

## Pengaruh Penambahan Pigmen Warna Pada Filamen PLA *SUNLU Colors dan SUNLU Natural*

Noesanto Dewantoro Ahmad<sup>1)</sup>, Sukamto<sup>2)</sup>, Bagas Risda Pratama<sup>3)</sup>.

<sup>1), 2), 3)</sup> Jurusan Teknik Mesin, Universitas Janabadra Yogyakarta

E-mail: <sup>1)</sup>noesanto@janabadra.ac.id, <sup>2)</sup> kamto@janabadra.ac.id.

### Abstrak

Teknologi *3D printing* (3DP) mengalami perkembangan yang pesat dan banyak digunakan diberbagai bidang. Material *polylactic acid* (PLA) banyak digunakan untuk filamen pada 3DP. Filamen PLA digunakan karena memiliki banyak keunggulan antara lain sifatnya *biocompatible* dan *biodegradable*. PLA mudah dan aman digunakan karena temperatur yang digunakan relatif rendah. SUNLU merupakan produsen terkenal yang menyediakan berbagai filamen antara lain PLA *Colors* dan *Natural*. Pemilihan filamen PLA disesuaikan pada kebutuhan salah satunya adalah efek visual. Variabel yang mempengaruhi kekuatan objek 3D yang dihasilkan adalah *raster angle*. Penelitian eksperimen ini dilakukan untuk mengetahui efek penambahan pigmen warna dan variable pencetakan *raster angle* pada sampel PLA *Colors Orange* dan *Grey* serta PLA *Natural*. Penelitian ini menggunakan pengujian tarik standar ASTM D638 V untuk mengetahui nilai kekuatan tariknya. Hasil pengujian tarik dari sampel menunjukkan *raster angle* 45° yang memiliki nilai kekuatan tarik tertinggi. Sampel 3D dari PLA *Natural* memiliki nilai 53,98 MPa dan sampel *Colors Orange* dan *Grey* memiliki nilai kekuatan tarik 46,58 MPa dan 46,63 MPa. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penambahan pigmen warna dan variabel *raster angle* pada sampel 3D mempengaruhi kekuatan dari sampel yang dihasilkan.

Kata Kunci: ASTM D638, filamen PLA, pengujian tarik, 3D printing (3DP)

### Abstract

*3D printing (3DP) technology has developed rapidly and is widely used in various fields. Polylactic acid (PLA) material is widely used for filaments in 3DP. PLA filament is used because it has many advantages, including being biocompatible and biodegradable. PLA is easy and safe to use because the temperature used is relatively low. SUNLU is a well-known manufacturer that provides various filaments including PLA Colors and Natural. The selection of PLA filament is adjusted to the needs of one of them is the visual effect. Another variable that affects the strength of the 3D object produced is the raster angle. This experimental research was conducted to determine the effect of adding colour pigments and raster angle printing variables on PLA Colors Orange and Grey and PLA Natural samples. This research uses ASTM D638 V standard tensile testing to determine the tensile strength value. The tensile testing results of the samples showed that the 45° raster angle had the highest tensile strength value. The 3D sample of PLA Natural had a value of 53.98 MPa and the Colour Orange and Grey samples had tensile strength values of 46.58 MPa and 46.63 MPa. These results show that the addition of colour pigments and variable raster angles in the 3D samples affect the strength of the samples produced.*

Keywords: ASTM D638, filament PLA, tensile testing, 3D printing (3DP)

