



**Jurnal Artikel**

**Peningkatan Sifat Mekanik Material PLA+ Skin Karbon Menggunakan Proses  
*Fused Deposition Modeling***

**Afifanisa Aulia Rahmah<sup>1</sup>, Muizuddin Azka<sup>2</sup>, Rando Tungga Dewa<sup>1\*</sup>, Ida Farida<sup>1</sup>, Ariyo Nurachman Satiya Permana<sup>1</sup>, Valentina Diva Putri Santoso<sup>1</sup>, Ellena Amalia Cahyaningrum<sup>1</sup>, Muhammad Daffa Agung Pratama<sup>1</sup>, Kristian Felix Fernandes Purba<sup>1</sup>, Tryas Putranto Sembali<sup>1</sup>, Ilan Ramond Awom<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Teknik Mesin, Fakultas Teknik dan Teknologi Pertahanan, Universitas Pertahanan Republik Indonesia, Bogor 15141, Indonesia

<sup>2</sup>Pusat Riset Teknologi Proses dan Industri Manufaktur, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), Tangerang Selatan 15314, Indonesia

<sup>1</sup>rahaulaf0711@gmail.com, <sup>2</sup>muizuddin.azka@gmail.com

\*Corresponding author – Email : rando.dewa@idu.ac.id

**Abstrak**

*PLA+ banyak digunakan dalam proses Fused Deposition Modeling (FDM), tetapi memiliki beberapa keterbatasan terkait mechanical properties seperti kekuatan, keuletan, dan elastisitas. Untuk mengatasi kekurangan ini, ada kebutuhan untuk mengeksplorasi solusi berkelanjutan untuk meningkatkan kinerja material PLA+. Penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki dampak karbon skin pada PLA+ untuk meningkatkan mechanical propertiesnya dalam aplikasi FDM. Pendekatan eksperimental melibatkan variasi penerapan komposit karbon pada PLA+ dengan membuat dua jenis spesimen: PLA+ karbon non skin dan PLA+ karbon skin. Spesimen dicetak menggunakan printer 3D Creality K1C dengan kepadatan pengisi 100%, sementara parameter proses lainnya, seperti kecepatan kipas, suhu pelat, dan kecepatan pencetakan, dijaga konstan. Setelah pencetakan, karbon skin diaplikasikan ke permukaan spesimen PLA+. Setiap variasi diuji dengan standar ASTM D638 tipe I. Hasil penelitian menunjukkan bahwa spesimen karbon skin PLA+ menunjukkan kekuatan dankekakuan yang jauh lebih tinggi tetapi perpanjangan yang lebih rendah, menunjukkan perilaku yang lebih rapuh dibandingkan dengan karbon non skin PLA+. Temuan ini menunjukkan bahwa penggunaan komposit karbon dalam PLA+ dapat secara signifikan mempengaruhi mechanical propertiesnya, terutama meningkatkan kekuatan dan kekakuan sekaligus mengurangi keuletan.*

**Kata kunci:** PLA+, fused deposition modeling, mechanical properties, karbon skin

**Abstract**

*PLA+ is widely used in Fused Deposition Modeling (FDM) processes, but it has some limitations regarding mechanical properties such as strength, ductility, and elasticity. To address these shortcomings, there is a need to explore sustainable solutions to enhance PLA+ material performance. This research aims to investigate the impact of skin carbon on PLA+ to improve its mechanical properties in FDM applications. The experimental approach involved varying the application of carbon composites on PLA+ by creating two types of specimens: PLA+ non skin carbon and PLA+ skin carbon. The specimens were printed using a Creality K1C 3D printer with a 100% infill density, while other process parameters, as well as fan speed, plate temperature, and printing speed, were kept constant. After printing, a skin carbon was applied to the surface of the PLA+ specimens. Each variation was tested with ASTM D638 type I standards. The results showed that PLA+ skin carbon specimens exhibited significantly higher strength and rigidity but lower elongation, indicating more brittle behavior compared to PLA+ non skin carbon. These findings demonstrate that the use of carbon composites in PLA+ can significantly affect its mechanical properties, particularly enhancing strength and stiffness while reducing ductility.*

**Keywords:** PLA+, fused deposition modeling, mechanical properties, skin carbon.

## I. PENDAHULUAN

3D *printing* adalah proses pembuatan objek 3D dalam bentuk apa pun dari simulasi pemodelan 3D (Gokhare et al., 2017). Hal ini diantisipasi menjadi salah satu proses industri revolusioner terkemuka di tahun-tahun mendatang (Jiménez et al., 2019). Teknologi ini telah merevolusi berbagai industri, mulai dari manufaktur, arsitektur, dan perawatan kesehatan. 3D *printing* memungkinkan untuk membuat prototipe produk dengan cepat, secara signifikan mengurangi biaya produksi (Kumar Panda et al., 2023; Rayna & Striukova, 2016). Selain itu, 3D *printing* memungkinkan untuk membuat desain yang unik, kompleks, sulit atau bahkan tidak mungkin dilakukan dengan menggunakan metode manufaktur tradisional (Algarni & Ghazali, 2021).

