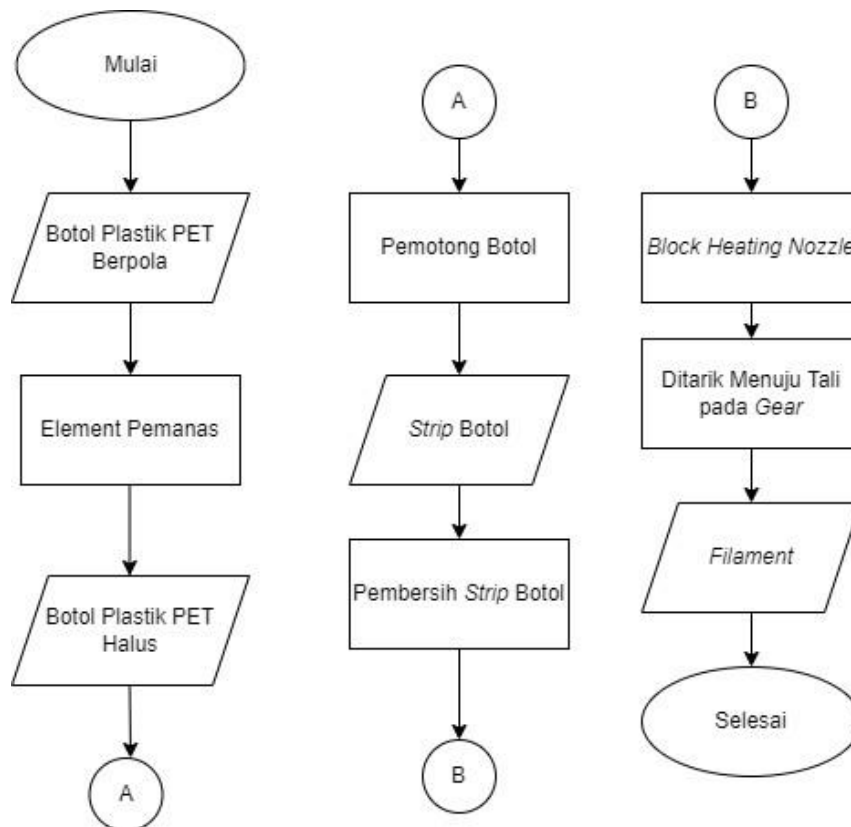
- d) Pengolahan data untuk mendapatkan modulus elastisitas dan yield strength
- e) Pengolahan data untuk mendapatkan nilai BEP pada *filament* yang dibuat



BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN

V.1. Hasil Rancang Bangun Sistem *Pultrusion* Terintegrasi Elemen Pemanas Berbasis Limbah Plastik Polyethylene Terephthalate

Dalam melakukan “Rancang Bangun Sistem *Pultrusion* Terintegrasi Elemen Pemanas Berbasis Limbah Plastik *Polyethylene Terephthalate*” untuk mengubah botol plastik menjadi *filament* dilakukan alur seperti pada Gambar 5.1.

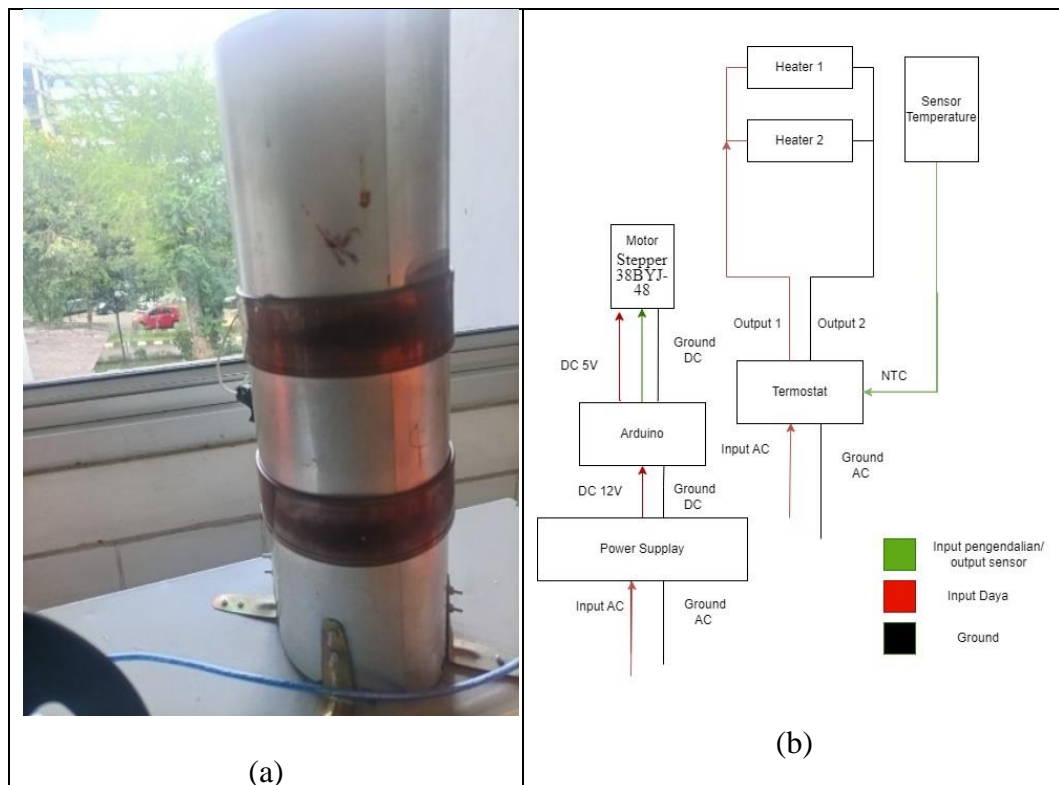


Gambar 5.1. Skema pembuatan *filament*



V.1.1. Hasil Pembuatan Elemen Pemanas

Elemen pemanas seperti yang terlihat pada Gambar 5.2 dibuat untuk menghilangkan motif pada botol, hal ini perlu untuk dilakukan agar botol dapat terpotong secara sempurna pada mesin pemotong. Apabila tidak dilakukan penghalusan pada elemen pemanas maka apabila botol langsung dimasukkan ke mesin pemotong, motif pada botol akan menyebabkan potongan botol terputus, ukuran potongan variatif atau bahkan membuat botol tersangkut di pemotong.



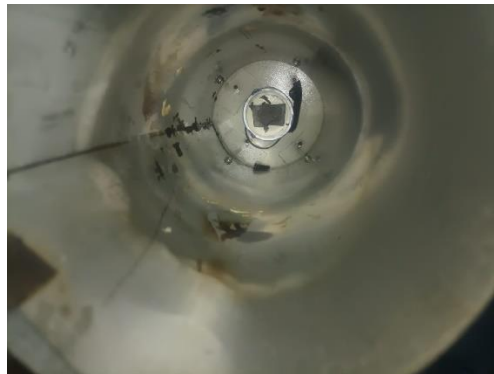
Gambar 5.2. (a) Elemen pemanas dan (b) *Wiring* elemen pemanas

Elemen pemanas untuk menghaluskan botol ini dibuat menggunakan 2 heater AC yang dibuat memutar tabung berongga *galvalum*. Pemilihan 2 heater digunakan agar semakin cepat memanaskan *galvalum*. Penggunaan *galvalum* dipilih karena mudah menghantarkan panas dan tidak mudah berkarat.



Sensor temperatur pada elemen pemanas diletakkan di udara bagian dalam elemen pemanas tanpa menyentuh *galvalum* dan elemen pemanas. Hal ini dilakukan karena pemanasan botol dilakukan oleh udara, bukan oleh besi *galvalum* secara langsung.

Elemen pemanas dikendalikan menggunakan *termistor*. Dengan menggunakan *termistor*, temperatur pada pemanas dapat dikendalikan dengan meningkatkan maupun menurunkan temperatur. Temperatur yang terukur pada sensor temperatur akan ditunjukkan pada layar LCD pada *termistor*.



Gambar 5.3. Bagian dalam elemen pemanas

Pada bagian dalam elemen pemanas diberi motor yang berfungsi untuk memutar botol dapat dilihat pada Gambar 5.3. Pemutaran botol dilakukan agar panas yang diterima botol menjadi lebih merata sehingga botol dapat menjadi halus secara maksimal seperti pada Gambar 5.4.





