

## PENINGKATAN SIFAT MEKANIK PRODUK 3D PRINTING DENGAN PROSES ANNEALING

Slamet Saefudin<sup>1\*</sup>, Dini Cahyandari<sup>1</sup>, Ilham Yustar Afif<sup>1</sup>, Samsudi Raharjo<sup>1</sup>, Muh. Subri<sup>1</sup>, Ahmad Nuril Anwar<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Semarang  
Jl. Kedungmundu Raya No.18, Tembalang, Semarang 50273.

\*Email: slametsaefudin66@unimus.ac.id

### Abstrak

Teknologi pencetak tiga dimensi *Fused Deposition Modeling (3D FDM)* memiliki perkembangan yang sangat pesat karena kemudahan penggunaan dalam menghasilkan produk yang kompleks secara cepat sesuai harapan. Kemudahan penggunaan dan biaya yang murah menjadikan teknologi FDM banyak diminati di berbagai bidang ilmu maupun teknik. Namun, produk yang dihasilkan dari proses lapis demi lapis pada 3D FDM menjadikan sifat mekanik yang rendah. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menyelidiki peningkatan sifat mekanik sampel poli asam laktat (PLA) yang dicetak dengan teknik 3D FDM melalui proses annealing. Sampel di annealing pada suhu dan waktu yang berbeda untuk selanjutnya dievaluasi dengan uji tarik. Hasil menunjukkan bahwa proses annealing menyebabkan peningkatan kekuatan tarik pada sampel dan perubahan dimensi yang disebabkan karena adanya pepadatan pada susunan layer. Semakin lama dan tinggi suhu yang digunakan dalam proses annealing membuat sampel lebih getas. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan kekuatan tarik tertinggi terjadi pada sampel PLA yang mengalami perlakuan panas pada suhu 120 °C dan waktu paparan panas selama 30 menit. Hasil ini menunjukkan bahwa proses perlakuan panas annealing mempengaruhi kuat tarik PLA yang dapat ditingkatkan dengan penggunaan parameter suhu dan waktu paparan yang tepat untuk menghindari perubahan dimensi.

**Kata kunci:** 3D Printing, Fused Deposition Modeling (FDM), Annealing, Uji tarik

### 1. PENDAHULUAN

*Fused Deposition Modeling (FDM)* adalah teknik manufaktur aditif yang paling banyak digunakan secara komersial karena sebagian biaya peralatan dan bahan baku yang relatif rendah. Dalam teknik ini, bahan filamen termoplastik dipanaskan dan dipaksa keluar secara mekanis melalui nosel untuk membuat lapisan – lapisan 3D. Setiap lapisan dicetak dengan mengekstrusi filamen termoplastik ke lapisan yang didinginkan sebelumnya hingga terbentuk model tiga dimensi (Jaisingh Sheoran & Kumar, 2020; Ngo et al., 2018a, 2018b). Meskipun memiliki banyak kelebihan, hasil cetakan dengan menggunakan FDM tidak dipersyaratkan untuk struktural dengan pembebanan tinggi karena sifat mekanik masih belum mencukupi sehingga rentan terjadi kegagalan untuk sebagian aplikasi teknik (Aliheidari et al., 2017; Bell & Siegmund, 2018; Chen et al., 2020; Diani & Gall, 2006; Dizon et al., 2018; Hikmat et al., 2021; Liparoti et al., 2021).

Pada proses pencetakan 3D FDM, polimer berbentuk filamen diendapkan di atas lapisan sebelumnya, suhu filamen naik di atas suhu

transisi gelas ( $T_g$ ) selama beberapa detik. Pada keadaan ini memungkinkan filamen mencair dan mengalir melalui nosel untuk membentuk suatu model baru. Waktu paparan panas dan tekanan pepadatan antar lapisan model yang terbentuk tidak cukup untuk membentuk ikatan berkekuatan tinggi, sehingga kekuatan antar lapisan secara signifikan lebih rendah dari pada cetakan polimer injeksi (Malekmotiei et al., 2017; Vorkapić et al., 2022; Wang et al., 2019). Bagian produk 3D FDM paling rentan mengalami kerusakan terdapat pada lapisan antar layer. Kegagalan ikatan antar layer telah diamati pada berbagai kondisi pengujian seperti tegangan, *bending*, torsi dan kompresi. Oleh karena itu, kekuatan ikatan antar layer pada 3D FDM sering menjadi penentu kegagalan struktural, terlepas dari pembebanan yang diharapkan. Berbagai metode telah digunakan untuk meningkatkan kekuatan ikatan antar layer pada produk FDM, termasuk berbagai parameter pencetakan (kecepatan pencetakan, suhu pencetakan, laju pengendapan material, kepadatan pengisi, dll). Penambahan material pengisi struktural dan iradiasi gelombang mikro telah dilakukan tetapi cara tersebut tidak sesuai

dengan kekuatan mekanik atau ketangguhan bahan berbentuk serupa yang diproduksi menggunakan metode tradisional seperti *injeksi molding* (Hart et al., 2018; Wach et al., 2018). Maka metode pemanasan kembali terhadap produk hasil cetakan perlu dilakukan untuk menambah daya ikat antar layer (Butt & Bhaskar, 2020; Dong et al., 2020; Lv et al., 2015).