Saat ini, additive manufacturing (AM) atau pencetakan 3D, khususnya melalui penggunaan teknologi fused deposition modeling (FDM), telah menjadi alat yang sangat populer dan telah banyak digunakan dalam kehidupan sehari-hari (Madhu et al., 2022), terutama dalam bidang pengembangan dan desain produk. *Fused deposition modeling* (FDM) merupakan salah satu metode dalam *additive manufacturing* (AM). Produk yang dibuat dengan FDM memiliki potensi besar untuk bersaing dengan metode manufaktur tradisional seperti *injection molding* (Setiawan et al., 2025). Ini adalah teknologi terbaru yang digunakan untuk memproduksi komponen yang dirancang secara detail dan rumit untuk berbagai aplikasi yang memungkinkan perusahaan berfokus pada pengurangan biaya, memproduksi barang sesuai permintaan, membangun operasi manufaktur lokal yang lebih kecil, dan memperpendek rantai pasokan mereka (Ahmad et al., 2023; Prashar et al., 2023; Tho et al., 2021).

Teknologi ini juga membawa peluang baru untuk inovasi, memungkinkan individu dan bisnis untuk mengembangkan produk yang lebih efisien dan kreatif. 3D

*printing* digunakan di banyak bidang aplikasi teknik dan penelitian, termasuk industri biomedis, otomotif, kedirgantaraan, dan desain produk (Rasyid et al., 2022). Dengan keunggulan 3D *printing* dan meningkatnya tren penggunaan 3D *printing* dalam pembuatan struktur drone, membuka peluang besar untuk beralih dari pembuatan drone secara konvensional menjadi menggunakan 3D *printing* (Yap et al., 2023). Dengan kemampuan mencetak komponen secara presisi dan efisien, 3D *printing* memungkinkan pembuatan drone yang lebih ringan, elastis, dan ekonomis. Penggunaan 3D *printing* dalam pembuatan drone memiliki berbagai keunggulan dibandingkan metode tradisional (El-Sayegh et al., 2020), diantaranya dalam membuat desain yang dapat disesuaikan dengan kebutuhan spesifik, komponen dapat dicetak dalam hitungan jam dan tidak membutuhkan cetakan yang mahal seperti pada metode pembuatan tradisional.

Jenis filamen yang paling umum digunakan dalam 3D *printing* adalah ABS, PLA, dan PETG (Stecula et al., 2024). PLA adalah pilihan yang baik dengan mempertimbangkan bahan yang ramah lingkungan dan mudah dicetak karena dibuat dari bahan yang berkelanjutan seperti tepung jagung atau tebu yang mudah terurai dan aman bagi lingkungan (Taib et al., 2023). ABS mungkin lebih cocok digunakan jika produk memerlukan kekuatan dan daya tahan yang lebih kuat. ABS adalah polimer termoplastik yang terbuat dari tiga monomer, yaitu *akrilonitril*, *butadiena*, dan *stirena*, yang dapat mengeluarkan gas berbahaya (VOC) selama proses pencetakan, sehingga kurang ramah lingkungan. Jika keseimbangan antara kekuatan dan kemudahan pencetakan diperlukan, PETG mungkin merupakan pilihan terbaik. Ini tidak menghasilkan racun atau bau yang berbahaya dan tahan terhadap panas dan bahan kimia, tetapi tidak sekuat ABS (Yan et al., 2024). Di antara jenis-jenis filamen 3D *printing*, PLA adalah yang paling banyak dan umum digunakan karena ramah lingkungan

(Casalini et al., 2019; Suteja et al., 2023; Taib et al., 2023). Namun, PLA memiliki kekuatan tarik dan ketahanan panas yang lebih rendah dibandingkan dengan ABS dan PETG. Oleh karena itu, PLA yang lebih baik seperti PLA+ diciptakan dengan memasukkan aditif yang meningkatkan sifat mekanik PLA.

PLA+ adalah bahan biodegradable terbaru yang merupakan variasi dari PLA murni (Abd-El Nabi et al., 2023). Ini adalah versi yang disempurnakan dari PLA standar, dengan tambahan modifikasi aditif tertentu untuk meningkatkan sifat mekanik, termal, dan kinerja sehingga memiliki ketahanan benturan dan daya rekat yang lebih baik antar lapisan yang dicetak (Kadhum et al., 2023). Namun, untuk beberapa aplikasi seperti drone dan komponen kedirgantaraan, sifat mekaniknya masih lebih rendah daripada jenis plastik lainnya. Jadi, perlu dilakukan peningkatan sifat mekanik PLA.