Gambar 5.4. Perbedaan botol yang dihaluskan menggunakan elemen pemanas (atas) dengan tidak di haluskan (bawah)

V.1.2. Hasil Pembuatan Mesin *Pultrusion*

Pada Gambar 5.5 merupakan mesin *pultrusion* yang dibuat. Komponen-komponen yang menyusun mesin *pultrusion* terdiri dari :

A : Elemen Pemanas/Penghalus Botol

B: Pemotong Botol

C: Penampungan *Strip* Botol

D : Pembersih *Strip* Botol

E : *Heating Block Nozzle / Ekstruder*

F : *Gear*

G : Motor Nema

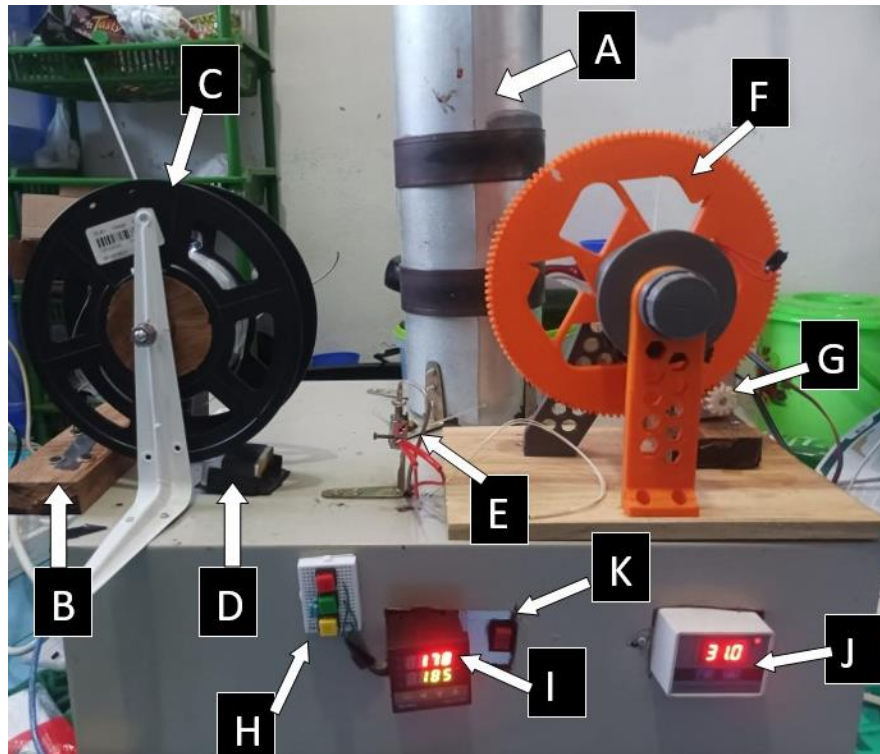
H : Remot Kecepatan Motor

I : Termostat *Heating Block Nozzle*

J : Termostat Elemen Pemanas

K : Tombol *On, Off* Motor





Gambar 5.5. Mesin *pultrusion*

Pada mesin *pultrusion* yang dibuat alat pengendali kecepatan motor dimana kecepatan awal motor adalah 150 step. Alat pengendali ini digunakan untuk meningkatkan dan menurunkan kecepatan motor. Tombol merah digunakan untuk meningkat kecepatan motor sebesar 50 step dan tombol hijau digunakan untuk menurunkan kecepatan motor sebesar 50 step, sedangkan tombol kuning digunakan untuk mereset kecepatan motor ke kecepatan awal.

Mesin *pultrusion* yang dibuat dapat dilihat pada Gambar 5.6 memiliki 2 mode, yaitu mode A dimana menggunakan botol yang masih utuh tetapi telah dihaluskan atau menggunakan mode B yaitu menggunakan botol yang sudah dijadikan *strip*. Apabila menggunakan botol yang masih utuh maka botol yang telah dihaluskan tersebut perlu dimasukkan terlebih dahulu di pemotong pada Gambar 5.6.



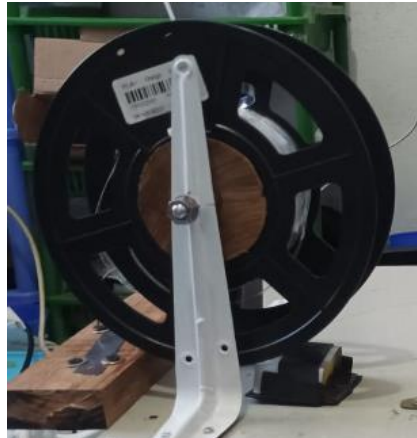


Gambar 5.6. Pemotong botol plastik

Setelah botol dimasukkan kedalam pemotong botol plastik, botol ditarik menuju *heater* ekstruksi. *Strip* botol akan terbentuk karena penarikan botol. Pada penelitian ini digunakan *strip* botol dengan ukuran 7mm. Ukuran *strip* botol dapat disesuaikan sesuai kebutuhan. *Strip* botol kemudian dimasukkan kedalam *nozzle*. *Nozzel* ini terhubung dengan elemen pemanas yang akan melelehkan *strip* botol menjadi *filament*. Setelah itu *filament* diikatkan pada tali pada *gear*. Mesin *pultrusion* akan bekerja secara otomatis untuk mengubah botol plastik menjadi *filament* hingga botol tersebut habis.

Apabila mode yang digunakan adalah mode dengan menggunakan *strip* botol maka botol perlu untuk dipotong menggunakan alat pemotong terlebih dahulu, setelah botol terpotong menjadi *strip*, *strip* dari botol tersebut dapat disambungkan dengan *strip* dari botol lainnya dan ditampung pada penampungan *strip* pada Gambar 5.7. Setelah mencapai sambungan *strip* terakhir, *strip* botol tersebut dapat dimasukkan menuju *nozzle* pada mesin *pultrusion*. *Nozzle* ini akan memanaskan *strip* hingga *strip* berubah menjadi *filament*. Setelah itu *filament* diikatkan pada tali pada *gear*. Mesin *pultrusion* akan bekerja secara otomatis untuk mengubah botol plastik menjadi *filament* hingga *strip* tersebut habis.