## 1. PENDAHULUAN

Teknologi manufaktur pada saat ini mengalami perkembangan yang pesat, salah satunya adalah teknik *additive manufacturing* (AM) [1]. AM adalah proses yang didasarkan pada pembuatan objek langsung dari material dengan proses lapis per lapis (*layer by layer*) dari bawah ke atas [2]. Keunggulan dari AM dibanding dengan *traditional manufacturing* antara lain tidak memerlukan cetakan, material yang digunakan tidak ada yang terbuang, murah, mudah, dapat membuat produk yang berbentuk kompleks dan membutuhkan waktu yang relatif singkat [3]. Penggunaan AM banyak digunakan pada industri seperti biomedis, konstruksi, otomotif, kedirgantaraan, akustik, dan tekstil [4]. Di antara teknik *additive manufacturing* yang ada saat ini, *3D Printing* (3DP) yang dikenal dengan pemodelan *fused deposition modelling* (FDM) merupakan teknologi yang paling populer yang diterapkan oleh industri dan bahkan oleh orang awam [5]. Selain itu penggunaan 3DP banyak dipilih karena suku cadang mesin tersedia di Indonesia. *3D printing* adalah salah satu teknik *additive manufacturing* yang dapat digunakan untuk memproduksi berbagai macam struktur dan produk. *3D printing* adalah proses pembentukan suatu benda yang dilakukan melalui penempelan material secara lapis per lapis (*layer by layer*) dari suatu filamen yang diekstrusi melewati *nozzle* yang panas [6]. *Manufacturing* dengan metode FDM memerlukan filamen yang digunakan untuk membentuk sebuah objek. Filamen yang banyak terdapat dipasaran saat ini terbuat dari polimer yang bersifat termoplastik. Salah satu filamen yang banyak digunakan secara umum yaitu filamen berbahan dasar *polylactic acid* (PLA) [7].

Filamen PLA lebih mudah dan lebih aman untuk digunakan jika dibandingkan dengan ABS karena temperatur pencetakan yang lebih rendah. Selain itu, ketika dipanaskan PLA menghasilkan asap yang berbau manis, berbeda dengan ABS yang menghasilkan asap yang berbau kurang sedap. PLA memiliki *glass transition* dan titik lebur yang cukup rendah daripada ABS. Sehingga benda atau produk yang berbahan dasar PLA tidak cocok untuk digunakan pada temperatur tinggi, karena dapat menyebabkan *wrapping*, retak atau meleleh [8]. Penelitian Yao dkk [9] menunjukkan PLA memiliki ketahanan terhadap *shrinkage* atau penyusutan yang cukup baik berdasarkan pengujian dengan membandingkan antara dimensi desain

dengan dimensi barang yang dibuat menggunakan berbagai macam filamen polimer yang tersedia.

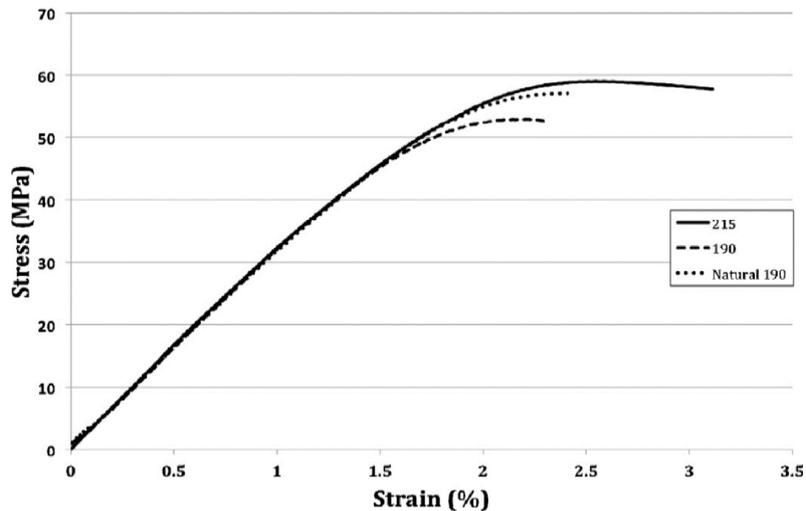
PLA memiliki kelebihan dibanding jenis plastik berbasis minyak konvensional yaitu plastik jenis PLA dapat terdegradasi secara alami oleh lingkungan. Karakter PLA yang sangat baik dalam aspek biokompatibilitas, biodegradabilitas, tidak beracun dan kekuatan mekanik yang baik, membuat PLA banyak diterapkan dalam berbagai aplikasi seperti biomedis, seperti dalam rekayasa jaringan untuk implant bedah, atau sistem pengiriman obat [10]. Menurut Hanon [11], PLA juga memiliki beberapa kekurangan, di antaranya material PLA adalah material yang bersifat *hydrophilic*, getas dan memiliki ketahanan terhadap impak yang rendah, dan kemampuan kristalisasi yang rendah.

