

# Pengaruh Parameter Cetak Pada Nilai Kekerasan Serta Akurasi Dimensi Material *Thermoplastic Elastomer* (TPE) Hasil 3D Printing

Juan Pratama<sup>1,\*</sup>, Adam Zuyyinal Adib<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Darma Persada  
Jl. Taman Malaka Selatan No. 8, RW. 6, Pondok Kelapa, Duren Sawit, Jakarta Timur, DKI  
Jakarta. 13450

<sup>2</sup>Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada  
Jl. Grafika 2, Yogyakarta. 55281

\*Korespondensi penulis: juan\_pratama@ft.unsada.ac.id; juanprtm@gmail.com.

(Received: 25-04-2022; Revised: 31-05-2022; Accepted: 03-06-2022)

**Abstract.** *The ability of Fused Deposition Modeling (FDM) 3D Printing technology to create complex objects makes this technology increasingly widely used. Apart from the advantages of FDM technology, the low dimensional accuracy and mechanical properties of FDM printed parts are one of the drawbacks of this process. In addition, developments in the use of elastic materials to create flexible products make the process of this technology requires special attention. This study focused on knowing the effect of process parameters, namely temperature and build orientation on dimensional accuracy and the value of hardness (Shore D Hardness) of the Thermoplastic Elastomer (TPE) material produced by FDM 3D Printing. The hardness test method refers to the ASTM D2240 standard for measuring Shore D hardness, while the dimensional accuracy is measured using a vernier caliper. The results showed that the temperature and build orientation had an influence on the accuracy and hardness values. The properties of TPE have different results from PLA which is completely shrunk. However, the porosity value does not have a significant effect on hardness, but the number of layers. The research results have been presented both in tables and graphically, and are briefly discussed in this study.*

**Keywords:** 3D printing; PLA; thermoplastic elastomer; dimensional accuracy; shore D hardness; printing parameters.

**Abstrak.** Kemampuan dari teknologi *Fused Deposition Modeling* (FDM) 3D Printing untuk membuat objek yang kompleks menjadikan teknologi ini semakin banyak digunakan secara luas. Terlepas dari kelebihan teknologi FDM, rendahnya akurasi dimensi serta sifat mekanis dari hasil cetak FDM menjadi salah satu kekurangan dari proses ini. Selain itu, perkembangan pada penggunaan material elastis untuk menciptakan produk yang fleksibel menjadikan proses dari teknologi ini membutuhkan perhatian khusus. Penelitian ini difokuskan untuk mengetahui pengaruh parameter proses yaitu suhu dan orientasi *build* terhadap akurasi dimensi serta nilai kekerasan (*Shore D Hardness*) dari material *Thermoplastic Elastomer* (TPE) hasil cetak FDM 3D Printing. Metode pengujian kekerasan mengacu pada standar ASTM D2240 untuk pengukuran *Shore D hardness*, sedangkan akurasi dimensi diukur menggunakan *vernier caliper*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa suhu serta orientasi *build* memiliki pengaruh terhadap nilai akurasi maupun kekerasan. Sifat TPE memiliki hasil yang berbeda dengan PLA yang sepenuhnya mengalami penyusutan. Meskipun demikian, nilai porositas tidak memiliki pengaruh signifikan terhadap kekerasan, tetapi jumlah lapisan lah yang berpengaruh terhadap kekerasan. Hasil penelitian telah ditampilkan baik dengan tabel maupun secara grafis, dan dibahas secara singkat pada penelitian ini.

**Kata kunci:** pencetakan 3D; PLA; *thermoplastic elastomer*; akurasi dimensi; kekerasan *shore D*; parameter proses pencetakan.

## PENDAHULUAN

Proses 3D *printing* berbasis filamen atau yang sering disebut dengan nama *Fused Filament Fabrication* (FFF), serta memiliki nama dagang *Fused Deposition Modeling* (FDM) merupakan salah satu teknik yang telah banyak digunakan secara luas karena kemampuannya untuk membuat produk dengan desain kompleks [1]. Proses ini secara langsung dapat mengkonversikan data *Computer-Aided Design* (CAD) menjadi sebuah produk fisik menggunakan mesin 3D *printer* [2]. Desain CAD yang telah dikonversikan ke format STL kemudian diiris menjadi beberapa lapisan tipis menggunakan *software* seperti Cura, Flashprint, Simplify, dll. Pada proses pencetakan, filamen dari spul diumpankan kedalam ekstruder, kemudian dipanaskan menggunakan *hot-end*, lalu filamen yang telah dipanaskan dan berubah fasa menjadi semi cair dikeluarkan atau didepositkan melalui nosel di atas *build platform*. Setelah satu lapisan selesai, *platform* dapat bergerak turun searah sumbu Z sejauh tebal lapisan yang digunakan. Proses ini terjadi berulang kali sampai bentuk 3D yang diinginkan tercapai.

Sampai saat ini, FDM menjadi sangat populer baik di kalangan industri, peneliti di Universitas, maupun penghobi desain. Hal ini disebabkan oleh beberapa faktor, antara lain:

- Proses fabrikasi yang aman dan sederhana [3]
- Modal awal (harga mesin) yang rendah [4], [5]
- Tidak membutuhkan perkakas [6]
- Waktu proses yang singkat [7], [8]
- Limbah yang sangat sedikit [9]
- Pergantian material yang mudah dan sifat mekanis yang baik [10]

Proses FDM umumnya menggunakan material *Polylactic Acid* (PLA) dan *Acrylonitrile Butadiene Styrene* (ABS). Namun, seiring dengan perkembangan teknologi FDM, banyak material baru yang dikembangkan dan dapat digunakan pada proses FDM. Salah satu tujuan utama dari pengembangan ini adalah untuk membuat objek yang memiliki sifat fleksibel [11]. Salah satu material yang sedang berkembang dan memiliki sifat ini adalah *Thermoplastic Elastomer* (TPE). TPE merupakan material polimer yang memiliki sifat *cross-linking* dengan karet [12]. Hal ini membuat TPE memiliki banyak keunggulan sehingga dapat digunakan dalam berbagai aplikasi seperti *coating*, material anti air, mainan, konstruksi, komponen peralatan olah raga, komponen sepatu maupun sandal, serta sangat berkembang pesat pada bidang otomotif dan implan biomedis [13].

