

Pengaruh Kekerasan Terhadap Density Produk 3D Pinting Berfilament TPU 95A

M. Aldiansyah

Universitas Nusa Putra, Cibolang Kaler, Sukabumi dan 43152, Indonesia
m.aldiansyah_tm22@nusaputra.c.id

ABSTRACT

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi parameter layer height dan print speed terhadap sifat mekanik produk hasil cetak 3D menggunakan filamen TPU 95A. Metode eksperimen digunakan dengan mencetak spesimen berdasarkan standar ASTM D2240-15 dan ASTM D792-20, serta menguji kekerasan dan densitas. Variasi parameter yang diuji meliputi layer height 0,2 mm dan 0,25 mm serta print speed 70 mm/s, 80 mm/s, dan 90 mm/s. Hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan print speed dan layer height berbanding terbalik dengan nilai kekerasan dan densitas. Kombinasi layer height kecil dan print speed rendah menghasilkan sifat mekanik terbaik dengan nilai kekerasan dan densitas. Temuan ini menegaskan pentingnya pengaturan parameter proses pencetakan 3D untuk memperoleh kualitas produk TPU 95A yang optimal. Penelitian ini memberikan kontribusi dalam pengembangan teknik manufaktur aditif khususnya pada material elastomer fleksibel.

KATA KUNCI

Density
Kekerasan
3D Printing
TPU 95A
Produk Cetak 3D

1. Pendahuluan

Teknologi 3D Printing, khususnya dengan metode Fused Deposition Modeling (FDM), telah berkembang pesat dan banyak digunakan dalam pembuatan prototipe maupun produk fungsional. Salah satu material yang populer adalah Thermoplastic Polyurethane (TPU) 95A, yang dikenal karena sifat elastis dan fleksibilitasnya. Namun, sifat mekanik seperti kekerasan sangat dipengaruhi oleh parameter proses pencetakan, salah satunya adalah density (kepadatan infill).

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi density (kepadatan infill) terhadap tingkat kekerasan produk hasil cetak 3D menggunakan filamen TPU 95A. Dengan memahami hubungan antara parameter density dan kekerasan, diharapkan dapat diperoleh parameter optimal untuk menghasilkan produk dengan sifat mekanik yang sesuai kebutuhan.

Teknologi 3D printing telah mengalami perkembangan pesat dan menjadi salah satu metode manufaktur aditif yang banyak digunakan dalam berbagai sektor industri, mulai dari otomotif, medis, hingga produk konsumen. Salah satu material yang cukup populer digunakan dalam proses ini adalah filamen TPU (Thermoplastic Polyurethane), khususnya dengan tingkat kekerasan 95A. TPU 95A dikenal memiliki sifat fleksibel, tahan aus, dan cukup elastis, menjadikannya ideal untuk aplikasi yang memerlukan kombinasi antara kekuatan dan kelenturan[2].

Dalam proses 3D printing, parameter cetak seperti layer height, print speed, dan infill density sangat memengaruhi karakteristik mekanik produk akhir[1]. Salah satu sifat mekanik penting dari material TPU 95A adalah kekerasan, yang menunjukkan sejauh mana material mampu menahan deformasi akibat beban atau tekanan. Di sisi lain, density (kepadatan) merupakan ukuran seberapa padat atau rapat suatu objek dicetak, yang dapat dipengaruhi oleh parameter pengisian (infill) dan kualitas pencetakan.

Namun, meskipun keduanya merupakan parameter penting, hubungan antara kekerasan dan density pada produk 3D printing berbahan TPU 95A masih belum banyak diteliti secara mendalam. Dalam banyak kasus, peningkatan density diasumsikan akan menghasilkan produk yang lebih keras dan kuat, namun hal tersebut belum tentu berlaku secara linier, terutama pada material fleksibel seperti TPU.

Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh kekerasan terhadap density produk 3D printing berbahan TPU 95A. Dengan memahami keterkaitan antara kedua parameter ini, diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap optimalisasi proses pencetakan 3D yang lebih efisien dan menghasilkan produk dengan kualitas mekanik yang sesuai dengan kebutuhan aplikasi. Selain itu, hasil penelitian ini juga dapat menjadi referensi teknis dalam pengaturan parameter pencetakan 3D, khususnya bagi pengguna dan produsen yang memanfaatkan material TPU 95A.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen, yaitu pendekatan ilmiah yang dilakukan melalui pengamatan langsung dan pengendalian variabel dalam kondisi terkontrol guna menganalisis hubungan sebab-akibat antara variabel bebas dan variabel terikat. Variabel bebas dalam penelitian ini adalah kondisi proses pencetakan 3D, sedangkan variabel terikatnya adalah sifat mekanik produk cetakan. Pendekatan ini memungkinkan evaluasi sistematis terhadap pengaruh perubahan proses pencetakan terhadap kualitas hasil cetakan.

