

Analisis Hasil Uji Tarik dan *Scanning Electron Microscope* (SEM) pada Obyek Cetak 3D dari Filamen Limbah Plastik Polyethylene Terephthalate (PET)

Tri Hannanto Saputra¹, Radhi Ariawan^{2*}, Nur AkhliS Sarihidaya Laksana³, Unggul Satria Jati⁴, Dikky Kusuma Wijaya⁵

^{1,5}Program Studi Teknik Perancangan Mekanik dan Mesin, Politeknik ATMI Surakarta

²Program Studi Teknologi rekayasa Energi Terbarukan, Politeknik Negeri Cilacap

^{3,4}Program Studi Teknik Mesin, Politeknik Negeri Cilacap

^{1,5}Jl. Mojo No.1 Surakarta 57145, Indonesia

^{2,3,4}Jln. Dr. Soetomo No.1 Karangcengis Sidakaya, Kabupaten Cilacap, 53212, Indonesia

E-mail: hannanto.saputra@atmi.ac.id¹, radhi.ariawan@pnc.ac.id², akhlissl@pnc.ac.id³, unggulsatriajati@pnc.ac.id⁴, dikky.kusuma@atmi.ac.id⁵

Info Naskah:

Naskah masuk: 14 Desember 2024

Direvisi: 8 Januari 2025

Diterima: 24 Januari 2025

Abstrak

Pembuatan filamen *3DPrinting* dari sampah botol plastik PET merupakan salah satu solusi yang cukup tepat mengatasi permasalahan penumpukan sampah plastik tipe PET. Penelitian ini bertujuan mengembangkan metode daur ulang botol plastik PET memanfaatkan teknologi ekstrusi menjadi filamen *3DPrinting*. Filamen yang terbentuk digunakan dalam proses pencetakan 3D menggunakan mesin *3DPrinting* FDM. Obyek spesimen yang dicetak berbentuk *dogbone ASTM D638 Type V*. Penelitian terdahulu menggunakan uji tarik dan fotografi makroskopi untuk mengamati kekuatan tariknya. Penelitian ini menggunakan metode pembuatan filamen, uji tarik, dan uji SEM. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa limbah botol plastik PET dapat di daur ulang menjadi filamen *3DPrinting*. Berdasarkan hasil uji tarik, nilai rata – rata tegangan tarik maksimum paling rendah hingga paling tinggi adalah 7,4 MPa; 12,4 MPa; dan 14,9 MPa. Jenis patahan yang terjadi pada spesimen dengan tegangan tarik maksimum tertinggi adalah patah getas dan teramati ikatan matrik yang baik antar lapisan sampel.

Keywords:

polyethylene terephthalate;
tensile test;
scanning electron microscope.

Abstract

3DPrinting filament from PET plastic bottle waste is one appropriate solution to overcome PET plastic waste. This research aims to develop a PET plastic bottle waste recycling method using extrusion technology into *3DPrinting* filament. The filament formed is used in the printing process using a *3DPrinting* FDM machine. The printed object specimens were *Dogbone ASTM D638 Type V*. Previous research used tensile test and macroscopy photography methods to observe the tensile strength. This research used filament-making, tensile test, and SEM test methods. This research showed that PET plastic bottle waste can be recycled into *3DPrinting* filaments. Based on the tensile test result, the average maximum tensile stress from lowest to highest in the sequence was 7.4 MPa, 12.4 MPa, and 14.9 MPa. The type of fracture that occurred in the specimen with the highest maximum tensile strength was a brittle fracture.

*Penulis korespondensi:

