

## ANALISA PENGARUH VARIASI SUHU DAN KECEPATAN CETAK TERHADAP HASIL PENGUJIAN TARIK DAN *FRACTOGRAFI MAKRO* PRODUK HASIL 3D *PRINTING* BERBAHAN PLA CARBON

**Danang Machputra Priyongono**

S1 Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya

Email: [danangmachputra.21037@mhs.unesa.ac.id](mailto:danangmachputra.21037@mhs.unesa.ac.id)

**Hanna Zakiyya**

Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya

Email: [hannazakiyya@unesa.ac.id](mailto:hannazakiyya@unesa.ac.id)

### Abstrak

Teknologi 3D *Printing Fused Deposition Modeling* (FDM) dengan material PLA Carbon menawarkan potensi peningkatan kekuatan mekanik, namun performanya sangat bergantung pada parameter proses cetak. Penelitian ini menganalisis pengaruh suhu nosel dan kecepatan cetak terhadap sifat mekanik produk 3D printing PLA Carbon dengan metode FDM. Variasi parameter yang digunakan adalah suhu 200°C, 215°C, dan 230°C serta kecepatan 40, 50, dan 60 mm/s. Pengujian tarik sesuai ASTM D638 tipe IV dan analisis fraktografi makro dilakukan pada 27 spesimen. Hasil penelitian menunjukkan bahwa suhu nosel merupakan parameter paling dominan. Peningkatan suhu dari 200°C ke 230°C meningkatkan kekuatan tarik dan modulus elastisitas, dengan peningkatan modulus mencapai 410%. Kombinasi optimal 230°C dan 50 mm/s menghasilkan kekuatan tarik tertinggi (38,59 MPa) dan modulus elastisitas tertinggi (10,41 GPa). Namun, peningkatan ini diiringi penurunan daktilitas, mengonfirmasi adanya *trade-off* antara kekuatan dan daktilitas. Analisis fraktografi mengungkap tiga morfologi patahan yang berkorelasi dengan level kekuatan, delaminasi pada spesimen lemah, morfologi campuran pada spesimen sedang, dan permukaan halus tegak lurus pada spesimen kuat. Untuk aplikasi struktural, kombinasi 230°C/50 mm/s direkomendasikan, sementara untuk aplikasi yang membutuhkan ketangguhan, kombinasi suhu menengah (215°C dengan 40-50 mm/s) lebih sesuai.

**Kata Kunci:** 3D *Printing*, PLA Carbon, *Fused Deposition Modeling*, kekuatan tarik, *fractografi makro*.

### Abstract

*Fused Deposition Modeling (FDM) 3D printing technology using PLA Carbon material offers the potential for enhanced mechanical strength, yet its performance is highly dependent on the printing process parameters. This study analyzes the effect of nozzle temperature and printing speed on the mechanical properties of 3D printed PLA Carbon products using the FDM method. The parameter variations used were temperatures of 200°C, 215°C, and 230°C, and speeds of 40, 50, and 60 mm/s. Tensile testing according to ASTM D638 type IV and macro fractography analysis were performed on 27 specimens. The results show that nozzle temperature is the most dominant parameter. Increasing the temperature from 200°C to 230°C increased tensile strength and modulus of elasticity, with the modulus increase reaching 410%. The optimal combination of 230°C and 50 mm/s produced the highest tensile strength (38.59 MPa) and highest modulus of elasticity (10.41 GPa). However, this increase was accompanied by a decrease in ductility, confirming a trade-off between strength and ductility. Fractography analysis revealed three fracture morphologies correlated with strength levels: delamination in weak specimens, mixed morphology in medium-strength specimens, and smooth perpendicular surfaces in strong specimens. For structural applications, the 230°C/50 mm/s combination is recommended, while for applications requiring toughness, a medium temperature combination (215°C with 40-50 mm/s) is more suitable.*