Proses *annealing* dapat meningkatkan kristalinitas *polimer* dengan menerapkan suhu antara transisi gelas ( $T_g$ ) dan suhu leleh ( $T_m$ ). *Annealing* menyebabkan proses *nukleasi* polimer yang mendorong pertumbuhan kristalisasi lebih baik. Daerah *amorf* dan kristal kecil dari polimer mendukung pembentukan daerah kristal yang lebih besar dengan struktur kristal yang lebih sempurna, yang mengarah ke perilaku polimer yang lebih kuat, terutama pada suhu tinggi (Ferreira et al., 2020; Lluch-Cerezo et al., 2022; Vanaei et al., 2020). Untuk mencapai beberapa tingkat kristalinitas, waktu *annealing* selalu berbanding terbalik dengan suhu *annealing*. Suhu *annealing* yang lebih rendah membutuhkan waktu *annealing* yang lebih lama. Namun, suhu *annealing* tidak boleh terlalu tinggi (jauh di atas  $T_m$ ) karena dapat membahayakan integritas struktural kristal *polimer*, yang mengarah pada penurunan kristalinitasnya secara keseluruhan (Basgul et al., 2020; Dunn et al., 2019; Hong et al., 2019). Proses *annealing* dapat meningkatkan sifat mekanik dari material yang dihasilkan. Selama pengkondisian termal di atas  $T_g$ , makromolekul memperoleh mobilitas, memungkinkan penataan ulang ikatan antar molekul dan bentuk secara teratur. Bagaimanapun, bahwa dalam kondisi termal tertentu, seperti pendinginan sampel tepat di atas  $T_g$  setelah peleburan, dapat menghasilkan polimer ulet (Vindokurov et al., 2022). Hasil ini dapat menguntungkan untuk aplikasi tertentu.

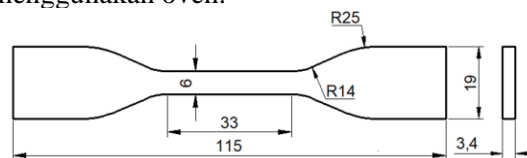
Tujuan dari penelitian ini adalah untuk memberikan pemahaman tentang peningkatan kekuatan mekanik sampel dari produk cetak 3D FDM dengan cara thermal *annealing*. Penggunaan suhu transisi gelas yang lebih rendah dibandingkan dengan proses pencetakan FDM memungkinkan kontrol yang lebih baik pada ikatan antar layer. Sampel uji tarik dibuat dengan 3D FDM kemudian di *annealing* dengan variasi waktu dan suhu. Sifat mekanik dari sampel hasil cetak 3D dan *annealing* kemudian dievaluasi dengan menggunakan pengujian tarik. Hasil uji tarik dianalisis kaitannya dengan

pengaruh waktu dan suhu dari proses *annealing*. Pemindaian mikroskop elektron digunakan untuk menyelidiki perubahan struktur dan *morfologi* pada bahan sebelum dan sesudah proses *annealing*.

## 2. METODOLOGI

### 2.1 Material

Penelitian ini menggunakan sampel produk 3D *printing* dengan bahan PLA yang dicetak sesuai standar *ASTM D638 IV*. Model didesain dengan menggunakan software *solidwork* dengan satuan milimeter (mm) seperti ditunjukkan pada Gambar 1 kemudian disimpan dalam file *Stereolithography (STL)*. Pengaturan parameter pencetakan menggunakan software *open source cura ultimaker* untuk merubah file STL ke file G-code. Hasil format file G-code dicetak menggunakan mesin cetak 3D bermerk *Creality Ender 3 Pro* dengan filamen PLA berdiameter 1,75 mm. Skema pembuatan sampel uji ditunjukkan pada Gambar 2. Beberapa parameter proses pencetakan ditunjukkan pada Tabel 1. Setelah proses pencetakan selesai, selanjutnya dilakukan proses *annealing* dengan menggunakan oven.