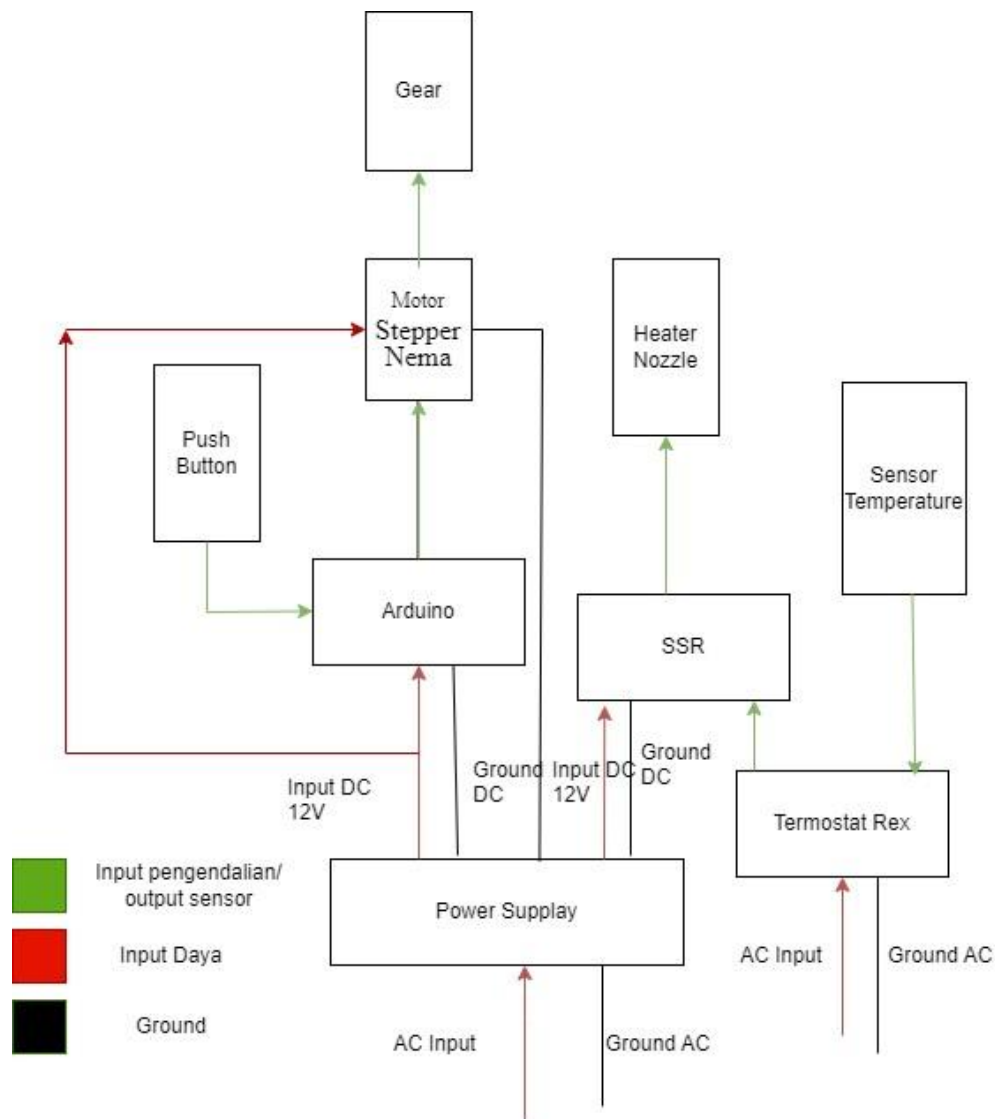


Gambar 5.7. Penampungan *strip*

Menggunakan mode A dan B memiliki kelebihan dan kelemahannya masing-masing. Pada mode A apabila botol yang digunakan habis maka perlu dilakukan penyambungan, penyambungan yang dilakukan dapat dilakukan sebelum *strip* botol terakhir melewati *nozzle* atau setelah menjadi *filament*. Model B, *strip* botol perlu untuk disambung terlebih dahulu kedalam penampungan *strip*. Dengan menyambungkan *strip* terlebih dahulu maka untuk selanjutnya mesin *pultrusion* akan terus dapat mengubah *strip* botol menjadi *filament* sampai semua *strip* yang ditampung di penampungan *strip* habis.

Temperatur pada *nozzle* dapat dikendalikan menggunakan *termistor* yang terhubung dari *heater* blok menuju *termostat*. Dengan menggunakan *termistor*, temperatur pada *heater* pada *heater* blok yang terhubung dengan *nozzle* dapat dikendalikan dengan meningkatkan maupun menurunkan temperatur. Temperatur yang terukur pada sensor temperatur juga akan ditunjukkan pada layar LCD pada *termostat*. Struktur mesin pultrusion yang lebih jelas dapat dilihat pada Gambar 5.8.





Gambar 5.8. Struktur mesin *pultrusion*

V.1.3. Hasil Pembuatan *Filament*

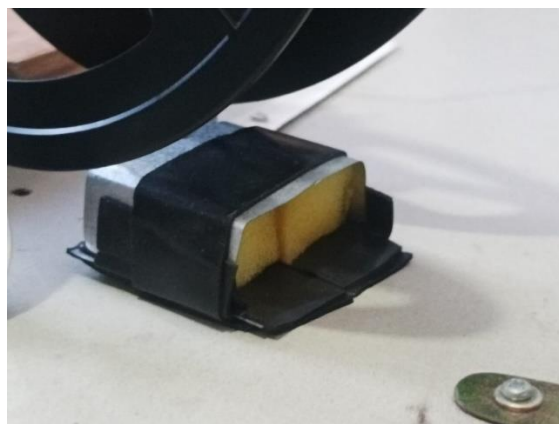
Botol PET yang sudah dipotong akan membentuk *strip* botol seperti pada Gambar 5.9. *Strip* botol ini dilewatkan terlebih dahulu menuju pembersih strip botol untuk membersihkan debu yang menempel pada *strip*. Ukuran pada strip botol yang dibuat adalah 7 mm untuk *nozzle* 1,6mm. Ukuran ini dapat divariasikan bergantung dengan ukuran *nozzle* yang dimiliki.





Gambar 5.9. *Strip* botol PET

Pembersihan pada strip yang dapat dilihat pada Gambar 5.10 berguna agar debu tidak menempel pada tahap *printing* ketika *filament* telah jadi. Debu yang menempel pada *filament* menyebabkan hasil *printing* menjadi kurang melekat pada *bedplate*. Setelah dilewatkan pembersih *strip* botol, *strip* botol akan di masukkan ke dalam *nozzle* yang berdiameter 1,6 mm dan akan dipanaskan. Ukuran *nozzle* dapat diganti sesuai dengan kebutuhan.

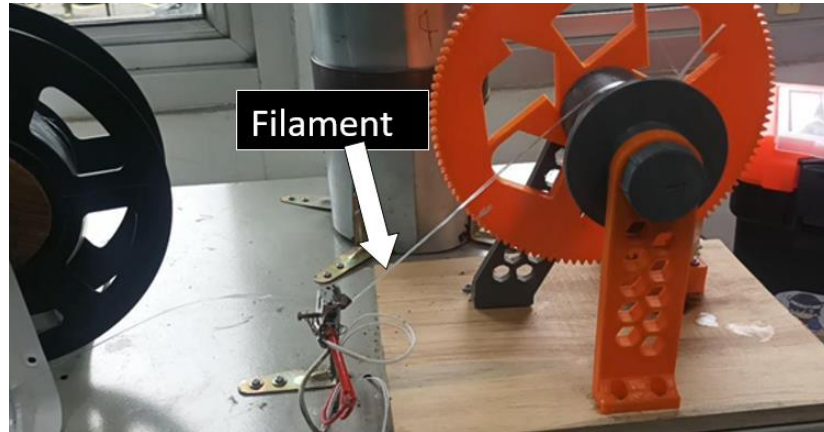


Gambar 5.10. Pembersih *strip* botol

Ketika *nozzle* telah dipanaskan, *strip* botol akan berubah menjadi *filament*. *Filament* kemudian diikatkan pada tali di *gear* yang dapat dilihat pada Gambar

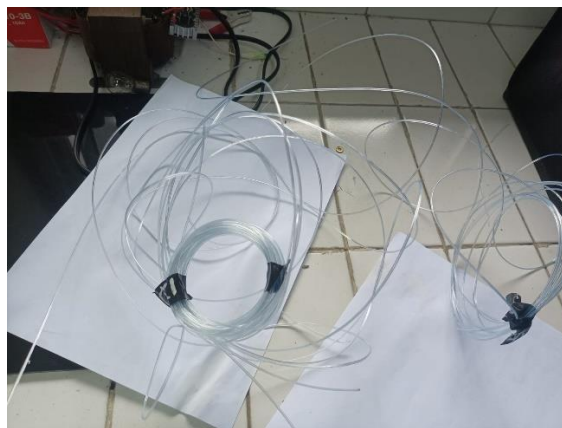


5.11. *Gear* secara otomatis akan berputar dan menarik *filament* sehingga menarik *strip* botol secara otomatis.



Gambar 5.11. Pemrosesan *filament* pada mesin *pultrusion*

Filament yang sudah terkumpul pada *gear* dapat dilepas. *Filament* yang dihasilkan dapat dilihat pada Gambar 5.12. Hasil dari *filament* tersebut kemudian dapat dikumpulkan untuk digunakan sebagai bahan dalam melakukan *3D print*.



Gambar 5.12. *Filament* botol PET

Massa dari *filament* yang dihasilkan diukur menggunakan timbangan. Pengukuran massa tersebut dapat dilihat pada Gambar 5.13. Pengukuran massa



kemudian dikurangi oleh massa solasi. Pengukuran massa ini diperlukan untuk mengetahui massa *filament* setiap meternya.



Gambar 5.13. Pengukuran massa dari *filament* (pengukuran massa dikurangi massa solasi)

Pada Tabel 5.1 menyajikan hasil pengukuran massa *filament*. Dari hasil pengukuran didapatkan bahwa massa *filament* yang dibuat berkisar 1,36 gram/meter. Pengukuran diameter *filament* dilakukan menggunakan jangka sorong dari hasil pengukuran didapatkan diameter sebesar 1,6 mm.

Tabel 5.1. Massa *Filament*

Massa <i>Filament</i> + solasi	Massa solasi	Massa Bersih <i>Filament</i>	Panjang <i>Filament</i>	Massa <i>Filament</i> (gram / meter)
44,1 gram	1,4 gram	42,7 gram	31,4 m	1,36



V.1.4. Hasil Pembuatan *Speciment Uji tarik*

Filament yang telah dibuat di masukkan ke dalam *3D printing*. Kemudian dilakukan *print* dengan standar ASTM D 638. Hasil *3D print* dapat dilihat pada Gambar 5.14. *Print* dilakukan sebanyak 3x sesuai dengan variasi *speciment* yang digunakan dimana dilakukan 3 variasi temperatur pada *nozzle pultrusion*. Setiap *speciment* dilakukan *print* sebanyak 2x, hal ini bermaksud untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat menggunakan metode *diplot*.