**Keywords:** 3D *Printing*, PLA Carbon, *Fused Deposition Modeling*, tensile strength, *fractography macro*.

### PENDAHULUAN

Proses manufaktur aditif yang dikenal dengan *Fused Deposition Modeling* (FDM) saat ini menjadi salah satu teknologi yang paling luas diaplikasikan karena biaya operasional yang ringan, kompatibilitasnya dengan beragam material serta kemampuannya menghasilkan bentuk rumit tanpa cetakan khusus. Pada metode ini, filamen termoplastik dipanaskan dan diekstrusi melalui nosel, kemudian dilapiskan secara bertahap di atas

panggung bangun untuk membentuk objek tiga dimensi berdasarkan data CAD. Selain hemat bahan, FDM juga menawarkan waktu produksi yang relatif singkat, sehingga sangat berguna dalam rekayasa, pembuatan prototipe cepat, hingga produksi komponen fungsional. Seperti ditekankan oleh (Rabilah et al. 2025) dalam ulasan sistematis mereka, pemahaman yang matang terhadap parameter pencetakan menjadi sangat penting karena sifat mekanik produk akhir akan menentukan kelayakan komponen tersebut untuk suatu aplikasi.

PLA (*Polylactic Acid*) merupakan termoplastik yang paling sering digunakan dalam FDM karena sifatnya yang mudah terurai, ramah lingkungan, dan mudah diproses. Namun, kekuatan mekanik dan kekakuan PLA murni kerap tidak memadai untuk komponen struktural, terutama jika dibandingkan dengan material rekayasa konvensional. Oleh karena itu, pengembangan material komposit seperti PLA yang diperkuat serat karbon ditujukan untuk meningkatkan kekuatan spesifik, modulus elastisitas, serta ketahanan termal komposit. Akan tetapi, peningkatan tersebut biasanya disertai dengan penurunan keuletan material, sebagaimana dilaporkan oleh (Kumar et al. 2023) bahwa CFPLA PLA berpenguat serat karbon menunjukkan kekakuan yang lebih tinggi daripada PLA murni namun dengan keuletan yang lebih rendah.

Salah satu tantangan utama dalam menggunakan PLA Carbon untuk keperluan rekayasa adalah bahwa kinerja mekanik produk akhir sangat dipengaruhi oleh parameter proses pencetakan. Berbeda dengan cetak injeksi konvensional yang menghasilkan material isotropik, produk cetak FDM bersifat anisotropik karena strukturnya dibangun lapis demi lapis. Anisotropi ini menyebabkan kekuatan mekanik sangat bergantung pada kualitas ikatan antar lapisan *interlayer bonding* yang dikendalikan oleh parameter seperti suhu nosel, kecepatan cetak, ketebalan lapisan, serta pola dan *densitas infill*.

Suhu nosel merupakan faktor paling kritis karena secara langsung mengontrol mobilitas rantai polimer. Penelitian oleh (El Magri et al 2021). menunjukkan bahwa kekuatan tarik maksimum untuk PLA dan PLA-CF dicapai pada suhu nosel 230°C, yang disebabkan oleh peningkatan koefisien difusi berdasarkan ketergantungan eksponensial dalam persamaan Arrhenius. Suhu nosel yang rendah 200°C mengakibatkan viskositas lelehan yang tinggi, sehingga menghambat difusi rantai dan menghasilkan ikatan antarlapisan yang lemah serta terbentuknya rongga mikro. Sebaliknya, suhu yang terlalu tinggi di atas 230°C berisiko menyebabkan degradasi termal polimer dan penurunan bobot molekul, yang pada akhirnya melemahkan matriks komposit.

Kecepatan cetak menentukan waktu kontak antara lapisan baru yang panas dengan lapisan sebelumnya. Kecepatan yang terlalu tinggi mempersingkat waktu kontak sehingga difusi dan fusi tidak optimal. Sebaliknya, kecepatan yang terlalu rendah pada suhu yang sudah rendah justru memperburuk kondisi karena aliran material lambat dapat meningkatkan kehilangan panas *heat loss* pada nosel. Penelitian oleh (Ben Fraj et al. 2025) melaporkan bahwa peningkatan kecepatan cetak dapat meningkatkan kristalinitas CFRPLA namun mengurangi stabilitas termal dan ketahanan terhadap degradasi, serta menyebabkan penurunan kekuatan tarik dan kekakuan akibat terbentuknya rongga udara besar dan pelepasan ikatan serat matriks. Temuan ini semakin menegaskan bahwa interaksi antara suhu dan kecepatan cetak bersifat kompleks dan harus dioptimalkan secara simultan.