Radhi Ariawan

E-mail: radhi.ariawan@pnc.ac.id

1. Pendahuluan

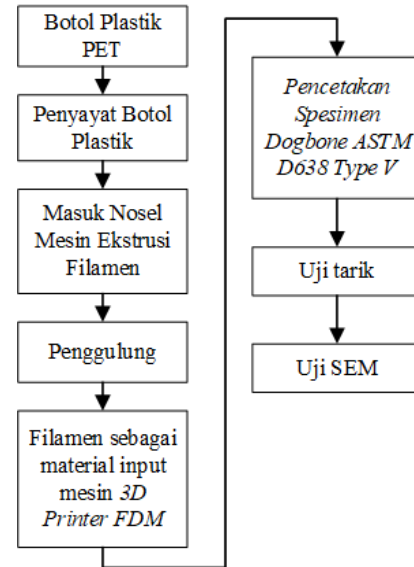
Konsumsi air dalam botol plastik PET sangat tinggi. Konsumsi air dalam kemasan botol meningkat dari 0,41 menjadi 48,9 liter/kapita dari tahun 2000 hingga 2015 [1]. Konsumsi air dalam kemasan botol meningkat sebesar 7% setiap tahun secara global [2]. Cara untuk mengurangi limbah secara umum adalah 3R, yaitu *Reduce*, *Reuse*, dan *Recycle*. *Reduce* adalah mengurangi penggunaan barang yang berpotensi menjadi limbah. *Reuse* adalah menggunakan kembali barang yang masih layak pakai sehingga mengurangi penumpukan limbah. *Recycle* merupakan suatu langkah mendaur ulang limbah menjadi barang lain yang dapat dimanfaatkan kembali. Pembuatan filamen 3D *Printing* dari limbah botol plastik PET sebagai langkah daur ulang merupakan hal yang cukup tepat dalam mengatasi masalah sampah plastik tersebut. Mesin cetak 3 dimensi atau yang sering disebut *3D printer* merupakan mesin yang digunakan untuk mencetak objek 3 dimensi. Salah satu metode yang digunakan dalam pencetakan 3 dimensi adalah FDM atau *Fused Deposition Modeling* [3]. Metode ini memanfaatkan proses penyusunan berlapis dari material yang diekstrusi melalui nosel *hotend*. Secara umum material yang digunakan dalam pencetakan 3 dimensi adalah polimer termoplastik (PLA, ABS, TPU). Adapun, jenis material lain yang digunakan seperti resin, keramik, serbuk logam [4], bambu [5], campuran sago dan polimer [6].

Pada penelitian terdahulu telah dilakukan uji tarik dan pengamatan makroskopi pada hasil cetakan 3 dimensi ASTM D-3379 dari limbah plastik yang menunjukkan korelasi antara tegangan tarik dengan struktur makro filamen. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa nilai tegangan tarik yang rendah terdapat pada filamen dengan gap di bagian tengahnya [7]. Penelitian lain menunjukkan adanya hubungan tingkat keseragaman matrik terhadap hasil uji tarik pada komposit dengan campuran PET yang mana semakin tinggi persentase campuran, maka tegangan tarik semakin rendah [8]. BPET (*Bottle PET*) digunakan sebagai material pencetakan 3D, menunjukkan potensi pemanfaatan limbah botol plastik PET sebagai material daur ulang yang tahan lama dan dapat bersaing dengan jenis material lain seperti PLA, ABS, dan PET-G [9]. Tujuan dari penelitian ini adalah melakukan analisis uji tarik dan SEM pada filamen hasil daur ulang limbah botol plastik PET menggunakan teknologi ekstrusi menjadi filamen yang kemudian digunakan untuk mencetak objek 3 dimensi. Pengembangan metode ekstrusi limbah botol plastik PET menjadi filamen sebagai material input pencetakan 3 dimensi dapat menjadi salah satu solusi daur ulang limbah plastik [10]. Objek spesimen 3 dimensi yang dicetak adalah *dogbone ASTM D638 Type V*. Uji SEM (*Scanning Electron Microscopy*) dilakukan untuk mengamati morfologi spesimen secara mikroskopi [11].

2. Metode

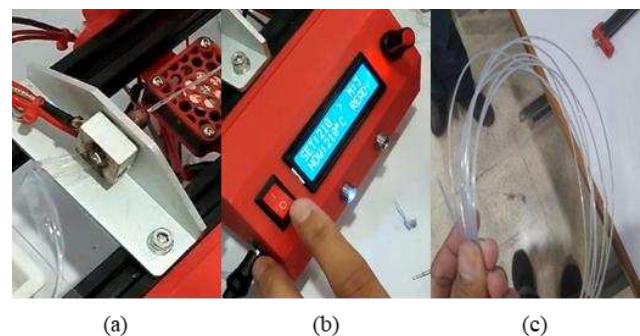
Plastik dikategorikan menjadi 2, yaitu termoplastik dan termoset. Pada penelitian ini digunakan botol plastik tipe PET yang termasuk dalam kategori termoplastik. PET merupakan plastik yang pemanfaatannya sangat luas dengan harga murah [12]. Penelitian ini dilakukan dalam beberapa langkah mulai dari pembuatan filamen dari limbah botol

plastik PET, proses pencetakan spesimen, uji tarik, dan uji SEM. Gambar 1 menunjukkan diagram alir metode penelitian yang digunakan. Botol plastik PET yang dikumpulkan adalah acak tanpa melihat merek botol, botol plastik yang digunakan sebagai material pembuatan filamen adalah botol plastik PET dengan ukuran 600ml.



