



# Optimasi Parameter Pencetakan dan Evaluasi Sifat Mekanis Filamen Poliuretan Termoplastik dalam Pencetakan 3D

Sandi Riskiawan, Hastuti Delima, Helmina Andami, Mardiyati\* & Steven

Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Institut Teknologi Bandung,  
Jalan Ganesa No. 10 Bandung 40132, Jawa Barat  
Email: mardiyati@material.itb.ac.id

**Abstract.** Termoplastik poliuretan (TPU) merupakan salah satu jenis polimer termoplastik yang saat ini sangat menarik perhatian pengguna mesin pencetakan 3D. Filamen TPU memiliki sifat elastis, kekuatan tarik dan ketahanan terhadap benturan yang baik sehingga sangat potensial untuk digunakan dalam proses pembuatan produk pada berbagai aplikasi. Walaupun demikian, dikarenakan sifat elastisnya, proses pencetakan TPU dinilai cukup sulit sehingga perlu dilakukan kajian untuk mengidentifikasi kecepatan cetak, kecepatan retraksi, temperatur cetak, dan jarak retraksi optimum untuk mencetak filamen TPU. Dalam penelitian ini, dilakukan kajian terkait penentuan parameter cetak optimum untuk mencetak filamen TPU. Parameter cetak optimum yang diperoleh kemudian digunakan untuk mencetak sampel pengujian tarik. Pengujian tarik pada sampel yang dihasilkan dilakukan dengan mengacu pada ASTM D 638-14. Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan, temperatur cetak, kecepatan cetak, jarak retraksi dan kecepatan retraksi optimum untuk mencetak filamen TPU adalah sebesar 230°C, 40 mm/s, 1 mm, dan 40 mm/s secara berturut-turut. Sampel yang dicetak dengan arah 0 memiliki kekuatan tarik yang lebih tinggi dibandingkan dengan spesimen yang dicetak dengan arah 90°.

**Kata Kunci:** *kekuatan tarik, parameter cetak, pencetakan 3D, TPU (thermoplastic polyurethane).*

## 1 Pendahuluan

Di era Industri 4.0, proses manufaktur di berbagai industri seperti industri otomotif, fashion, perawatan kesehatan dan robotika, mulai beralih pada pemanfaatan informasi digital untuk dibuat menjadi suatu produk atau prototipe melalui proses otomatisasi<sup>1</sup>. Informasi digital tersebut dapat dicetak sesuai dengan keinginan pengguna melalui suatu sistem manufaktur yang dikenal dengan istilah pencetakan 3D (*3D printing*). Berdasarkan definisinya, pencetakan 3D merupakan salah satu metode manufaktur terkini yang dapat menciptakan komponen dalam bentuk kompleks secara lapis demi lapis sesuai dengan desain yang diberikan<sup>2</sup>. Prinsip yang sederhana, serta kemampuan untuk membuat

prototipe rumit dengan cepat dan murah menyebabkan sistem manufaktur ini sangat disukai<sup>3</sup>.

Secara umum, proses pencetakan 3D dapat diklasifikasikan berdasarkan metode yang digunakan untuk membentuk suatu objek cetak. Adapun jenis-jenis metode pencetakan 3D meliputi FDM (*Fused Deposition Modeling*), SLS (*Selective Laser Sintering*), SLM (*Selective Laser Melting*), *Binder Jetting*, dan LOM (*Laminated Object Manufacturing*)<sup>4-7</sup>. Dari keseluruhan jenis metode pencetakan 3D, FDM merupakan salah satu metode yang paling banyak diminati karena teknologinya yang sederhana dan mudah digunakan, biaya bahan bakunya yang murah, serta aksesibilitasnya yang tinggi<sup>7-11</sup>. Dalam proses penggunaannya sendiri, pencetakan 3D FDM memanfaatkan polimer termoplastik dalam bentuk filamen sebagai bahan bakunya. Variasi jenis polimer yang dapat digunakan sebagai bahan baku pencetakan FDM juga sangat tinggi.