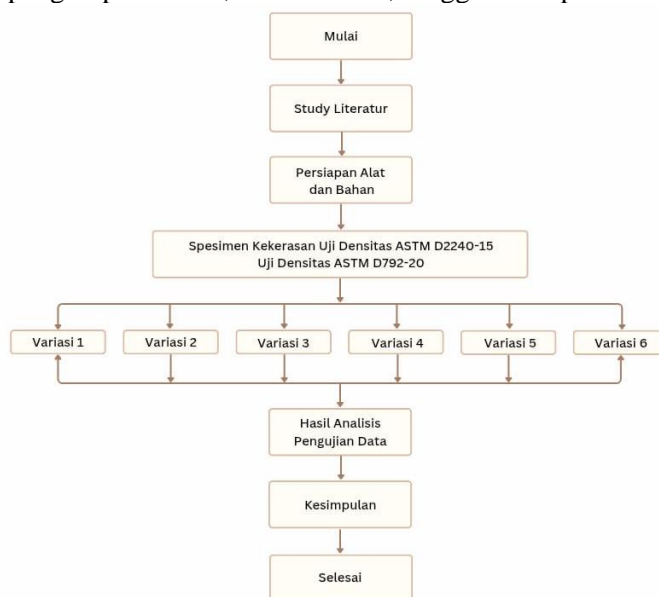
Parameter dalam penelitian ini dibagi menjadi parameter tetap dan parameter variasi. Parameter tetap meliputi Infill density 100% yang berarti seluruh volume spesimen cetak diisi penuh untuk memastikan kekuatan optimal, bed temperature diatur dalam suhu 600°C untuk meningkatkan ikatan antara spesimen dan permukaan cetak, Printing temperature 220°C dan infill patterns berjenis concentric agar memberikan struktur stabil dan tahan terhadap deformasi. Sedangkan parameter variasi yang diuji dalam penelitian ini yakni layer height dan print speed, dengan dua level variasi untuk layer height dan tiga level untuk print speed, seperti pada Tabel 2.1. Variasi ini bertujuan menentukan pengaturan optimal pencetakan 3D guna meningkatkan kualitas dan kekuatan mekanik produk akhir.

Tabel 2.1 Parameter Variasi

| Layer Height (mm) | Print Speed (mm/s) | Variasi Parameter |
|-------------------|--------------------|-------------------|
| 0,2 | 70 | Variasi 1 |
| 0,25 | 70 | Variasi 2 |
| 0,2 | 80 | Variasi 3 |
| 0,25 | 80 | Variasi 4 |
| 0,2 | 90 | Variasi 5 |
| 0,25 | 90 | Variasi 6 |

2.1. Diagram Alir

Tahapan penelitian yang akan dilaksanakan disajikan pada gambar 2.1, yang menunjukkan diagram alir penelitian. Diagram ini menunjukkan langkah-langkah penelitian yang dilakukan secara sistematis, mulai dari perencanaan, pengumpulan data, analisis hasil, hingga kesimpulan.



Gambar 2.1 Diagram Alir

Berdasarkan diagram alir pada Gambar 2.1. Penelitian ini dimulai dengan melakukan identifikasi masalah, perumusan masalah, dan penentuan tujuan penelitian, kemudian dilanjutkan dengan studi literatur yang berfokus pada pengumpulan informasi dan referensi dari sumber ilmiah yang relevan.

Selanjutnya, dilakukan persiapan alat dan bahan yang akan digunakan untuk proses pembuatan spesimen uji. Tahapan berikutnya adalah desain spesimen uji sesuai standar ASTM D2240-15 untuk uji kekerasan, ASTM D792-20 untuk uji densitas. Setelah desain selesai, spesimen uji dibuat menggunakan teknologi 3D printing dengan variasi parameter seperti layer height dan print speed untuk menghasilkan enam variasi spesimen.

Setiap variasi spesimen tersebut kemudian diuji menggunakan uji kekerasan ASTM D2240-15, uji densitas ASTM D792-20 untuk mengetahui karakteristik sifat mekanik dan sifat fisiknya. Setelah data pengujian terkumpul, dilakukan analisis data dan pembahasan. Berdasarkan hasil analisis data dan pembahasan, dibuat kesimpulan mengenai pengaruh parameter tersebut terhadap sifat mekanik spesimen yang diuji. Dengan demikian, penelitian ini diakhiri pada tahapan kesimpulan dan dinyatakan selesai.