Gambar 1. Diagram Alir Metode Penelitian

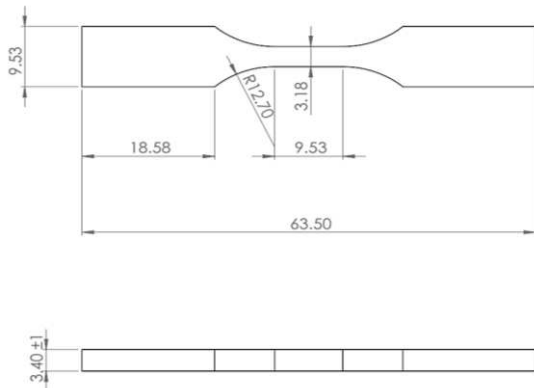
Limbah botol plastik PET dikumpulkan dan dibersihkan untuk mempermudah proses selanjutnya. Penyayatan botol plastik dilakukan untuk menghasilkan pita plastik yang menjadi input pada nosel *extruder*. *Extruder* dilengkapi dengan *hotend* sebagai pemanas untuk melelehkan plastik. Temperatur yang digunakan saat pembuatan filamen adalah 210°C. Gambar 2 menunjukkan proses ekstrusi filamen dari limbah botol plastik PET.



Gambar 2. (a) Ekstrusi Filamen; (b) Pengaturan Temperatur; (c) Filamen Hasil Ekstrusi.

Filamen yang terbentuk memiliki diameter 1,7 mm. Penelitian terdahulu menyatakan bahwa filamen tidak standar tidak mempengaruhi masalah kompatibilitas pencetakan 3 dimensi selama memiliki penampang lingkaran dengan diameter penampang kurang dari 1,75 mm [13]. Filamen tersebut selanjutnya digunakan dalam pencetakan objek spesimen 3 dimensi *dogbone ASTM D638 Type V*, dengan dimensi seperti yang ditunjukkan gambar 3.

Pencetakan spesimen dilakukan menggunakan mesin 3D printer FDM dengan parameter pencetakan seperti terbaca pada tabel 1.



Gambar 3. Spesifikasi Dogbone ASTM D638 Type V [14]

Tabel 1. Parameter pencetakan 3 dimensi [9]

Filamen	Temperatur (°C)		Kecepatan cetak (mm/s)	Ukuran nosel (mm)	Infill (%)
	Hotend	Printing Bed			
PET	255	85	30	0,2	100

Uji tarik dilakukan menggunakan UTM (*Universal Testing Machine*) dengan ukuran 1 – 20 kN. uji tarik dan uji SEM dilakukan di Politeknik ATMI Surakarta. Hasil uji tarik berupa grafik gaya terhadap elongasi, sehingga dapat ditentukan tegangan tarik dari filamen dari limbah botol plastik PET. Proses uji tarik dapat diamati pada gambar 4.



Gambar 4. Proses Uji Tarik Menggunakan Mesin UTM

Selain uji tarik, dilakukan juga uji SEM untuk mengamati morfologi spesimen secara mikroskopi. Metalurgi vakum dilakukan pada bagian spesimen untuk membuat spesimen bersifat konduktif secara elektrik [11].

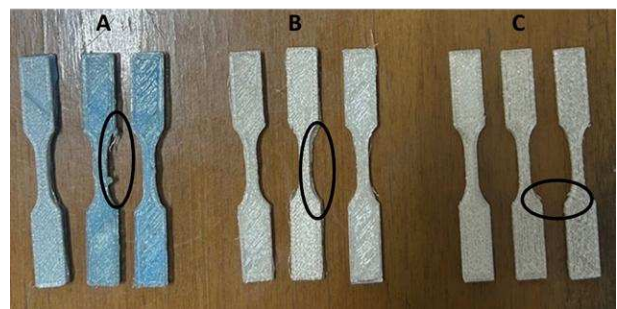
3. Hasil dan Pembahasan

Sebanyak total 9 spesimen berhasil dicetak untuk dilakukan pengujian tarik dan SEM. spesimen tersebut yang dikelompokkan menjadi 3 yaitu A, B, dan C untuk