Dalam penerapannya, terdapat berbagai polimer termoplastik yang umum digunakan dalam proses pencetakan 3D FDM seperti TPU (termoplastik poliuretan), PLA (asam poli-laktat), ABS (akrilonitril butadiena stirena), PET (polietilena tereftalat), PS (polistiren), dan PA (poliamida)<sup>4, 9-12</sup>. Di antara polimer-polimer tersebut, saat ini filamen TPU sangat menarik perhatian karena memiliki sifat elastis, kekuatan tarik dan ketahanan terhadap benturan yang unggul<sup>13, 14</sup>. Walaupun demikian, sifat elastis dari filamen TPU juga menyebabkan proses pencetakan TPU menjadi cukup sulit dan membutuhkan parameter pencetakan yang sesuai agar dapat dihasilkan produk atau prototipe dengan sifat mekanik yang diinginkan.

Beberapa parameter pencetakan harus diatur pada mesin pencetakan 3D agar diperoleh objek cetak dengan kualitas yang baik secara umum. Adapun parameter-parameter cetak yang harus diatur meliputi kecepatan cetak, kecepatan retraksi, temperatur cetak, dan jarak retraksi. Parameter cetak yang tidak sesuai dapat menimbulkan berbagai jenis cacat, serta penurunan sifat mekanik pada produk cetak. Berdasarkan hal tersebut, tujuan dari penelitian ini adalah mengidentifikasi kecepatan cetak, kecepatan retraksi, suhu cetak, dan jarak retraksi optimum untuk mencetak filamen TPU.

## **2 Bahan dan Metoda**

### **2.1 Persiapan**

Pada penelitian ini digunakan mesin pencetakan 3D *Creality Ender 3 S1 Pro* dan perangkat lunak pemotong *Ultimaker Cura* untuk menyiapkan file cetak. Filamen yang digunakan adalah TPU 95A dengan diameter sebesar 1,75 mm dari *Polymaker* yang diperoleh dari 3D Zaiku di Jakarta Barat, Indonesia.

## 2.2 Proses pencetakan filamen Termoplastik Poliuretan (TPU)

Terdapat beberapa parameter pencetakan yang harus diatur dalam proses pencetakan sampel. Parameter pencetakan yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada **Tabel 2.1**.

**Tabel 2.1** Parameter pencetakan produk

Parameter	Value
Jenis Perangkat	Creality ender 3 S1 Pro
<i>Slicer</i>	Ultimaker Cura
Filamen	TPU 95A Polymaker
Ukuran <i>nozzle</i>	0,4 mm
Temperatur <i>print</i>	215, 220, 225, 230°C
Kecepatan <i>print</i>	20, 30, 40 mm/s
<i>Retraction Speed</i>	20, 30, 40, 50 mm/s
<i>Retraction Distance</i>	1, 2, 3 mm
Temperatur <i>bed</i>	45°C
<i>Infill</i>	100%
Pola <i>infill</i>	Garis

## 2.3 Penentuan Temperatur Cetak Optimum

Penentuan temperatur cetak optimal dimulai dengan mengunduh desain 3D tower temperatur dari thingiverse.com dalam format STL. Kemudian, format STL dimasukkan ke perangkat lunak *slicer Ultimaker Cura* untuk pengaturan pencetakan. *Extension* digunakan untuk mengubah temperatur setiap lapisan, sehingga setiap tingkat tower memiliki variasi temperatur sebesar 215, 220, 225, 230°C. Setelah dicetak, hasil pencetakan dianalisis secara visual dan tiga tower dengan hasil terbaik dipilih. Hasil pencetakan kemudian dianalisis untuk menentukan cacat dan kegagalan terbanyak pada objek cetak, sehingga dapat disimpulkan temperatur cetak yang paling optimal.

## 2.4 Penentuan Kecepatan Cetak Optimum

Model 3D dicetak dengan tiga variasi kecepatan, yaitu 20 mm/s, 30 mm/s, dan 40 mm/s, sementara temperatur cetak yang digunakan adalah 220, 225, dan 230°C. Setiap variasi kecepatan dicetak tiga kali, dan hasil cetakan dianalisis secara visual untuk menentukan kecepatan cetak terbaik dan menghindari cacat seperti *stringing* atau *warping*.