Terlepas dari berbagai keunggulan dari proses FDM dan material TPE, kombinasi proses FDM dengan material ini harus diteliti lebih lanjut untuk memastikan kapabilitas dari material untuk dapat digunakan pada aplikasi yang diharapkan. Hal ini disebabkan oleh beberapa fakta bahwa proses FDM memiliki salah satu kekurangan utama yaitu akurasi dimensi yang rendah pada benda hasil cetak, serta kualitas permukaan yang buruk [14]–[16]. Kemudian, banyaknya parameter proses pencetakan mungkin juga dapat mempengaruhi kualitas hasil cetak dari material TPE.

Penelitian pada penggunaan material *Elastomer* dengan proses FDM telah dilakukan oleh beberapa peneliti sebelumnya dengan tujuan yang beragam. Arifvianto dkk (2021) meneliti tentang pengaruh sudut *raster* dan temperatur *printing* terhadap kekuatan tarik dari material *Elastomer* TPU (*Thermoplastic Polyurethane*)[17]. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sudut *raster* memiliki pengaruh signifikan terhadap kekuatan tarik yang dihasilkan, dan pola yang didapatkan menyerupai material PLA [18]. Selain itu, Xiao dan Gao (2017) juga menunjukkan bahwa *toughness* terbaik pada material TPE hasil FDM didapatkan pada suhu cetak 215 °C dan sudut *raster* 45° [19]. Di sisi lain, Hohimer dkk (2017) menunjukkan pentingnya pengaruh *air gap* terhadap kekuatan TPE yang dihasilkan dari proses FDM [20]. Selebihnya, *air gap* juga menunjukkan pengaruh yang signifikan pada akurasi dimensi, tetapi tidak berpengaruh signifikan terhadap kualitas permukaan [21]. Selanjutnya, *void* atau porositas juga merupakan kerugian yang tidak dapat dihindari pada proses FDM, terlepas dari material apapun. Porositas dapat secara langsung mempengaruhi

akurasi dimensi serta kualitas permukaan dari hasil FDM [22]. Selain porositas, proses pendinginan yang tidak seragam pada proses pencetakan FDM juga menjadi masalah yang dapat menyebabkan penyusutan yang tidak seragam [23]. Akibat dari fenomena ini, muncul efek anak tangga pada bagian permukaan hasil FDM dengan menggunakan sudut *raster* tertentu [24].

Terbatasnya penelitian pada penggunaan material TPE mendorong dilakukannya penelitian ini untuk mendukung kemajuan teknologi FDM. Pada aplikasi otomotif dan biomedis khususnya, nilai kekerasan dari produk TPE hasil FDM merupakan salah satu titik penting sebagai penunjang penggunaan material ini terhadap aplikasi tersebut. Berdasarkan masalah yang timbul serta tinjauan yang telah dilakukan sebelumnya, penelitian ini difokuskan pada pengaruh parameter cetak terhadap kekerasan dan akurasi dimensi pada material TPE hasil cetak FDM. Parameter cetak difokuskan pada dua jenis parameter yaitu suhu cetak dan orientasi cetak. Meskipun suhu cetak telah diteliti sebelumnya, tetapi pengaruhnya terhadap kekerasan TPE hasil cetak FDM masih belum jelas. Kemudian, pengaruh orientasi cetak juga belum pernah diteliti sebelumnya, dimana perbedaan orientasi akan berpengaruh pada jumlah lapisan yang akan dicetak yang mungkin dapat mempengaruhi nilai kekerasan maupun akurasi dimensi. Pada akhirnya, penelitian ini diharapkan mampu untuk memberikan kontribusi pada perkembangan teknologi FDM dengan penggunaan material elastis, dalam hal ini TPE.

## METODE PENELITIAN

### Material

Pada penelitian ini, filamen TPE yang digunakan memiliki diameter 1.75 mm dan berwarna kuning yang dibeli dari Shenzhen Esun Industrial CO., Ltd. China (eSun Filament) untuk membuat spesimen uji kekerasan. Properti dari material TPE yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada tabel 1.

**TABEL 1.** Properti filamen TPE pada penelitian ini [25]

| <i>Properties</i>                      | <b>TPE</b>             |
|--|------------------------|
| <i>Density</i>                         | 1.14 g/cm <sup>3</sup> |
| <i>Ultimate Tensile Strength (UTS)</i> | 52 MPa                 |
| <i>Elongation at Break</i>             | 420%                   |
| <i>Melting Point</i>                   | ~ 150 °C               |
| <i>Glass Trnasion Point</i>            | ~ 60 - 70 °C           |

### Pembuatan Spesimen

Spesimen uji kekerasan dibuat menggunakan *printer Flashforge Creator Pro*, dan dimensi spesimen uji mengacu pada standar pengujian kekerasan ASTM D2240 untuk material polimer dan campuran. Sebelum proses pencetakan, *software* Flashprint digunakan untuk *setting parameter printing* dan mengiris model 3 dimensi menjadi beberapa lapisan *horizontal*. *Printing parameter* serta *design of experiment* (DoE) masing-masing ditunjukkan pada tabel 2 dan 3.