Berdasarkan karya ilmiah yang dikutip, banyak perhatian diberikan untuk mengoptimalkan kualitas material pada PLA, pada penelitian ini penggunaan PLA+ dipilih karena PLA+ dianggap memiliki kemampuan yang lebih unggul dibandingkan PLA standar, sehingga diharapkan dapat dioptimalkan lebih lanjut. Optimasi material dilakukan dengan menambahkan *skin* karbon pada PLA+ yang kemudian akan diuji menggunakan uji tarik dan karakterisasi menggunakan Scanning Electron Microscope (SEM). Pada pengujian ini diharapkan terjadi peningkatan sifat dan karakteristik PLA+ sehingga dapat diaplikasikan pada berbagai bidang yang membutuhkan sifat mekanik yang sesuai.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### *Polilactic Acid (PLA)*

*Polylactic Acid* (PLA) merupakan biopolimer yang berasal dari sumber daya alam terbarukan seperti pati jagung dan

tebu, melalui proses fermentasi asam laktat. Dalam satu dekade terakhir, PLA menjadi salah satu kandidat utama dalam pengembangan material ramah lingkungan karena sifat biodegradabelnya dan proses produksi yang relatif bersih. Tidak hanya itu, PLA juga menunjukkan karakteristik mekanik yang cukup baik, sehingga banyak dimanfaatkan dalam bidang kemasan, medis, hingga sebagai matriks dalam material komposit (Aida, 2020).

Meski demikian, PLA masih memiliki beberapa kelemahan, seperti sifat yang rapuh, stabilitas termal yang terbatas, dan proses degradasi yang lambat pada kondisi lingkungan tertentu. Untuk mengatasi keterbatasan ini, berbagai studi telah dilakukan, salah satunya dengan menambahkan material penguat seperti serat alami, nanopartikel, hingga serat sintetis. Pendekatan ini bertujuan untuk meningkatkan performa mekanik dan ketahanan termal PLA (Hidayanti, 2021). Bahkan, kombinasi PLA dengan material berperforma tinggi seperti serat karbon atau *graphene* kini tengah dikembangkan untuk menghasilkan komposit ringan namun kuat, yang cocok untuk aplikasi struktural.

### Serat Karbon

Serat karbon dikenal sebagai material penguat yang unggul karena kombinasi antara bobot yang ringan dan kekuatan mekanik yang sangat tinggi. Material ini umumnya diperoleh dari proses pirolisis terhadap prekursor seperti *polyacrylonitrile* (PAN). Berkat sifatnya yang luar biasa, serat karbon telah lama digunakan dalam industri-industri strategis seperti kedirgantaraan dan otomotif. Dalam pengembangan komposit berbasis PLA, penambahan serat karbon terbukti dapat meningkatkan kekakuan dan kekuatan tarik secara signifikan, sekaligus mengurangi deformasi akibat beban mekanik. Meski demikian, untuk mencapai interaksi antarmuka yang optimal antara PLA dan serat karbon, sering kali dibutuhkan modifikasi permukaan atau penambahan

bahan penghubung (*coupling agent*) agar kedua komponen dapat berpadu dengan baik. Dengan optimalisasi ini, PLA-serat karbon berpotensi besar menjadi material komposit ringan yang berkelanjutan untuk berbagai kebutuhan teknik.

### Resin

Dalam sistem material komposit, resin berperan sebagai matriks yang menyatukan dan melindungi serat penguat, serta mendistribusikan beban ke seluruh struktur. Resin PLA sebagai bahan termoplastik kini semakin banyak dikembangkan untuk menggantikan resin termo-set konvensional seperti epoksi dan poliester karena keunggulannya dalam hal keberlanjutan dan kemudahan daur ulang. Namun, PLA sebagai resin tidak lepas dari tantangan, terutama terkait kompatibilitasnya dengan serat penguat seperti serat karbon. Oleh karena itu, berbagai metode telah dicoba untuk meningkatkan daya ikat antara PLA dan serat, seperti penggunaan agen kopling, modifikasi permukaan serat, atau penggabungan PLA dengan resin lain yang lebih reaktif. Dengan pemilihan jenis resin dan teknik pemrosesan yang tepat, performa akhir dari material komposit dapat ditingkatkan secara signifikan, baik dari sisi kekuatan, ketahanan, maupun keawetan.

### III. METODOLOGI

Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan material PLA+ dengan menambahkan lapisan *skin* karbon untuk meningkatkan karakteristik mekanik dan daya tahannya. Metode yang digunakan meliputi proses fabrikasi dengan teknik 3D *printing* dan pelapisan karbon dengan metode hand layup.

