

Kajian Kelayakan Sifat Mekanik Produk 3D Printing FDM Berfilamen eFlex TPU-95A untuk Aplikasi Polisi Tidur

Dani Mardiyana^{1*}, Dodi Iwan Sumarno¹, Muchtar Ali Setyo Yudono², Lazuardi Akmal Islami¹

¹Program Studi Teknik Mesin, Universitas Nusa Putra

Jl. Raya Cibolang Cisaat - Sukabumi No.21, Cibolang Kaler, Cisaat, Kabupaten Sukabumi, Jawa Barat 43152

²Jurusan Teknik Elektro, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa

Jl. Jenderal Sudirman Km 3, Kotabumi, Kec. Purwakarta, Kota Cilegon, Banten 42435

*E-mail: dani.mardiyana@nusaputra.ac.id

Diajukan: 10-09-2024; Diterima: 19-12-2024; Diterbitkan: 21-12-2024

Abstrak

Polisi tidur berfungsi meningkatkan keselamatan lalu lintas dengan mengurangi kecepatan kendaraan di area berisiko tinggi. Salah satu metode produksi polisi tidur adalah melalui teknologi *additive manufacturing* (AM) menggunakan mesin 3D printer berjenis *fused deposition modeling* (FDM) dengan filamen eFlex TPU-95A. Filamen ini memiliki sifat fleksibel yang cocok untuk aplikasi tersebut, namun sifat mekanik seperti kekerasan, keuletan, dan kekuatan tarik sangat dipengaruhi oleh pengaturan parameter proses pencetakan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh variasi parameter pencetakan, seperti suhu *nozzle*, kecepatan pencetakan, dan ketebalan lapisan, terhadap sifat mekanik produk 3D *printing* dari filamen TPU-95A. Metode Taguchi L9 (3³) digunakan untuk menentukan kombinasi parameter optimal dalam proses pencetakan. Uji sifat mekanik dilakukan pada beberapa sampel produk hasil eksperimen. Berdasarkan hasil penelitian, sampel 1, 3, dan 4 menunjukkan sifat mekanik yang sangat baik dalam hal fleksibilitas dan ketahanan terhadap deformasi dinamis, sehingga layak digunakan sebagai bahan alternatif untuk pembuatan polisi tidur. Penelitian ini menyimpulkan bahwa produk 3D *printing* dengan filamen TPU-95A dapat memenuhi standar sifat mekanik yang diperlukan untuk aplikasi polisi tidur, terutama dalam hal daya tahan dan performa terhadap beban dinamis, dengan penyesuaian parameter pencetakan yang tepat.

Kata kunci: 3D printing; Metode Taguchi; Polisi tidur; sifat mekanik; TPU-95A

Abstract

Speed bumps serve to enhance road safety by reducing vehicle speeds in high-risk areas. One method of producing speed bumps is through additive manufacturing (AM) technology, using a fused deposition modeling (FDM) 3D printer with eFlex TPU-95A filament. This filament has flexible properties suitable for such applications; however, mechanical properties such as hardness, toughness, and tensile strength are highly influenced by the adjustment of 3D printing process parameters. Therefore, this study aims to examine the impact of varying printing parameters, such as nozzle temperature, printing speed, and layer thickness, on the mechanical properties of 3D-printed products made from TPU-95A filament. The Taguchi L9 (3³) method was employed to determine the optimal combination of printing parameters. Mechanical property tests were conducted on several experimental product samples. Based on the findings, samples 1, 3, and 4 exhibited excellent mechanical properties in terms of flexibility and resistance to dynamic load deformation, making them viable alternatives for producing speed bumps. The study concludes that 3D-printed products using TPU-95A filament can meet the required mechanical standards for speed bump applications, particularly in terms of durability and performance under dynamic loads, with appropriate adjustments to the printing parameters.

Keywords: 3D Printing; Mechanical Properties; Speed Bump; Taguchi Method; TPU-95A

1. Pendahuluan

Polisi tidur, yang juga dikenal sebagai rintangan jalan atau speed bump, merupakan elemen fisik yang ditempatkan di permukaan jalan atau lintasan kendaraan dengan tujuan untuk mengurangi kecepatan kendaraan [1], [2]. Biasanya, polisi tidur terdiri dari satu atau beberapa bagian yang terbuat dari bahan elastis, kuat, dan tahan lama, yang dipasang pada permukaan jalan dengan jarak tertentu [3], [4]. Tujuan utama dari keberadaan polisi tidur adalah untuk meningkatkan keselamatan jalan raya dengan menurunkan kecepatan kendaraan di area berisiko tinggi, seperti zona sekolah, kawasan pemukiman, atau area dengan lalu lintas pejalan kaki yang tinggi [5].