Berdasarkan Analisa diatas penelitian ini memiliki beberapa sasaran utama, yaitu menelaah dampak variasi

temperatur nosel (200°C, 215°C, dan 230°C) terhadap nilai tegangan tarik, modulus elastisitas, serta regangan saat putus, mengevaluasi pengaruh perubahan kecepatan pencetakan (40, 50, dan 60 mm/s), mendeteksi adanya interaksi antara temperatur dan kecepatan, sekaligus menemukan pasangan parameter yang sesuai, mempelajari keterkaitan antara parameter proses dengan bentuk morfologi patahan melalui pengamatan fraktografi makro. Hasil akhir dari penelitian ini diharapkan mampu memberikan sumbangan teoretis mengenai rantai hubungan antara parameter proses, struktur mikro, dan sifat mekanik, serta menawarkan panduan praktis dalam memilih parameter pencetakan yang paling sesuai dengan kebutuhan fungsional suatu produk.

## METODE

### Jenis Penelitian

Jenis penelitian yang digunakan adalah penelitian kuantitatif dengan metode eksperimental dengan menganalisis pengaruh variasi suhu dan kecepatan cetak.

### Waktu dan Tempat Penelitian

#### 1. Waktu Penelitian

Rentang waktu penelitian pada bulan november 2025 hingga januari 2026.

#### 2. Tempat Penelitian

Tempat penelitian di laboratorium pengujian bahan Fakultas Teknik Universitas Politeknik Negeri Malang.

### Variabel Penelitian

#### 1. Variabel Bebas

Variabel bebas meliputi suhu 200°C, 215°C, dan 230°C. dan kecepatan cetak 40, 50, dan 60 mm/s.

#### 2. Variabel Terikat

Variabel terikat penelitian ini adalah hasil pengujian Tarik dan *fractografi makro* patahan.

#### 3. Variabel Kontrol

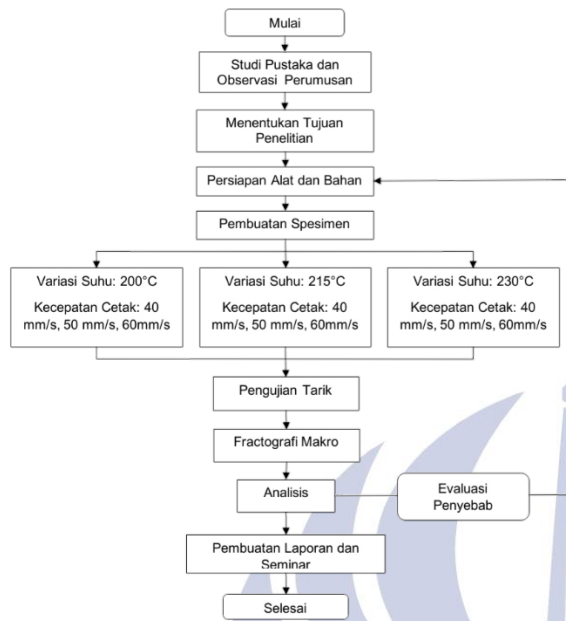
Variabel kontrol yang dijaga konstan meliputi jenis filamen PLA Carbon, diameter filamen (1,75 mm), layer height (0,20 mm), diameter nosel (0,4 mm), suhu bed (60°C), pengaturan kipas pendingin, serta kondisi lingkungan seperti kelembapan penyimpanan filamen dan suhu ruang cetak.

### Alat, Bahan, dan Instrumen Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental pada proses pencetakan 3D FDM. Perangkat yang digunakan meliputi laptop, mesin Kingroon KP3S Pro S1, micro SD, perangkat lunak Autodesk Fusion 360 dan Ultimaker Cura, serta smartphone Samsung A51 untuk dokumentasi. Bahan utama yang digunakan adalah filamen PLA Carbon Bambulab. Sementara itu, instrumen pengujian yang dipakai adalah mesin uji tarik MFL Piufund BSY-TENE D6800 untuk mengukur parameter mekanik spesimen.