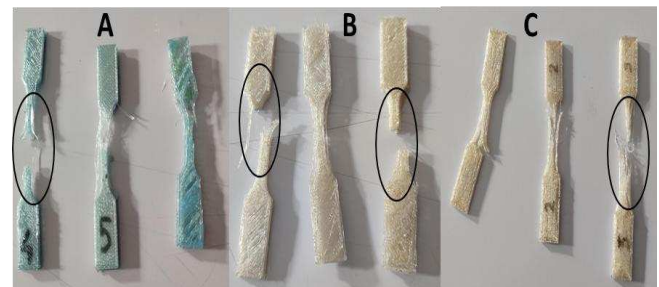
memastikan detail analisis perbandingan setiap spesimen. Pengelompokkan spesimen hanya berdasarkan warna asal limbah botol plastik yang digunakan tanpa membedakan merek asal botol plastik seperti yang telah dijelaskan pada bagian metode. Spesimen yang berhasil dicetak dapat dilihat pada gambar 5.

Gambar 5 menunjukkan hasil cetakan spesimen dari filamen limbah botol plastik PET. Teramati ada cacat minor berupa *flashing* pada permukaan spesimen. *Flashing* adalah plastik yang meluber di bagian tepi spesimen yang dapat dibersihkan, sehingga spesimen masih dianggap baik [15]. Spesimen hasil uji tarik teramati pada gambar 6.

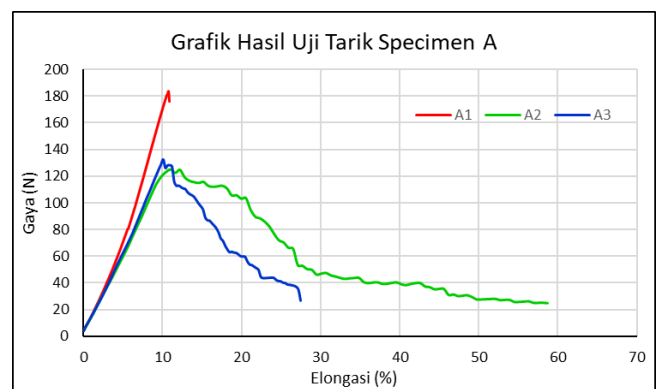
Spesimen A dan C teramati ada 1 sampel patah sempurna, sedangkan teramati ada 2 sampel patah sempurna pada spesimen B. Gambar 7, 10, dan 13 dapat diamati untuk mengetahui gaya yang diterima spesimen selama proses uji tarik.



Gambar 5. Spesimen Hasil Cetakan Mesin 3D Printer FDM



Gambar 6. Spesimen Hasil Uji Tarik



Gambar 7. Grafik Gaya – Elongasi Spesimen A

Gambar 7 menunjukkan hubungan antara gaya dengan elongasi pada spesimen A dengan sampel A1, A2, dan A3. Sampel A2 memiliki elongasi terbesar mencapai 59%. Namun demikian, nilai gaya tertinggi yang dapat ditahan

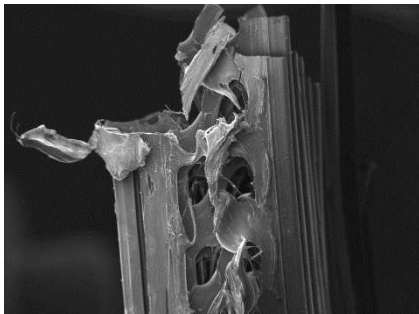
tercatat pada sampel A1 dengan nilai 184,67 N. Sampel A3 memiliki perilaku menyerupai A2. Jika melihat spesimen hasil uji tarik pada gambar 6, terdapat 2 sampel yang menunjukkan patahan ulet dimana masih tercatat elongasi pada sampel setelah mencapai tegangan tarik maksimumnya. Statistik hasil uji tarik spesimen A ditampilkan pada tabel 2.

Tabel 2. Data Uji Tarik Spesimen A

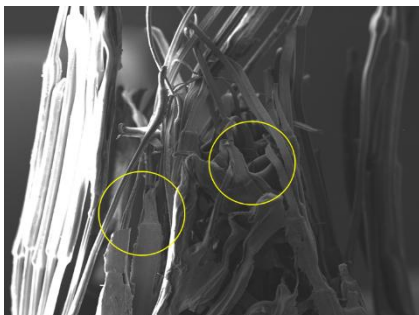
No	Sampel	Gaya $F(N)$	Tegangan Tarik Max $\sigma_M(MPa)$	Elon gasi $\epsilon_M (%)$	Elong asi Break $\epsilon_B (%)$	h (mm)	b (mm)
1	A1	184,67	16,3	11	11	3,56	3,18
2	A2	125,25	10,2	11	59	4,1	3
3	A3	135,38	10,7	10	27	4,1	3
Rata – rata		148,44	12,4	11	32	3,95	3,06