Pembuatan polisi tidur dapat dilakukan melalui teknologi *additive manufacturing* (AM), salah satu alternatifnya

adalah menggunakan mesin 3D printer berjenis *fused deposition modeling* (FDM) yang memanfaatkan *material filament* eFlex TPU-95A [6], [7], [8]. Filamen ini memiliki karakteristik elastisitas tinggi, daya lentur yang baik, dan ketahanan terhadap aus, menjadikannya material yang ideal untuk komponen polisi tidur [9]. Namun, untuk mencapai sifat mekanik yang optimal dalam hal kekerasan, keuletan, dan kekuatan tarik pada produk yang dicetak menggunakan filamen eFlex TPU-95A, diperlukan pengaturan parameter proses pencetakan 3D yang tepat, seperti suhu *nozzle*, kecepatan pencetakan, dan pola isi [10], [11].

Penyesuaian parameter proses pada 3D printer harus dilakukan dengan perencanaan yang matang, oleh karena itu, metode Taguchi dapat menjadi alternatif yang tepat untuk digunakan. Metode Taguchi merupakan pendekatan statistik dalam perancangan eksperimen yang bertujuan untuk mengoptimalkan kualitas produk dan proses manufaktur [12]. Metode ini telah berhasil diterapkan dalam berbagai penelitian sebelumnya dalam konteks pencetakan 3D untuk meningkatkan efisiensi dan kualitas hasil cetakan, meskipun sebagian besar penelitian tersebut lebih berfokus pada penggunaan filamen jenis lain seperti PLA dan ABS [13], [14], [15], [16]. Hingga saat ini, belum terdapat penelitian yang secara khusus meneliti penggunaan filamen eFlex TPU-95A untuk aplikasi polisi tidur. Oleh karena itu, penelitian ini memiliki signifikansi yang besar dalam menjadi pelopor pemahaman dan optimasi pencetakan 3D menggunakan filamen eFlex TPU-95A.

Mempertimbangkan kebutuhan produk polisi tidur yang mengharuskan sifat mekanik yang baik dalam hal kekerasan, keuletan, dan kekuatan tarik yang optimal, serta kurangnya penelitian yang berfokus pada filamen eFlex TPU-95A, penelitian ini bertujuan untuk melakukan "Kajian Kelayakan Sifat Mekanik Produk 3D *Printing* FDM Berfilamen eFlex TPU-95A untuk Aplikasi Polisi Tidur." Melalui penelitian ini, diharapkan dapat ditemukan parameter-parameter optimal yang mampu memaksimalkan kualitas dan efisiensi pencetakan 3D menggunakan filamen eFlex TPU-95A, serta mendukung pengembangan produk polisi tidur yang lebih efektif dan aman.

2. Material dan metodologi

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental, yang merupakan metode ilmiah di mana pengumpulan data dilakukan melalui pengamatan langsung dan manipulasi variabel-variabel yang relevan dalam kondisi terkontrol [17]. Metode ini dipilih untuk memfasilitasi analisis hubungan kausal antara variabel independen (parameter proses pencetakan 3D) dan variabel dependen (sifat mekanik produk hasil cetak). Melalui pendekatan eksperimen, peneliti dapat secara sistematis mengevaluasi pengaruh perubahan variabel-variabel proses pencetakan terhadap kualitas hasil cetakan.

Dalam penelitian ini, bahan yang digunakan adalah filamen eFlex TPU-95A, yang merupakan termoplastik poliuretan elastomer dengan diameter 1,75 mm. Filamen ini akan dicetak menggunakan mesin 3D printer Ender-3 Pro untuk memproduksi spesimen uji dengan tujuan menganalisis pengaruh berbagai parameter proses terhadap sifat mekanik produk cetak. Penggunaan bahan ini dipilih karena sifat elastomerik dan kemampuannya untuk diaplikasikan pada polisi tidur yang membutuhkan material yang fleksibel dan tahan lama.