## Rancangan Penelitian

Berikut merupakan rancangan penelitian dalam bentuk *flowchart*



Gambar 1. *Flowchart* penelitian

## Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian dilaksanakan dalam tiga tahap utama setelah seluruh alat dan bahan terkumpul. Tahap pertama adalah pembuatan spesimen uji tarik sesuai standar ASTM D638 Tipe IV. Spesimen didesain menggunakan perangkat lunak Fusion 360, kemudian parameter pencetakan seperti suhu nozzle dan kecepatan cetak diatur melalui perangkat lunak slicer Ultimaker Cura 5.1 sesuai rancangan eksperimen. File hasil slicing dalam format G-code dipindahkan ke mesin 3D printing Kingroon KP3S Pro S1 melalui kartu *microSD*, lalu proses pencetakan dilakukan dengan bahan filamen PLA Carbon Bambulab. Tahap kedua adalah pengujian tarik, yang diawali dengan pengukuran panjang dan luas penampang spesimen, pemasangan spesimen pada mesin uji tarik MFL Piufund BSY-TENE D6800, dan pemberian beban tarik secara kontinu hingga spesimen putus. Gaya maksimum dan pertambahan panjang dicatat dari hasil rekaman plotter. Tahap ketiga adalah pengujian *fractografi* makro, di mana spesimen yang telah patah diletakkan pada permukaan datar dengan pencahayaan cukup, kemudian difoto menggunakan *smartphone* Samsung A51 dalam mode makro untuk mendapatkan gambar permukaan patahan yang jelas sebagai bahan analisis.

## Teknik Analisis Data

Dalam penelitian ini, pendekatan statistik deskriptif diterapkan dengan cara menelaah dan menyajikan data hasil uji tarik untuk setiap kombinasi suhu serta kecepatan pencetakan. Data mentah yang diperoleh dari pengujian disusun dalam bentuk tabel numerik, selanjutnya diubah menjadi tampilan grafik

menggunakan aplikasi Microsoft Excel. Setelah itu, informasi yang terkandung dalam tabel dan grafik tersebut diuraikan ke dalam uraian yang sederhana dan mudah dicerna, sehingga kesimpulan dapat ditarik secara sistematis.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

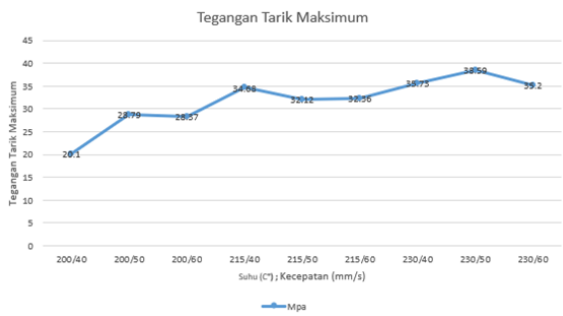
### 1. Analisis hasil pengujian Tarik

Melalui pengujian tarik didapatkan hasil yang diperoleh meliputi tegangan tarik maksimum ( $\sigma$ ), regangan pada saat putus  $\epsilon$  (%), dan modulus elastisitas (E) pada tabel 1 berikut:

Tabel 1. Rata-rata hasil pengujian tarik

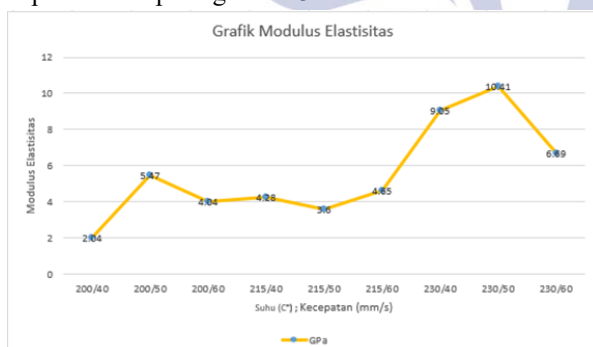
Spesimen	Suhu (°C)	Kecepatan (mm/s)	$\sigma$ (MPa)	$\epsilon$ (%)	E (GPa)
Kelompok I	200	40	20,10	0,97	2,04
Kelompok II	200	50	28,79	0,52	5,47
Kelompok III	200	60	28,37	0,74	4,04
Kelompok IV	215	40	34,68	0,77	4,28
Kelompok V	215	50	32,12	0,87	3,60
Kelompok VI	215	60	32,36	0,69	4,65
Kelompok VII	230	40	35,73	0,49	9,05
Kelompok VIII	230	50	38,59	0,37	10,41
Kelompok IX	230	60	35,20	0,52	6,69