Gambar 5.14. *Speciment* ASTM D638 yang belum dibersihkan

V.2. Analisis Hasil Uji Tarik

Uji tarik dilakukan menggunakan *speciment 3d printing* dengan standar ASTM D 638. Dari hasil uji tarik didapatkan Tabel 5.2. Pada tabel terdapat *Fmax*, *tensile strength*, *elongation*, *modulus*, *yeild force* dan *yeild stress*.



Tabel 5.2. Hasil uji tarik

Test Num.	Sample	Area (mm ²)	F Max (N)	Tensile Strength (MPa)	Elongation (%)	Modulus (MPa)	Yield Force (N)	Yield Stress (MPa)
1	195-1	10.81	744.14	68.84	134.06	575.99	447.73	41.42
2	195-2	10.81	718.80	66.48	72.51	2626.86	669.38	61.91
3	175-1	10.81	689.43	63.77	25.39	2521.28	673.03	62.25
4	175-2	10.81	652.86	60.38	2.89	2386.38	557.90	51.60
5	185-1	10.81	635.87	58.81	39.82	2518.20	571.68	52.87
6	185-2	10.81	632.05	58.46	22.39	2569.94	611.07	56.52
Average	0.0000	10.81	678.86	62.79	49.51	2199.77	588.47	54.43

Pada uji tarik dilakukan uji tarik sebanyak 2 kali untuk setiap sample specimen. Dimana dilakukan variasi *speciment* menggunakan temperatur 195 °C, 185 °C, dan 175 °C. Dari data hasil uji tarik diatas dibuat rata-rata hasil uji tarik dari setiap *speciment*, dapat dilihat pada Tabel 5.3. Pembuatan rata-rata ini digunakan untuk mengetahui kemampuan rata-rata dari setiap variasi temperatur *speciment* yang dilakukan uji tarik.

Tabel 5.3. Rata-Rata hasil uji tarik setiap variasi *speciment*

No	Temperatur (°C)	Area (mm ²)	Fmax (N)	Tensile Strength (Mpa)	Elonga tion (%)	Modulus (Mpa)	Yeild Force (N)	Yeild Stress (Mpa)
1	195	10,81	731,47	67,66	103,285	1601,425	558,555	51,665
2	185	10,81	633,96	58,635	31,105	2544,07	591,375	54,695
3	175	10,81	671,145	62,075	14,14	2453,83	615,465	56,925

Area pada *speciment* dihitung berdasarkan luasan ketebalan pada *speciment* yang akan diukur kemampuan uji tariknya. Perhitungan ini diperlukan untuk mengetahui *tensile strength*. Dimana *tensile strength* merupakan hasil pembagian F max terhadap area pada lekukan *speciment* (daerah dimana *spesiment* diukur *tensile* nya. *Tensile strength* adalah tegangan maksimum yang dapat ditahan oleh sebuah material saat ditarik atau diregangkan sebelum akhirnya patah. Pada dasarnya, itu mengukur seberapa besar gaya yang dapat ditahan oleh sebuah material sebelum gagal dalam tegangan. Dari data dapat dilihat bahwa nilai Fmax



pada temperatur 195°C memiliki nilai yang lebih tinggi setelah itu disusul temperatur 175 °C dan 185°C. Nilai *F max* yang semakin tinggi menyebabkan nilai *tensile strength* akan meningkat.

Elongation, juga dikenal sebagai regangan pada patah atau *elongasi ultimate*, merujuk pada seberapa jauh sebuah material dapat meregang atau berdeformasi sebelum akhirnya patah. *Elongation* ini dinyatakan sebagai persentase dan mewakili peningkatan panjang sebuah material relatif terhadap panjang aslinya saat dikenai tegangan sampai kegagalan. Dari sampel dapat dilihat bahwa pada temperatur 195°C memiliki *elongation* tertinggi disusul oleh 185°C dan 175°C. Hal ini menunjukkan semakin tinggi temperatur yang dibuat pada *filament* akan menyebabkan semakin tingginya nilai *elongation* dari hasil *printing* menggunakan *filament* tersebut.

Modulus, khususnya *Young's modulus* atau modulus elastisitas, adalah ukuran kekakuan sebuah material. Ini mengkuantifikasi kemampuan sebuah material untuk berdeformasi di bawah tekanan sepanjang suatu sumbu saat gaya diterapkan tegak lurus terhadap sumbu tersebut. *Modulus Young* dinyatakan dalam satuan tekanan, seperti Pascal, dan mencirikan kemiringan kurva tegangan-regangan di wilayah elastis linier. Modulus yang lebih tinggi menunjukkan material yang lebih kaku.

Yield Force, juga dikenal sebagai kekuatan *yield*, adalah titik di kurva tegangan-regangan di mana sebuah material mulai mengalami deformasi plastis atau perubahan permanen dalam bentuknya tanpa peningkatan signifikan dalam beban yang diterapkan. Ini adalah titik di mana material tidak lagi kembali ke bentuk dan ukuran aslinya setelah beban diberhentikan. Perilaku material sebelum mencapai *yield force* disebut sebagai deformasi elastis, di mana material dapat mengembalikan bentuk dan ukurannya setelah beban diberhentikan tanpa adanya deformasi permanen. Namun, setelah *yield force* tercapai, material akan mengalami deformasi plastis, yang berarti *deformasi* permanen terjadi. *Yield force* sangat penting dalam pemilihan dan desain material karena merupakan parameter penting dalam menentukan batas beban yang aman untuk aplikasi tertentu. Material yang

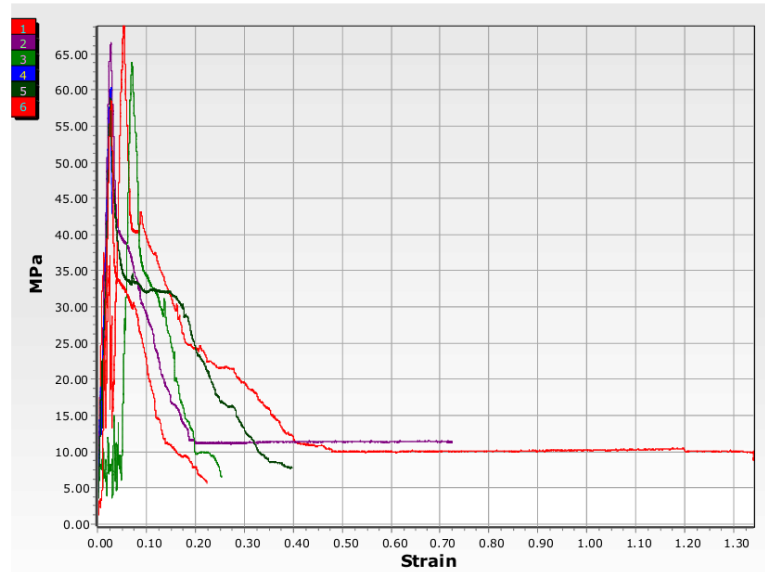


memiliki *yield force* yang lebih tinggi cenderung lebih kuat dan mampu menahan beban yang lebih besar tanpa mengalami deformasi permanen.

Yield stress adalah tegangan maksimum yang dapat ditahan oleh sebuah material sebelum mulai mengalami deformasi plastis atau perubahan permanen dalam bentuknya tanpa peningkatan yang signifikan dalam beban yang diterapkan. Ini adalah titik di mana material secara permanen berubah bentuknya ketika dikenai tegangan, meskipun beban yang diterapkan mungkin tidak meningkat. Saat material disubjekkan pada tegangan yang bertambah, dalam fase awal, responsnya biasanya elastis, artinya ketika beban dihilangkan, material tersebut akan kembali ke bentuk dan ukuran aslinya tanpa adanya deformasi permanen. Namun, ketika tegangan mencapai titik *yield*, material mulai menunjukkan perilaku plastis, di mana deformasi permanen terjadi. Material dengan *yield stress* yang lebih tinggi cenderung lebih kuat dan mampu menahan beban yang lebih besar tanpa mengalami deformasi permanen.