2.2. Studi Literatur

Didalam melakukan sebuah penelitian ilmiah perlu dilaksanakan teknik penyusunan yang tersistematis agar mudah dalam melakukan penyusunan, dalam Menyusun laporan penelitian ini juga langkah pertama yang dilakukan yaitu melaksanakan studi literatur pada jurnal dan buku-buku mengenai 3D Printing, parameter 3D printing, jenis-jenis filament, pengujian sifat mekanik material, pengujian sifat fisik material, serta analisis data. Data yang didapatkan dari hasil studi literatur ini akan digunakan sebagai referensi terkait penelitian yang akan dilaksanakan.

2.3. Perisapan Alat dan Bahan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini mencakup berbagai perangkat utama yang mendukung seluruh tahapan, mulai dari perancangan spesimen, proses pencetakan, hingga pengujian dan analisis data. Selain itu, penelitian ini juga memanfaatkan beberapa jenis bahan penting, baik sebagai material utama untuk pembuatan spesimen cetak maupun sebagai cairan pendukung dalam proses pengukuran sifat fisik dan mekanik material. Seluruh alat dan bahan tersebut dipilih serta digunakan secara sistematis agar setiap tahap penelitian dapat berjalan dengan valid dan terkontrol, sehingga hasil yang diperoleh dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah.

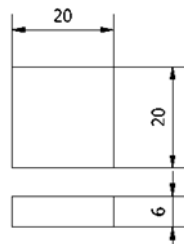
Tabel 2.2 Alat dan Bahan

| No. | Nama Alat/Bahan | Spesifikasi | Fungsi |
|-----|-------------------|---|--|
| 1. | Laptop/PC | | Menjalankan software desain, slicing, pengolahan data, dan analisis statistic. |
| 2. | Autodesk Inventor | Software CAD 3D, versi 2015. | Mendesain model 3D specimen uji sesuai standar pengujian. |
| 3. | Ultimaker Cura | Software slicing 3D printing, kompatibel dengan berbagai printer FDM. | Mengatur parameter cetak (layer height, print speed, infill, dll) dan menghasilkan G-Code. |
| 4. | OriginPro | Software analisis dan visualisasi data, grafik statistic. | Membuat grafik hasil uji kekerasan, dan densitas. |
| 5. | IBM SPSS | Software statistic, versi 25 atau setara. | Analisis statistic data hasil pengujian (mean, standar deviasi, ANOVA, dsb). |
| 6. | 3D Printer | Ender-3Pro, FDM, area cetak 220 x 220 x 250 mm, nozzle 0,4 mm. | Mencetak specimen uji dari filamen TPU 95A dengan parameter terkontrol. |

| | | | |
|-----|------------------------------|---|--|
| 7. | Scrap | Pisau/alat bantu pembersih. | Mengangkat hasil cetak dari bed printer dan membersihkan sisa filamen. |
| 8. | Vernier Caliper | Akurasi 0,01 mm, Panjang maksimal 150 mm. | Mengukur dimensi spesimen uji secara presisi. |
| 9. | Timbangan Analitik | Ketelitian 0,001 gram, kapasitas 200 gram. | Menimbang massa specimen untuk pengujian densitas. |
| 10. | Gelas Ukur 250 ml | Volume maksimal 250 ml, material kaca/plastic. | Wadah cairan (metanol) untuk pengujian densitas specimen. |
| 11. | Durometer | Durometer digital Shore A, ketelitian 0,01 sesuai ASTM D2240. | Mengukur kekerasan spesimen TPU 95A pada beberapa titik permukaan. |
| 12. | Filamen TPU 95A | Diameter 1,75 mm, Shore A, densitas 1,21 g/cm ³ . | Material utama pencetakan specimen uji 3D printing. |
| 13. | Metanol (CH ³ OH) | Densitas 0,791 g/cm ³ (25°C), cairan bening. | Media perendam pada uji densitas (prinsip Archimedes) untuk menentukan massa jenis specimen. |

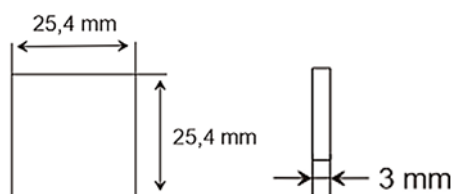
2.4. Desain Spesimen Uji ASTM D2240-15 dan ASTM D792-15

Pembuatan desain spesimen uji kekerasan uji densitas dan kekuatan tarik disini menggunakan software Autodesk inventor 2015, untuk spesimen uji kekerasan dimensi ukuran dibuat sesuai standar ASTM D2240-15 yaitu dengan ukuran 20x20 mm atau lebih besar dengan ketebalan minimal 6 mm.