Berdasarkan data hasil pengujian tarik menunjukkan bahwa peningkatan suhu nosel dari 200°C ke 230°C secara konsisten meningkatkan nilai tegangan tarik maksimum ( $\sigma$ ) dan modulus elastisitas (E) pada semua variasi kecepatan cetak. Sebagai contoh dapat diamati pada gambar 2, Dimana kecepatan 40 mm/s, nilai  $\sigma$  meningkat dari 20,10 MPa 200°C menjadi 34,68 MPa 215°C dan 35,73 MPa 230°C. Demikian pula, nilai E melonjak dari 2,04 GPa pada suhu 200°C menjadi 9,05 GPa pada suhu 230°C untuk kecepatan yang sama.



**Gambar 2.** Grafik tegangan Tarik maksimal

Fenomena ini dapat dijelaskan melalui teori difusi reptasi polimer yang menyatakan bahwa koefisien difusi rantai molekul meningkat secara eksponensial seiring kenaikan suhu, sesuai persamaan Arrhenius. Pada suhu yang lebih tinggi, viskositas lelehan PLA Carbon menurun drastis, sehingga mobilitas rantai polimer meningkat. Hal ini memungkinkan terjadinya difusi dan saling terkait *entanglement* rantai polimer yang lebih ekstensif melintasi bidang antarmuka antar lapisan. Akibatnya, ikatan antarlapisan *interlayer bonding* menjadi lebih kuat, hampir mendekati kekuatan material dasar *bulk material*. Selain itu, suhu yang tinggi juga meningkatkan kemampuan pembasahan *wetting* matriks PLA terhadap partikel karbon, sehingga beban tarik dapat ditransfer secara efisien dari matriks ke filler. Hal ini menjelaskan peningkatan modulus elastisitas yang sangat signifikan hingga 410% pada suhu 230°C seperti yang dapat diamati pada gambar 3.



**Gambar 3.** Grafik modulus elastisitas

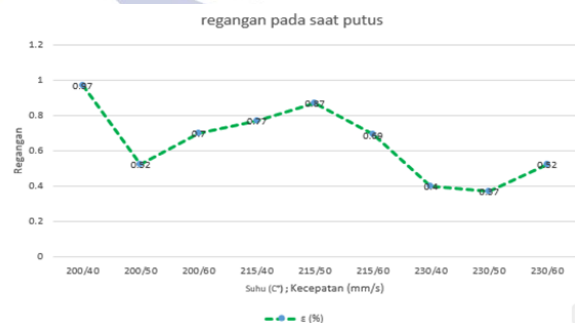
Temuan ini sejalan dengan penelitian (El Magri et al. 2021) yang melaporkan bahwa kekuatan tarik maksimum PLA dan PLA-CF dicapai pada suhu nosel 230°C. Penelitian oleh (Coogan dan Kazmer et.al 2017) juga menegaskan bahwa total difusi antar lapisan merupakan determinan utama kekuatan ikatan.

Berbeda dengan pengaruh suhu yang relatif monotonik, pengaruh kecepatan cetak terhadap sifat mekanik bersifat non-linear dan menunjukkan interaksi yang signifikan dengan suhu. Pada suhu rendah 200°C, kecepatan 50 mm/s menghasilkan kekuatan tarik tertinggi 28,79 MPa, sementara kecepatan 40 mm/s dan 60 mm/s

menghasilkan nilai yang lebih rendah. Pada suhu tinggi 230°C, kecepatan 50 mm/s kembali menjadi titik optimal dengan  $\sigma = 38,59$  MPa, sedangkan kecepatan 40 mm/s dan 60 mm/s menghasilkan kekuatan yang sedikit lebih rendah.