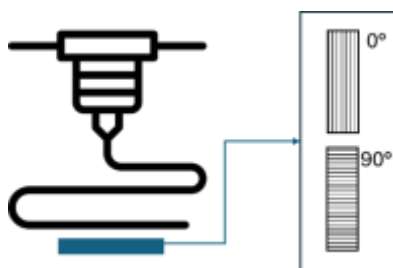
## 2.5 Penentuan Kecepatan dan Jarak Retraksi

Untuk menentukan kecepatan dan jarak retraksi yang optimal, model 3D dicetak dalam bentuk *retraction tower*. Model ini dicetak dengan memvariasikan kecepatan retraksi dari rendah ke tinggi (20, 30, 40, 50 mm/s), serta menggunakan

tiga variasi jarak retraksi (1, 2, 3 mm) yang berbeda. Hasil pencetakan kemudian dianalisis untuk mengidentifikasi cacat dan kegagalan yang terdapat pada *retraction* tower, sehingga dapat ditentukan kombinasi kecepatan dan jarak retraksi untuk menghasilkan hasil pencetakan dengan kualitas terbaik.

## 2.6 Pengujian Mekanik dan Pengamatan Morfologi

Uji tarik pada filamen TPU dilakukan sesuai standar ASTM D 638-14 menggunakan mesin uji tarik Tensilon dengan kecepatan *crosshead* 100 mm/menit. Spesimen dicetak dengan dua arah pembebanan, yaitu arah  $0^\circ$  dan arah  $90^\circ$ , seperti yang diilustrasikan pada **Gambar 2.1**. Arah  $0^\circ$  (paralel) menunjukkan gaya tarik diaplikasikan searah dengan arah pencetakan filamen. Arah  $90^\circ$  (tegak lurus) menunjukkan arah cetak tegak lurus terhadap pemberian gaya tarik. Pengujian dalam dua arah ini dilakukan untuk mengidentifikasi pengaruh arah pencetakan terhadap sifat mekanik TPU. Setelah dilakukan pengujian tarik, morfologi spesimen diuji diamati menggunakan mikroskop optik untuk menganalisis perubahan morfologi akibat pengujian.

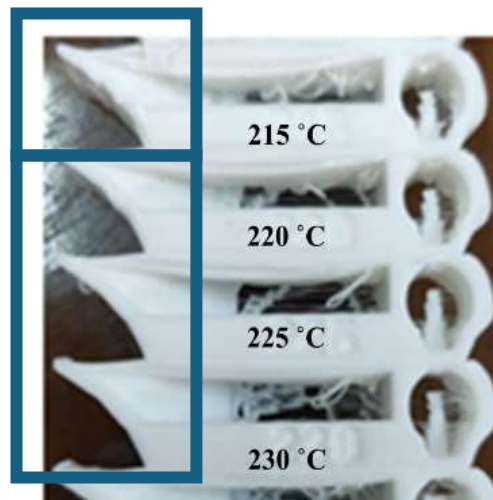


**Gambar 2.1** Ilustrasi spesimen cetak uji tarik.

## 3 Hasil dan Pembahasan

### 3.1 Penentuan Parameter *Print* Optimum

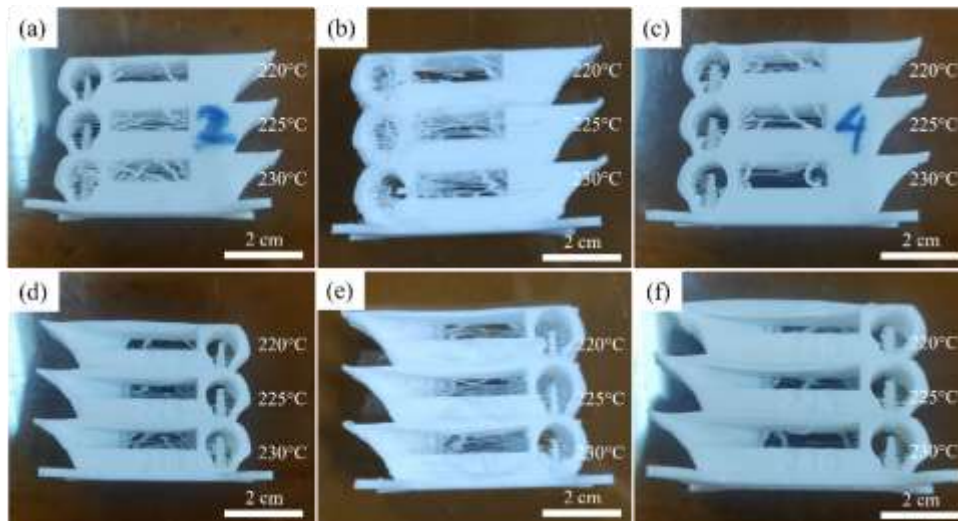
Parameter cetak optimum ditentukan dengan mencetak spesimen pada berbagai parameter seperti, temperatur cetak, kecepatan cetak, jarak retraksi, dan kecepatan retraksi. Spesimen tower pertama dicetak dengan variasi temperatur 215-230°C. Hasil cetak spesimen untuk menentukan temperatur cetak optimum dapat dilihat pada **Gambar 3.1**.