Salah satu produsen filamen PLA yang mudah ditemukan adalah *SUNLU*. *SUNLU* merupakan salah satu produsen terkenal yang menyediakan berbagai jenis filamen PLA berkualitas antar lain Filament *PLA Natural*, *PLA Colors*, *PLA+*, *PLA Pro*, *PLA Rainbow*, *PLA Marble*. Setiap jenis filamen PLA *SUNLU* di atas memiliki karakteristik dan keunggulan masing-masing. Pemilihan jenis filamen PLA disesuaikan pada kebutuhan pencetakan yang diinginkan, seperti tingkat kekuatan, presisi, atau efek visual yang diinginkan.

Tabel 1. rerata kekuatan tarik dan persentase *crystallinity* dari sampel (Wittbrodt dan Pearce, 2015)

Color	UTS (MPa)	Crystallinity (%)
Natural	57,16 ± 0,35	0,93 ± 0,06
Black	52,81 ± 1,18	2,62 ± 0,09
Grey	50,84 ± 0,23	4,79 ± 0,10
Blue	54,11 ± 0.30	4,85 ± 0,15
White	53,97 ± 0,26	5,05 ± 0,18

Penelitian yang dilakukan oleh Wittbrodt dan Pearce [12] menunjukkan hasil bahwa penambahan pigmen warna pada filamen *PLA Lulzbot TAZ 3 mm* ternyata mempengaruhi sifat mekanik dari sampel, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1. Wittbrod dkk juga melakukan perbandingan kekuatan tarik dari sampel yang dihasilkan dengan variasi *nozzle temperature* yang digunakan ketika proses *printing* sampel dengan standar ASTM D638 seperti yang ditunjukkan pada



Gambar 1. perbandingan *stress-strain* sampel dengan variasi *nozzle temperature* (Wittbrodt dan Pearce, 2015)

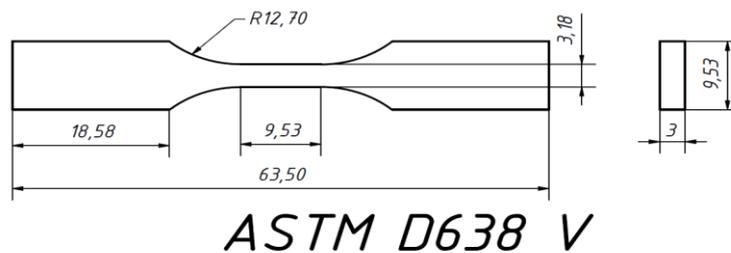
Berdasarkan latar belakang diatas, penelitian ini harapannya dapat mengetahui dan membandingkan kekuatan mekanik dari sampel yang dihasilkan oleh filamen SUNLU PLA *Natural* dan SUNLU PLA *Colors* diameter 1,75 mm. Pigmen warna pada filamen SUNLU PLA *Colors* yang digunakan adalah warna *orange* dan *grey* untuk mengetahui pengaruh penambahan pigmen berwarna cerah dan berwarna cenderung lebih gelap. Selain itu penelitian ini juga dapat membandingkan dan mengetahui kekuatan mekanik dari sampel dengan variasi *raster angle*. Pengujian yang akan digunakan pada sampel yang dihasilkan yaitu pengujian tarik (*tensile test*) yang bertujuan untuk mengetahui sifat mekanik dari sampel.