Interaksi ini terjadi karena kecepatan cetak mengatur waktu kontak antara lelehan panas dan lapisan sebelumnya, serta laju pendinginan. Pada suhu rendah, waktu kontak yang lama kecepatan 40 mm/s tidak mampu mengkompensasi rendahnya mobilitas rantai polimer, bahkan dapat menyebabkan pendinginan berlebih pada nosel. Sebaliknya, waktu kontak yang terlalu singkat kecepatan 60 mm/s menghambat proses fusi. Kecepatan 50 mm/s merupakan kompromi terbaik. Pada suhu tinggi, kecepatan 40 mm/s berisiko menyebabkan degradasi termal akibat paparan panas berlebih, sementara kecepatan 60 mm/s membatasi waktu untuk difusi yang mendalam. Dengan demikian, kecepatan 50 mm/s menciptakan jendela proses ideal yang memaksimalkan difusi tanpa menimbulkan efek termal negatif. Hasil ini konsisten dengan laporan (Ben Fraj et al. 2025) bahwa peningkatan kecepatan cetak dapat meningkatkan kristalinitas namun menurunkan kekuatan tarik akibat terbentuknya rongga udara.

Hasil penelitian mengonfirmasi adanya *trade-off* pada material komposit: peningkatan kekuatan tarik dan modulus elastisitas diiringi oleh penurunan regangan putus *daktilitas*. Spesimen dengan kekuatan tertinggi (230°C/50 mm/s,  $\sigma = 38,59$  MPa) memiliki regangan putus terendah (0,37%). Sebaliknya, spesimen dengan kekuatan terendah (200°C/40 mm/s,  $\sigma = 20,10$  MPa) menunjukkan daktilitas tertinggi (0,97%), Dapat diamati pada gambar 4.



**Gambar 4.** Grafik regangan putus

Penurunan daktilitas ini disebabkan oleh dua mekanisme. Pertama, pada suhu tinggi, partikel karbon terdispersi lebih homogen dan ikatan antarmuka *matriks-filler* menjadi sangat kuat. Partikel karbon yang kaku ini bertindak sebagai penghalang fisika yang membatasi deformasi plastik rantai polimer. Kedua, suhu nosel yang tinggi dapat meningkatkan derajat kristalinitas PLA selama pendinginan, dan daerah kristalin umumnya lebih getas dibanding daerah *amorf*. Fenomena ini sering

dijumpai pada komposit berpenguat serat, sebagaimana dilaporkan oleh (Kumar et al. 2023) dan (Alshammari et al. 2025).

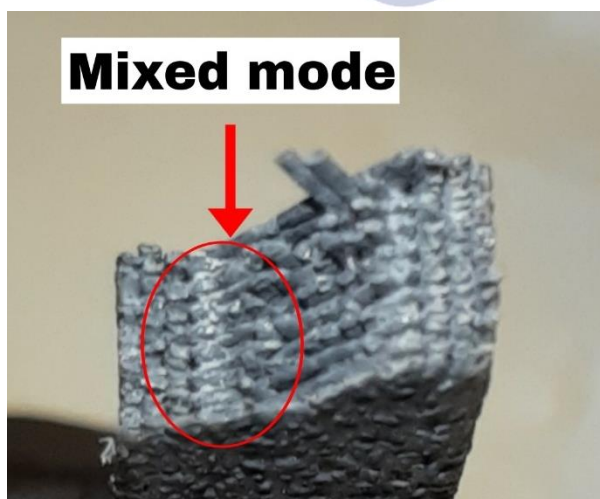
## 2. Analisis *Fractografi Makro* dan Mekanisme Kegagalan

Berdasarkan pengamatan langsung terhadap permukaan hasil patahan, ditemukan tiga pola morfologi yang secara jelas mencerminkan tingkat kekuatan mekanik material. Pada kelompok dengan parameter suhu 200°C dan kecepatan 40 mm/s yang menghasilkan kekuatan paling rendah.