Gambar 2.2 Dimensi Spesimen Uji Kekerasan

Sedangkan desain uji densitas, ukuran spesimen dibuat sesuai dengan standar ASTM D792-20 Standar ini merupakan salah satu metode yang umum digunakan untuk mengukur densitas plastik, termasuk material elastomer seperti TPU 95A.



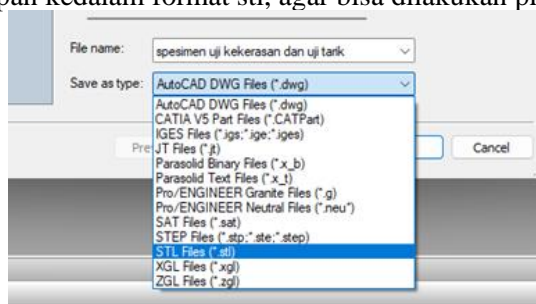
Gambar 2.3 Dimensi spesimen uji densitas

2.5. Proses Pembuatan Spesimen

Spesimen yang akan dibuat dalam penelitian ini yaitu menggunakan mesin 3D printer dengan jumlah total 48 pcs spesimen, dimana 18 pcs spesimen uji kekerasan, 18 pcs spesimen uji densitas dan 12 pcs spesimen uji tarik. Spesimen uji kekerasan dan uji densitas diduplikasi sebanyak tiga kali, sementara spesimen uji tarik diduplikasi sebanyak dua kali untuk memastikan akurasi serta keandalan data, hal ini diambil untuk meminimalisir kesalahan eksperimen dan menghasilkan data yang lebih akurat. Berikut adalah tahapan-tahapan proses pembuatan spesimen uji kekerasan dan uji tarik.

2.5.1. Desain spesimen menggunakan Software Autodesk 2015.

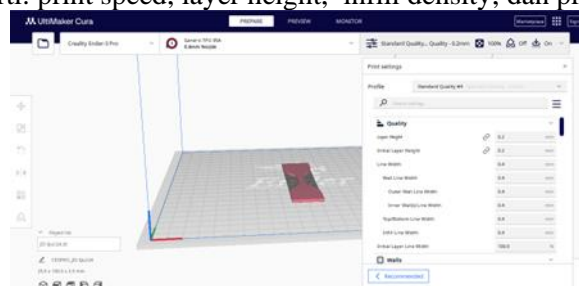
Pada tahap pertama ini dilakukan pembuatan desain spesimen uji kekerasan, uji densitas dan uji tarik sesuai dengan standar ukurannya menggunakan Software Autodesk inventor 2015 dimensi ukuran spesimen uji yang telah di desain terdapat pada gambar 2.10 dan gambar 2.11 diatas. Selanjutnya spesimen diekspor dan disimpan kedalam format stl, agar bisa dilakukan proses slice.



Gambar 2.4 Mengekspor file kedalam format stl

2.5.2. Pengaturan parameter pada Software Ultimake Cura

Pada tahap kedua ini dilakukan pengaturan parameter proses pencetakan spesimen. Beberapa parameter yang diatur seperti: print speed, layer height, infill density, dan printing temperature.



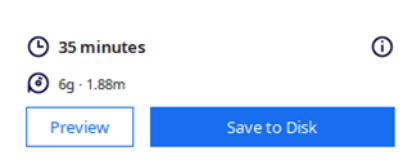
Gambar 2.5 Pengaturan Parameter

2.5.3. Menyimpan parameter yang telah diatur kedalam format g-code.

Setelah dilakukan pengaturan parameter, agar pengaturan tersebut terbaca oleh 3D printer file harus dirubah kedalam format g-code.

2.5.4. Memindahkan file g-code kedalam SD-Card.

File g-code yang telah dibuat kemudian dipindahkan kedalam SD-Card agar dapat dilakukan pencetakan produk.



Gambar 2.6 Pemindahan File

2.5.5. Menghidupkan dan melakukan preheat pada mesin 3D Printing

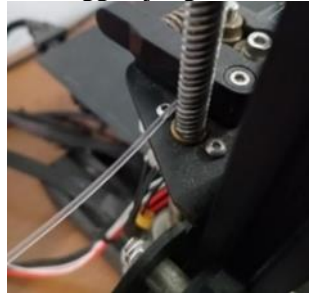
Sebelum melakukan proses pencetakan, mesin 3D printer harus dinyalakan terlebih dahulu dan dilakukan preheat, tujuannya untuk memastikan nozzle tidak tersumbat dan untuk menghilangkan sisa filament pada percetakan sebelumnya.