## 2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui perbandingan kekuatan tarik dari filamen PLA *SUNLU Natural* dengan *SUNLU Colors orange* dan *grey* berdiameter 1,75 mm dan membandingkan kekuatan tarik sampel dengan variable *raster angle* yang berbeda. Parameter *printing* sampel telah ditentukan dengan parameter seperti ditunjukkan pada Tabel 2. Penambahan pigmen warna pada filamen SUNLU PLA *Colors* yang digunakan adalah warna *orange* dan *grey* untuk mengetahui pengaruh penambahan pigmen berwarna cerah dan berwarna cenderung lebih gelap. Sampel dicetak dengan mesin 3D *Printer Creality CR-10S Pro V2* dengan ukuran maksimal pencetakan 300 x 300 x 400 mm, memiliki ketelitian  $\pm 0,1$  mm, diameter *nozzle* yang digunakan 0,4 mm.

Tabel 2. parameter pencetakan sampel 3D

Parameter	Keterangan
<i>Nozzle Temperature</i>	215 °C
<i>Bed Temperature</i>	60 °C
<i>Print Speed</i>	100 mm/s
<i>Infill Pattern</i>	<i>Line</i>
<i>Infill Density</i>	100%



Gambar 2. ukuran sampel uji tarik ASTM D638 V

Sampel yang dicetak mengikuti standar ASTM D638 V [13] (Gambar 2) dengan sampel berjumlah 5 untuk masing-masing warna dan untuk *raster angle* yang digunakan adalah 0° dan 45°. Pengambilan data dilakukan dengan menguji kekuatan tarik dari masing-masing sampel dengan mesin uji tarik. Pengujian tarik merupakan pengujian dengan cara merusak/destruktif. Hasil dari pengujian tersebut diperoleh informasi terkait kekuatan tarik, kekuatan luluh, dan keuletan suatu material. Dari pengujian ini akan dihasilkan diagram tegangan-regangan (*stress-strain*). Selain diagram tegangan-regangan, pengujian tarik memberikan informasi kekuatan tarik (*tensile strength*), regangan tarik (*tensile strain*), modulus elastisitas (*tensile modulus*), penambahan panjang (*elongation*) [14]. Persamaan 1-3 dijabarkan untuk dapat menentukan nilai dari:

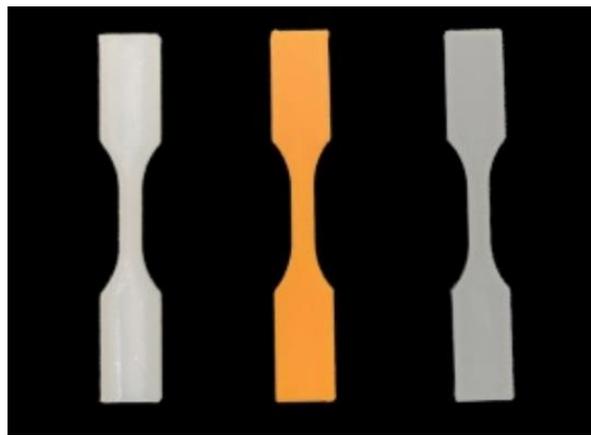
$$\sigma = \frac{F}{A_0} \tag{1}$$

$$\varepsilon = \frac{l_i - l_0}{l_0} \tag{2}$$

$$\sigma = E\varepsilon \quad (3)$$

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini memfokuskan pada pengaruh penambahan pigmen warna pada filamen dan pengaruh variabel *raster angle* terhadap kekuatan tarik dari sampel uji tarik D638 V. Sampel yang dicetak berjumlah 5 untuk masing-masing warna dan *raster angle* yang digunakan adalah 0° dan 45°. Filamen yang digunakan untuk mencetak sampel yaitu filamen PLA SUNLU berwarna *natural*, *orange* dan *grey*.