**Gambar 3.1** Spesimen cetak pada tiga temperatur terbaik.

Berdasarkan **Gambar 3.1**, terdapat cacat signifikan berupa stringing pada 215°C, menunjukkan aliran material yang buruk. Kualitas permukaan pada spesimen mulai membaik pada 220°C dibandingkan 215°C, namun *stringing* (benang-benang halus) masih terlihat sedikit di bagian ujung spesimen. Hal ini adalah suatu fenomena dimana sejumlah kecil atau bahkan sangat kecil plastik yang dicetak membentuk benang-benang halus pada permukaan benda yang dicetak dan dapat menyebabkan kegagalan estetika yang mempengaruhi sifat mekanis dari benda tersebut<sup>15</sup>.

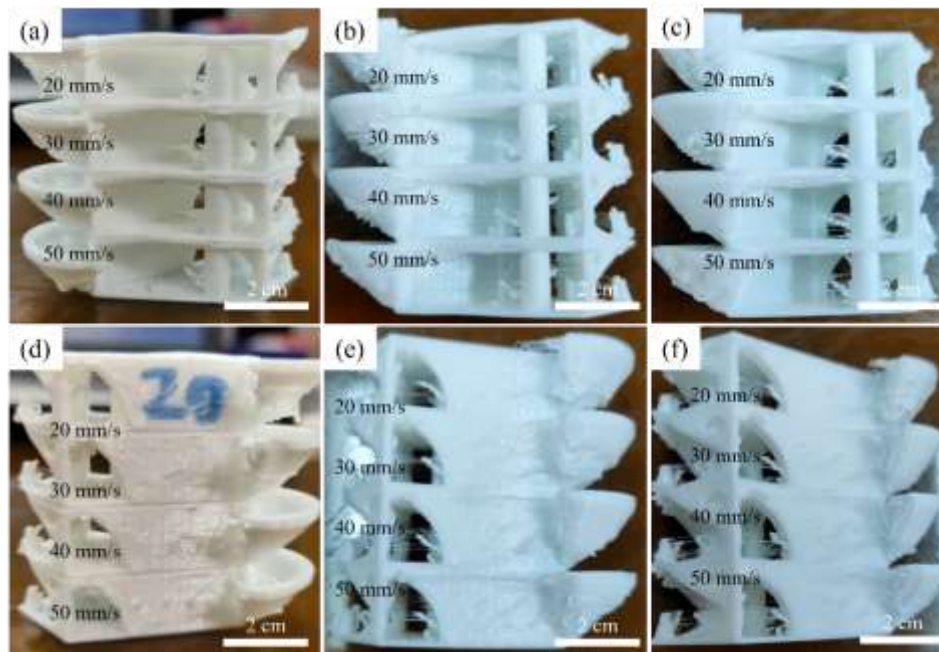
Pada 225°C, cacat *stringing* mulai berkurang dan lapisan terikat lebih baik antara satu sama lain, menunjukkan kondisi yang paling baik dari variasi spesimen. Pada 230°C, hasil cetakan menunjukkan kualitas permukaan yang halus dengan adhesi antar lapisan yang lebih baik. Sejalan dengan pencetakan 3D FDM lapis demi lapis, menunjukkan adhesi antar lapisan yang sangat baik<sup>16</sup>. Sehingga temperatur cetak yang paling baik dari berbagai variasi ini adalah 220, 225, 230°C karena terlihat cacat yang lebih sedikit jika dibandingkan dengan 215°C yang memiliki jumlah cacat yang paling banyak.