Gambar 2.7 Preheat

2.5.6. Memasukkan filamen kedalam ekstruder.

Filamen dimasukkan kedalam ekstruder hingga ujung dari filamen menyentuh nozzle.



Gambar 2.8 Pemasangan Filamen

2.5.7. Memilih file yang akan dicetak melalui display 3D Printing

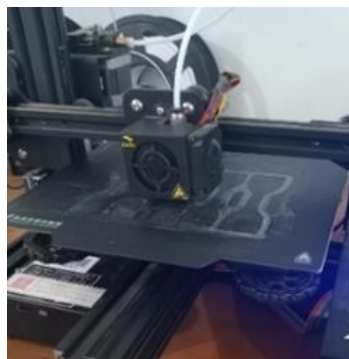
File yang sudah dipindahkan pada sd card dipilih melalui display untuk proses pencetakan pada mesin 3D printer.



Gambar 2.9 Pemilihan File

2.5.8. Proses pencetakan specimen

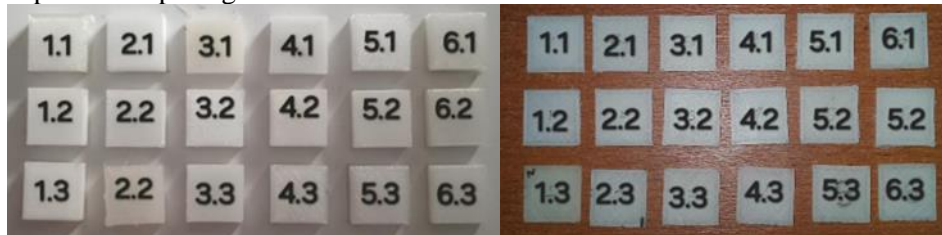
Mesin akan mencetak specimen secara otomatis mengikuti g-code yang sudah diatur pada Ultimaker Cura.



Gambar 2.10 Pencetakan Spesimen

2.5.9. Melakukan penamaan pada setiap specimen

Lakukan penamaan menggunakan spidol pada setiap spesimen yang telah dibuat dengan variasi parameter agar tidak tertukar. Adapun hasil pencetakan spesimen uji kekerasan dan uji densitas yang telah dibuat dapat dilihat pada gambar 2.11.



Gambar 2.11 Hasil Pencetakan 3D printing Spesimen (kiri) uji kekerasan, (kanan) uji densitas

2.6. Pengujian Spesimen

2.6.1. Pengujian kekerasan ASTM D2240-15

Prosedur Pengujian kekerasan dilakukan sesuai standar ASTM D2240-15 dengan menggunakan Durometer Digital Shore A dengan tingkat ketelitian 0,01. Adapun tahapan pengujian kekerasan meliputi: memastikan spesimen uji bebas dari kotoran dan debu kemudian di letakkan pada bidang yang rata, menyiapkan dan mengkalibrasi durometer, tekan durometer secara tegak lurus pastikan indenter tertancap sempurna pada permukaan spesimen uji, pengujian dilakukan pada lima titik yang berbeda dengan jarak antar titik pengukuran setidaknya 6 mm antar titik pengukuran lainnya.



Gambar 2.12 Pengujian Kekerasan: (kiri) Pengujian menggunakan Durometer Digital Shore A, (kanan) Ilustrasi titik pengujian

Pengukuran dilakukan pada beberapa titik permukaan spesimen guna memastikan bahwa nilai kekerasan yang diperoleh mencerminkan kondisi material secara menyeluruh. Hal ini bertujuan untuk meminimalkan potensi kesalahan akibat ketidakteraturan permukaan atau ketidakteragaman struktur material. Nilai kekerasan dari tiap titik kemudian dihitung rata-ratanya untuk mendapatkan nilai kekerasan akhir dari spesimen.

2.6.2. Pengujian densitas ASTM D792-20

Pengujian densitas dilakukan untuk mengetahui sifat fisik material TPU 95A hasil pencetakan 3D, khususnya dalam kaitannya dengan massa jenis yang dapat memengaruhi kekerasan material. Densitas menjadi salah satu indikator penting dalam menilai kepadatan struktur internal material, sehingga hasil pengujian ini digunakan sebagai data pendukung dalam menganalisis hubungan antara kekerasan dan kerapatan spesimen yang dihasilkan dari variasi parameter pencetakan.