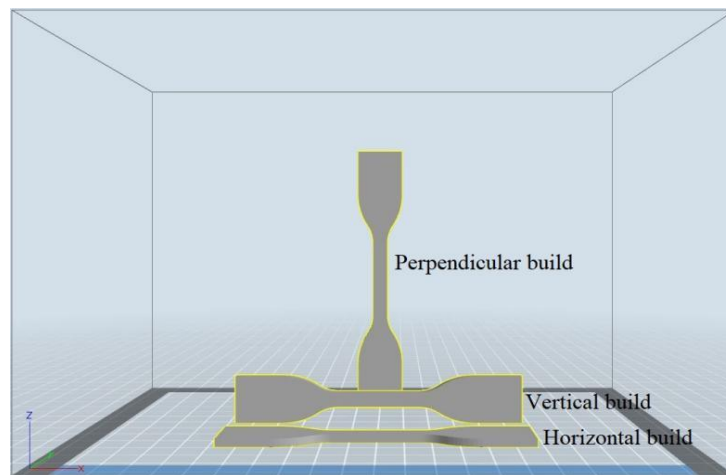
**TABEL 2.** Parameter *printing* untuk pembuatan spesimen uji

| <i>Parameters</i>           | <b>Defined value</b> |
|-----------------------------|----------------------|
| <i>Platform temperature</i> | <i>No heat</i>       |
| <i>Infill density</i>       | 100%                 |
| <i>Printing speed</i>       | 30 mm/s              |
| <i>Raster angle</i>         | +45/-45              |
| <i>Layer thickness</i>      | 0.2 mm               |
| <i>Shell count</i>          | 2                    |

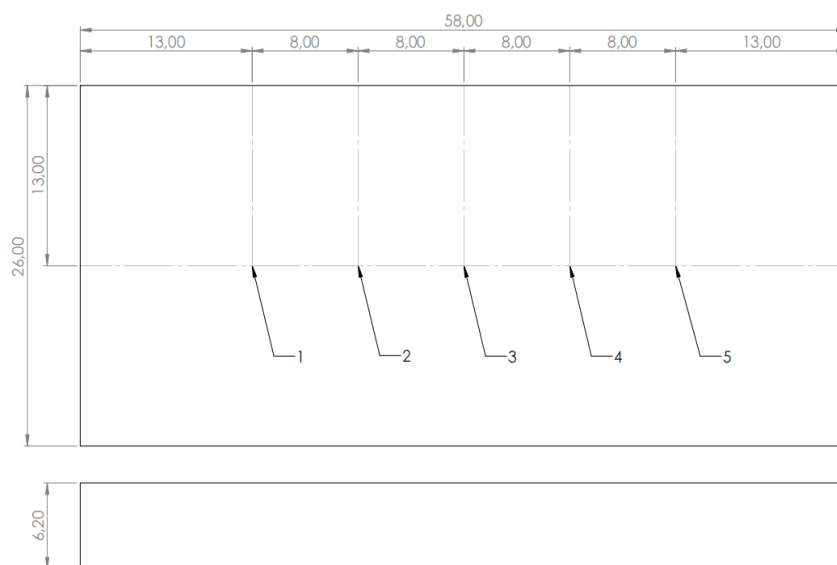
**TABEL 3.** *Design of Experiment (DoE)* pada penelitian ini.

| <i>Run</i> | <i>Materials</i> | <i>Extruder temperature</i> | <i>Build Orientation</i> | <i>Specimen's Code</i> |
|------------|------------------|-----------------------------|--------------------------|------------------------|
| 1          | TPE              | 200 °C                      | <i>Horizontal</i>        | H200                   |
| 2          | TPE              | 220 °C                      | <i>Horizontal</i>        | H220                   |
| 3          | TPE              | 240 °C                      | <i>Horizontal</i>        | H240                   |
| 4          | TPE              | 200 °C                      | <i>Vertical</i>          | V200                   |
| 5          | TPE              | 220 °C                      | <i>Vertical</i>          | V220                   |
| 6          | TPE              | 240 °C                      | <i>Vertical</i>          | V240                   |
| 7          | TPE              | 200 °C                      | <i>Perpendicular</i>     | P200                   |
| 8          | TPE              | 220 °C                      | <i>Perpendicular</i>     | P220                   |
| 9          | TPE              | 240 °C                      | <i>Perpendicular</i>     | P240                   |

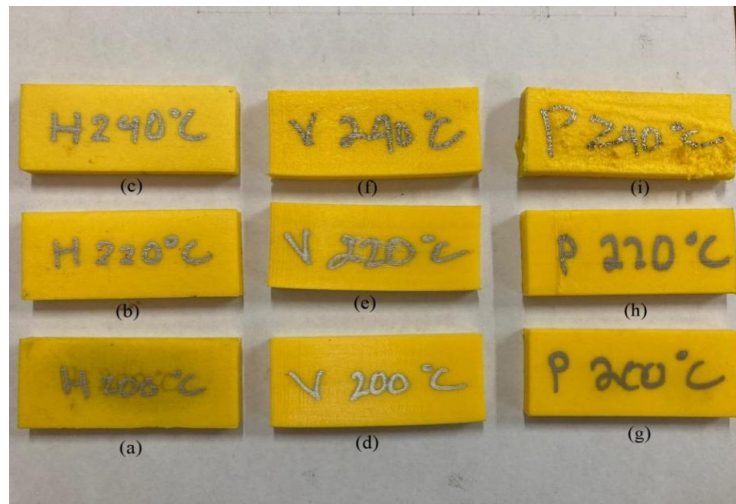
Total 9 spesimen telah dibuat untuk pengujian kekerasan dan akurasi dimensi. Pada tabel 3, orientasi *build* divariasikan menggunakan 3 jenis orientasi yaitu *horizontal*, *vertical*, serta *perpendicular*, dimana orientasi tersebut diilustrasikan dengan spesimen uji tarik pada Gambar 1. Dimensi dari spesimen uji serta 5 titik pengujian kekerasan yang mengacu pada standar ASTM D 2240 ditunjukkan pada gambar 2, sedangkan gambar 3 menunjukkan foto spesimen uji yang telah berhasil dicetak.