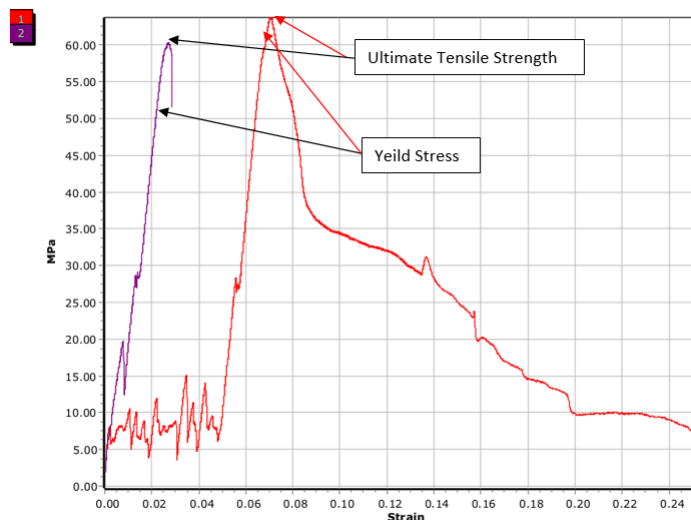
Hasil pengukuran uji tarik pada *speciment* dapat dilihat dalam bentuk grafik pada Gambar 5.15. Grafik *Tensile Strength vs Strain* adalah alat yang digunakan untuk memvisualisasikan respons sebuah material terhadap penerapan tegangan atau gaya yang dikenai padanya (*speciment*). Grafik ini merupakan hasil dari pengujian tegangan-regangan, di mana material dikenai gaya tarik secara bertahap hingga patah, dan tegangan yang diterapkan terhadap material diukur seiring dengan regangan yang terjadi. Sumbu X pada grafik merepresentasikan *strain* sedangkan pada sumbu Y pada grafik merepresentasikan *tensile strength*.





Gambar 5.15. Grafik *Tensile Strength Vs Strain*

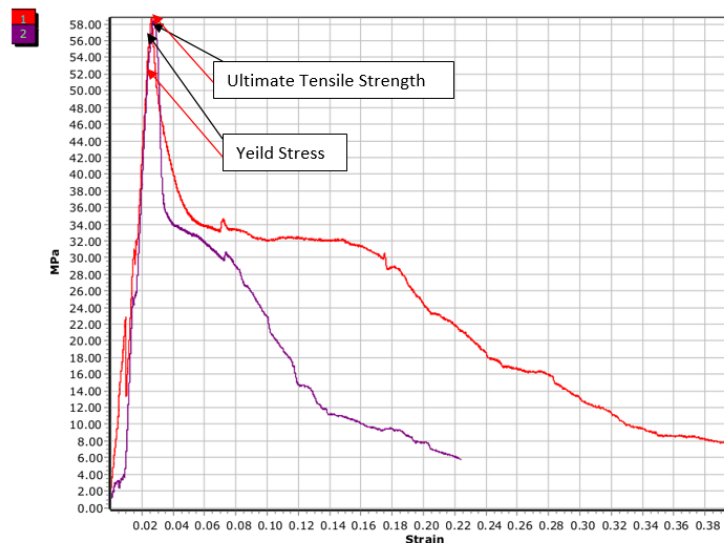
Grafik pada Gambar 5.16. Grafik Uji Tarik *Speciment* Temperatur 175°C merupakan grafik uji tarik *speciment* pada variasi temperatur 175°C. Grafik warna merah merupakan grafik pada *speciment* 1 unruk variasi 175°C dan grafik warna ungu adalah grafik pada *speciment* 2 untuk variasi temperatur 175°C. Nilai Titik *ultimate tensile strength* dan *yeild stress* dapat dilihat lebih jelas pada Tabel 5.2.



Gambar 5.16. Grafik uji tarik *speciment* temperatur 175°C



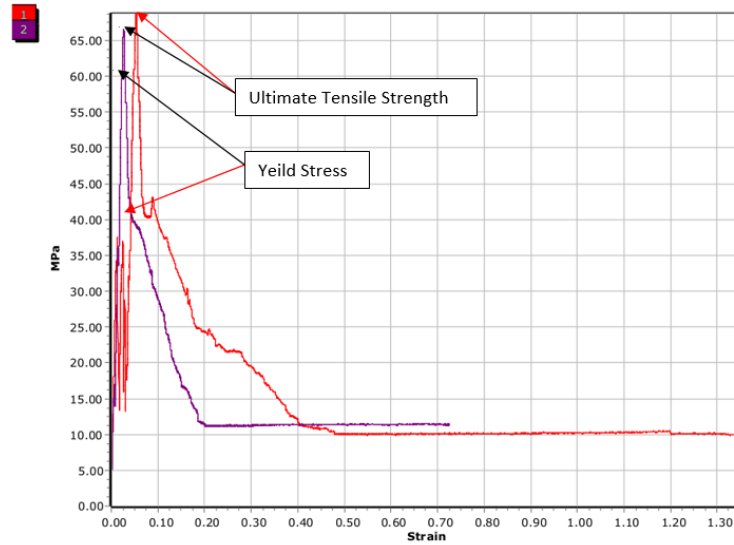
Grafik pada Gambar 5.17 merupakan grafik uji tarik *speciment* pada variasi temperatur 185°C. Grafik warna merah merupakan grafik pada *speciment* 1 unruk variasi 185°C dan grafik warna ungu adalah grafik pada *speciment* 2 untuk variasi temperatur 185°C. Nilai titik *ultimate tensile strength* dan yeild stress dapat dilihat lebih jelas pada Tabel 5.2.



Gambar 5.17. Grafik uji tarik *speciment* temperatur 185°C

Grafik pada Gambar 5.18 merupakan grafik uji tarik *speciment* pada variasi temperatur 195°C. Grafik warna merah merupakan grafik pada *speciment* 1 unruk variasi 195°C dan grafik warna ungu adalah grafik pada *speciment* 2 untuk variasi temperatur 195°C. Nilai Titik *ultimate tensile strength* dan *yeild stress* dapat dilihat lebih jelas pada Tabel 5.2.





Gambar 5.18. Grafik uji tarik *speciment* temperatur 195°C

Untuk mengetahui kualitas *filament* yang telah dibuat, dilakukan 2 jenis perbandingan yaitu perbandingan dengan *filament* PET dari mesin *pultrusion* pada penelitian lain dan perbandingan dengan *filament* jenis lainnya yang dapat dilihat pada Tabel 5.4.



Tabel 5.4. Perbandingan dengan *filament* jenis lainnya

No	Material	Persentase Infill	Tensile Strength (MPa)	Strain (%)	T-Bed (°C)	T-Ekstruder (°C)	Referensi
1	PET Pultrusion	100%	67,66	103	100	260	Penelitian Ini
2	BPET Pultrusion	100%	26,2	5,5	85	256	(Tylman & Dzierzek, 2020) [6]
3	PC	100%	65	8	132	255	(Avila dkk., 2019) [9]
4	PMMA	100%	70	6	97	255	(Avila dkk., 2019) [9]
5	PEEK	100%	95	7	128	355	(Avila dkk., 2019) [9]
6	PLA	100%	45	6	60	215	(Vidakis dkk., 2020) [10]
7	ABS	100%	35	7	80	260	(Vidakis dkk., 2020) [10]
8	PETG	100%	40	7	70	240	(Vidakis dkk., 2020) [10]
9	PA6	100%	16	120	60	235	(Vidakis dkk., 2020) [10]
10	PP	100%	25	16	105	230	(Vidakis dkk., 2020) [10]

Pada perbandingan dengan *filament* PET dari mesin *pultrusion* pada penelitian lain, dilakukan perbandingan antara penelitian ini dan penelitian Tylman & Dzierzek (2020). Hasil uji tarik yang dilakukan pada BPET yang dibuat Igor dibandingkan dengan penelitian ini, penelitian ini memiliki nilai *tensile strength* dan *strain* yang lebih tinggi. Dengan kata lain hasil 3D *print* pada *filament* yang terbuat dari botol plastik yang dihasilkan pada penelitian ini memiliki ketahanan uji



tarik yang lebih baik dibandingkan pada *filament* pada mesin *pultrusion* yang dibuat oleh Igor.

Jika dibandingkan dengan *filament* jenis lainnya pada penelitian oleh Avila dkk. (2019) dan Vidaskis dkk. (2020) yang dapat dilihat pada Tabel 5.4. *Filament* yang dibuat menggunakan botol plastik PET pada temperatur 195°C yang telah dibuat memiliki kemampuan *tensile strength* yang lebih tinggi dibandingkan dengan *filament* PC, PLA, ABS, PETG, PA6, PP serta memiliki strain/elongation yang lebih baik dibandingkan pada *filament* PC, PMMA, PEEK, PLA, ABS, PETG, PP.