### Pembuatan Spesimen

Penelitian ini dilakukan dengan membuat sampel uji tarik sesuai dengan standar ASTM D638 tipe I, meliputi PLA+ *non skin* karbon (NK), PLA+ *skin* karbon

(NKK) dengan sifat-sifat yang ditunjukkan pada gambar 1. PLA+ merupakan variasi dan pengembangan dari PLA dengan penambahan zat aditif tertentu untuk meningkatkan sifat mekanik dan termalnya.



Gambar 1 Contoh gambar PLA + *non skin* ((NK) dan PLA + *skin* karbon (NKK)

Tabel 1. Ukuran spesimen

Dimensi	Ukuran (mm)
Panjang Penuh	165
Ketebalan	3
Panjang Paralel	57
Panjang Pengukur	50
Lebar Bagian Paralel	13
Lebar Bagian Genggaman	19
Jarak Antar Genggaman	115

Proses pembuatan sampel uji diawali dengan proses pemodelan spesimen uji dengan menggunakan perangkat lunak CAD solidwork. Seluruh sampel diproduksi menggunakan mesin cetak 3D merek Creality tipe K1C. Untuk sampel dengan tambahan *skin* karbon, ketebalan sampel yang dicetak 3D dikurangi sebesar ~1 mm untuk mempertahankan ketebalannya yaitu 3 mm. Pengaturan mesin cetak 3D sesuai dengan variabel terikat yang telah ditentukan sebelumnya dengan parameter pencetakan dirangkum dalam Tabel 2. Lapisan *skin* karbon dibuat dengan metode *hand lay-up* menggunakan resin epoksi dengan rasio resin 1:2.

Tabel 2 Parameter mesin cetak 3D

Parameter	Pengaturan <i>Printing</i>
<i>Deposition Temp</i> (°C)	210
<i>Nozzle Diameter</i> (mm)	0.4
<i>Layer Height</i> (mm)	0.1
<i>Bed Temp</i> (°C)	60
<i>Infill Density</i> (%)	100

<i>Fan Speed (%)</i>	100
<i>Nozzle Temp (°C)</i>	210

## Prosedur Pengujian

Pengujian dilakukan dengan menggunakan Mesin Uji Universal Shimadzu AG-X plus 50 kN dengan jarak cengkeraman 115 mm, panjang pengukur 50 mm, laju kepala bab 5 mm/menit, pada suhu  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  dan RH  $50 \pm 10\%$ . Semua sampel disimpan di ruang pendingin ( $23 \pm 2^\circ\text{C}$  dan  $50 \pm 5\%$  RH) selama  $>40$  jam sebelum pengujian. Hasil pengujian ini ditampilkan dalam grafik tegangan versus regangan dengan karakteristik pembebahan dan deformasi yang bergantung pada geometri spesimen. Dalam pengujian ini, bagian patahan dari sampel uji dipotong secara melintang pada penampang melintang. Pengujian SEM diamati menggunakan *JSM-6510LA JEOL SEM SCAN ELECTRON MICROSCOPE* dengan preparasi pelapisan Au (50s; 30mA), *Accelerate Voltage* 20 kV, dan perbesaran 20X hingga 200X. Semua sampel dilapisi dengan platinum untuk mengurangi pengisian daya. Pengamatan dilakukan pada penampang melintang dari area yang patah setelah uji tarik.



Gambar 2. Sampel uji tarik

Hasil pengujian ini ditampilkan dalam kurva beban versus perpanjangan dengan karakteristik pembebahan dan deformasi yang bergantung pada geometri spesimen. Dalam meminimalkan faktor geometris,

pemanjangan dan beban dinormalisasi menggunakan parameter tegangan teknis dan parameter tarik teknik. Tegangan teknik  $\sigma$  didefinisikan melalui hubungan:

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

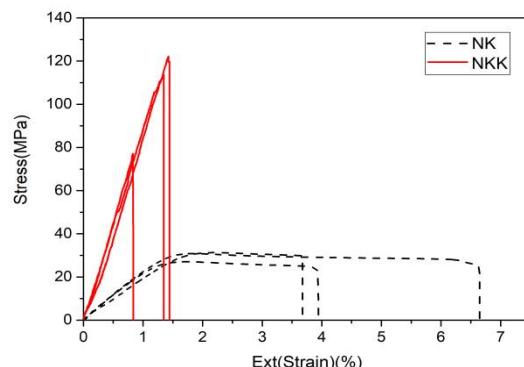
$F$  dalam newton (N) adalah beban yang bekerja tegak lurus terhadap penampang spesimen dan  $A$  adalah luas penampang awal sebelum beban diberikan ( $\text{m}^2$ ) Satuan tegangan teknik adalah megapascal atau MPa (SI). Teknik Regangan ditentukan oleh hubungan:

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

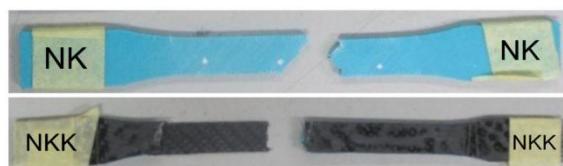
$L_0$  menunjukkan panjang awal sebelum penerapan beban, sedangkan  $\Delta L$  menunjukkan perubahan panjang yang terjadi setelah beban diterapkan. Regangan tidak seragam dan biasanya regangan dibuat dalam persen dengan mengalikan nilai regangan dengan 100%.

## IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

### Uji Tarik



Gambar 3. Kurva tegangan-regangan dari semua sampel

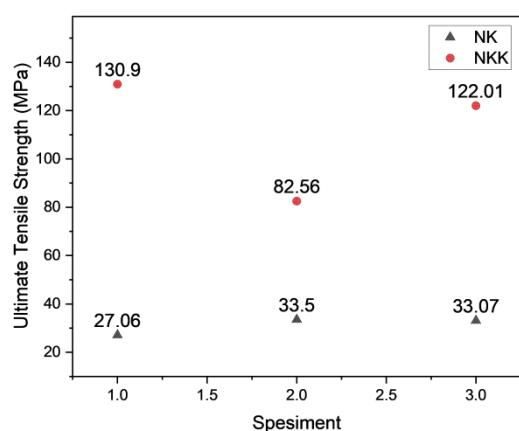


Gambar 4. Sampel PLA + non skin ((NK) dan PLA + skin karbon (NKK) setelah pengujian

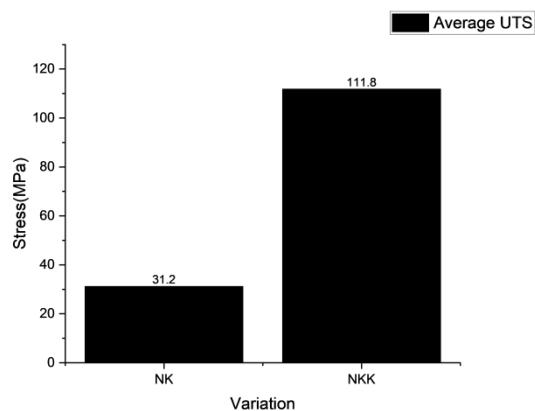
Tabel 3. Hasil rata-rata uji tarik

Sample Name	Tensile Modulus (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation at Break (%)	Density (g/cm³)	Specific Strength
NK	2488	31.2	5	1.20	26
NKK	9415	111.8	1	1.22	91.7

Gambar 3 menunjukkan kurva tegangan-regangan komposit NK dan NKK. Sampel NK menunjukkan tegangan maksimum yang lebih rendah daripada NKK yaitu sekitar 30 MPa. Setelah mencapai tegangan luluh, sampel ini mempertahankan tegangan sedikit lebih lama sebelum patah yang berarti sampel NK memiliki sifat ulet. Sementara itu, sampel NKK memiliki tegangan maksimum 110-120 MPa pada regangan yang sangat rendah. NKK memiliki kemiringan yang curam, menunjukkan modulus elastisitas yang tinggi (materialnya sangat kaku). Setelah mencapai tegangan luluh maksimum, sampel NKK mengalami penurunan tegangan yang tajam, yang mengindikasikan sifat getas. Nilai *Ultimate Tensile Strength* (UTS) untuk masing-masing spesimen dapat dilihat pada Gambar 5.

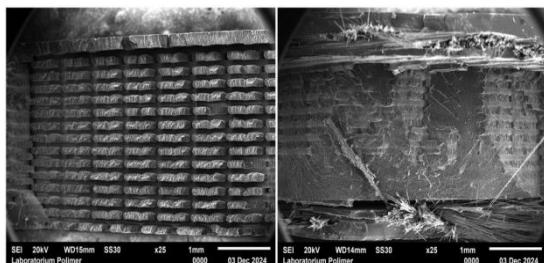


Gambar 5 SEM permukaan patahan sampel (a) PLA + karbon non- skin (b) PLA + skin karbon



Gambar 6 Rata-rata Ultimate Tensile Strength (UTS)