**GAMBAR 1.** Ilustrasi orientasi *build* pada proses *printing* [1].



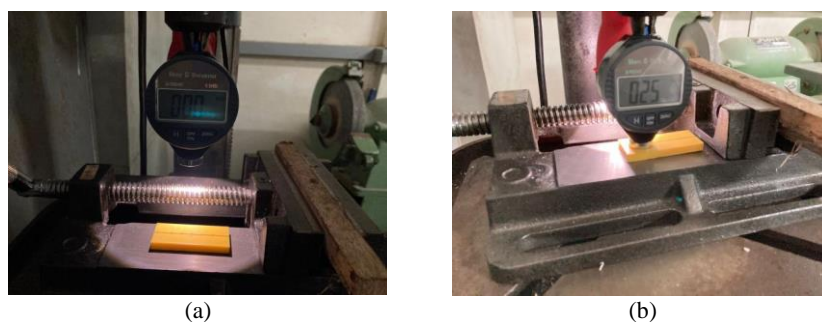
**GAMBAR 2.** Dimensi spesimen uji kekerasan serta 5 titik pengujian kekerasan.



**GAMBAR 3.** Spesimen TPE hasil cetak FDM yang terdiri dari: (a) H200, (b) H220, (c) H240, (d) V200, (e) V220, (f) V240, (g) P200, (h) P220, dan (i) P240.

### Prosedur Pengujian

Proses pengujian kekerasan mengacu pada standar ASTM D2240, dimana uji kekerasan dilakukan sebanyak 5 kali pada satu spesimen atau sampel dengan satu variasi parameter. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2, Titik pengujian harus memiliki jarak minimum 12 mm dari tepi dan 6 mm diantara titik pengujian [26]. Uji kekerasan dilakukan menggunakan alat uji *Shore D Hardness Tester* (Durometer) yang dipasang pada mesin cekam mesin *bor* untuk mendukung stabilitas penekanan, kemudian spesimen diletakkan pada meja mesin, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. Pada saat pengujian kekerasan, Durometer ditahan selama 3 sampai 5 detik saat *indenter* memberikan penetrasi pada spesimen. Jika saat penekanan nilai pada Durometer tidak berubah pada kurun waktu tersebut, nilai kekerasan dianggap valid dan kemudian dicatat.



**GAMBAR 4.** (a) Proses pemasangan Durometer pada mesin *bor*, dan (b) Proses pengujian kekerasan dengan Durometer pada spesimen uji.

Untuk pengujian akurasi dimensi, digunakan *vernier caliper* karena spesimen memiliki bentuk yang sederhana dan tidak memiliki kontur yang kompleks. Pengujian akurasi dimensi dilakukan untuk menghitung volume akhir dari spesimen hasil cetak FDM yang akan dibandingkan dengan dimensi desain. Selain itu, volume spesimen juga digunakan untuk mengukur porositas dari spesimen yang telah dicetak. Perhitungan porositas dilakukan dengan menimbang setiap spesimen yang kemudian dibagi dengan volume aktual untuk mendapatkan densitas aktualnya [27]. Kemudian porositas dapat dihitung menggunakan persamaan dibawah ini