Gambar 1. Desain sampel

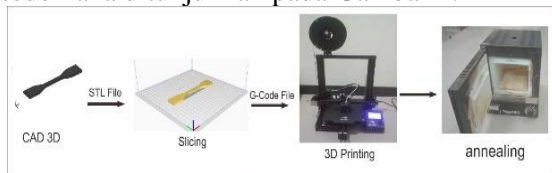
Tabel 1. Parameter Pencetakan

Parameter pencetakan	Spesifikasi
<i>Infill Pattern</i>	<i>Grid</i>
<i>Infill Density</i>	60%, 80%, 100%
<i>Printing Speed (mm/s)</i>	50
<i>Layer Height (mm)</i>	0.16
<i>Extruder Temp (°C)</i>	200
<i>Bed Temp (°C)</i>	80
<i>Nozzle Diameter (mm)</i>	0.4

### 2.2 Annealing

*Annealing* sampel dilakukan dalam sebuah pemanas terisolasi (Oven). Suhu *annealing* dipilih untuk menghindari suhu transisi kritis polimer PLA, sementara waktu *annealing* yang dipilih yaitu 15, 20, 25 dan 30 menit. Setelah waktu *annealing* yang ditentukan

tercapai, oven dimatikan dan pintu oven dibuka untuk memungkinkan pendinginan, hingga suhu kamar. Perubahan dimensi sebelum dan sesudah *annealing* diamati sebelum dilanjutkan ke pengujian tarik. Proses persiapan sampel secara sederhana ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Proses pembuatan sampel uji

### 2.3 Pengujian tarik

Untuk menyelidiki sifat mekanik specimen 3D yang telah dibuat, uji tarik dilakukan dalam penelitian ini. Mesin uji tarik yang kami gunakan berada di laboratorium pengujian material Universitas Muhammadiyah Semarang (Gambar 3). Sampel ditarik dengan kecepatan 3 mm/menit sampai patah. Data hasil pengujian yang terekam oleh komputer dibahas dalam penelitian ini. Hasil patahan sampel selanjutnya diamati dengan menggunakan *Scanning electron Microscopy* (SEM).



Gambar 3. Mesin Uji tarik

### 2.4 SEM ( *Scanning Electron Microscopy* )

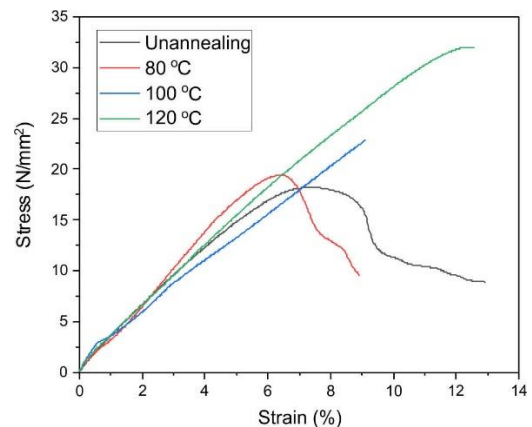
Perubahan struktur permukaan sebelum dan setelah perlakuan panas mempengaruhi sifat mekanik suatu bahan, modulus elastisitas polimer, yang juga bergantung pada parameter pencetakan 3D dan yang terpenting adalah pengaruh dari proses *annealing*. Untuk alasan ini, analisis struktural-morfologis secara rinci dilakukan. Morfologi permukaan dikarakterisasi menggunakan *Scanning Electron Microscopy* (SEM) di laboratorium terpadu Universitas

Diponegoro untuk memvalidasi karakteristik sampel yang di *annealing*.

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 3.1 Perubahan sifat mekanik

Perubahan sifat mekanik sampel PLA dari hasil pengujian tarik mengalami peningkatan setelah melalui proses *annealing* yang dilakukan pada suhu 80 °C, 100 °C dan 120 °C. Sampel yang *annealing* semuanya memiliki perilaku yang sama, dengan *modulus elastisitas* yang relatif lebih tinggi dan dengan kekuatan tarik akhir yang meningkat secara signifikan. Kekuatan tarik pada sampel dengan *infill density* 80% adalah 18,18 MPa untuk sampel yang dicetak dan 31,99 MPa untuk sampel yang di *annealing* pada suhu 120 °C. Spesimen yang di *annealing* menunjukkan peningkatan 6,5 % sampai 75,9% dalam kekuatan tarik *ultimate* dibandingkan dengan sampel tanpa *annealing*. Peningkatan kekuatan tarik disebabkan oleh pengaruh suhu dan waktu proses *annealing* (Bhandari et al., 2019; Rabbi & Chalivendra, 2021; S. Valvez et al., 2022). Namun, semakin meningkat waktu *annealing* menyebabkan menurunnya elongasi pada daerah plastis.