Pengujian ini mengacu pada standar ASTM D792-20, yaitu metode penentuan densitas plastik padat dengan prinsip Archimedes melalui teknik perendaman dalam fluida. Pengukuran dilakukan menggunakan timbangan digital analitik dengan ketelitian 0,001 gram. Setiap spesimen ditimbang dalam dua kondisi, yaitu saat berada di udara (massa kering) dan saat terendam sepenuhnya dalam fluida (massa basah). Prosedur penimbangan ditunjukkan pada Gambar 2.13



Gambar 2.13 Pengujian Densitas : (kiri) Penimbangan Berat di udara, (kanan) Penimbangan Berat di air

Fluida yang digunakan untuk perendaman dalam pengujian ini adalah metanol (CH_3OH), karena memiliki densitas yang cukup rendah sehingga memungkinkan spesimen TPU 95A yang cenderung ringan dan mengapung di air dapat tenggelam sepenuhnya. Selain itu, metanol memiliki tegangan permukaan dan viskositas yang rendah, sehingga mampu mengurangi terbentuknya gelembung udara pada permukaan spesimen selama pencelupan. Hal ini penting untuk menjaga kestabilan dan akurasi pembacaan massa.

Suhu ruangan saat pengujian dicatat sebesar 25°C , sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.30. Berdasarkan data pada Lampiran 9, densitas metanol pada suhu tersebut adalah $0,791 \text{ g/cm}^3$, dan nilai ini digunakan dalam perhitungan densitas spesimen.



Gambar 2.14 Suhu metanol saat pengujian

Namun, spesimen TPU 95A yang digunakan merupakan hasil pencetakan 3D dengan metode Fused Deposition Modeling (FDM), sehingga berpotensi memiliki pori-pori mikro antar lapisan cetakan. Struktur berpori ini dapat menyebabkan metanol meresap ke dalam spesimen jika terendam terlalu lama, yang berisiko mengubah massa dan memengaruhi keakuratan hasil pengujian[4]. Oleh sebab itu, proses pencelupan dilakukan secara cepat dan terkontrol untuk meminimalkan penyerapan cairan.

Setiap variasi spesimen diuji sebanyak tiga kali pengujian dengan tiga replikasi, sehingga menghasilkan data yang lebih akurat dan representatif. Nilai rata-rata dari hasil tersebut digunakan sebagai nilai densitas akhir. Hasil pengujian densitas digunakan sebagai data pendukung dalam menganalisis keterkaitan antara struktur internal material dan sifat kekerasan, karena densitas yang lebih tinggi umumnya menunjukkan material yang lebih padat dan berpotensi memiliki kekerasan yang lebih tinggi.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Hasil Uji Kekerasan

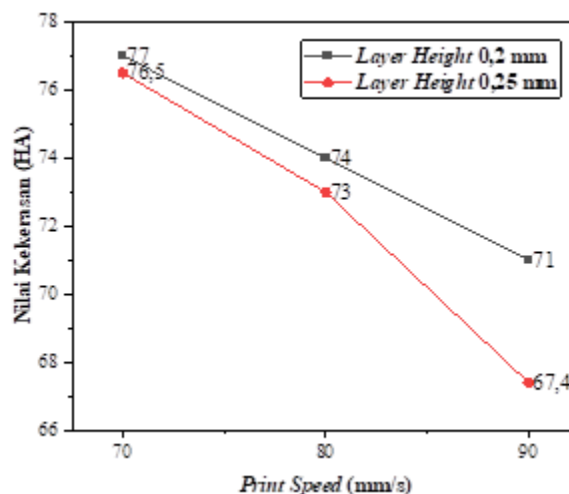
Pengujian kekerasan dilakukan untuk mengetahui sejauh mana material TPU 95A mampu menahan deformasi setelah melalui proses pencetakan 3D dengan variasi parameter layer height dan print speed. Uji kekerasan dilakukan menggunakan metode pengukuran Shore A pada lima titik berbeda untuk setiap spesimen, kemudian dihitung nilai rata-ratanya. Hasil pengujian disajikan pada Tabel 3.1 berikut:

Tabel 3.1 Hasil Pengujian Kekerasan

| Nama Spesimen | Layer Height (mm) | Print Speed (mm/s) | Nilai Kekerasan Shore A | | | Rata-rata (HA) |
|---------------|-------------------|--------------------|-------------------------|------|------|----------------|
| | | | Replikasi | | | |
| | | | 1 | 2 | 3 | |
| Variasi 1 | 0,2 | 70 | 77,1 | 76,8 | 77,1 | 77 |
| Variasi 2 | 0,25 | 70 | 76,6 | 76,3 | 76,8 | 76,5 |
| Variasi 3 | 0,2 | 80 | 74 | 73,6 | 74,4 | 74 |
| Variasi 4 | 0,25 | 80 | 73 | 72,6 | 73,4 | 73 |
| Variasi 5 | 0,2 | 90 | 70,2 | 71 | 71,8 | 71 |
| Variasi 6 | 0,25 | 90 | 67 | 67,2 | 68 | 67,4 |

Berdasarkan Tabel 3.1 dapat dilihat bahwa peningkatan print speed berdampak pada penurunan kekerasan material TPU 95A untuk kedua layer height yang diuji. Kekerasan tertinggi diperoleh pada spesimen variasi 1 dengan layer height 0,2 mm dan print speed 70 mm/s sebesar 74,8 HA, sedangkan kekerasan terendah terdapat pada spesimen dengan layer height 0,25 mm dan print speed 90 mm/s sebesar 67,1 HA [5].