Tahapan penelitian disajikan dalam Gambar 1, yang menunjukkan diagram alir penelitian. Diagram ini menggambarkan langkah-langkah yang dilakukan secara sistematis, mulai dari perencanaan, pengumpulan data, analisis hasil, hingga penarikan kesimpulan. Proses penelitian ini melibatkan pengaturan variabel yang memengaruhi proses pencetakan, seperti suhu pencetakan, kecepatan cetak, dan tinggi lapisan, yang masing-masing diuji pada beberapa variasi level. Dengan demikian, pendekatan eksperimen ini diharapkan dapat menghasilkan data yang valid dan dapat diandalkan untuk menentukan parameter pencetakan optimal yang berpengaruh terhadap karakteristik mekanik produk.

Penelitian ini bertujuan untuk memberikan pemahaman yang mendalam tentang hubungan antara parameter pencetakan dengan hasil cetakan produk 3D printing berfilamen eFlex TPU-95A, khususnya untuk aplikasi polisi tidur yang membutuhkan ketahanan dan elastisitas tinggi.



Gambar 1. Diagram alir penelitian

Berdasarkan Gambar 1 Penelitian ini diawali dengan studi literatur yang berfokus pada pengumpulan informasi dan referensi dari sumber ilmiah yang relevan. Tahap berikutnya adalah persiapan alat dan bahan, termasuk pengaturan peralatan yang diperlukan seperti printer 3D dan filamen TPU-95A. Setelah itu, dilakukan perencanaan pengaturan parameter proses 3D *printing* menggunakan Metode Taguchi, yang melibatkan optimasi suhu, kecepatan cetak, dan tinggi lapisan. Selanjutnya, spesimen uji diproduksi untuk pengujian kekerasan dan kekuatan tarik. Pengujian dilakukan pada spesimen untuk mengukur sifat mekanik, seperti kekerasan dan kekuatan tarik. Setelah pengujian, hasil data dianalisis untuk mengevaluasi sifat mekanik produk, termasuk kekerasan, kekuatan tarik, dan keuletan. Berdasarkan analisis ini, dilakukan evaluasi kelayakan produk 3D *printer* berfilamen TPU-95A untuk aplikasi polisi tidur, menilai apakah produk

tersebut memenuhi persyaratan elastisitas dan ketahanan. Akhirnya, kesimpulan ditarik berdasarkan hasil analisis, termasuk rekomendasi parameter optimal untuk aplikasi yang dituju.

2.1. Persiapan Alat dan Bahan serta Pengaturan Parameter

Material utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah filamen eFlex TPU-95A dengan diameter 1,75 mm. Filamen ini merupakan bahan elastomer poliuretan termoplastik yang memiliki sifat fleksibel dan tahan lama, sehingga cocok untuk aplikasi yang memerlukan ketahanan mekanik dan elastisitas, seperti polisi tidur. Proses pencetakan dilakukan menggunakan mesin 3D *printer* Ender-3 Pro, yang dikenal dengan kemampuan cetaknya yang presisi dan andal untuk material fleksibel.

Spesimen uji dibuat dengan pengaturan kepadatan infill sebesar 100%, yang berarti seluruh volume spesimen diisi penuh untuk memastikan kekuatan optimal. Suhu bed printer diatur pada 60 °C untuk memastikan adhesi yang baik antara lapisan dasar filamen dan permukaan cetak, dengan pola *infill* yang digunakan adalah *concentric*, yang memberikan struktur yang stabil dan tahan terhadap deformasi.

Penelitian ini menguji tiga parameter utama dalam proses pencetakan, yaitu suhu pencetakan (*printing temperature*), kecepatan cetak (*print speed*), dan tinggi lapisan (*layer height*). Setiap parameter diuji pada tiga variasi level, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1, untuk mengeksplorasi pengaruhnya terhadap sifat mekanik spesimen. Variasi ini bertujuan untuk menentukan pengaturan optimal dalam proses pencetakan, yang diharapkan dapat meningkatkan kualitas cetakan dan kekuatan mekanik produk akhir.

Dengan pendekatan yang terstruktur dan sistematis ini, penelitian diharapkan memberikan data yang akurat dan bermanfaat bagi pengembangan aplikasi material eFlex TPU-95A, khususnya dalam konteks pencetakan 3D yang memerlukan material fleksibel dengan kualitas mekanik yang unggul.