Gambar 5. *Fractografi makro* kelompok I

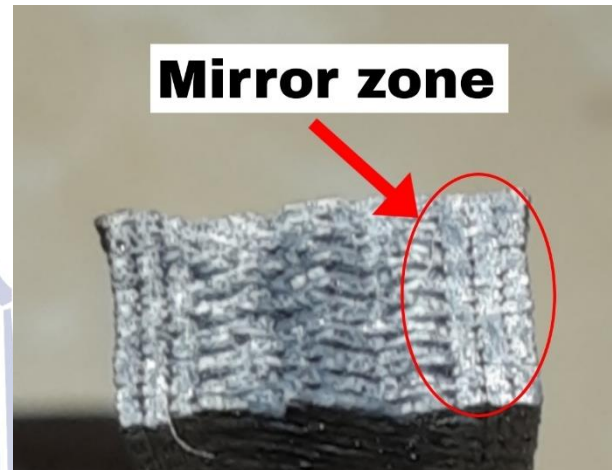
Tampak pada gambar 5 dapat diamati bahwa permukaan patahannya sangat kasar, berlapis-lapis, serta didominasi oleh pola delaminasi ini menunjukkan bahwa kegagalan terjadi di antara lapisan *interlayer failure* karena ikatan yang sangat lemah, sehingga retak dengan mudah merambat di sepanjang batas lapisan tanpa menembus lapisan itu sendiri.



Gambar 6. *Fractografi makro* kelompok II-VI

Untuk spesimen dengan kekuatan sedang pada rentan suhu 200°C dengan kecepatan 50-60 mm/s serta semua kombinasi pada suhu 215°C pada gambar 6, morfologi patahan bersifat campuran *mixed-mode* disamping masih

terdapat sisa-sisa delaminasi, muncul area yang lebih halus dengan orientasi bidang patahan yang mulai miring, yang menandakan bahwa retak telah mulai menembus lapisan *translayer fracture* suatu indikasi perbaikan ikatan antar lapisan dan transisi menuju mekanisme kegagalan kohesif.



Gambar 7. *Fractografi makro* kelompok VII-IX

Sementara itu pada gambar 7 spesimen berkekuatan tinggi yang dicetak pada suhu 230°C, permukaan patahan cenderung halus, rata, dan tegak lurus terhadap arah tarikan, serta memperlihatkan ciri khas fraktur getas seperti zona cermin *mirror zone* mekanisme kegagalannya adalah kohesif getas murni, di mana ikatan antar lapisan telah optimal sehingga material runtuh pada kekuatan intrinsiknya sendiri. Temuan ini diperkuat oleh penelitian (Sreesha et al. 2022) yang menyatakan bahwa PLA yang diperkuat serat karbon cenderung mengalami patahan trans-laminar, berbeda dengan PLA murni yang lebih bersifat intra-laminar. Hasil serupa juga dilaporkan oleh (T. A. et al. 2025) bahwa tingkat porositas *voids* berkorelasi langsung dengan performa mekanik dimana pada suhu rendah *void* lebih banyak dan saling terhubung, sedangkan pada suhu tinggi *void* lebih sedikit dan tersebar.

## PENUTUP

### Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian tarik, analisis statistik, serta pengamatan *fractografi makro* yang telah dilakukan pada material komposit PLA Carbon hasil pencetakan 3D dengan metode FDM, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Suhu nosel merupakan parameter paling dominan yang mempengaruhi sifat mekanik produk cetak. Peningkatan suhu dari 200°C ke 230°C secara konsisten meningkatkan kekuatan tarik dan modulus elastisitas. Pada kombinasi parameter optimal (230°C/50 mm/s), nilai tegangan tarik maksimum mencapai 38,59 MPa dan modulus elastisitas mencapai 10,41 GPa. Peningkatan modulus yang mencapai 410% mengindikasikan

bahwa suhu tinggi mampu mengaktifkan mekanisme penguatan filler karbon secara penuh melalui peningkatan wetting, dispersi, dan orientasi serat dalam matriks PLA.