**Gambar 3.2** Analisis visual pencetakan temperatur tower:  
(a-c) tampak depan hasil cetak dengan kecepatan 20, 30, 40 mm/s; (d-f) tampak belakang hasil cetak dengan kecepatan 20, 30, 40 (mm/s).

Berdasarkan **Gambar 3.2** dapat disimpulkan bahwa variasi temperatur cetak pada 230°C dan kecepatan cetak pada 40 mm/s menghasilkan kualitas cetak terbaik. Pada variasi ini, tower yang dihasilkan tidak memunculkan cacat *stringing* (benang-benang halus)<sup>17</sup> dan lapisan yang terlewat (*skipped layer*).

Untuk menentukan kecepatan dan jarak retraksi yang optimal, dilakukan pencetakan *retraction tower* pada berbagai variasi kecepatan dan jarak retraksi<sup>18</sup>. Hasil pencetakan kemudian dianalisis secara visual untuk menemukan parameter yang paling optimal. Analisis visual ini bertujuan untuk mengidentifikasi spesimen dengan jumlah cacat dan kegagalan cetak paling sedikit. Hasil analisis visual dari pencetakan *retraction tower* ditunjukkan pada **Gambar 3.3**.



**Gambar 3.3** Analisis visual pencetakan *retraction tower*:

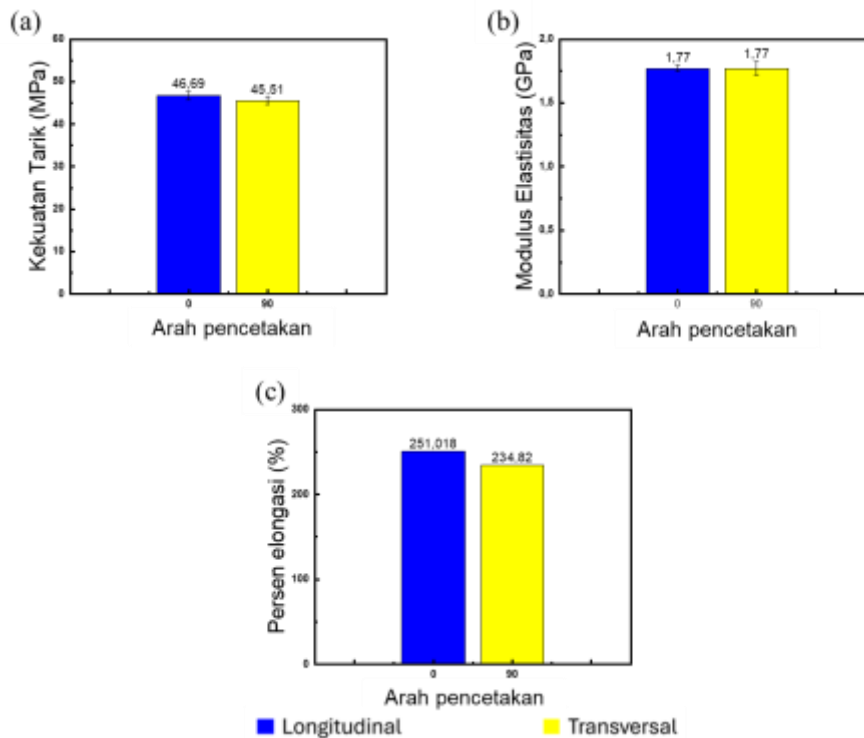
(a-c) tampak depan hasil cetak dengan jarak 1, 2, 3 mm; (d-f) tampak belakang hasil cetak dengan kecepatan 1, 2, 3 mm.

Berdasarkan **Gambar 3.3**, spesimen dengan jarak retraksi 1 mm dan kecepatan retraksi 40 mm/s menunjukkan jumlah cacat yang paling sedikit. Hal ini dibuktikan dengan tidak adanya cacat berupa *stringing* dan *skipped layer*. Kecepatan pencetakan 40 mm/s menghasilkan objek cetak terbaik karena memberikan keseimbangan yang baik antara kecepatan dan waktu solidifikasi material. Pada kecepatan ini, adhesi antar lapisan optimal, dan kontrol temperatur lebih stabil sehingga dapat mengurangi deformasi yang dialami oleh objek cetak. Selain itu, aliran material dari *nozzle* lebih konsisten sehingga dapat mencegah masalah *under-extrusion* atau *over-extrusion* yang dapat merusak kualitas pencetakan.