Tensile strength yang lebih tinggi berarti hasil 3D print dari *filament* PET pada temperatur 195 °C yang dibuat pada penelitian ini, memiliki nilai maksimum yang dapat ditahan oleh sebuah material saat ditarik atau diregangkan sebelum akhirnya patah, lebih tinggi dibandingkan *filament* jenis PC, PLA, ABS, PETG, PA6, PP. Dalam aplikasi di mana kegagalan material dapat menyebabkan risiko keamanan atau kerugian besar, bahan dengan *tensile stress* yang tinggi memberikan keandalan dan keamanan tambahan. Selain itu, bahan dengan *tensile strength* yang tinggi memungkinkan pembuatan komponen yang lebih tipis dan ringan tanpa mengorbankan kekuatan jika dibandingkan bahan dengan *tensile strength* yang rendah.

Strain/Elongation yang lebih tinggi berarti hasil 3D print dari *filament* PET pada temperatur 195 °C yang dibuat dapat meregang lebih panjang dibandingkan *filament* jenis PC, PMMA, PEEK, PLA, ABS, PETG, PP. Bahan dengan elongation yang tinggi memberikan fleksibilitas lebih besar dalam desain, memungkinkan pembuatan komponen yang kompleks dan geometris tanpa risiko tinggi patah. Bahan yang memiliki elongation yang tinggi membuatnya lebih tahan lama dalam aplikasi yang memerlukan fleksibilitas.

V.3. Analisis Hasil Pengukuran Konsumsi Energi

Pengukuran konsumsi energi pada mesin *pultrusion* dilakukan dengan memisahkan pengukuran elemen pemanas dan *pultrusion* tanpa elemen pemanas.



Setelah itu juga dilakukan pengukuran 1 jam setelah temperatur pada elemen pemanas atau *nozzel* mencapai *set point*.

Pada Tabel 5.5 dilakukan pengukuran konsumsi energi elemen pemanas menuju *set point* dari tabel tersebut didapatkan nilai kWh rata-rata yang digunakan elemen pemanas untuk mencapai *set point* adalah 0,203 kWh.

Tabel 5.5. Konsumsi energi elemen pemanas menuju *set point*

Elemen Pemanas menuju <i>set point</i>					
Pengukuran ke-	Waktu	kWh	V	W_{low}	W_{high}
1	15 menit 24 detik	0,145	230,2	0,3	733,8
2	22 menit 00 detik	0,28	229,5	9,1	905,3
3	16 menit 38 detik	0,185	220,3	6,6	681,5

Pada Tabel 5.6 dilakukan pengukuran konsumsi energi elemen pemanas 1 jam setelah mencapai *set point*. Dari tabel tersebut didapatkan nilai kWh rata-rata yang digunakan elemen pemanas 1 jam setelah mencapai *set point* adalah 0,509 kWh.

Tabel 5.6. Konsumsi energi elemen pemanas 1 jam setelah *set point*

Elemen Pemanas 1 Jam setelah <i>set Point</i>						
Pengukuran ke-	Waktu	kWh	V	A	W_{low}	W_{high}
1	1 jam	0,457	216,3	3,03	25,6	728,9
2	1 jam	0,578	220,5	3,084	3,3	905,3
3	1 jam	0,491	219,5	3,09	0,3	684,9

Pada Tabel 5.7 dilakukan pengukuran konsumsi energi pada *pultrusion* tanpa menggunakan elemen pemanas hingga mencapai *set point*. Dari tabel tersebut didapatkan nilai kWh rata-rata yang digunakan mesin *pultrusion* mencapai *set point* adalah 0,00233 kWh.



Tabel 5.7. Konsumsi energi *pultrusion* menuju *set point*

<i>Pultrusion</i> menuju <i>set point</i>					
Pengukuran ke-	Waktu	kWh	V	W_{low}	W_{high}
1	7 menit 8 detik	0,002	234,8	0,7	46,6
2	8 menit 4 detik	0,002	221,2	4,1	42,4
3	7 menit 48 detik	0,003	260,5	6,7	59,6

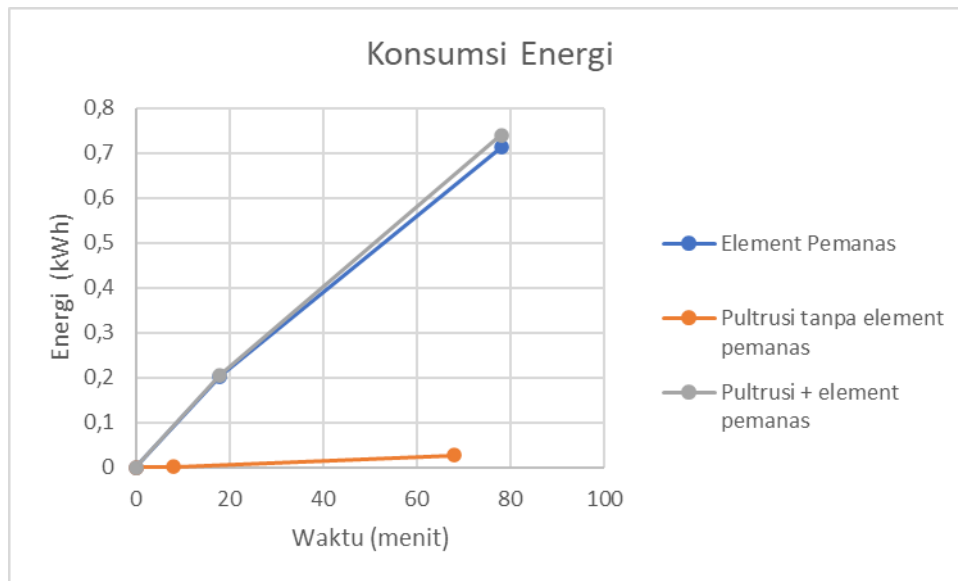
Pada Tabel 5.8 dilakukan pengukuran konsumsi energi pada *pultrusion* 1 jam setelah mencapai *set point* tanpa menggunakan elemen pemanas. Dari tabel tersebut didapatkan nilai kWh rata-rata yang digunakan mesin *pultrusion* 1 jam setelah mencapai *set point* adalah 0,0257 kWh.

Tabel 5.8. Konsumsi energi *pultrusion* 1 jam setelah *set point*

<i>Pultrusion</i> 1 Jam setelah <i>set poin</i>						
Pengukuran Ke-	Waktu	kWh	V	A	W_{low}	W_{high}
1	1 jam	0,031	223,7	0,296	0,7	53,7
2	1jam	0,02	221,4	0,545	4,1	53,7
3	1 jam	0,026	227	0,541	5,7	59,6

Dari hasil pengukuran konsumsi energi listrik dibuat grafik yang dapat dilihat pada Gambar 5.19. Grafik ini memperlihatkan konsumsi energi listrik yang digunakan pada mesin *pultrusion* yang dibuat dengan hanya elemen pemanas, *pultrusion* tanpa elemen pemanas dan *pultrusion* dengan elemen pemanas.





Gambar 5.19. Grafik konsumsi energi listrik

Dari data yang didapatkan perlu untuk mendapatkan BEP (*Break-Even Point*) dari *filament* yang dibuat untuk mengetahui nilai jual minimal untuk mencapai keuntungan. Dalam menghitung BEP tersebut, perlu untuk dilakukan perhitungan modal yang digunakan untuk botol plastik serta konsumsi energi yang digunakan.

Sebuah botol plastik 1,5L dalam keadaan kosong memiliki berat rata-rata 35 gram dan menghasilkan 7 meter *filament* dengan berat 9,45 gram. Botol plastik 1 Kg berisi sebanyak 28 botol. Untuk mendapatkan *filament* PET seberat 1 Kg bisa didapatkan dengan menggunakan 3,7 Kg botol plastik PET.

Konsumsi energi yang dibutuhkan untuk mencapai *set point* elemen pemanas adalah 0,203 kWh dan konsumsi energi yang digunakan setiap jamnya setelah mencapai set point 0,509 kWh. Dibutuhkan waktu selama 15 menit untuk menghaluskan sebuah botol plastik. Jadi, untuk menghaluskan 28 botol dibutuhkan waktu 7 jam.