Tabel 1. Parameter Proses dan Nilai Level

<i>Process parameters</i>	<i>Level</i>		
	1	2	3
<i>Printing temperature (°C)</i>	220	230	240
<i>Print speed (mm/s)</i>	70	80	90
<i>Layer height (mm)</i>	0,15	0,2	0,25

Desain eksperimen dalam penelitian ini menggunakan Metode Taguchi L9 (3³), yang merupakan pendekatan eksperimental yang dirancang untuk mengoptimalkan proses melalui kombinasi variabel yang berbeda. Metode ini dipilih karena kemampuannya dalam mengurangi jumlah percobaan yang diperlukan, tanpa mengorbankan validitas hasil, dengan memilih kombinasi parameter yang representatif. Taguchi berfokus pada pengurangan variabilitas dalam proses melalui desain percobaan yang efisien, yang pada akhirnya dapat mengidentifikasi faktor-faktor kunci yang mempengaruhi kualitas hasil cetakan [18], [19].

Pada desain Taguchi L9 yang digunakan, sembilan kombinasi percobaan diterapkan berdasarkan tiga variabel utama proses pencetakan, yaitu suhu pencetakan, kecepatan cetak, dan tinggi lapisan, dengan setiap variabel memiliki tiga level variasi. Pengaturan ini tercantum dalam Tabel 2, yang menggambarkan detail tingkatan variasi untuk setiap parameter. Desain ini memungkinkan analisis yang efisien terhadap pengaruh masing parameter terhadap sifat mekanik spesimen hasil cetakan, seperti kekerasan, kekuatan tarik, dan keuletan.

Untuk memastikan akurasi dan keandalan data, setiap percobaan diduplikasi sebanyak tiga kali. Langkah ini diambil untuk meminimalkan kesalahan eksperimen dan menghasilkan data yang lebih *robust* serta *reproducible*. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat mengidentifikasi kombinasi parameter proses yang optimal, yang memberikan pengaruh signifikan terhadap kualitas cetakan dan sifat mekanik produk 3D printing berbahan eFlex TPU-95A, terutama untuk aplikasi yang memerlukan ketahanan dan elastisitas tinggi, seperti polisi tidur.

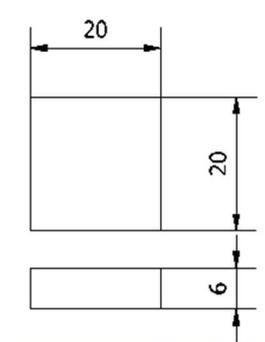
Tabel 2. Desain Parameter Proses 3D Printing dengan Metode Taguchi L9 (3³)

Experiment	Level		
	Printing temperature (°C)	print speed (mm/s)	Layer height (mm)
1	220	70	0,15
2	220	80	0,2
3	220	90	0,25
4	230	70	0,2
5	230	80	0,25
6	230	90	0,15
7	240	70	0,25
8	240	80	0,15
9	240	90	0,2

Metode ini memberikan kerangka kerja yang terstruktur untuk mengeksplorasi pengaruh berbagai parameter pencetakan terhadap hasil cetakan, sehingga memungkinkan optimalisasi proses yang lebih baik dalam produksi polisi tidur berbasis eFlex TPU-95A.

2.2. Pengujian Kekerasan

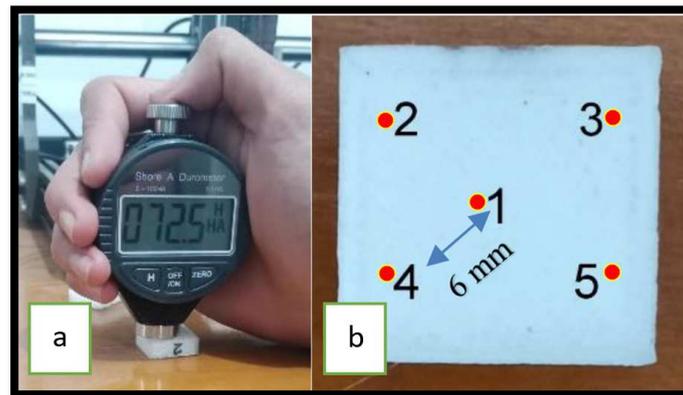
Pengujian kekerasan dilakukan berdasarkan standar ASTM D2240, yang digunakan untuk mengukur kekerasan material elastomer menggunakan metode Shore A. Dalam penelitian ini, spesimen uji dibuat dengan dimensi 20 x 20 mm dan ketebalan minimal 6 mm, sesuai dengan spesifikasi standar yang ditunjukkan pada Gambar 2. Standar ini dipilih karena relevansi dan ketepatannya dalam mengukur kekerasan material termoplastik elastomer seperti eFlex TPU-95A yang digunakan dalam penelitian ini [10], [20], [21].