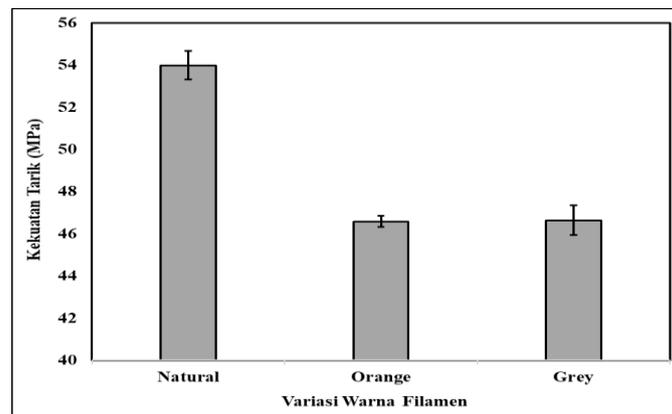


Gambar 3. sampel uji tarik 3DP variasi warna

Pengujian tarik sampel menggunakan standar ASTM D638 tipe V dimana untuk dimensi panjang secara keseluruhan yaitu 63,5 mm (2,5 in) dan ketebalan kurang dari 4 mm. Standar ASTM D638 V dipilih karena beberapa pertimbangan yaitu keterbatasan filamen yang dapat digunakan, efisiensi waktu dan material. Untuk parameter pengujian yang digunakan yaitu kecepatan *crosshead* dari alat pengujian adalah 1 mm/menit [15].

Hasil dari pengujian tarik pada sampel *3D print* dengan variasi warna *natural*, *orange* dan *grey* ditunjukkan pada Gambar 4 dan Tabel 3. Secara keseluruhan hasil pengujian tarik sampel variasi warna menunjukkan bahwa sampel 3D yang dicetak dari filamen berwarna *natural* atau tanpa penambahan pigmen warna memiliki kekuatan tarik yang paling tinggi dan berbeda jauh jika dibandingkan dengan sampel 3D yang dicetak dari filamen dengan penambahan pigmen berwarna *orange* dan *grey*.

Rerata kekuatan tarik dari sampel 3D *natural* yaitu 53,98 MPa, nilai tersebut berbeda jauh dengan nilai kekuatan tarik dari sampel 3D *orange* 46,58 MPa dan sampel 3D *grey* 46,63 MPa.



Gambar 4. rerata hasil pengujian tarik dari sampel filamen variasi warna

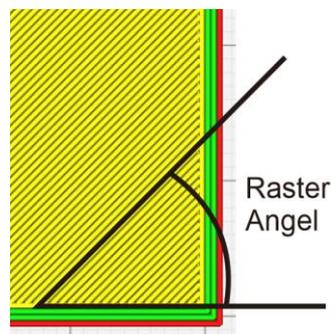
Perbedaan nilai kekuatan dari sampel-sampel tersebut dipengaruhi oleh pigmen warna yang ditambahkan pada filamen yang digunakan. Menurut Wittbrodt dan Pearce [12], kekuatan sampel 3D *print* yang dicetak dengan variasi warna dipengaruhi oleh penambahan pigmen warna yang digunakan. Sampel yang dihasilkan dari filamen PLA tanpa penambahan pigmen warna memiliki persentase rata-rata celah (*void*) 10,6% dengan kekuatan tarik filamen 63,64 MPa atau 11,4% lebih kuat dibandingkan dengan sampel uji tarik 3D dari filamen berwarna (*color*) dengan merk yang sama. Jika dibandingkan dengan filamen atau sampel yang dicetak dari filamen berwarna menunjukkan bahwa bahan tambahan pewarna dapat berperan dalam ukuran celah (*void*) seperti halnya suhu, jika dengan suhu yang lebih rendah beberapa bahan pewarna membatasi aliran sehingga meningkatkan ukuran celah.

Ketika suhu ditingkatkan, lapisan-lapisan tersebut melekat lebih baik dan lebih dekat dengan lapisan sebelumnya. Lapisan yang sudah mengeras berpotensi menjadi rantai amorf dari monomer dasar yang memanjang di bawah beban dan putus ketika tegangan melebihi kekuatan tarik yang menyebabkan patah [5]. Studi-studi lampau memiliki beberapa keterbatasan. Batasan utamanya adalah semua produsen filamen PLA menjaga rahasia dagang hak milik aditif pewarna masing-masing. Hal ini menyulitkan untuk menjelaskan hasil karena bahan tambahannya tidak diketahui.