Total konsumsi energi element pemanas

$$\begin{aligned}
 &= \text{Konsumsi energi sampai set point} \\
 &+ \frac{\text{Konsumsi energi element pemanas}}{\text{jam}} \times \frac{\text{waktu}}{\text{kg}} \times \text{jumlah} \\
 &= 0,203 \text{ kWh} + \frac{0,509 \text{ kWh}}{\text{jam}} \times 7 \frac{\text{jam}}{\text{kg}} \times 3,7 \text{ kg} \\
 &= 0,203 \text{ kWh} + 13,183 \text{ kWh} \\
 &= 13,386 \text{ kWh}
 \end{aligned}$$

Konsumsi energi yang dibutuhkan untuk mencapai set point pada *pultrusion* tanpa elemen pemanas adalah 0,00233 kWh dan daya yang digunakan setiap jamnya setelah mencapai set point 0,0257 kWh. Dengan asumsi digunakan kecepatan 150 step pada mesin *pultrusion* maka akan menghasilkan *filament* sepanjang 15cm/menit. Massa pada *filament* 1,36 gram/meter dengan kata lain dibutuhkan *filament* sepanjang 735,3 meter untuk membuat *filament* 1kg. Dibutuhkan 4902 menit atau sekitar 81,7 jam untuk menghasilkan *filament* seberat 1 kg.

Total konsumsi energi pultrusi

$$\begin{aligned}
 &= \text{Konsumsi energi sampai set point} \\
 &+ \frac{\text{Konsumsi energi pultrusi}}{\text{jam}} \times \text{waktu} \\
 &= 0,00233 \text{ kWh} + \frac{0,0257 \text{ kWh}}{\text{jam}} \times 81,7 \text{ jam} \\
 &= 0,00233 \text{ kWh} + 2,100 \text{ kWh} \\
 &= 2,102 \text{ kWh}
 \end{aligned}$$

Untuk mengetahui total konsumsi energi yang digunakan maka perlu untuk melakukan penjumlahan antara konsumsi energi pada elemen pemanas dengan konsumsi energi pada *pultrusion*.



Total Konsumsi Energi

$$\begin{aligned}
 &= \text{Konsumsi energi element pemanas} \\
 &+ \text{Konsumsi energi Pultrusi} \\
 &= 13,386 \text{ kWh} + 2,102 \text{ kWh} \\
 &= 15,488 \text{ kWh}
 \end{aligned}$$

Harga botol yang digunakan untuk membuat *filament* perlu dihitung untuk mengetahui harga bahan yang digunakan.

$$\begin{aligned}
 \text{Harga botol} &= \text{Berat botol} \times \text{harga} \frac{\text{botol}}{\text{kg}} \\
 &= 3,7 \times \text{Rp } 3.750 \\
 &= \text{Rp } 13.875
 \end{aligned}$$

Harga listrik yang digunakan untuk membuat *filament* 1 kg dapat dihitung dengan mengalikan total daya yang digunakan dengan harga listrik/kWh.

$$\begin{aligned}
 \text{Harga listrik digunakan} &= \text{Total Konsumsi energi} \times \text{harga} \frac{\text{listrik}}{\text{kWh}} \\
 &= 15,488 \text{ kWh} \times \frac{\text{Rp}1444,70}{\text{kWh}} \\
 &= \text{RP } 22.376
 \end{aligned}$$

Biaya produksi dari pembuatan *filament* setiap kilogramnya dapat dicari dengan menambahkan harga botol dengan harga listrik yang digunakan. Pencarian nilai biaya produksi digunakan untuk mendapatkan titik di mana total pendapatan sama dengan total biaya, sehingga tidak ada laba atau rugi yang dihasilkan.

$$\begin{aligned}
 \text{Biaya produksi} &= \text{Harga botol} + \text{Harga listrik digunakan} \\
 &= \text{Rp } 13.875 + \text{RP } 22.376 \\
 &= \text{Rp } 36.251
 \end{aligned}$$

Dari hasil perhitungan yang dilakukan didapatkan BEP dari pembuatan 1kg *filament* dengan harga Rp 36.251.



BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

VI.1. Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang dilakukan, didapatkan beberapa kesimpulan, yaitu:

- Telah dibuat sistem *pultrusion* yang terintegrasi elemen pemanas berbasis limbah plastik polyethylene terephthalate yang dilengkapi dengan elemen pemanas, pemotong botol, penampungan *strip* botol, *gear transmission* kecepatan, *control temperatur*.
- Temperatur pada pembuatan *filament* berpengaruh terhadap *tensile strength* dari hasil *printing filament* tersebut, dimana pada temperatur heat blok pada nozzle 195 °C mendapatkan *tensile strength* 67,66 Mpa, pada temperatur 185 °C mendapatkan *tensile strength* 58,635 Mpa, sedangkan pada temperatur 175 °C mendapatkan *tensile strength* 62,075 Mpa.
- Nilai kWh rata-rata yang digunakan elemen pemanas untuk mencapai *set point* adalah 0,203 kWh dan nilai kWh rata-rata yang digunakan elemen pemanas 1 jam setelah mencapai *set point* adalah 0,509 kWh. Sedangkan nilai kWh rata-rata yang digunakan mesin *pultrusion* mencapai *set point* adalah 0,00233 kWh dan nilai kWh rata-rata yang digunakan mesin *pultrusion* 1 jam setelah mencapai *set point* adalah 0,0257 kWh.

VI.2. Saran

Sebagai saran untuk penelitian selanjutnya, diperlukan untuk mencari pengaruh kecepatan gear terhadap *tensile strength* pada hasil 3D *printing* dari *filament*. Selain itu, penelitian yang melibatkan berbagai jenis plastik lainnya juga perlu untuk dilakukan untuk mendapatkan karakteristik *filament* dari semakin banyak jenis plastik.



DAFTAR PUSTAKA

- [1] N. Fonna, *Pengembangan Revolusi Industri 4.0 dalam Berbagai Bidang*. GUEPEDIA, 2019.
- [2] L. J. Kumar, P. M. Pandey, and D. I. Wimpenny, Eds., *3D Printing and Additive Manufacturing Technologies*. Singapore: Springer, 2019. doi: 10.1007/978-981-13-0305-0.
- [3] A. Dey, I. N. Roan Eagle, and N. Yodo, “A Review on Filament Materials for Fused Filament Fabrication,” *J. Manuf. Mater. Process.*, vol. 5, no. 3, Art. no. 3, Sep. 2021, doi: 10.3390/jmmp5030069.
- [4] R. B. Kristiawan, F. Imaduddin, D. Ariawan, Ubaidillah, and Z. Arifin, “A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: Filament processing, materials, and printing parameters,” *Open Eng.*, vol. 11, no. 1, pp. 639–649, Jan. 2021, doi: 10.1515/eng-2021-0063.
- [5] M. Taufik, G. S. Lubis, and M. Ivanto, “Rancang Bangun Mesin Pultrusion Pembuat Filamen 3D Printing Berbasis Limbah Plastik Botol PET,” *JTRAIN J. Teknol. Rekayasa Tek. Mesin*, vol. 4, no. 1, pp. 01–08, Dec. 2022.
- [6] I. Tylman and K. Dzierżek, “Filament for a 3D Printer from Pet Bottles- Simple Machine,” *Int. J. Mech. Eng. Robot. Res.*, pp. 1386–1392, 2020, doi: 10.18178/ijmerr.9.10.1386-1392.
- [7] M. L. Sonjaya, M. Mutmainnah, and M. F. Hidayat, “Construction of Plastic Waste Extruding Machine to Produce Filaments of 3D Printing Machine,” *Int. J. Mech.*, vol. 16, pp. 82–90, Jul. 2022, doi: 10.46300/9104.2022.16.10.
- [8] Prof. V. D. Dhopte, G. S. Parate, M. P. Narkhede, and A. Bhongade, “Design and Fabrication of PET Filament Making Machine,” *Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol.*, vol. 10, no. 4, pp. 1529–1531, Apr. 2022, doi: 10.22214/ijraset.2022.41568.
- [9] E. De Avila, J. Eo, J. Kim, and N. P. Kim, “Heat Treatment Effect on Mechanical Properties of 3D Printed Polymers,” *MATEC Web Conf.*, vol. 264, p. 02001, 2019, doi: 10.1051/mateconf/201926402001.
- [10] N. Vidakis, M. Petousis, E. Velidakis, M. Liebscher, V. Mechtcherine, and L. Tzounis, “On the Strain Rate Sensitivity of Fused Filament Fabrication (FFF) Processed PLA, ABS, PETG, PA6, and PP Thermoplastic Polymers,” *Polymers*, vol. 12, no. 12, p. 2924, Dec. 2020, doi: 10.3390/polym12122924.
- [11] A. K. Singh, B. Saltonstall, B. Patil, N. Hoffmann, M. Doddamani, and N. Gupta, “Additive Manufacturing of Syntactic Foams: Part 2: Specimen Printing and Mechanical Property Characterization,” *JOM*, vol. 70, no. 3, pp. 310–314, Mar. 2018, doi: 10.1007/s11837-017-2731-x.
- [12] PT PLN, “Listrik untuk Kehidupan yang Lebih Baik,” PT PLN (Persero). Accessed: May 17, 2024. [Online]. Available: <https://web.pln.co.id/pelanggan/tarif-tenaga-listrik>
- [13] P. Putranto, “Prinsip 3R: Solusi Efektif untuk Mengelola Sampah Rumah Tangga,” *Innov. J. Soc. Sci. Res.*, vol. 3, no. 5, Art. no. 5, Nov. 2023, doi: 10.31004/innovative.v3i5.5882.
- [14] S. Kumar, R. Sooraj, and M. V. V. Kumar, “Design And Fabrication Of Extrusion Machine For Recycling Plastics,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*,