$$\frac{\rho_t - \rho_a}{\rho_t} \times 100\% = \text{Porosity (\%)} \quad (1)$$

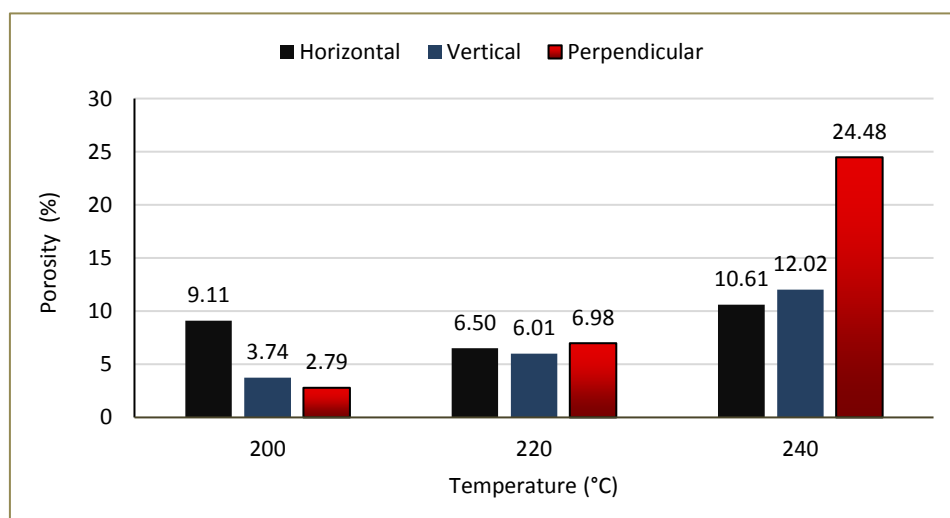
Dimana  $\rho_t$  adalah masa jenis teori yang didapatkan dari tabel 1,  $\rho_a$  adalah massa jenis atau densitas aktual spesimen.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil dari pengukuran akurasi dimensi spesimen uji kekerasan ditunjukkan pada tabel 4. Masing-masing spesimen juga ditimbang untuk menghitung densitas aktual yang juga dituangkan pada tabel 4 (sisi paling kanan). Setelah densitas aktual diketahui, persamaan (1) digunakan untuk menghitung porositas dari masing-masing spesimen, yang ditunjukkan pada gambar 5. Dapat dilihat dari tabel 4, bahwa sampel yang dicetak pada orientasi *horizontal* memiliki panjang dan lebar yang lebih kecil daripada desainnya. Akan tetapi memiliki ketebalan yang lebih besar. Fenomena ini juga ditemukan pada orientasi *vertical* pada suhu 200°C. Namun, ketika suhu dinaikkan sampai suhu 240°C, lebar sampel lebih besar dibandingkan desainnya. Di sisi lain, pada orientasi *perpendicular*, nilai panjang dan tebal lebih besar dari desain sedangkan lebarnya lebih kecil dibandingkan desainnya. Fenomena yang ditemukan pada material TPE berbeda dengan material PLA, dimana material PLA umumnya mengalami penyusutan ke segala arah setelah proses pencetakan [10]. Pada material TPE, penyusutan dialami pada sumbu *X* pada saat proses *printing*. Dapat dilihat pada orientasi *horizontal* penyusutan terjadi pada panjang, pada orientasi *vertical* juga pada panjang, serta pada orientasi *perpendicular* terjadi pada lebar, dimana semua diwakili oleh sumbu *X* saat proses pencetakan. Sedangkan pada sumbu *Z*, semua orientasi mengalami penambahan dimensi. Pada orientasi *horizontal* dan *vertical* bertambah tebal, dan pada orientasi *perpendicular* bertambah panjang. Hal ini mungkin menunjukkan bahwa material TPE tidak terpengaruh secara signifikan dengan beban gravitasi, berbeda dengan PLA. Pada PLA, hasil struktru mikro hasil cetak cenderung berbentuk oval. Namun, kemungkinan hal ini tidak terjadi pada material TPE. Oleh karena itu, dibutuhkan penelitian lebih lanjut untuk mengkonfirmasi hasil penelitian ini dari segi struktur mikro.

TABEL 4. Hasil pengukuran akurasi dimensi, massa, serta densitas aktual.

| Specimen | l (mm) | w (mm) | t (mm) | V (mm <sup>3</sup> ) | m (g) | ρ (g/cm <sup>3</sup> ) |
|----------|--------|--------|--------|----------------------|-------|------------------------|
| H 200°C  | 57.57  | 25.55  | 6.22   | 9149.08              | 9.48  | 1.04                   |
| H 220°C  | 57.56  | 25.62  | 6.26   | 9231.54              | 9.84  | 1.07                   |
| H 240°C  | 57.87  | 25.91  | 6.44   | 9656.21              | 9.84  | 1.02                   |
| V 200°C  | 57.64  | 25.94  | 6.29   | 9404.69              | 10.32 | 1.10                   |
| V 220°C  | 57.69  | 26.17  | 6.54   | 9873.75              | 10.58 | 1.07                   |
| V 240°C  | 57.81  | 26.36  | 6.87   | 10469.00             | 10.5  | 1.00                   |
| P 200°C  | 58.1   | 25.63  | 6.29   | 9366.46              | 10.38 | 1.11                   |
| P 220°C  | 58.24  | 25.78  | 6.57   | 9864.38              | 10.46 | 1.06                   |
| P 240°C  | 58.25  | 25.79  | 8.18   | 12288.55             | 10.58 | 0.86                   |
| Design   | 58     | 26     | 6.2    | -                    | -     | -                      |



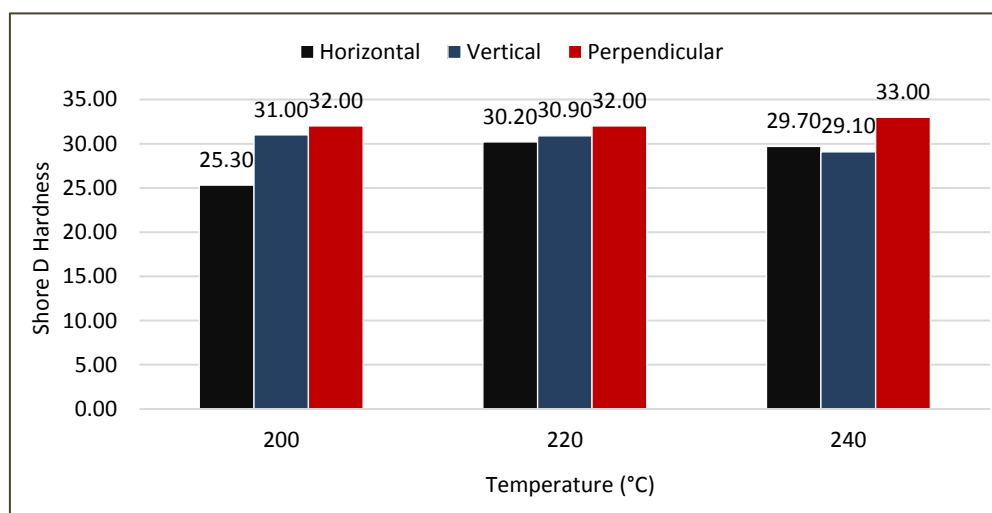
GAMBAR 5. Nilai porositas pada masing-masing spesimen uji.

Dari gambar 5, dapat dilihat bahwa suhu serta orientasi *build* memiliki pengaruh pada porositas. Pada suhu 200°C, nilai porositas tertinggi didapatkan pada *build horizontal*, sedangkan pada suhu 220°C dan 240°C, nilai porositas tertinggi didapatkan pada *build perpendicular*. Berdasarkan logika, nilai porositas akan berbanding lurus dengan nilai kekerasan karena porositas secara langsung dapat mempengaruhi sifat mekanis dari benda hasil cetak FDM [28]–[30]. Oleh karena itu, hasil uji kekerasan pada masing-masing spesimen ditunjukkan pada tabel 5 dan gambar 6.