Tegangan tarik maksimum yang tercatat berdasarkan tabel 2 adalah 16,3 MPa pada sampel A1. Elongasi *break* ϵ_B memiliki nilai yang sama dengan elongasi ϵ_M nya. Rata – rata tegangan tarik maksimum pada spesimen A adalah 12,4 MPa. Pada gambar 7, sampel A1 tidak renggang setelah mencapai tegangan tarik maksimumnya. Untuk memastikan jenis patah pada sampel A1 maka perlu dilihat struktur mikroskopisnya melalui uji SEM. Gambar 8 adalah hasil uji SEM pada sampel A1.

Hasil uji SEM yang pada gambar 8 menunjukkan patah yang terjadi adalah patah getas. Gambar 9 menunjukkan hasil SEM patahan yang didominasi patah ulet pada sampel A2 dengan tegangan tarik maksimum terendah.



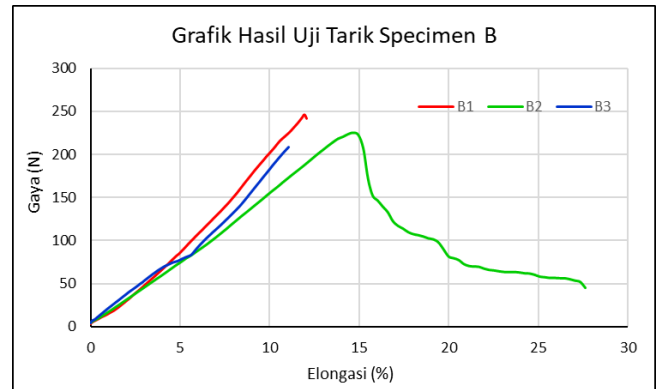
Gambar 8. Hasil Uji SEM Sampel A1 dengan perbesaran 50 kali



Gambar 9. Hasil Uji SEM Sampel A2 dengan perbesaran 50 kali

Tampak pada gambar 9 bahwa patahan yang terjadi adalah patah ulet, dengan sebagian patah getas yang ditandai lingkaran kuning. Patah ulet yang terjadi menyebabkan nilai elongasi pada sampel A2 paling besar, sesuai dengan yang teramati pada gambar 7 dan tabel 2. Patah ulet pada spesimen

juga dapat disebabkan adanya cacat berupa rongga udara akibat proses ekstrusi selama proses pencetakan seperti yang terjadi pada limbah plastik jenis HDPE[16]

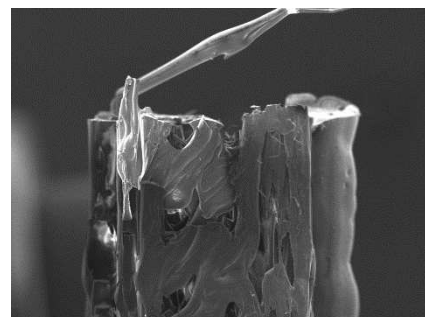


Gambar 10. Grafik Gaya – Elongasi Spesimen B

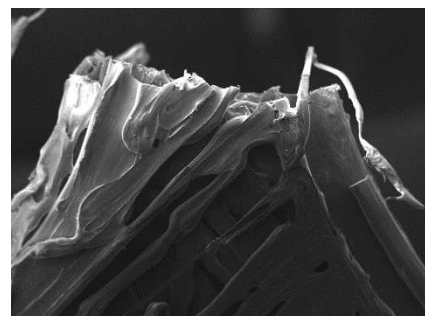
Gambar 10 menunjukkan gaya tertinggi yang dapat ditahan filamen spesimen B adalah 249,55 N. Nilai tersebut tercatat pada sampel B1. Gaya terendah yang dapat ditahan filamen tercatat pada sampel B3 dengan nilai 208,88 N. Sampel B3 terlihat memiliki nilai elongasi terbesar, yaitu 28%. Data statistik hasil uji tarik spesimen B menunjukkan tegangan tarik maksimum yang tercatat adalah 15,7 MPa, dengan rata -rata tegangan tarik maksimum sebesar 14,9 MPa. Nilai tersebut dapat dilihat pada tabel 3.