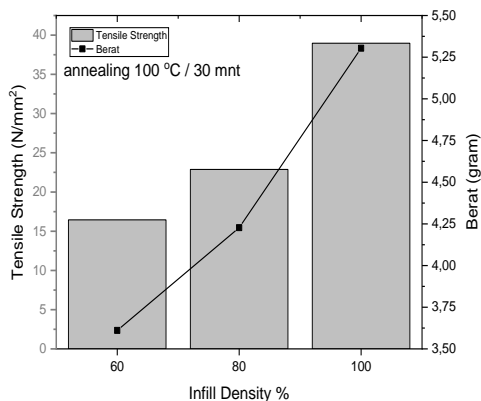


Gambar 4. Pengaruh temperatur terhadap *stress vs strain*

Sampel *annealing* suhu terendah, 80 °C dengan *infill density* 80%, mengalami peningkatan kekuatan tarik sebesar 6,3 % dibandingkan sampel hasil cetakan yang tanpa *annealing*. Nilai *strain* pada kedua sampel hasil cetakan dan hasil *annealing* adalah 12,92 % dan 8,94% secara berurutan pada saat terjadi putus (Gambar 4). Nilai *strain* yang tinggi menyebabkan *modulus* elastisitas rendah, sehingga benda tersebut akan memiliki batas elastis yang panjang dengan nilai *stress* rendah (Slavković et

al., 2017; Yu et al., 2023). Pada sampel tanpa *annealing* memiliki elastisitas puncak pada *yield strength* 16,83 N/mm<sup>2</sup> dan memiliki daerah elastis sampai regangan sebesar 5,96%. Terdapat daerah plastis yang lebih besar pada sampel tanpa *annealing* dan dengan pemanasan 80 °C. Selain itu *necking* juga terjadi dalam kedua sampel ini. Sedangkan untuk pemanasan pada suhu 100 - 120 °C *necking* hampir tidak terjadi karena terjadi kegagalan secara tiba-tiba pada kedua sampel, sehingga dapat dipastikan kedua sampel hanya terdapat sedikit daerah plastis dan bersifat getas (Hart et al., 2020; Sara Valvez et al., 2023).

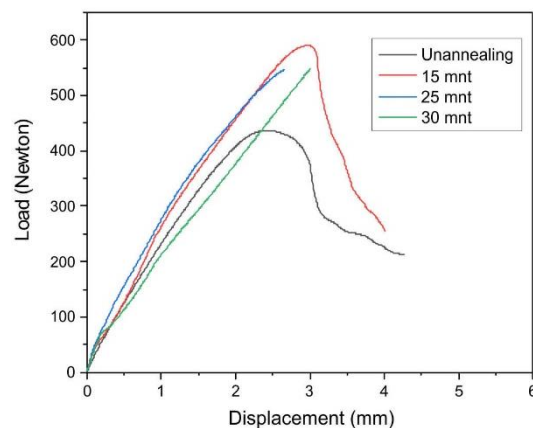
Perbedaan *infill density* atau persentase kepadatan sampel saat pencetakan menunjukkan perbedaan kekuatan tarik yang sangat signifikan. Sampel dengan perbedaan *infill density* di *annealing* dengan suhu 100 °C selama 30 menit menunjukkan hasil kekuatan tarik yang lebih unggul. Kepadatan pencetakan mempengaruhi berat hasil cetakan yang akan menentukan kekuatan tariknya (Kumar et al., 2021; Yu et al., 2019). Sampel dengan *infill density* 100% memiliki kekuatan tarik tertinggi yang diikuti dengan penambahan berat hasil cetakan. Seperti ditunjukkan pada Gambar 5, kekuatan tarik (*tensile strength*) dengan *infill density* 60, 80 dan 100% secara berurutan adalah sebesar 16,45 N/mm<sup>2</sup>, 22,88 N/mm<sup>2</sup> dan 38,97 N/mm<sup>2</sup>. Dibandingkan dengan kekuatan tarik dan berat sampel maka sampel dengan *infill density* 100% memiliki perbandingan kekuatan tarik dan berat yang lebih unggul yaitu dengan perbandingan 7,34 N/gram.



**Gambar 5. Perbedaan *infill density* terhadap kekuatan tarik**

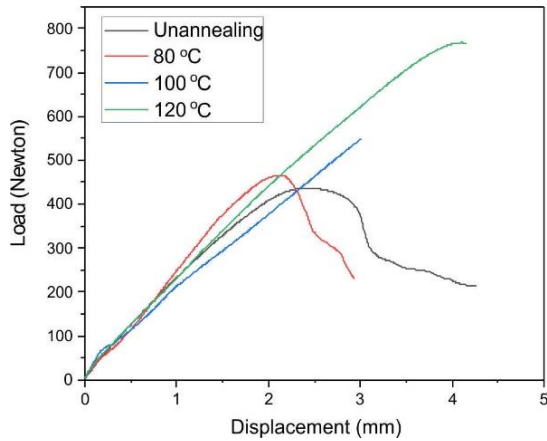
Hasil pengujian tarik sampel dengan perbedaan waktu *annealing* menunjukkan hasil

peningkatan yang cukup signifikan seperti ditunjukkan pada Gambar 6. Sampel tanpa melalui proses *annealing* memiliki kemampuan yang rendah dalam menahan beban yang diberikan. Setelah melewati proses *annealing* selama 15, 20 dan 25 menit kekuatan meningkat. Semakin lama proses *annealing* sampel akan lebih getas seperti pada pengujian 25 dan 30 menit. Sedangkan sampel tanpa mengalami *annealing* dan dengan proses *annealing* tersingkat menunjukkan hasil pengujian tarik yang lebih ulet. Hal tersebut ditunjukkan dengan penurunan kekuatan tarik setelah sampai ketitik puncak secara perlahan menurun sampai terjadi putus.