Berdasarkan data yang ditampilkan pada tabel 5 dan gambar 6, nilai porositas tidak berbanding lurus dengan nilai kekerasan dan hanya terjadi pada suhu 200°C, dimana semakin kecil porositas semakin besar pula kekerasannya. Namun, ketika suhu dinaikkan menjadi 220°C, nilai kekerasan memiliki pola yang berbeda, dimana kekerasan tertinggi pada *build perpendicular* dan terendah pada *build horizontal*, meskipun pada *build perpendicular* nilai porositas lebih tinggi dibandingkan dengan *build horizontal* maupun *vertical*. Kemudian pada suhu 240°C, nilai kekerasan tertinggi tetap berada pada *build perpendicular* meskipun nilai porositasnya sangat tinggi. Fenomena ini berbanding terbalik dengan logika sebelumnya yaitu semakin kecil porositas maka semakin tinggi sifat mekanis, namun tidak terjadi pada material TPE hasil cetak FDM pada suhu tinggi.

**TABEL 5.** Hasil uji kekerasan (*Shore D Hardness*)

| Build Orientation | Temp (°C) | Test 1 | Test 2 | Test 3 | Test 4 | Test 5 | Average | STDEV |
|-------------------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|-------|
| Horizontal        | 200       | 25.5   | 26     | 26     | 24     | 25     | 25.30   | 0.84  |
|                   | 220       | 30     | 30     | 30     | 31.5   | 29.5   | 30.20   | 0.76  |
|                   | 240       | 31     | 30     | 30     | 29.5   | 28     | 29.70   | 1.10  |
| Vertical          | 200       | 29.5   | 30     | 30.5   | 33     | 32     | 31.00   | 1.46  |
|                   | 220       | 31     | 31     | 30.5   | 31     | 31     | 30.90   | 0.22  |
|                   | 240       | 29     | 28     | 30     | 29.5   | 29     | 29.10   | 0.74  |
| Perpendicular     | 200       | 31.5   | 31.5   | 32     | 32.5   | 32.5   | 32.00   | 0.50  |
|                   | 220       | 31.5   | 31.5   | 32     | 33     | 32     | 32.00   | 0.61  |
|                   | 240       | 33.5   | 30     | 31.5   | 35.5   | 34.5   | 33.00   | 2.24  |



**GAMBAR 6.** Grafik hasil uji kekerasan *shore D hardness*.

Pada pengujian kekerasan, *indenter* akan melakukan penetrasi pada bagian luar spesimen. Pada kondisi ini ada dua kemungkinan yang akan terjadi; pertama, *indenter* akan memberikan penetrasi ke satu lapisan filamen yang berdiri sendiri (*single layer*); kedua, *indenter* akan memberikan penetrasi ke antar lapisan filamen yang menempel satu sama lain (*interlayer*). Kedua kondisi ini memiliki nilai kekuatan yang berbeda. Pada proses *Stereolithography* (SLA), kekuatan antar lapisan memiliki nilai yang lebih tinggi daripada kekuatan satu lapisan itu sendiri [31], [32]. Pada FDM di sisi lain, kekuatan lapisan

ditentukan oleh suhu yang dapat menyebabkan proses *sintering* pada kedua lapisan terdekat. Fase *sintering* dapat terjadi ketika suhu filamen pada saat didepositkan masih mendekati *melting point* dari material tersebut, sehingga menciptakan ikatan antar filamen (*inter-raster bonding*) yang baik [33]. Fenomena yang sama ditunjukkan pada gambar 6, pada suhu 200°C, dimana nilai kekerasan tertinggi pada *build perpendicular* bukan disebabkan karena nilai porositasnya yang rendah, melainkan memiliki jumlah lapisan terbanyak. Selain itu, pada suhu ini fase *sintering* dapat terjadi sehingga mendapatkan ikatan antar lapisan yang baik. Hal ini juga terjadi pada suhu 220°C. Kedua kondisi ini mengkonfirmasi bahwa nilai kekerasan TPE hasil cetak FDM utamanya dipengaruhi oleh jumlah lapisan dan suhu dibandingkan dengan porositas.

Fenomena yang janggal ditemukan pada suhu pencetakan 240°C, dimana nilai kekerasan memiliki nilai tertinggi pada *build perpendicular*. Hal ini mungkin disebabkan karena suhu yang terlalu tinggi yang mengakibatkan hilangnya sifat karet pada material TPE sehingga hanya menyisakan sifat polimer. Dapat dilihat juga pada gambar 3(i), spesimen yang dicetak memiliki bentuk permukaan yang sangat buruk, yang mungkin terjadi karena kondisi filamen terlalu panas dan sudah berada di fase cair bukan lagi pada fase semi-cair. Oleh karena itu, dibutuhkan penelitian lebih lanjut untuk dapat mengklarifikasi fenomena ini. Akan sangat baik bila dapat melihat struktur mikro dari TPE hasil cetak pada suhu 240°C.