Dari hasil penentuan parameter cetak optimal dapat disimpulkan bahwa objek cetak terbaik dihasilkan dengan mencetak spesimen pada temperatur cetak, kecepatan cetak, jarak retraksi dan kecepatan retraksi sebesar 230°C, 40 mm/s, 1 mm, dan 40 mm/s secara berturut-turut.

### 3.2 Analisis Pengujian Mekanik dan Pengamatan Morfologi Spesimen

Pengujian tarik dilakukan pada sampel yang dicetak dengan memanfaatkan parameter cetak optimum yang diperoleh sebelumnya. Perbandingan kekuatan tarik untuk setiap arah pembebanan dapat dilihat pada **Gambar 3.4**.

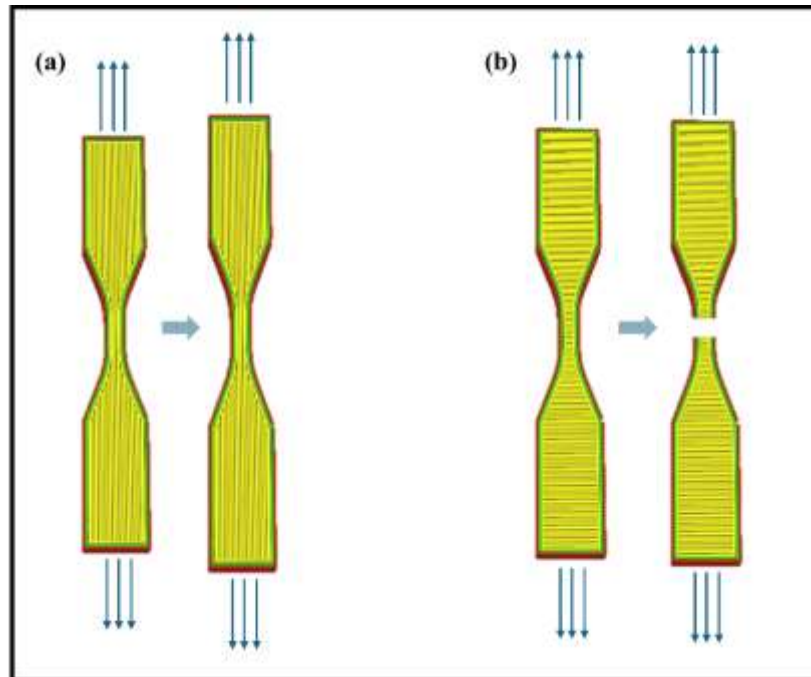


**Gambar 3.4** Evaluasi Pengujian Mekanik: (a) Kekuatan Tarik (b) Modulus Elastisitas (c) Elongasi saat Patah.

Berdasarkan **Gambar 3.4(a)**, terlihat bahwa spesimen dengan arah pembebanan  $0^\circ$  memiliki kekuatan tarik yang lebih tinggi dibandingkan dengan arah  $90^\circ$ . Pada orientasi arah  $0^\circ$ , arah pencetakan sejajar dengan arah penarikannya, sehingga material dapat menahan beban tarik yang lebih efektif. Sedangkan pada orientasi arah  $90^\circ$ , arah pencetakan tegak lurus terhadap gaya tariknya, sehingga beban tarik lebih banyak ditahan oleh antarmuka lapisan. Hal ini menyebabkan spesimen dengan orientasi  $90^\circ$  cenderung memiliki kekuatan tarik yang lebih rendah. Spesimen yang dicetak dalam orientasi datar memiliki jumlah lapisan yang lebih sedikit, dengan beban yang sejajar dengan lapisan, sehingga kekuatan tarik utamanya bergantung pada kekuatan masing-masing lapisan<sup>19</sup>.