- vol. 1065, no. 1, p. 012014, Feb. 2021, doi: 10.1088/1757-899X/1065/1/012014.
- [15] K. Minchenkov, A. Vedernikov, A. Safonov, and I. Akhatov, "Thermoplastic Pultrusion: A Review," *Polymers*, vol. 13, no. 2, p. 180, Jan. 2021, doi: 10.3390/polym13020180.
- [16] R. de C. Costa Dias, *Pultrusion of thermoset based profiles-state of the art regarding materials, process set-ups, process modeling, and process simulation*. 2020.
- [17] ZwickRoell Pte Ltd. Indonesia, "Pengujian Material," Pengujian Material. Accessed: May 18, 2024. [Online]. Available: <https://www.zwickroell.com/id/industri/pengujian-material/>
- [18] S. Advani and K.-T. Hsiao, *Manufacturing techniques for polymer matrix composites (PMCs)*. Woodhead Publishing, 2012. doi: 10.1533/9780857096258.1.1.
- [19] A. Vedernikov, F. Tucci, A. Safonov, P. Carlone, S. Gusev, and I. Akhatov, "Investigation on the Shape Distortions of Pultruded Profiles at Different Pulling Speed," *Procedia Manuf.*, vol. 47, pp. 1–5, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.promfg.2020.04.107.
- [20] H. John, "Power Supplies | Electronics Club," Electronics Club. Accessed: May 18, 2024. [Online]. Available: <https://electronicsclub.info/powersupplies.htm>
- [21] P. S. Heljo, M. Li, K. E. Lilja, H. S. Majumdar, and D. Lupo, "Printed Half-Wave and Full-Wave Rectifier Circuits Based on Organic Diodes," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 60, no. 2, pp. 870–874, Feb. 2013, doi: 10.1109/TED.2012.2233741.
- [22] A. S. Morris and R. Langari, *Measurement and Instrumentation: Theory and Application*. Academic Press, 2011.
- [23] S. F. Barrett, *Arduino Microcontroller Processing for Everyone! Third Edition*. Springer Nature, 2022.
- [24] V. D. Yurkevich, Ed., *Advances in PID Control*. InTech, 2011. doi: 10.5772/770.
- [25] M. Scarpino, *Motors for Makers: A Guide to Steppers, Servos, and Other Electrical Machines*. Que Publishing, 2015.
- [26] V. Gurevich, *Electric Relays: Principles and Applications*. Boca Raton: CRC Press, 2018. doi: 10.1201/9781315221168.
- [27] L. De Vos, B. Van De Voorde, L. Van Daele, P. Dubruel, and S. Van Vlierberghe, "Poly(alkylene terephthalate)s: From current developments in synthetic strategies towards applications," *Eur. Polym. J.*, vol. 161, p. 110840, Dec. 2021, doi: 10.1016/j.eurpolymj.2021.110840.
- [28] B. Evans, *Practical 3D printers*. in Technology in action. [Berkeley, CA]: New York: Apress ; Distributed to the book trade world wide by Springer Science+Business Media, 2012.
- [29] Y. P. Shaik, J. Schuster, and A. Shaik, "A Scientific Review on Various Pellet Extruders Used in 3D Printing FDM Processes," *OALib*, vol. 08, no. 08, pp. 1–19, 2021, doi: 10.4236/oalib.1107698.



- [30] A. Goyanes, A. B. M. Buanz, A. W. Basit, and S. Gaisford, “Fused-filament 3D printing (3DP) for fabrication of tablets,” *Int. J. Pharm.*, vol. 476, no. 1–2, pp. 88–92, Dec. 2014, doi: 10.1016/j.ijpharm.2014.09.044.
- [31] M. Spoerk, J. Gonzalez-Gutierrez, J. Sapkota, S. Schuschnigg, and C. Holzer, “Effect of the printing bed temperature on the adhesion of parts produced by fused filament fabrication,” *Plast. Rubber Compos.*, vol. 47, no. 1, pp. 17–24, Jan. 2018, doi: 10.1080/14658011.2017.1399531.
- [32] N. Volpato, J. Aguiomar Foggiatto, and D. Coradini Schwarz, “The influence of support base on FDM accuracy in Z,” *Rapid Prototyp. J.*, vol. 20, no. 3, pp. 182–191, Jan. 2014, doi: 10.1108/RPJ-12-2012-0116.
- [33] H. Miyajani, N. Momenzadeh, and L. Yang, “Effect of printing speed on quality of printed parts in Binder Jetting Process,” *Addit. Manuf.*, vol. 20, pp. 1–10, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.addma.2017.12.008.
- [34] “ASTM D638 - Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics.” Accessed: May 18, 2024. [Online]. Available: <https://www.ssi.shimadzu.com/industries/automotive-materials-testing/plastics-polymers-rubber/astm-d638/index.html>
- [35] G. Saritha, T. Iswarya, D. Keerthana, and A. T. Dhaniyath Baig, “Micro universal testing machine system for material property measurement,” *Mater. Today Proc.*, p. S2214785323022307, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2023.04.329.
- [36] A. Sola *et al.*, “Open challenges in tensile testing of additively manufactured polymers: A literature survey and a case study in fused filament fabrication,” *Polym. Test.*, vol. 117, p. 107859, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.polymertesting.2022.107859.
- [37] G. Oyéniran ADEOTI, F. Fan, M. A. Huihuan, and S. Shen, “Investigation of aluminium bolted joint (HBJ) system behavior,” *Thin-Walled Struct.*, vol. 144, p. 106100, Nov. 2019, doi: 10.1016/j.tws.2019.03.059.
- [38] R. E. Thomas, A. J. Rosa, and G. J. Toussaint, *The Analysis and Design of Linear Circuits*. John Wiley & Sons, 2016.



LAMPIRAN



LAMPIRAN A

Video Demonstrasi pada Mesin *Pultrusion* yang Dibuat

Link : <https://youtu.be/7qRQBS3fzmE>





RANCANG BANGUN SISTEM PULTRUSION TERINTEGRASI ELEMEN PEMANAS BERBASIS LIMBAH PLASTIK POLYETHYLENE TEREPHTHALATE

ALIS HIC BMA, Dr. Ir. Nur Abdillah Siddiq, S.T., IPP. ; Dr. Dwi Joko Suroso, S.T., M.Eng.

Universitas Gadjah Mada, 2024 | Diunduh dari <http://etd.repository.ugm.ac.id/>

Lampiran: Histori alur persetujuan

No	Jabatan	Nama	Jenis	Tanggal Disetujui
1	Dosen Pembimbing	Dr.Ir. Nur Abdillah Siddiq, S.T., IPP.	Paraf	Senin, 8 Juli 2024 15:01
2	Ketua Program Studi Sarjana Teknik Fisika	Dr.-Ing. Ir. Awang Noor Indra Wardana, S.T., M.T., M.Sc., IPM.	Paraf	Senin, 8 Juli 2024 15:07
3	Ketua Departemen Teknik Nuklir dan Teknik Fisika	Dr. Ir. Alexander Agung, S.T., M.Sc., IPU.	Tanda Tangan	Selasa, 9 Juli 2024 05:47

Diajukan oleh Triyanto



Dokumen ini telah melalui proses approval secara daring sebelum QR Code dibubuhkan. Scan QR Code yang ada di setiap halaman dokumen ini untuk verifikasi.