## KESIMPULAN

Pada penelitian ini, pengaruh parameter cetak yaitu suhu dan orientasi *build* terhadap nilai kekerasan (*Shore D Hardness*) dan akurasi dimensi dari *Thermoplastic Elastomer* (TPE) telah diteliti. Hasil penelitian menunjukkan bahwa suhu serta orientasi *build* memiliki pengaruh pada nilai kekerasan serta akurasi dimensi. Nilai kekerasan terbaik didapatkan pada *build perpendicular* yang diakibatkan oleh orientasi ini memiliki jumlah lapisan terbanyak dibandingkan kedua jenis *build* lainnya. Di sisi lain, porositas yang dimiliki sampel tidak berpengaruh signifikan pada hasil uji kekerasan. Akan tetapi dibutuhkan penelitian lebih lanjut yang difokuskan pada struktur mikro untuk mengkonfirmasi fenomena yang terjadi pada hasil cetak TPE pada suhu tinggi (240°C), salah satunya adalah untuk mengkonfirmasi apakah pada suhu tersebut TPE masih memiliki sifat *cross-linking* dengan karet atau telah menjadi polimer seutuhnya. Selain itu, pengujian struktur mikro juga dibutuhkan untuk mengkonfirmasi apakah ada pengaruh beban gravitasi pada TPE hasil cetak FDM, dimana penyusutan tidak dialami pada setiap sumbu.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. Pratama *et al.*, "A Review on Reinforcement Methods for Polymeric Materials Processed Using Fused Filament Fabrication (FFF)," *Polymers (Basel)*, vol. 13, no. 22, p. 4022, Nov. 2021, doi: 10.3390/polym13224022.
- [2] M. Dawoud, I. Taha, and S. J. Ebeid, "Mechanical behaviour of ABS: An experimental study using FDM and injection moulding techniques," *J. Manuf. Process.*, vol. 21, pp. 39–45, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.jmapro.2015.11.002.
- [3] S. . Masood and W. . Song, "Development of new metal/polymer materials for rapid tooling using Fused deposition modelling," *Mater. Des.*, vol. 25, no. 7, pp. 587–594, Oct. 2004, doi: 10.1016/j.matdes.2004.02.009.
- [4] E. Çantı and M. Aydın, "Effects of micro particle reinforcement on mechanical properties of 3D printed parts," *Rapid Prototyp. J.*, vol. 24, no. 1, pp. 171–176, Jan. 2018, doi: 10.1108/RPJ-06-2016-0095.
- [5] H. Jami, S. H. Masood, and W. Q. Song, "Dynamic Response of FDM Made ABS Parts in Different Part Orientations," *Adv. Mater. Res.*, vol. 748, pp. 291–294, Aug. 2013, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.748.291.



- [6] A. K. Sood, R. K. Ohdar, and S. S. Mahapatra, "Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts," *Mater. Des.*, vol. 31, no. 1, pp. 287–295, Jan. 2010, doi: 10.1016/j.matdes.2009.06.016.
- [7] I. Durgun and R. Ertan, "Experimental investigation of FDM process for improvement of mechanical properties and production cost," *Rapid Prototyp. J.*, vol. 20, no. 3, pp. 228–235, Apr. 2014, doi: 10.1108/RPJ-10-2012-0091.
- [8] B. Huang, S. H. Masood, M. Nikzad, P. R. Venugopal, and A. Arivazhagan, "Dynamic Mechanical Properties of Fused Deposition Modelling Processed Polyphenylsulfone Material," *Am. J. Eng. Appl. Sci.*, vol. 9, no. 1, pp. 1–11, Jan. 2016, doi: 10.3844/ajeassp.2016.1.11.
- [9] L. Cheng, P. Zhang, E. Biyikli, J. Bai, J. Robbins, and A. To, "Efficient design optimization of variable-density cellular structures for additive manufacturing: theory and experimental validation," *Rapid Prototyp. J.*, vol. 23, no. 4, pp. 660–677, Jun. 2017, doi: 10.1108/RPJ-04-2016-0069.
- [10] J. Nsengimana, J. Van der Walt, E. Pei, and M. Miah, "Effect of post-processing on the dimensional accuracy of small plastic additive manufactured parts," *Rapid Prototyp. J.*, vol. 25, no. 1, pp. 1–12, Jan. 2019, doi: 10.1108/RPJ-09-2016-0153.
- [11] E. Paz, M. Jiménez, L. Romero, M. del M. Espinosa, and M. Domínguez, "Characterization of the resistance to abrasive chemical agents of test specimens of thermoplastic elastomeric polyurethane composite materials produced by additive manufacturing," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 138, no. 32, p. 50791, Aug. 2021, doi: 10.1002/app.50791.
- [12] D. Manas *et al.*, "Mechanical Properties Changes of Irradiated Thermoplastic Elastomer," *Polymers (Basel)*, vol. 10, no. 1, p. 87, Jan. 2018, doi: 10.3390/polym10010087.
- [13] R. C. V. Fletes, E. O. C. López, P. O. Gudiño, E. Mendizábal, R. G. Núñez, and D. Rodrigue, "Ground tire rubber/polyamide 6 thermoplastic elastomers produced by dry blending and compression molding," *Prog. Rubber, Plast. Recycl. Technol.*, vol. 38, no. 1, pp. 38–55, Feb. 2022, doi: 10.1177/14777606211038956.
- [14] A. Garg, A. Bhattacharya, and A. Batish, "Effect of cold vapour treatment on geometric accuracy of fused deposition modelling parts," *Rapid Prototyp. J.*, vol. 23, no. 6, pp. 1226–1236, 2017, doi: 10.1108/RPJ-05-2016-0072.
- [15] Stephen Oluwashola Akande, "Dimensional Accuracy and Surface Finish Optimization of Fused Deposition Modelling Parts using Desirability Function Analysis," *Int. J. Eng. Res.*, vol. V4, no. 04, pp. 196–202, Apr. 2015, doi: 10.17577/IJERTV4IS040393.
- [16] G. Krolczyk, P. Raos, and S. Legutko, "Experimental analysis of surface roughness and surface texture of machined and fused deposition modelled parts," *Teh. Vjesn.*, vol. 21, no. 1, pp. 217–221, 2014, [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/260287927\\_Experimental\\_analysis\\_of\\_surface\\_roughness\\_and\\_surface\\_texture\\_of\\_machined\\_and\\_fused\\_deposition\\_modelled\\_parts](https://www.researchgate.net/publication/260287927_Experimental_analysis_of_surface_roughness_and_surface_texture_of_machined_and_fused_deposition_modelled_parts).
- [17] B. Arifvianto *et al.*, "Tensile properties of the FFF-processed thermoplastic polyurethane (TPU) elastomer," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 117, no. 5–6, pp. 1709–1719, 2021, doi: 10.1007/s00170-021-07712-0.
- [18] S. Ahn, M. Montero, D. Odell, S. Roundy, and P. K. Wright, "Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS," *Rapid Prototyp. J.*, vol. 8, no. 4, pp. 248–257, Oct. 2002, doi: 10.1108/13552540210441166.
- [19] J. Xiao and Y. Gao, "The manufacture of 3D printing of medical grade TPU," *Prog. Addit. Manuf.*, vol. 2, no. 3, pp. 117–123, Sep. 2017, doi: 10.1007/s40964-017-0023-1.
- [20] C. Hohimer, J. Christ, N. Aliheidari, C. Mo, and A. Ameli, "3D printed thermoplastic polyurethane with isotropic material properties," in *Behavior and Mechanics of Multifunctional Materials and Composites 2017*, Apr. 2017, vol. 10165, p. 1016511,