Untuk memberikan visualisasi hubungan antara parameter cetak dan kekerasan, dibuat grafik hubungan antara print speed terhadap nilai kekerasan untuk masing-masing layer height seperti ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Grafik hubungan print speed terhadap nilai kekerasan pada dua variasi layer height

Berdasarkan grafik pada Gambar 4.1, terlihat bahwa nilai kekerasan menurun seiring meningkatnya print speed. Pada layer height 0,2 mm, nilai kekerasan menurun dari 77 menjadi 74 dan kemudian 71. Sedangkan pada layer height 0,25 mm, nilai kekerasan menurun dari 76,5 menjadi 73 dan 67,4. Hal ini menunjukkan bahwa semakin tinggi print speed, kekerasan cenderung menurun. Selain itu, pada setiap print speed, nilai kekerasan untuk layer height 0,2 mm selalu lebih tinggi dibandingkan 0,25 mm, mengindikasikan bahwa layer height juga berpengaruh signifikan terhadap nilai kekerasan[3].

Untuk mengevaluasi sebaran dan konsistensi data pengujian kekerasan, digunakan analisis statistik deskriptif berupa nilai rata-rata, standar deviasi, dan koefisien variasi (CV). Standar deviasi mengukur penyimpangan data terhadap nilai rata-ratanya, sementara koefisien variasi menunjukkan keragaman relatif dari data tersebut dan dinyatakan dalam persen. Koefisien variasi dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$CV = \left(\frac{SD}{X}\right) = 100\%$$

Sebagai contoh, perhitungan nilai CV untuk Variasi 1 dapat dilakukan sebagai berikut:

$$CV = \left(\frac{0.173}{77}\right) = 0.22\%$$

Koefisien variasi dihitung secara manual berdasarkan nilai rata-rata dan standar deviasi yang diperoleh dari hasil analisis menggunakan bantuan software IBM SPSS Versi 25. nilai CV yang rendah menunjukkan bahwa data yang diperoleh bersifat relatif homogen. Untuk data selengkapnya dari seluruh variasi, termasuk nilai mean, standar deviasi, dan koefisien variasi yang dihitung dengan cara serupa, dapat dilihat pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Statistik Deskriptif Kekerasan

| Spesimen | Layer Height (mm) | Print Speed (mm/s) | Mean | Std. Deviasi | CV (%) |
|-----------|-------------------|--------------------|------|--------------|--------|
| Variasi 1 | 0,2 | 70 | 77 | 0,173 | 0,22% |
| Variasi 2 | 0,25 | 70 | 76,5 | 0,251 | 0,33% |
| Variasi 3 | 0,2 | 80 | 74 | 0,400 | 0,54% |
| Variasi 4 | 0,25 | 80 | 73 | 0,400 | 0,55% |
| Variasi 5 | 0,2 | 90 | 71 | 0,800 | 1,13% |
| Variasi 6 | 0,25 | 90 | 67,4 | 0,529 | 0,23% |

Berdasarkan Tabel 3.2, nilai standar deviasi pengukuran berkisar antara 0,100 hingga 0,200. Nilai standar deviasi terendah sebesar 0,100 terdapat pada Variasi 5, yang menunjukkan konsistensi hasil pengukuran yang tinggi karena penyebaran data yang sempit terhadap nilai rata-rata. Standar deviasi tertinggi sebesar 0,200 terdapat pada Variasi 3, yang mengindikasikan penyebaran data paling besar di antara semua variasi. Nilai koefisien variasi (CV) untuk seluruh variasi berada di bawah 0,30%, yang menandakan tingkat presisi tinggi pada semua kondisi pencetakan. Variasi 1 dan 5 memiliki CV terkecil sebesar 0,15%, menunjukkan hasil pengukuran yang paling stabil, sedangkan CV tertinggi sebesar 0,28% terdapat pada Variasi 3, yang mengindikasikan keragaman data yang sedikit lebih besar dibandingkan variasi lainnya.