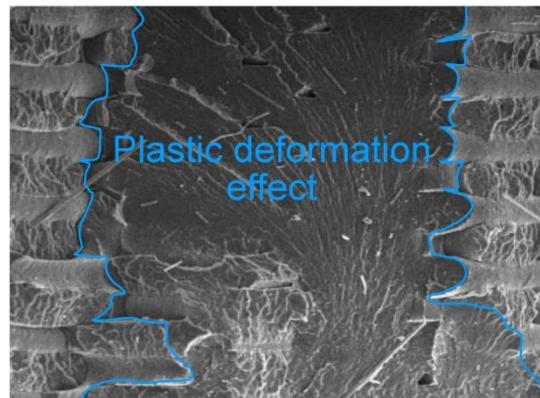
Tabel 3 dan gambar 6 menunjukkan nilai rata-rata sifat tarik sampel NK dan NKK. Tabel tersebut menunjukkan bahwa modulus tarik NKK lebih tinggi (>278%) dibandingkan NK yang mengindikasikan bahwa NKK memiliki kekakuan yang lebih tinggi dibandingkan NK. Sementara itu, kekuatan luluh NKK lebih tinggi (>258%) daripada NK menunjukkan bahwa sampel NK lebih mudah mengalami deformasi plastis daripada sampel NKK. Tabel tersebut juga menunjukkan bahwa regangan luluh NK lebih tinggi daripada NKK, yang mengindikasikan bahwa NK mengalami deformasi yang lebih besar sebelum material terdeformasi secara permanen. Sampel NK juga memiliki perpanjangan putus yang lebih tinggi dibandingkan dengan NKK, yang menunjukkan bahwa sampel NK lebih ulet dan dapat meregang lebih banyak sebelum putus dibandingkan dengan NKK.

**Scanning Electron Microscope (SEM)**

Gambar 7. SEM permukaan patahan sampel (a) PLA+ *non skin* karbon (b) PLA+ *skin* karbon

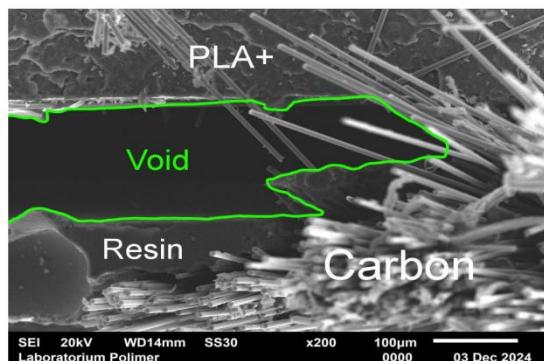
Permukaan patahan sampel ditunjukkan pada Gambar 5. Gambar diambil pada permukaan patahan sampel setelah uji tarik. Pola *infill 3D printing* terlihat jelas dengan lapisan yang tersusun rapi pada permukaan PLA+ *non skin*. Retakan terjadi di sepanjang batas lapisan pengisi yang mencerminkan sifat PLA+ yang relatif rapuh, di mana retakan menyebar dengan cepat di sepanjang jalur lapisan. Struktur ini menunjukkan bahwa PLA+ *non skin* memiliki keterbatasan dalam menyerap energi ketika menerima beban tarik, sehingga cenderung patah dengan pola yang teratur.

Sebaliknya, pola pengisian PLA+ *skin* karbon tidak lagi terlihat, menunjukkan infiltrasi epoksi ke dalam celah di antara lapisan selama pembuatan *skin* karbon menggunakan lay-up tangan. Epoksi yang disusupi meningkatkan kekuatan rekat antar lapisan. *Skin* karbon juga berperan dalam menahan deformasi plastis, mendistribusikan tegangan secara lebih merata, sehingga pola retakan menjadi lebih terkontrol dan tidak mengikuti pola *infill* seperti pada PLA+ *non skin* karbon. *Skin* karbon berperan sebagai penguat dan menahan retakan atau deformasi pada jalur tertentu, sehingga batas-batas pola *infill* tidak lagi teridentifikasi dengan jelas.



Gambar 8. SEM menangkap efek deformaasi plastis pada PLA+ *skin* karbon

Hilangnya pola pengisian permukaan pada *skin* karbon PLA+ juga terkait dengan redistribusi tegangan selama uji tarik. PLA+ *skin* karbon menghasilkan deformasi plastis yang lebih terkendali dengan menyebarkan tegangan yang sebelumnya terfokus pada batas lapisan ke seluruh matriks material. Selain itu, *skin* karbon menambah kekuatan mekanik pada material, sehingga patahan tidak lagi terfokus pada area tertentu, melainkan menyebar secara acak ke seluruh struktur. Jadi, hilangnya pola pengisian pada lapisan PLA+ *skin* karbon terkait dengan beban tarik yang ditahan oleh lapisan karbon yang mengelilingi permukaan sampel cetak 3D. Hal ini menjelaskan bagaimana penambahan *skin* karbon pada suatu material mengubah mekanisme fraktur dan meningkatkan kekuatan tarik, membuatnya lebih kuat dan mampu mendistribusikan tegangan secara lebih efektif.



Gambar 9. Gambar SEM dari permukaan patahan PLA+ *skin* karbon .