Tabel 3. rerata hasil pengujian tarik dari sampel variasi warna

Sampel	Kekuatan Tarik (MPa)	Regangan Patah (%)	Modulus elastisitas (MPa)
Natural	53,98 ± 0,7	8,0 ± 0,5	314,3 ± 12,3
Orange	46,58 ± 0,3	5,0 ± 0,3	415,8 ± 6,4
Grey	46,63 ± 0,7	4,8 ± 0,5	420,2 ± 7,8

Selain itu, sampel dicetak dan divariasikan untuk *raster angle* penyusun dari masing-masing sampel untuk mengetahui apakah terdapat pengaruh *raster angle* terhadap kekuatan tarik dari sampel yang dicetak menggunakan *3D printer*. *Raster angle* adalah sudut atau arah material diekstrusi dari *nozzle*. *Raster angle* diukur dari sumbu X dan biasanya sudut raster bervariasi dari 0° hingga 90° [4] (Gambar 5).

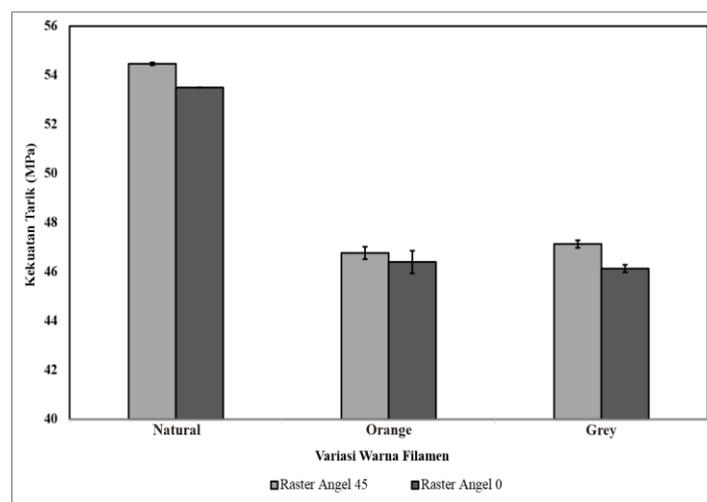
Gambar 5. *raster angle* 45° pencetakan sampel

Variasi *raster angle* yang digunakan pada masing-masing sampel yaitu 0° dan 45°, dimana *raster angle* pada sampel memberikan pengaruh terhadap kekuatan tarik dari masing-masing sampel. Diketahui bahwa posisi pencetakan sampel dengan *raster angle* 45° memiliki nilai kekuatan tarik rerata yang lebih tinggi dibandingkan dengan *raster angle* 0° baik itu pada sampel *3D print* berwarna *Natural*, *Orange* dan *Grey*. Sampel *3D print* berwarna *Natural 45* memiliki rerata nilai kekuatan tarik 54,47 MPa, sampel *3D print* berwarna *Orange 45* memiliki rerata nilai kekuatan tarik 46,77 MPa dan sampel *3D print* berwarna *Orange 45* memiliki rerata nilai kekuatan tarik 47,13 MPa seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4 dan Gambar 6.

Tabel 4. rerata hasil pengujian tarik dari sampel variasi warna dan *raster angle*

Sampel	Kekuatan Tarik (MPa)	Regangan Patah (%)	Modulus elastisitas (MPa)
Natural 45	54,47 ± 0,1	8,3 ± 1,2	323,0 ± 65,0
Natural 0	53,50 ± 0,0	7,7 ± 1,5	305,7 ± 72,3
Orange 45	46,77 ± 0,3	5,3 ± 0,7	411,3 ± 18,6
Orange 0	46,40 ± 0,5	4,8 ± 0,3	420,3 ± 31,0
Grey 45	47,13 ± 0,2	5,2 ± 0,1	425,7 ± 30,5
Grey 0	46,13 ± 0,2	4,5 ± 0,0	414,7 ± 34,7