Gambar 2. Desain Spesimen Uji Kekerasan ASTM D2240

Pengujian kekerasan dilakukan menggunakan Durometer Digital Shore A, alat yang memiliki tingkat akurasi tinggi dengan resolusi pengukuran hingga 0,01 Shore A. Langkah pengujian diawali dengan memastikan spesimen uji dalam keadaan bersih dan bebas dari kotoran yang dapat mempengaruhi hasil pengujian. Spesimen kemudian ditempatkan pada bidang datar untuk menjamin stabilitas selama proses pengukuran.

Durometer dikalibrasi sebelum digunakan untuk memastikan bahwa hasil pengujian valid dan dapat diandalkan. Selanjutnya, indentor pada durometer ditekan secara tegak lurus terhadap permukaan spesimen dengan memastikan bahwa *indentor* tertancap sempurna di permukaan material. Pengujian ini dilakukan pada lima titik berbeda di permukaan spesimen, dengan jarak antar titik pengukuran minimal 6 mm seperti yang diilustrasikan pada Gambar 3b [22], [23].



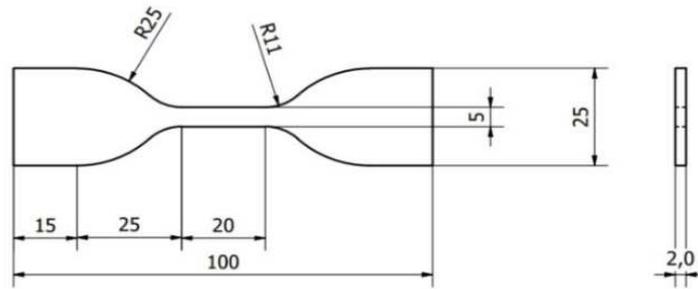
Gambar 3. Pengujian kekerasan: (a) Pengujian menggunakan Durometer *Digital Shore A*, (b) Ilustrasi titik pengujian

Pengukuran di beberapa titik dilakukan untuk memastikan bahwa hasil pengujian mewakili kekerasan material secara merata, menghindari variasi lokal yang mungkin terjadi akibat ketidakhomogenan material atau ketidakteraturan permukaan spesimen. Hasil dari setiap titik pengukuran kemudian dirata-ratakan untuk memperoleh nilai kekerasan akhir dari masing-masing spesimen. Dengan metode ini, penelitian bertujuan untuk mengevaluasi kekerasan material eFlex TPU-95A secara akurat, yang nantinya akan dikorelasikan dengan parameter proses pencetakan dalam analisis sifat mekanik produk.

2.3. Pengujian Tarik

Pengujian tarik dilakukan sesuai dengan standar JIS K6251-2017, yang dirancang untuk menguji sifat tarik material elastomer dan sejenisnya. Spesimen uji dalam penelitian ini dibuat dengan mengikuti dimensi dan bentuk standar seperti yang ditampilkan pada Gambar 4. Setiap parameter proses menghasilkan tiga spesimen uji, sehingga total spesimen yang diuji mencapai jumlah yang memadai untuk memastikan akurasi dan validitas hasil. Pendekatan ini diambil untuk mengurangi variasi data dan memperoleh informasi yang lebih representatif mengenai sifat mekanik material [25], [26].

Pengujian dilakukan menggunakan mesin uji tarik Shimadzu model AGS-X 10kN, yang mampu mengukur gaya tarik hingga 10 kN dengan tingkat akurasi tinggi. Mesin ini dioperasikan pada kecepatan uji 100 mm/menit, yang merupakan kecepatan pengujian yang sesuai untuk material elastomer. Kecepatan ini dipilih untuk memastikan bahwa deformasi spesimen berlangsung secara terukur dan konsisten di antara seluruh spesimen yang diuji [27].



Gambar 4. Dimensi Spesimen Uji Tarik JIS K6251-2017.

Data yang diperoleh dari pengujian tarik meliputi gaya maksimum yang diterima oleh spesimen sebelum mengalami kerusakan serta perpanjangan spesimen selama proses pengujian. Data ini kemudian digunakan untuk menghitung keuletan (strain) material, yang merupakan indikator penting dari kemampuan material untuk menahan deformasi sebelum putus. Keuletan dihitung menggunakan Persamaan 1, sebagai berikut:

$$\epsilon = \frac{L_f - L_0}{L_0} \quad (1)$$

di mana:

- L_f : adalah panjang akhir setelah pengujian tarik, dan
- L_0 : adalah panjang awal sebelum pengujian.