Gambar 9 menunjukkan permukaan patahan PLA+ *skin* karbon dengan

perbesaran 200 kali dan skala 100  $\mu\text{m}$ . Pada permukaan terlihat rongga-rongga besar antara komposit PLA+ dan serat karbon, disana juga terlihat serat karbon yang terlepas dari matriks PLA+ yang mengindikasikan adanya fenomena delaminasi atau lepasnya ikatan antara serat dan matriks. Serat karbon yang menonjol mengindikasikan bahwa adhesi antara PLA+ dan serat karbon belum sempurna, hal ini dapat terjadi karena perbedaan sifat mekanik, ketidaksempurnaan proses fabrikasi atau distribusi resin yang kurang maksimal sehingga berpotensi mengurangi kekuatan mekanik dan ketahanan impak material.

Adanya *void* antara lapisan PLA+ dan lapisan komposit serat karbon disebabkan oleh metode *hand lay-up*. Hal ini menunjukkan bahwa meskipun terdapat *void* antara lapisan PLA+ dengan lapisan komposit karbon, namun nilai *mechanical properties* material tetap meningkat, sehingga jika kekosongan antar lapisan tersebut dapat dihilangkan maka nilai *mechanical properties*nya akan semakin meningkat.

## V. KESIMPULAN

1. Berdasarkan hasil uji tarik, modulus tarik PLA+*skin* karbon lebih tinggi ( $>278\%$ ) daripada PLA+karbon *non skin*. Sementara itu, kekuatan luluh PLA+*skin* karbon lebih tinggi ( $>258\%$ ) dibandingkan dengan PLA+karbon *non skin*. Namun, pada nilai regangan luluh, sampel karbon *non skin* PLA+ memiliki perpanjangan putus yang lebih tinggi daripada *skin* karbon PLA+, yang mengindikasikan bahwa karbon *non skin* PLA+ lebih elastis dan dapat meregang lebih banyak sebelum putus dibandingkan dengan *skin* karbon PLA+. Oleh karena itu, ini cocok untuk aplikasi yang membutuhkan kekuatan, kekakuan, dan stabilitas struktural yang tinggi, tetapi tidak memerlukan fleksibilitas atau deformasi yang besar.

2. Hasil pengamatan menggunakan SEM (*Scanning Electron Microscope*) menunjukkan adanya void dan cacat atau ketidaksempurnaan material akibat proses laminasi berupa hand lay-up sehingga laminasi *skin* karbon merupakan langkah yang tepat untuk meningkatkan sifat dan karakteristik PLA+, apalagi jika *skin* karbon pada PLA+ dapat diimplementasikan secara sempurna, maka sifat dan karakteristik PLA+ yang diberikan laminasi *skin* karbon semakin meningkat.

## ACKNOWLEDGEMENT

Kami mengucapkan terima kasih atas dukungan yang diterima dari Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP) di bawah Program Riset dan Inovasi untuk Indonesia Maju (RIIM).

## DAFTAR PUSTAKA

- Abd-El Nabi, A. M., Mahmoud, M. M., Marzouk, W. W., Omran, H. A., ElSheikh, A., Bedairi, B. H., & Mahmoud Ibrahim, A. M. (2023). Tension and bending behaviors of 3D printed PLA+ at different printing parameters. *Journal of Micromechanics and Molecular Physics*, 08(02n03), 123–135. <https://doi.org/10.1142/S2424913023410047>
- Ahmad, M. N., Ishak, M. R., Mohammad Taha, M., Mustapha, F., & Leman, Z. (2023). A Review of Natural Fiber-Based Filaments for 3D Printing: Filament Fabrication and Characterization. *Materials*, 16(11). <https://doi.org/10.3390/ma16114052>
- Aida, A. (2020). SINTESA MATERIAL BIOSCAFFOLD BERBAHAN DASAR PLA/NANOKITOSAN DENGAN PENAMBAHAN ZN-CURCUMIN. *Journal of Science and Technology*, 18.