Perbedaan nilai kekuatan dari sampel ini dipengaruhi oleh arah pencetakan (*raster angle*) yang mengakibatkan perbedaan arah pembeban yang diterima pada sampel. Sampel yang dicetak dengan *raster angle* 45° mampu menerima beban tarik yang besar sehingga memiliki kekuatan tarik lebih tinggi [16]. Hal ini disebabkan karena arah ekstrusi dari filamen yang dicetak mampu menahan beban yang diberikan baik secara paralel ataupun miring. Berbeda dengan *raster angle* 0° yang hanya mampu menahan beban yang diberikan secara paralel saja.

Gambar 6. hasil pengujian tarik dari sampel variasi warna dan *raster angle*

#### 4. KESIMPULAN

Hasil dari pengujian sampel *3D printing* dengan variasi warna dan variasi *raster angle* mendapatkan hasil yang dapat disimpulkan, yaitu: 1) pengujian dari sampel uji tarik yang dicetak dengan menggunakan filamen SUNLU PLA *Natural*, *Orange* dan *Grey* diameter 1,75 mm menunjukkan nilai rerata yang berbeda.

Rerata kekuatan tarik dari sampel yang dihasilkan filamen SUNLU PLA *Natural* memiliki nilai rerata kekuatan tarik tertinggi yaitu  $53,98 \pm 0,7$  MPa, jika dibandingkan dengan sampel dari filamen SUNLU PLA *Orange* dan *Grey* masing-masing  $46,58 \pm 0,3$  MPa dan  $46,63 \pm 0,7$  MPa; 2) pengujian dari sampel uji tarik yang dicetak menggunakan filamen SUNLU PLA dengan variasi *raster angle* menunjukkan bahwa sampel uji tarik dengan *raster angle*  $45^\circ$  memiliki nilai rerata kekuatan tarik lebih tinggi jika dibandingkan dengan *raster angle*  $0^\circ$ . Hal ini terlihat dari data hasil pengujian yang disajikan pada Tabel 4. Terlihat bahwa untuk sampel 3DP PLA *Natural*  $45^\circ$  memiliki nilai lebih tinggi yaitu  $54,47 \pm 0,1$  MPa, jika dibandingkan dengan *Natural*  $0^\circ$  yaitu  $53,50 \pm 0,0$  MPa. Hal tersebut juga terjadi pada sampel PLA *Orange* dan *Grey* yang menunjukkan nilai lebih tinggi pada *raster angle*  $45^\circ$ .

Sampel yang dicetak dengan menggunakan filamen PLA *natural* memiliki kekuatan tarik yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan sampel yang dicetak menggunakan filamen dengan penambahan pigmen warna *orange* dan *grey*. Sehingga untuk mendapatkan objek yang memiliki kekuatan tinggi maka digunakan filamen PLA *Natural* sedangkan jika menginginkan objek yang dihasilkan memiliki efek visual dengan warna tertentu maka perlu untuk dilakukan antisipasi dalam hal kekuatan yang dihasilkan dari filamen PLA *colors orange* ataupun *grey*.

## 5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. R. Khosravani and T. Reinicke, "Effects of raster layup and printing speed on strength of 3D-printed structural components," *Procedia Struct. Integr.*, vol. 28, pp. 720–725, 2020, doi: 10.1016/j.prostr.2020.10.083.
- [2] F. Ning, W. Cong, J. Qiu, J. Wei, and S. Wang, "Additive manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modeling," *Compos. Part B Eng.*, vol. 80, pp. 369–378, 2015, doi: 10.1016/j.compositesb.2015.06.013.
- [3] J. Singh, K. Kumar Goyal, and R. Kumar, "Effect of filling percentage and raster style on tensile behavior of FDM produced PLA parts at different build orientation," *Mater. Today Proc.*, vol. 63, pp. 433–439, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.03.444.
- [4] M. Benamira, N. Benhassine, A. Ayad, and A. Dekhane, "Investigation of printing parameters effects on mechanical and failure properties of 3D printed PLA," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 148, no. March, p. 107218, 2023, doi: 10.1016/j.engfailanal.2023.107218.
- [5] B. Brenken, E. Barocio, A. Favaloro, V. Kunc, and R. B. Pipes, "Fused filament fabrication of fiber-reinforced polymers: A review," *Addit. Manuf.*, vol. 21, no. February, pp. 1–16, 2018, doi: 10.1016/j.addma.2018.01.002.