**Gambar 6. Pengaruh waktu terhadap Load vs displacement**

Hal tersebut ditunjukkan dengan penurunan kekuatan setelah sampai ketitik puncak secara perlahan sampai terjadi putus. Sedangkan untuk sampel dengan *annealing* 25 dan 30 menit terjadi putus secara tiba-tiba setelah sampai ke beban maksimal. Hal tersebut terjadi karena semakin lama proses pemanasan sampel dengan bahan PLA akan berubah menjadi kristal pada susunan atomnya (Sara Valvez et al., 2023; Wach et al., 2018). Ikatan dan kepadatan yang tinggi antar atom menyebabkan sulitnya kesempatan untuk menyerap gaya yang diberikan sehingga terjadi patah yang tiba-tiba. Tidak hanya terjadi pada pengaruh waktu, tingginya suhu juga menyebabkan proses kristalisasi lebih cepat seperti ditunjukkan pada Gambar 7. *Annealing* dengan suhu rendah memiliki kekuatan tarik yang lebih kecil jika dibandingkan dengan suhu 100 °C dan 120 °C.

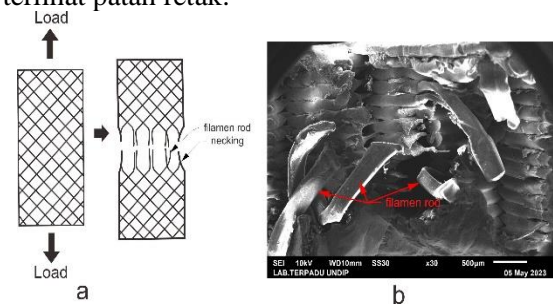


Gambar 7. Pengaruh suhu terhadap load vs displacement

Kemampuan menahan beban sampel paling tinggi dimiliki pada sampel dengan pemanasan 120 °C dengan maksimal beban sebesar 767,7 N, sedangkan kemampuan pembebanan terendah pada sampel tanpa melalui proses *annealing* yaitu sebesar 436,2 N. Sehingga terbukti bahwa proses *annealing* secara baik akan meningkatkan nilai kekuatan tariknya meskipun membuat keuletan hasil cetakan 3D PLA menjadi berkurang tanpa ada *necking* sebagai peringatan *deformasi* sebelum terjadinya kegagalan.

Selain terlihat pada hasil pengujian tarik peristiwa patah getas dan munculnya *necking* juga dibuktikan dengan hasil pengujian *scanning electron microscopy (SEM)* seperti ditunjukkan pada Gambar 8. Saat proses pengujian tarik, sampel akan menerima pembebanan. Deformasi terjadi seiring dengan penambahan beban yang diberikan, saat sampel sudah mencapai titik puncak dari kekuatan tarik maka kegagalan akan terjadi. Hal ini ditunjukkan pada Gambar 8a. Kegagalan melalui proses *necking* menandakan benda tersebut ulet dan memiliki daerah plastis yang panjang, terdapat robek dan pengecilan permukaan pada daerah patah. Terlihat pada Gambar 8b, terdapat batang filamen (*filamen rod*) yang terlepas dari ikatan antar layer, menandakan keuletan yang dimiliki masih tinggi. Proses tanpa *annealing* menunjukkan terdapat batang filamen yang terlepas dari struktur pola cetakan yang diakibatkan usaha dalam menahan beban tarik. Kekuatan filamen pada arah X dan Y yang lebih kuat dibanding arah Z menyebabkan lepasnya ikatan pola cetakan pada arah Z terlebih dahulu saat menerima pembebanan. Kegagalan secara tiba-tiba tanpa melalui *necking* terjadi pada benda getas karena terdapat sedikit daerah plastis.

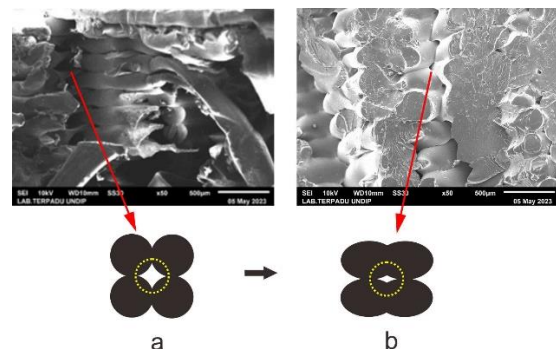
Sedangkan pada patah getas tanpa melalui proses *necking*, permukaan pada daerah patahan terlihat patah retak.