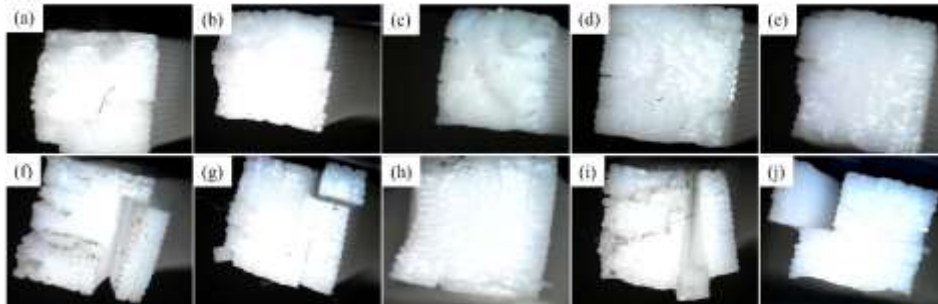


Perbandingan nilai modulus elastisitas dari kedua arah pembebanan objek cetak ditunjukkan pada **Gambar 3.4(b)**. Dari data yang diperoleh, dapat disimpulkan bahwa ketika spesimen ditarik pada arah pencetakan  $0^\circ$  maupun  $90^\circ$  tidak memengaruhi nilai modulus elastisitas sampel. Selain itu, nilai persentase elongasi saat patah dapat dilihat pada **Gambar 3.4(c)**. Dari **Gambar 3.4(c)**, terlihat bahwa sampel dengan arah pencetakan  $0^\circ$  memiliki persentase elongasi yang lebih tinggi dibandingkan dengan arah pembebanan  $90^\circ$ . Perbedaan ini dapat diilustrasikan seperti pada **Gambar 3.5**.



**Gambar 3.5** Arah pembebanan: (a) Longitudinal (b) Transversal

Pada **Gambar 3.5** dapat disimpulkan bahwa spesimen yang dicetak pada arah  $0^\circ$ , memiliki persentase elongasi saat patah yang lebih tinggi dibandingkan dengan spesimen yang dicetak pada arah  $90^\circ$ . Fenomena ini dapat terjadi disebabkan karena pada spesimen yang dicetak pada arah  $0^\circ$ , proses perengangan diakomodasi oleh ikatan sekunder dari TPU. Di sisi lain, pada spesimen dengan arah cetak  $90^\circ$ , yang menahan tarikan adalah bagian antarmuka lapisan. Bagian antarmuka lapisan memiliki kekuatan ikatan yang lebih rendah dibandingkan dengan lapisan TPU, sehingga persentase elongasi saat patah dari sampel dengan arah cetak  $90^\circ$  lebih rendah dibandingkan dengan arah  $0^\circ$ . Pengamatan morfologi dilakukan untuk mengevaluasi permukaan hasil patahan dari sampel. Hasil dari pengamatan morfologi ditunjukkan dalam **Gambar 3.6**.



**Gambar 3.6** Morfologi hasil pengujian tarik: (a-e) arah 0° (f-j) arah 90°.

Dari hasil pengamatan morfologi, spesimen dengan arah cetak 0° menampilkan lapisan cetak yang lebih rapi dan seragam. Spesimen dengan arah cetak 0° mengalami lebih sedikit retakan dan kerusakan, deformasi yang merata, dan distribusi tegangan yang lebih baik. Sebaliknya, spesimen arah cetak 90° menunjukkan adhesi antar lapisan yang lebih lemah, dengan banyak retakan dan kerusakan struktural pada bagian antarmuka lapisan. Kegagalan tersebut mengonfirmasi bahwa pada spesimen dengan arah pencetakan 90°, bagian yang menahan tarikan adalah bagian antarmuka.

#### 4 Kesimpulan

Temperatur cetak, kecepatan cetak, jarak retraksi dan kecepatan retraksi optimum untuk mencetak filamen TPU adalah sebesar 230°C, 40 mm/s, 1 mm, dan 40 mm/s secara berturut-turut. Spesimen yang dicetak dengan arah 0 memiliki kekuatan tarik yang lebih tinggi dibandingkan dengan spesimen yang dicetak dengan arah 90°.

#### 5 Referensi

- [1] Zhang, Y., Yu, X.& Cheng, Z., *Research on the Application of Synthetic Polymer Materials in Contemporary Public Art*, *Polymers*, **14**, pp. 1208, 2022.
- [2] Vayre, B., Vignat, F.& Villeneuve, F., *Designing for Additive Manufacturing*, *Procedia CIRP*, **3**, pp. 632-637, 2012.
- [3] Hohimer, C., Christ, J., Aliheidari, N., Mo, C.& Ameli, A., *3D Printed Thermoplastic Polyurethane with Isotropic Material Properties*, in Nakhiah C. Goulbourne(ed(pp. 101680E, 2017.
- [4] Prakash, K. S., Nancharaih, T.& Rao, V. V. S., *Additive Manufacturing Techniques in Manufacturing -An Overview*, *Materials Today: Proceedings*, **5**(2, Part 1), pp. 3873-3882, 2018.