Tabel 3. Data Uji Tarik Spesimen B

No	Sampel	Gaya $F(N)$	Tegangan Tarik Max $\sigma_M(MPa)$	Elon gasi $\epsilon_M (%)$	Elong asi Break $\epsilon_B (%)$	h (mm)	b (mm)
1	B1	249,55	15,7	12	12	4,26	3,72
2	B2	224,92	14,5	15	28	4,24	3,66
3	B3	208,88	14,5	11	11	3,8	3,78
Rata – rata		227,79	14,9	13	17	4,1	3,72

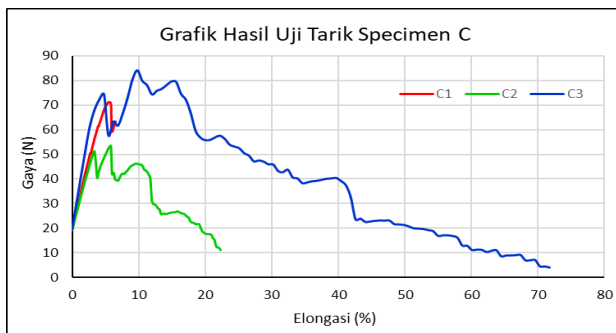


Gambar 11. Hasil Uji SEM Sampel B1 dengan perbesaran 50 kali



Gambar 12. Hasil Uji SEM Sampel B2 dengan perbesaran 50 kali

Teramati pada gambar 11 dan 12, bahwa sampel B1 dan B2 mengalami patah getas ketika dilakukan uji tarik. Sampel dengan jenis patahan getas cenderung memiliki nilai tegangan tarik yang tinggi, hal tersebut juga terjadi pada penelitian sebelumnya yang menggunakan material rPET (*recycled PET*) [10]. Teramati pula pada tabel 3, bahwa sampel B1 memiliki elongasi lebih besar dari sampel B2 meskipun mengalami patahan yang sama yang menunjukkan sampel B1 lebih mampu menahan gaya beban yang diterima sebelum akhirnya patah.



Gambar 13. Grafik Gaya – Elongasi Spesimen C

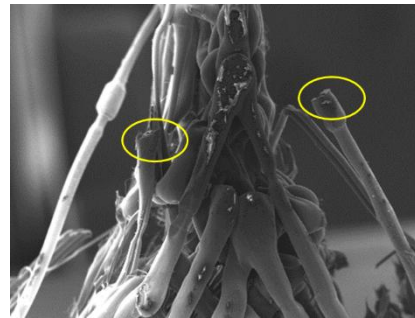
Gambar 13 menunjukkan grafik hasil uji tarik pada spesimen C. Terlihat gaya tertinggi yang dapat ditahan oleh filamen ada pada sampel C3 dengan nilai 84,79 N. Gaya terendah teramati pada sampel C2 dengan nilai 53,67 N. Elongasi tertinggi juga teramati pada sampel C3 yaitu 72%. Hal yang sama ditunjukkan pada hasil uji tarik pada plastik PLA, yang mana mungkin saja terjadi akibat banyak faktor salah satunya keseragaman matrik sampel uji [17] Tabel 4 menunjukkan data statistik hasil uji tarik spesimen C.

Tabel 4 Data Uji Tarik Spesimen C

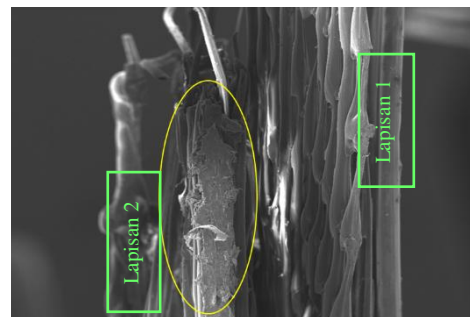
No	Sampe l	Gaya $F(N)$	Tegan gan Tarik Max $\sigma_M(MPa)$	Elon gasi $\epsilon_M (%)$	Elong asi Break $\epsilon_B (%)$	h (mm)	b (mm)
1	C1	71,31	6,53	5,5	6,5	3,67	2,97
2	C2	53,67	7,01	5,9	22	3,04	2,52
3	C3	84,79	8,67	9,7	72	3,28	2,98
Rata – rata		69,92	7,40	7,0	34	3,33	2,82