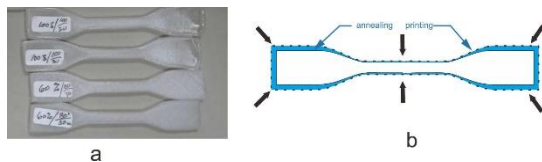
Gambar 8. a. skema representasi pola patahan pada pengujian tarik b. Hasil SEM daerah patahan tanpa *annealing*

### 3.2 Perubahan Dimensi

Proses *annealing* menyebabkan peningkatan kekuatan tarik pada sampel namun juga mengakibatkan terjadinya perubahan dimensi yang disebabkan karena adanya pepadatan pada susunan layer. Panas pada proses *annealing* mengakibatkan layer filamen berikatan lebih *solid*. Penyatuan ikatan antar filamen yang terbentuk dibarengi dengan tertutupnya rongga – rongga antar filamen. Hal ini menyebabkan dimensi sampel mengalami penurunan dimensi. Pada Gambar 9 dimensi sebelum dan sesudah proses *annealing* terdapat celah/Gap yang menandakan perbedaan ukuran dan rongga antar filamen. Pada gambar 9a menunjukkan tanpa proses *annealing* dan 9b melalui proses *annealing*. Proses *annealing* menyebabkan rongga antar layer menutup dan bekas patahan terlihat getas. Sedangkan gambar 9b proses *annealing* pada suhu yang lebih tinggi dapat meningkatkan pengurangan rongga dan meningkatkan ikatan antar lapisan. Namun, spesimen akan menunjukkan deformasi yang signifikan saat terpapar suhu yang lebih tinggi (Malekmotiei et al., 2017).



Gambar 9. Morfologi pada daerah patahan a. sebelum *annealing* b. sesudah *annealing*



**Gambar 10.a. sampel setelah proses annealing b. skema penyusutan sampel dari proses annealing**

Perubahan dimensi setelah proses *annealing* ditunjukkan pada gambar 10. Terlihat pada gambar 10a terdapat bagian ujung yang memadat dan terjadi perubahan dimensi akibat panas. Ilustrasi perubahan dimensi akibat panas terlihat seperti gambar 10b dimana dimensi sampel akan mengalami penyusutan kedalam pada arah x dan y sedangkan untuk arah z akan menyusut ke bawah. Persentase penyusutan sampel *annealing* dengan perbedaan temperatur dan waktu *annealing* dihitung dengan membagi selisih volume awal dikurangi volume akhir yang hasilnya ditunjukkan pada Tabel 2. Semakin tinggi dan lama waktu *annealing* maka persentase volume sampel menyusut (-V %) semakin tinggi, hal ini disebabkan karena peningkatan kristalinitas selama perlakuan *annealing* (Hart et al., 2018).

**Tabel 2. Perubahan dimensi sampel sebelum dan sesudah *annealing***

	Annealing 30 menit			Annealing 100 °C		
	80	100	120	15	20	25
	°C			Menit		
-V (%)	5,8	6,5	9,3	5,3	6,4	8,7

Persentase *infill density* pencetakan juga akan mempengaruhi besarnya volume penyusutan, semakin rendah persentase *infill density* maka volume penyusutan akan semakin tinggi. Hal ini disebabkan karena banyaknya rongga kosong antar layer yang memungkinkan untuk diisi dengan ikatan yang lebih kuat antara filamen.

#### 4. KESIMPULAN

Teknologi *Fused Deposition Modeling* (FDM) memungkinkan pembuatan objek dengan biaya murah dan bentuk kompleks yang tidak dapat dibuat dengan metode lain. Kualitas dan sifat mekanik sampel PLA yang diproses dengan FDM sangat bergantung pada *infill density*nya. Di satu sisi, penerapan suhu dan waktu *annealing* memastikan kualitas produk yang