3.1.1. Hasil Uji Density

Pengujian densitas bertujuan untuk mengetahui sifat fisik dan mengamati sejauh mana parameter layer height dan print speed memengaruhi tingkat kerapatan hasil cetak TPU 95A. Adapun standar uji densitas yang digunakan yaitu standar ASTM D792-20 (hukum Archimedes) dengan menggunakan persamaan uji densitas sebagai berikut:

$$Densitas = \frac{m_k}{m_k - m_t} \times \rho_{cairan}$$

dengan:

m_k = berat benda di udara (g)

m_t = berat benda saat dicelupkan dalam cairan (g)

ρ_{cairan} = massa jenis cairan (g/cm³).

Sebagai contoh, densitas dari spesimen variasi satu replikasi satu dihitung sebagai berikut :

$$Densitas = \frac{2.08g}{0.51g} \times 0.790g/cm^2$$

Perhitungan serupa dilakukan untuk variasi lainnya. Hasil lengkap perhitungan nilai densitas disajikan pada Tabel 3.3 berikut:

Tabel 3.3. Hasil pengujian densitas

| Nama Spesimen | layer Height (mm) | Print Speed (mm/s) | Densitas (g/cm ³) | | | Rata-rata (g/cm ³) |
|---------------|-------------------|--------------------|-------------------------------|-------|-------|--------------------------------|
| | | | Replikasi | | | |
| | | | 1 | 2 | 3 | |
| Variasi 1 | 0,2 | 70 | 1,046 | 1,046 | 1,040 | 1,044 |
| Variasi 2 | 0,25 | 70 | 1,035 | 1,029 | 1,035 | 1,033 |
| Variasi 3 | 0,2 | 80 | 1,030 | 1,029 | 1,030 | 1,029 |
| Variasi 4 | 0,25 | 80 | 1,009 | 1,009 | 1,009 | 1,009 |
| Variasi 5 | 0,2 | 90 | 1,001 | 1,001 | 1,001 | 1,001 |
| Variasi 6 | 0,25 | 90 | 0,993 | 0,992 | 0,992 | 0,992 |

Berdasarkan hasil uji densitas pada Tabel 3.3, nilai densitas tertinggi diperoleh pada kombinasi layer height 0,2 mm dan print speed 70 mm/s pada Variasi 1, yaitu sebesar 1,044 g/cm³. Sebaliknya, densitas terendah tercatat pada layer height 0,25 mm dan print speed 90 mm/s pada Variasi 6, sebesar 0,992 g/cm³. Pola ini menunjukkan bahwa kombinasi layer height besar dan print speed tinggi menghasilkan cetakan dengan kerapatan yang rendah, sedangkan kombinasi layer height kecil dan print speed rendah menghasilkan cetakan yang lebih padat.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian, dapat disimpulkan bahwa parameter layer height dan print speed berpengaruh signifikan terhadap kekerasan, densitas, dan kekuatan tarik produk 3D printing TPU 95A. Semakin tinggi print speed dan layer height, nilai kekerasan, densitas, dan kekuatan tarik cenderung menurun. Kombinasi layer height kecil (0,2 mm) dan print speed rendah (70 mm/s) menghasilkan sifat mekanik terbaik, yaitu kekerasan, densitas, dan kekuatan tarik tertinggi. Oleh karena itu, pemilihan parameter proses yang tepat sangat penting untuk memperoleh hasil cetak.

Daftar Pustaka

- [1] D. Mahandika and H. Sukma, "Analisa hasil cetak 3D printer terhadap pengujian tarik material ABS+ dengan variasi densitas infill." Jurnal Ilmiah Program Studi Magister Teknik Mesin, vol 15, no. 1.
- [2] D. Mardiyana, D. I. Sumarno, M. A. S. Yudono, and L. A. Islami, "Kajian kelayakan sifat mekanik produk 3D printing FDM berfilamen eFlex TPU-95A untuk aplikasi polisi tidur," Jurnal Rekayasa Mesin, vol. 19, no. 3, pp. 457–468, 2024.
- [3] R. Lesmana, D. Mardiyana, and D. I. Sumarno, "Analysis of the effect of print speed and layer height on the hardness of TPU-95A filament 3D-printed products," Jurnal Konversi Energi dan Manufaktur, pp. 18–24, 2025. K. Elissa, "Title of paper if known," unpublished.
- [4] R. N. A. Santoso, "Pengaruh parameter 3D printing material filamen thermoplastic polyurethane (TPU) terhadap kualitas produk 3D printing fused filament fabrication (FFF): Studi kasus soft mold vacuum infusion process (VIP)," 2022.
- [5] T. Gulo, D. Mardiyana, and D. I. Sumarno, "Analysis of print speed variations effect and nozzle temperature on the tensile strength of 3D printed TPU-95A products," Jurnal Konversi Energi dan Manufaktur, pp. 53–60, 2025.