Tegangan tarik maksimum tercatat sebesar 8,67 MPa dengan rata – rata tegangan tarik maksimum spesimen C 7,40 MPa. Berdasarkan pengamatan grafik gaya – elongasi spesimen C, sampel C2 dan C3 mengalami patah ulet yang dominan. Hal tersebut dikuatkan dengan hasil uji SEM pada spesimen C yang ditunjukkan gambar 14 dan gambar 15. Gambar 14 menunjukkan ada sebagian patah getas (dilingkari) yang teramati pada sampel C2. Patahan dominan yang terdeteksi adalah patah ulet. Pada sampel C3 yang ditunjukkan gambar 15 teramati masih ada sebagian dari sampel yang tidak patah, sedangkan bagian lain teramati patah getas (dilingkari). Teramati juga ada gap antara lapisan satu dengan yang. Hal tersebut sesuai dengan hasil uji tarik gambar 6, bahwa ada sampel spesimen C dengan bagian sampel yang tidak patah ketika dilakukan uji tarik. Hal ini disebabkan oleh hasil pencetakan dimana muncul gap antar

lapisan dan pada lapisan tertentu terdapat ikatan matrik yang lebih baik dari lapisan yang lain sehingga tidak patah saat uji tarik dilakukan seperti yang tampak pada gambar 15. Akibatnya grafik uji tarik menunjukkan adanya pertambahan elongasi yang signifikan meskipun sudah dinyatakan patah.



Gambar 14. Hasil Uji SEM Sampel C2 dengan perbesaran 50 kali



Gambar 15. Hasil Uji SEM Sampel C3 dengan perbesaran 50 kali

Grafik uji tarik dari material filamen PET memiliki bentuk yang tidak umum dan memiliki kemiripan dengan PLA, dan tidak dapat dipastikan penyebab pasti perubahan kemiringan atau *slope* pada grafik. Hal tersebut dapat dipengaruhi banyak faktor diantaranya arah pencetakan, ikatan pada setiap lapisan, pengaturan parameter suhu, parameter kecepatan pencetakan, dan ukuran nosel [7] [17].

4. Kesimpulan

Filamen *3DPrinting* dari limbah botol plastik PET berhasil dibuat menggunakan teknologi ekstrusi dengan diameter filamen 1,7 mm. Hasil uji tarik spesimen berupa *dogbone ASTM D638 Type V* menunjukkan bahwa rata – rata gaya beban tertinggi yang dapat ditahan oleh filamen dari limbah botol plastik PET sebesar 227,79 N. Rata – rata tegangan tarik maksimum tertinggi adalah 14,9 MPa dan terendah adalah 7,40 MPa. Hasil uji SEM menunjukkan terdapat patah getas pada sampel dengan tegangan tarik maksimum tertinggi dan teramati ikatan matrik yang baik antar lapisan sampel.

Berdasarkan data uji tarik, spesimen C memiliki ketahanan gaya dan tegangan tarik maksimum dengan nilai paling rendah dibandingkan spesimen A dan B. Untuk analisis lebih lanjut mengenai penyebab tersebut, dapat dilakukan pengujian SEM-IDX dan uji FTIR (*Fourier Transform Infrared Spectroscopy*) sehingga dapat mengidentifikasi bahan, senyawa, dan gugus fungsi yang menyusun sampel.

Ucapan Terimakasih

Ucapan Terimakasih disampaikan kepada Politeknik ATMI Surakarta sebagai tempat pengujian material dan Penelitian ini didanai menggunakan dana DIPA Politeknik Negeri Cilacap Nomor 023.18.2677629/2022 berdasarkan perjanjian penugasan Nomor 077/PL43/AL.04/2024.