baik, karena ikatan antar layer filamen yang saling terhubung dengan baik. Kristalinitas menjadi faktor kritis yang mempengaruhi kekuatan bahan semikristalin dihasilkan. Dengan demikian, sampel yang diproduksi diperlakukan secara termal pada suhu  $T_g$  PLA untuk meningkatkan ikatan antar layer yang dikehendaki. Suhu dan waktu *annealing* adalah variabel yang dikontrol. Perlakuan termal *annealing* dari sampel menyebabkan peningkatan kekuatan tarik material PLA sebesar 6,5% sampai 75,9 % dan perubahan *modulus* elastisitas. Dampak yang muncul dari proses *annealing* adalah perubahan dimensi produk dengan penyusutan. Dengan demikian proses *annealing* tetap masih dapat diterapkan pada PLA yang diproduksi dengan pemrosesan FDM untuk meningkatkannya dengan memperhatikan perubahan dimensi produk. Kami menyarankan untuk melakukan pencegahan perubahan dimensi dengan memberikan bahan tambah selama proses *annealing*.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Aliheidari, N., Tripuraneni, R., Ameli, A., & Nadimpalli, S. (2017). Fracture resistance measurement of fused deposition modeling 3D printed polymers. *Polymer Testing*, 60, 94–101. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2017.03.016>
- Basgul, C., Yu, T., MacDonald, D. W., Siskey, R., Marcolongo, M., & Kurtz, S. M. (2020). Does annealing improve the interlayer adhesion and structural integrity of FFF 3D printed PEEK lumbar spinal cages? *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 102(May 2019), 103455. <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2019.103455>
- Bell, D., & Siegmund, T. (2018). 3D-printed polymers exhibit a strength size effect. *Additive Manufacturing*, 21, 658–665. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.04.013>
- Bhandari, S., Lopez-Anido, R. A., & Gardner, D. J. (2019). Enhancing the interlayer tensile strength of 3D printed short carbon fiber reinforced PETG and PLA composites via annealing. *Additive Manufacturing*, 30, 100922. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100922>

- 22
- Butt, J., & Bhaskar, R. (2020). Investigating the effects of annealing on the mechanical properties of FFF-printed thermoplastics. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 4(2), 1–20. <https://doi.org/10.3390/jmmp4020038>
- Chen, J. V., Tanaka, K. S., Dang, A. B. C., & Dang, A. (2020). Identifying a commercially-available 3D printing process that minimizes model distortion after annealing and autoclaving and the effect of steam sterilization on mechanical strength. *3D Printing in Medicine*, 6(1), 1–10. <https://doi.org/10.1186/s41205-020-00062-9>
- Diani, J., & Gall, K. (2006). Finite Strain 3D Thermoviscoelastic Constitutive Model. *Society*, 1–10. <https://doi.org/10.1002/pen>
- Dizon, J. R. C., Espera, A. H., Chen, Q., & Advincula, R. C. (2018). Mechanical characterization of 3D-printed polymers. In *Additive Manufacturing* (Vol. 20, pp. 44–67). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.12.002>
- Dong, J., Huang, X., Muley, P., Wu, T., Berekati-Goudarzi, M., Tang, Z., Li, M., Lee, S., Boldor, D., & Wu, Q. (2020). Carbonized cellulose nanofibers as dielectric heat sources for microwave annealing 3D printed PLA composite. *Composites Part B: Engineering*, 184, 107640. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107640>
- Dunn, R. M., Hart, K. R., & Wetzel, E. D. (2019). Improving fracture strength of fused filament fabrication parts via thermal annealing in a printed support shell. *Progress in Additive Manufacturing*, 4(3), 233–243. <https://doi.org/10.1007/s40964-019-00081-x>
- Ferreira, I., Melo, C., Neto, R., Machado, M., Alves, J. L., & Mould, S. (2020). Study of the annealing influence on the mechanical performance of PA12 and PA12 fibre reinforced FFF printed specimens. *Rapid Prototyping Journal*, 26(10), 1761–1770. <https://doi.org/10.1108/RPJ-10-2019-0278>
- Hart, K. R., Dunn, R. M., Sietins, J. M., Hofmeister Mock, C. M., Mackay, M. E., & Wetzel, E. D. (2018). Increased fracture toughness of additively manufactured amorphous thermoplastics via thermal annealing. *Polymer*, 144, 192–204. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2018.04.024>
- Hart, K. R., Dunn, R. M., & Wetzel, E. D. (2020). Increased fracture toughness of additively manufactured semi-crystalline thermoplastics via thermal annealing. *Polymer*, 211(September), 123091. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2020.12.3091>
- Hikmat, M., Rostam, S., & Ahmed, Y. M. (2021). Investigation of tensile property-based Taguchi method of PLA parts fabricated by FDM 3D printing technology. *Results in Engineering*, 11, 100264. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2021.100264>
- Hong, J. H., Yu, T., Chen, Z., Park, S. J., & Kim, Y. H. (2019). Improvement of flexural strength and compressive strength by heat treatment of PLA filament for 3D-printing. *Modern Physics Letters B*, 33(14–15), 3–7. <https://doi.org/10.1142/S0217984919400256>
- Jaisingh Sheoran, A., & Kumar, H. (2020). Fused Deposition modeling process parameters optimization and effect on mechanical properties and part quality: Review and reflection on present research. *Materials Today: Proceedings*, 21(xxxx), 1659–1672. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.11.296>
- Kumar, K. S., Soundararajan, R., Shanthosh, G., Saravanakumar, P., & Ratteesh, M. (2021). Augmenting effect of infill density and annealing on mechanical properties of PETG and CFPETG composites fabricated by FDM. *Materials Today: Proceedings*, 45(xxxx), 2186–2191. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.078>
- Liparoti, S., Sofia, D., Romano, A., Marra, F., & Pantani, R. (2021). Fused filament deposition of pla: The role of interlayer adhesion in the mechanical performances. *Polymers*, 13(3), 1–18. <https://doi.org/10.3390/polym13030399>
- Lluch-Cerezo, J., Meseguer, M. D., García-Manrique, J. A., & Benavente, R. (2022).