- [5] Herianto, H., Mastrisiswadi, H., Nasution, A.& Atsani, S., *Effect of Shot Peening Parameters on PLA Parts Manufactured with Fused Deposition Modeling*, Journal of Engineering and Technological Sciences, **55**, pp. 513-523, 2023.
- [6] Tikhomirov, E., Levine, V., Åhlén, M., Di Gallo, N., Strømme, M., Kipping, T., Quodbach, J.& Lindh, J., *Impact of polymer chemistry on critical quality attributes of selective laser sintering 3D printed solid oral dosage forms*, International Journal of Pharmaceutics: X, **6**, pp. 100203, 2023.
- [7] Ramya, A., *3D PRINTING TECHNOLOGIES IN VARIOUS APPLICATIONS*, International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET), **7**(3), pp. 396-409, 2016.
- [8] Rezvani Ghomi, E., Khosravi, F., Saedi Ardahaei, A., Dai, Y., Esmaeely Neisiany, R., Foroughi, F., Wu, M., Das, O.& Ramakrishna, S., *The Life Cycle Assessment for Polylactic Acid (PLA) to Make It a Low-Carbon Material*, Polymers, **13**, pp. 1854, 2021.
- [9] Mikula, K., Skrzypczak, D., Izydorzycyk, G., Warchoń, J., Moustakas, K., Chojnacka, K.& Witek-Krowiak, A., *3D printing filament as a second life of waste plastics-a review*, Environ Sci Pollut Res Int, **28**(10), pp. 12321-12333, 2021.
- [10] Haghsefat, K.& Tingting, L., *FDM 3D Printing Technology and Its Fundamental Properties*, in pp. June 2020.
- [11] Liu, Z., Wang, Y., Wu, B., Cui, C., Yu, G.& Yan, C., *A critical review of fused deposition modeling 3D printing technology in manufacturing polylactic acid parts*, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, **102**, pp. 2019.
- [12] Hörlesberger, M., Kriszt, B.& Kasztler, A., *Analysis of innovation phases in the different AM future scenarios*, in pp. 1-10, 2022.
- [13] Roy Choudhury, N., Chaki, T. K.& Bhowmick, A. K., *Thermal characterization of thermoplastic elastomeric natural rubber-polypropylene blends*, Thermochimica Acta, **176**, pp. 149-161, 1991.
- [14] Haryńska, A., Kucińska-Lipka, J.& Janik, H., *Thermoplastic elastomer filaments and their application in 3D printing*, **4**, pp. 2016.
- [15] Paraskevoudis, K., Karayannis, P.& Koumoulos, E. P., *Real-Time 3D Printing Remote Defect Detection (Stringing) with Computer Vision and Artificial Intelligence*, Processes, **8**(11), pp. 1464, 2020.

- [16] Luo, X., Cheng, H., Chen, K., Gu, L., Liu, S. & Wu, X., *Multi-walled carbon nanotube-enhanced polyurethane composite materials and the application in high-performance 3D printed flexible strain sensors*, *Composites Science and Technology*, **257**, pp. 110818, 2024.
- [17] Chien-Hung Lin, B.-Y.-G., *Investigating capacitive force sensors with 3D printed flexible structures as dielectric layers*, *IOPScience*, pp. 2023.
- [18] Morita, L., Asad, A., Sun, X., Ali, M. & Sameoto, D., *Integration of a needle valve mechanism with cura slicing software for improved retraction in pellet-based material extrusion*, *Additive Manufacturing*, **82**, pp. 104045, 2024.
- [19] Hanitio, E. W., Lutfhyansyah, N. R., Efendi, B. M., Mardiyati, Y. & Steven, S., *From Electronic Waste to 3D-Printed Product, How Multiple Recycling Affects High-Impact Polystyrene (HIPS) Filament Performances*, *Materials*, **16**(9), pp. 3412, 2023.