Daftar Pustaka

- [1] H. Aslani, P. Pashmtab, A. Shaghghi, A. Mohammadpoorasl, H. Taghipour, and M. Zarei, "Tendencies towards bottled drinking water consumption: Challenges ahead of polyethylene terephthalate (PET) waste management," *Health Promot Perspect*, vol. 11, no. 1, pp. 60–68, Feb. 2021, doi: 10.34172/hpp.2021.09.
- [2] H. Hossini, S. Naseri, and A. Asadi, "Assessment of Bottled Water Quality in Kermanshah City Based on Calcium and Magnesium Hardness: Consumer Awareness and Laboratory Studies," *International Journal of Health and Life Sciences*, vol. 6, no. 2, May 2020, doi: 10.5812/ijhls.100132.
- [3] R. Ariawan, N. Akhli Sarihidaya Laksana, U. Satria Jati, and R. Aries Permana Tarigan, "Rancang Bangun Rangka dan Penggerak Mesin FDM Berbasis Arduino Tipe XZ-Head," *Infotekmesin*, vol. 14, no. 1, pp. 168–175, Jan. 2023, doi: 10.35970/infotekmesin.v14i1.1741.
- [4] M. Amiruddin, I. Harjanto, Y. Setyoadi, and Carsoni, "Perancangan Dan Manufaktur Printer 3 Dimensi Tipe Fused DeposFition Modeling (Fdm)," in *Seminarnasionalhasilpenelitian (Snhp-V)*, Nov. 2015, pp. 547–551.
- [5] A. Khan *et al.*, "An examination of cutting-edge developments in Bamboo-PLA composite research: A comprehensive review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 188, p. 113832, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113832>.
- [6] I. R. Putra and A. E. Tontowi, "Properti Mekanik Material [Sagu/PMMA] '3D-Printable,'" in *Seminar Nasional Inovasi dan Aplikasi Teknologi di Industri*, Feb. 2019.
- [7] I. R. Putra, M. L. Bukhori, A. B. Prasetyo, F. Robbika, and B. T. Putra, "Recycled PET Plastics Filament: Characteristic and Cost Opportunity," *Semesta Teknika*, vol. 27, no. 2, pp. 148–158, Nov. 2024, doi: 10.18196/st.v27i2.21072.
- [8] I. M. A. Markuwat, Wawan Trisnadi Putra, and Yoyok Winardi, "Pengaruh campuran plastik waste ldpe dan pet bermatrik resin polyester terhadap kekuatan tarik dan struktur mikro," *TEKNOSAINS: Jurnal Sains, Teknologi dan Informatika*, vol. 10, no. 1, pp. 51–58, Aug. 2022, doi: 10.37373/tekn.v10i1.280.
- [9] I. Tylman and K. Dzierzek, "Filament for a 3D Printer from Pet Bottles-Simple Machine," *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, vol. 9, no. 10, pp. 1386–1392, Oct. 2020, doi: 10.18178/ijmerr.9.10.1386-1392.
- [10] P. Pires, M. L. de Aguiar, and A. C. Vieira, "Mechanical Performance of rPET Filament Obtained by Thermal Drawing for FFF Additive Manufacturing," *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, vol. 9, no. 1, p. 26, Jan. 2025, doi: 10.3390/jmmp9010026.
- [11] L. Liu, M. Lin, Z. Xu, and M. Lin, "Polylactic Acid-based Wood-plastic 3D Printing Composite and its Properties," *Bioresources*, vol. 14, no. 4, pp. 8484–8498, 2019.
- [12] E. I. M. Bardoquillo, J. M. B. Firmán, D. B. Montecastro, and A. M. Basilio, "Chemical recycling of waste polyethylene terephthalate (PET) bottles via recovery and polymerization of terephthalic acid (TPA) and ethylene glycol (EG)," *Mater Today Proc*, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.160>.
- [13] S. Palaniyappan and N. kumar Sivakumar, "Development of crab shell particle reinforced polylactic acid filaments for 3D printing application," *Mater Lett*, vol. 341, p. 134257, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2023.134257>.
- [14] G. Issayev, A. Aitmaganbet, E. Shehab, and M. H. Ali, "Bonding Strength Analysis of Multi-material and Multi-color Specimens Printed with Multi-extrusion Printer," *Manufacturing Technology*, vol. 21, no. 5, pp. 627–633, 2021, doi: 10.21062/mft.2021.072.
- [15] R. Sitanggang, C. Gede Indra Partha, and I. Wayan Arta Wijaya, "Analisis Pengaruh Suhu Pemanasan, Waktu Pemanasan Dan Suhu Pembukaan Terhadap Cacat Warpage Dan Flashing Pada Mesin Hot Press Plastik HDPE," *Jurnal SPEKTRUM*, vol. 11, no. 1, Mar. 2024.
- [16] A. Riyanto, S. M. B. Respati, and M. Dzulfikar, "Analisis Sifat Fisik Daur Ulang Limbah Plastik Jenis High Density Polyethylene," *Momentum*, vol. 17, no. 2, pp. 99–102, 2021.
- [17] J. Sedlak, L. Spisak, D. Hrusecka, E. Jurickova, L. Hrbackova, and Z. Joska, "Analysis of test plastic samples printed by the additive method fused filament fabrication," *MM Science Journal*, pp. 4283–4290, Mar. 2021, doi: 10.17973/MMSJ.2021_03_2020075.