doi: 10.1117/12.2259810.

- [21] T. Nancharaiah, D. Ranga Raju, and V. Ramachandra Raju, "An experimental investigation on surface quality and dimensional accuracy of FDM components," *Int. J. Emerg. Technol.*, vol. 1, no. 2, pp. 106–111, 2010, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/267248480>.
- [22] D.-Y. Chang and B.-H. Huang, "Studies on profile error and extruding aperture for the RP parts using the fused deposition modeling process," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 53, no. 9–12, pp. 1027–1037, Apr. 2011, doi: 10.1007/s00170-010-2882-1.
- [23] V. K. Tiwary, A. P., A. S. Deshpande, and N. Rangaswamy, "Surface enhancement of FDM patterns to be used in rapid investment casting for making medical implants," *Rapid Prototyp. J.*, vol. 25, no. 5, pp. 904–914, Jun. 2019, doi: 10.1108/RPJ-07-2018-0176.
- [24] A. Armillotta, S. Bianchi, M. Cavallaro, and S. Minnella, "Edge quality in fused deposition modeling: II. experimental verification," *Rapid Prototyp. J.*, vol. 23, no. 4, pp. 686–695, Jun. 2017, doi: 10.1108/RPJ-02-2016-0021.
- [25] L. Shenzhen Esun Industrial Co., "Safety Data Sheet," *Mater. Saf. Data Sheet*, vol. 4(2), no. 1, pp. 8–10, 2012, [Online]. Available: [https://us.vwr.com/assetsvc/asset/en\\_US/id/16490607/contents](https://us.vwr.com/assetsvc/asset/en_US/id/16490607/contents).
- [26] American Society for Testing and Materials. ASTM., "Rubber Property—Durometer Hardness Materials, E. I., Manufacturing, C. B., Hardness, D., & Laboratories, C. (2017). Rubber Property—Durometer Hardness 1 Methods, S. T. (2008). Standard Test Methods for Rubber Property — Compression Set 1, i(Reapproved), 1–6.," *Astm D 2240*, pp. 1–13, 2017, doi: 10.1520/D2240-15.2.
- [27] 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, Oct. 2015, doi: 10.1016/j.compositesb.2015.06.013.
- [28] H. L. Tekinalp *et al.*, "Highly oriented carbon fiber–polymer composites via additive manufacturing," *Compos. Sci. Technol.*, vol. 105, pp. 144–150, Dec. 2014, doi: 10.1016/j.compscitech.2014.10.009.
- [29] B. Arifvianto, Y. B. Wirawan, U. A. Salim, S. Suyitno, and M. Mahardika, "Effects of extruder temperatures and raster orientations on mechanical properties of the FFF-processed polylactic-acid (PLA) material," *Rapid Prototyp. J.*, vol. 27, no. 10, pp. 1761–1775, Nov. 2021, doi: 10.1108/RPJ-10-2019-0270.
- [30] M. Ivey, G. W. Melenka, J. P. Carey, and C. Ayranci, "Characterizing short-fiber-reinforced composites produced using additive manufacturing," *Adv. Manuf. Polym. Compos. Sci.*, vol. 3, no. 3, pp. 81–91, Jul. 2017, doi: 10.1080/20550340.2017.1341125.
- [31] A. Sandi, M. Mahardika, S. I. Cahyono, and U. A. Salim, "Pengaruh variasi parameter cetak dan post process terhadap tingkat kekerasan spesimen hasil cetak tiga dimensi berbasis stereolithography ( SLA )," *Senat. 2021*, vol. VII, pp. 33–46, 2022, doi: 10.28989/senatik.v7i1.454.
- [32] M. Kurimoto, Y. Manabe, S. Mitsumoto, and Y. Suzuoki, "Layer interface effects on dielectric breakdown strength of 3D printed rubber insulator using stereolithography," *Addit. Manuf.*, vol. 46, no. June, p. 102069, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.addma.2021.102069.
- [33] F. Bähr and E. Westkämper, "Correlations between Influencing Parameters and Quality Properties of Components Produced by Fused Deposition Modeling," *Procedia CIRP*, vol. 72, no. January, pp. 1214–1219, 2018, doi: 10.1016/j.procir.2018.03.048.