- [6] J. O. Barrasa, A. Ferrández-Montero, B. Ferrari, and J. Y. Pastor, "Characterisation and modelling of pla filaments and evolution with time," *Polymers (Basel)*, vol. 13, no. 17, 2021, doi: 10.3390/polym13172899.
- [7] T. Yao, J. Ye, Z. Deng, K. Zhang, Y. Ma, and H. Ouyang, "Tensile failure strength and separation angle of FDM 3D printing PLA material: Experimental and theoretical analyses," *Compos. Part B Eng.*, vol. 188, no. February, p. 107894, 2020, doi: 10.1016/j.compositesb.2020.107894.
- [8] O. A. Mohamed, S. H. Masood, and J. L. Bhowmik, "Mathematical modeling and FDM process parameters optimization using response surface methodology based on Q-optimal design," *Appl. Math. Model.*, vol. 40, no. 23–24, pp. 10052–10073, 2016, doi: 10.1016/j.apm.2016.06.055.
- [9] T. Yao, Z. Deng, K. Zhang, and S. Li, "A method to predict the ultimate tensile strength of 3D printing polylactic acid (PLA) materials with different printing orientations," *Compos. Part B Eng.*, vol. 163, no. January, pp. 393–402, 2019, doi: 10.1016/j.compositesb.2019.01.025.
- [10] N. A. S. Mohd Pu'ad, R. H. Abdul Haq, H. Mohd Noh, H. Z. Abdullah, M. I. Idris, and T. C. Lee, "Review on the fabrication of fused deposition modelling (FDM) composite filament for biomedical applications," *Mater. Today Proc.*, vol. 29, no. November 2018, pp. 228–232, 2019, doi: 10.1016/j.matpr.2020.05.535.
- [11] M. M. Hanon, L. Zsidai, and Q. Ma, "Accuracy investigation of 3D printed PLA with various process parameters and different colors," *Mater. Today Proc.*, vol. 42, pp. 3089–3096, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.12.1246.
- [12] B. Wittbrodt and J. M. Pearce, "The effects of PLA color on material properties of 3-D printed components," *Addit. Manuf.*, vol. 8, pp. 110–116, 2015, doi: 10.1016/j.addma.2015.09.006.
- [13] A. Pulipaka, K. M. Gide, A. Beheshti, and Z. S. Bagheri, "Effect of 3D printing process parameters on surface and mechanical properties of FFF-printed PEEK," *J. Manuf. Process.*, vol. 85, no. September 2022, pp. 368–386, 2023, doi: 10.1016/j.jmapro.2022.11.057.
- [14] N. D. Ahmad, Kusmono, M. W. Wildan, and Herianto, "Preparation and properties of cellulose nanocrystals-reinforced Poly (lactic acid) composite filaments for 3D printing applications," *Results Eng.*, vol. 17, no. December 2022, 2023, doi: 10.1016/j.rineng.2022.100842.
- [15] S. C. Daminabo, S. Goel, S. A. Grammatikos, H. Y. Nezhad, and V. K. Thakur, "Fused deposition modeling-based additive manufacturing (3D printing): techniques for polymer material systems," *Mater. Today Chem.*, vol. 16, p. 100248, 2020, doi: 10.1016/j.mtchem.2020.100248.
- [16] G. Atakok, M. Kam, and H. B. Koc, "Tensile, three-point bending and impact strength of 3D printed parts using PLA and recycled PLA filaments: A statistical investigation," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 18, pp. 1542–1554, 2022, doi: 10.1016/j.jmrt.2022.03.013.