- Algarni, M., & Ghazali, S. (2021). Comparative Study of the Sensitivity of PLA, ABS, PEEK, and PETG's Mechanical Properties to FDM Printing Process Parameters. *Crystals*, 11(8). <https://doi.org/10.3390/cryst11080995>
- Casalini, T., Rossi, F., Castrovinci, A., & Perale, G. (2019). A Perspective on Polylactic Acid-Based Polymers Use for Nanoparticles Synthesis and Applications. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 7(October), 1–16. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2019.00259>
- Minh, T., Phat Tai, N., & Huu Tho, N. (2020). The effect of infill pattern, infill density, printing speed and temperature on the additive manufacturing process based on the FDM technology for the hook-shaped components. *Jurnal Polimesin*, 18(1), 1–6. <http://dx.doi.org/10.30811/jpl.v18i1.1445>
- El-Sayegh, S., Romdhane, L., & Manjikian, S. (2020). A critical review of 3D printing in construction: Benefits, challenges, and risks. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 20(2), 34. <https://doi.org/10.1007/s43452-020-00038-w>
- Gokhare, V. G., Raut, D. N., & Shinde, D. K. (2017). A Review paper on 3D-Printing and Various Processes Used in the 3D-Printing. *International Journal of Scientific Research in Engineering and Management*, 06(06), 953–958. <https://doi.org/10.55041/ijserem13278>
- Hidayanti, F. (2021). MATERIAL BIOKOMPOSIT.
- Jiménez, M., Romero, L., Domínguez, I. A., Espinosa, M. D. M., & Domínguez, M. (2019). Additive Manufacturing Technologies: An Overview about 3D Printing Methods and Future Prospects. *Complexity*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/9656938>
- Kadhum, A. H., Al-Zubaidi, S., & Alkareem, S. S. A. (2023). Optimization of Mechanical Properties and Surface Characteristics of PLA+ 3D Printing Materials. *International Journal of Chemical Engineering*, 2023. <https://doi.org/10.1155/2023/8887905>
- Kumar Panda, S., Charan Rath, K., Mishra, S., & Khang, A. (2023). Revolutionizing product development: The growing importance of 3D printing technology. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.10.138>
- Madhu, N. R., Erfani, H., Jadoun, S., Amir, M., Thiagarajan, Y., & Chauhan, N. P. S. (2022). Fused deposition modelling approach using 3D printing and recycled industrial materials for a sustainable environment: A review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 122(5–6), 2125–2138. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10048-y>
- Prashar, G., Vasudev, H., & Bhuddhi, D. (2023). Additive manufacturing: Expanding 3D printing horizon in industry 4.0. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 17(5), 2221–2235. <https://doi.org/10.1007/s12008-022-00956-4>
- Rasyid, S., Nur, R., & Basongan, Y. (2022). Simulation and Experimental Evaluation of Tensile Properties and Macrostructure

- Changed of 3D printer PLA Filaments. *Disseminating Information on the Research of Mechanical Engineering-Jurnal Polimesin*, 20(2), 138–142. <http://dx.doi.org/10.30811/jpl.v20i2.2929>
- Rayna, T., & Striukova, L. (2016). From rapid prototyping to home fabrication: How 3D printing is changing business model innovation. *Technological Forecasting and Social Change*, 102, 214–224. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2015.07.023>
- Setiawan, F., Sofyan, R. M., & Putra, I. R. (2025). The effect of honeycomb and rectangular structures made with PLA 3D printing on the impact strength of sandwich composite. *Disseminating Information on the Research of Mechanical Engineering - Jurnal Polimesin*, 23(1), 77–82. <https://doi.org/10.30811/jpl.v22i4.3713>
- Stecuła, B., Sitko, J., Stecuła, K., Witkowski, M., & Orzeł, B. (2024). Comparison of the strength of popular thermoplastic materials used in 3D printing—PLA, ABS and PET-G. *Combustion Engines*, 199(4), 97–103. <https://doi.org/10.19206/ce-189386>
- Suteja, T. J., Handoko, R., & Soesanti, A. (2023). Optimization of Infill Density, Layer Height, and Shell Thickness to Achieve Maximum Bending Strength and Minimum Printing Time of PLA 3D Printed Part. *Disseminating Information on the Research of Mechanical Engineering - Jurnal Polimesin*, 21(5), 477–481. <http://dx.doi.org/10.30811/jpl.v21i5.3883>
- Taib, N. A. A. B., Rahman, M. R., Huda, D., Kuok, K. K., Hamdan, S., Bakri, M. K. B., Julaihi, M. R. M. B., & Khan, A. (2023). A review on poly lactic acid (PLA) as a biodegradable polymer. In *Polymer Bulletin* (Vol. 80). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/s00289-022-04160-y>
- Tho, N. H., Dien, N. K., Tho, T. T., Thanh, N. V., & Duy, N. V. A. (2021). Application of topology optimization technique in sand casting process of a complex product based on FDM 3D printing technology. *Jurnal Polimesin*, 19, 122–132. <https://doi.org/DOI: http://dx.doi.org/10.30811/jpl.v19i2.2115>
- Yan, C., Kleiner, C., Tabigue, A., Shah, V., Sacks, G., Shah, D., & DeStefano, V. (2024). PETG: Applications in Modern Medicine. *Engineered Regeneration*, 5(1), 45–55. <https://doi.org/10.1016/j.engreg.2023.11.001>
- Yap, Y. L., Toh, W., Giam, A., Yong, F. R., Chan, K. I., Tay, J. W. S., Teong, S. S., Lin, R., & Ng, T. Y. (2023). Topology optimization and 3D printing of micro-drone: Numerical design with experimental testing. *International Journal of Mechanical Sciences*, 237, 107771. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2022.107771>