- Influence of Thermal Annealing Temperatures on Powder Mould Effectiveness to Avoid Deformations in ABS and PLA 3D-Printed Parts. *Polymers*, 14(13).  
<https://doi.org/10.3390/polym14132607>
- Lv, S., Gu, J., Cao, J., Tan, H., & Zhang, Y. (2015). Effect of annealing on the thermal properties of poly (lactic acid)/starch blends. *International Journal of Biological Macromolecules*, 74, 297–303.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2014.12.022>
- Malekmoitei, L., Voyiadjis, G. Z., Samadi-Dooki, A., Lu, F., & Zhou, J. (2017). Effect of annealing temperature on interrelation between the microstructural evolution and plastic deformation in polymers. *Journal of Polymer Science, Part B: Polymer Physics*, 55(17), 1286–1297.  
<https://doi.org/10.1002/polb.24379>
- Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T. Q., & Hui, D. (2018a). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. In *Composites Part B: Engineering* (Vol. 143, Issue February, pp. 172–196). Elsevier.  
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>
- Ngo, T. D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K. T. Q., & Hui, D. (2018b). Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. In *Composites Part B: Engineering* (Vol. 143, pp. 172–196). Elsevier Ltd.  
<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.012>
- Rabbi, M. F., & Chalivendra, V. (2021). Improvement in interfacial fracture toughness of multi-material additively manufactured composites through thermal annealing. *Forces in Mechanics*, 5, 100051.  
<https://doi.org/10.1016/j.finmec.2021.100051>
- Slavković, V., Grujović, N., Disić, A., & Radovanović, A. (2017). Influence of Annealing and Printing Directions on Mechanical Properties of PLA Shape Memory Polymer Produced by Fused Deposition Modeling. *International Congress of Serbian Society of Mechanics*, June, 1–8.
- Valvez, S., Silva, A. P., Reis, P. N. B., & Berto, F. (2022). Annealing effect on mechanical properties of 3D printed composites. *Procedia Structural Integrity*, 37(C), 738–745.  
<https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.02.004>
- Valvez, Sara, Reis, P. N. B., & Ferreira, J. A. M. (2023). Effect of annealing treatment on mechanical properties of 3D-Printed composites. *Journal of Materials Research and Technology*, 23, 2101–2115.  
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.01.097>
- Vanaei, H. R., Raissi, K., Deligant, M., Shirinbayan, M., Fitoussi, J., Khelladi, S., & Tcharkhtchi, A. (2020). Toward the understanding of temperature effect on bonding strength, dimensions and geometry of 3D-printed parts. *Journal of Materials Science*, 55(29), 14677–14689.  
<https://doi.org/10.1007/s10853-020-05057-9>
- Vindokurov, I., Pirogova, Y., Tashkinov, M., & Silberschmidt, V. V. (2022). Effect of Heat Treatment on Elastic Properties and Fracture Toughness of Fused Filament Fabricated PEEK for Biomedical Applications. *Polymers*, 14(24).  
<https://doi.org/10.3390/polym14245521>
- Vorkapić, M., Mladenović, I., Ivanov, T., Kovačević, A., Hasan, M. S., Simonović, A., & Trajković, I. (2022). Enhancing mechanical properties of 3D printed thermoplastic polymers by annealing in moulds. *Advances in Mechanical Engineering*, 14(8), 1–15.  
<https://doi.org/10.1177/16878132221120737>
- Wach, R. A., Wolszczak, P., & Adamus-Włodarczyk, A. (2018). Enhancement of Mechanical Properties of FDM-PLA Parts via Thermal Annealing. *Macromolecular Materials and Engineering*, 303(9), 1800169.  
<https://doi.org/10.1002/mame.201800169>
- Wang, G., Zhang, D., Li, B., Wan, G., Zhao, G., & Zhang, A. (2019). Strong and thermal-resistance glass fiber-reinforced polylactic acid (PLA) composites enabled by heat treatment. *International Journal of Biological Macromolecules*, 129, 448–459.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.02>



.020

- Yu, W., Wang, X., Ferraris, E., & Zhang, J. (2019). Melt crystallization of PLA/Talc in fused filament fabrication. *Materials & Design*, 182, 108013. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108013>
- Yu, W., Wang, X., Yin, X., Ferraris, E., & Zhang, J. (2023). The effects of thermal annealing on the performance of material extrusion 3D printed polymer parts. *Materials and Design*, 226, 111687. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.111687>