- Kecepatan cetak memiliki pengaruh non-linear yang berinteraksi dengan suhu. Nilai kecepatan 50 mm/s terbukti optimal baik pada suhu rendah (200°C) maupun suhu tinggi (230°C). Pada suhu rendah, kecepatan ini menjadi kompromi kinetik terbaik di tengah keterbatasan mobilitas rantai polimer pada suhu tinggi, dan menciptakan jendela waktu ideal yang cukup untuk difusi mendalam sekaligus mencegah degradasi termal.
- Terdapat *trade-off* antara kekuatan/daktilitas. Peningkatan suhu cetak yang memperbaiki kekuatan tarik dan modulus elastisitas justru diikuti oleh penurunan regangan putus daktilitas. Kombinasi 230°C/50 mm/s menghasilkan regangan terendah (0,37%), sementara kombinasi 200°C/40 mm/s menghasilkan regangan tertinggi (0,97%). Hal ini disebabkan oleh meningkatnya efektivitas penguatan *filler* karbon yang bertindak sebagai penghalang deformasi plastik serta potensi peningkatan kristalinitas matriks PLA pada suhu tinggi.
- Analisis *fractografi makro* mengungkap tiga kategori morfologi patahan yang berkorelasi dengan tingkat kekuatan mekanik. Pada kekuatan rendah (200°C/40 mm/s), permukaan kasar dan berlapis dengan delaminasi ekstensif mengindikasikan kegagalan antarlapisan akibat ikatan yang sangat lemah. Pada kekuatan sedang (200°C/50-60 mm/s & 215°C), morfologi campuran dengan area halus dan orientasi patahan miring menandakan transisi menuju kegagalan kohesif. Pada kekuatan tinggi (230°C), permukaan halus, rata, tegak lurus terhadap arah tarikan, serta memperlihatkan ciri fraktur getas seperti *mirror zone* dan *hackle lines*, mengindikasikan kegagalan kohesif getas murni pada material yang telah terikat sempurna.

### Saran

Berdasarkan hasil penelitian, analisis, dan pembahasan yang telah dilaksanakan, terdapat beberapa saran sebagai berikut:

- Diharapkan pada penelitian selanjutnya untuk ekspansi rentang dan parameter penelitian, dapat dikembangkan dengan memperluas rentang suhu misalnya 210-240°C dan kecepatan misalnya 30-70 mm/s dengan interval yang lebih rapat
- Pada penelitian lebih lanjut disarankan menggunakan pengujian mekanik lain yang relevan dengan aplikasi dinamis, seperti uji dampak (*Charpy/Izod*) untuk menilai

ketangguhan, uji fatik untuk mengetahui ketahanan siklus beban, dan uji tekuk untuk aplikasi yang lebih spesifik.

### DAFTAR PUSTAKA

- Alshammari, M., El Said, M., Alshami, A., Ali, S., & Deiab, I. (2025). *Influence of carbon fiber reinforcement on mechanical and thermal behavior of PLA and PAHT in additive manufacturing. Machines*, 13(11), 985.
- Ben Fraj, B., Alresheedi, F., Alhubail, M., Alqahtani, A. R., El Mahi, A., & Beyaoui, M. (2025). *Thermal, structural, and mechanical properties of carbon fiber reinforced PLA composites: Influence of FDM print speed and comprehensive analysis. Polymer Composites*, 46(18), 17229–17239.
- Coogan, T. J., & Kazmer, D. O. (2017). *Healing simulation for bond strength prediction of FDM. Rapid Prototyping Journal*, 23(3), 551–561.
- El Magri, A., El Mabrouk, K., Vaudreuil, S., & Touhami, M. E. (2021). *Mechanical properties of CF-reinforced PLA parts manufactured by fused deposition modeling. Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 34(5), 589–607.
- Kumar, N. H., Adarsha, H. J., Keshavamurthy, R., & Kapilan, N. (2023). *Influence of carbon nano fibre addition on mechanical behaviour of PLA based 3D printed polymer nanocomposites. Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*, 105, 33–47.
- Mudakavi, D., Sreesha, R. B., Kumar, V., & Adinarayanappa, S. M. (2022). *A comprehensive experimental investigation on mechanical properties and fracture morphology of particulate composites via material extrusion-based 3D printing. Results in Materials*, 16, 100348.
- Rabilah, R., Basri, M. H., Mustafa, W. A., Azahar, F. H., & Farrahnoor, A. (2025). *Exploring the impact of printing parameters on mechanical properties in fused deposition modelling. Journal of Advanced Research in Applied Mechanics*, 138(1), 151–167.
- T. A., Abualbandora, et al. (2025). *Impact of 3D printing parameters of short carbon fiber reinforced polymer CFRP on the mechanical and failure performance: review and future perspective. Next Materials*, 8, 100645