3. Hasil dan pembahasan

Bagian ini menyajikan hasil-hasil utama yang diperoleh dari pengujian kekerasan dan pengujian tarik pada spesimen yang dicetak menggunakan 3D printer dengan filamen eFlex TPU-95A. Data yang dikumpulkan akan dianalisis untuk mengevaluasi pengaruh parameter pencetakan terhadap sifat mekanik material. Hasil tersebut kemudian diinterpretasikan secara sistematis guna memberikan pemahaman yang lebih mendalam terkait bagaimana variasi parameter proses, seperti printing temperature, print speed, dan layer height, mempengaruhi karakteristik kekerasan dan keuletan dari produk akhir. Setiap pengujian didukung oleh analisis statistik dan visualisasi melalui tabel serta gambar untuk memperjelas temuan penelitian.

3.1. Analisis Hasil Uji Kekerasan

Pengujian kekerasan pada spesimen dilakukan untuk mengukur tingkat kekerasan material eFlex TPU-95A setelah melalui proses pencetakan 3D dengan variasi parameter. Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh parameter pencetakan seperti suhu, kecepatan cetak, dan tinggi lapisan terhadap sifat mekanik produk. Hasil pengujian kekerasan dirangkum dalam Tabel 3, yang menampilkan nilai kekerasan yang diukur pada lima titik berbeda untuk setiap spesimen, serta rata-rata kekerasan setiap spesimen.

Berdasarkan hasil pengujian, terdapat variasi nilai kekerasan antar spesimen yang menunjukkan pengaruh signifikan dari perubahan parameter proses pencetakan. Nilai kekerasan minimum tercatat pada Spesimen 3, dengan rata-rata kekerasan sebesar 63,5 HA, sementara nilai kekerasan maksimum tercatat pada Spesimen 6, dengan rata-rata kekerasan 74,9 HA. Rentang nilai kekerasan ini menunjukkan bahwa perubahan dalam parameter proses, seperti *temperature printing*, *print speed*, dan *layer height*, secara langsung memengaruhi kekerasan material yang dihasilkan.

Perbedaan hasil ini memainkan peran krusial dalam mengevaluasi kinerja mekanik produk cetakan 3D, terutama dalam aplikasi yang menuntut kombinasi elastisitas dan kekuatan mekanik yang spesifik, seperti penggunaan pada polisi tidur. Variasi nilai kekerasan yang diamati mencerminkan sensitivitas material eFlex TPU-95A terhadap perubahan parameter proses pencetakan, seperti *temperature printing*, *print speed*, dan *layer height*. Hal ini menunjukkan bahwa pengaturan parameter yang tepat sangat penting untuk menghasilkan produk dengan karakteristik mekanik optimal. Dengan demikian, optimalisasi parameter proses tidak hanya dapat meningkatkan kekerasan material, tetapi juga mempengaruhi ketahanan jangka panjang dan fungsionalitas produk dalam aplikasi praktis. Penelitian ini memberikan wawasan yang mendalam mengenai hubungan antara variabel proses pencetakan dan sifat mekanik material, yang dapat diandalkan untuk desain produk 3D printing dalam berbagai aplikasi teknis yang memerlukan material dengan performa mekanik yang dapat disesuaikan.

Tabel 3. Hasil Uji Kekerasan

Sampel	Hasil Uji Kekerasan					Rata-Rata (HA)
	Titik 1	Titik 2	Titik 3	Titik 4	Titik 5	
1	70,5	68,5	70	68,5	70,5	69,6
2	72	68	71,5	70	71	70,5
3	62,5	62	66	63	64	63,5
4	71,5	70	67	66	64,5	67,8
5	72,5	74	68,5	73	74	72,4
6	78	75	75	73,5	73	74,9
7	72,5	76,5	72,5	71	70	72,5
8	69	69,5	73,5	69,5	70,5	70,4
9	68,5	71,5	70,5	75	74,5	72

Berdasarkan hasil ini, dapat dilihat bahwa spesimen yang diproduksi pada kondisi proses tertentu cenderung memiliki kekerasan lebih tinggi, terutama pada spesimen 6 yang menunjukkan kekerasan tertinggi. Kondisi ini mungkin diakibatkan oleh tingginya *temperature printing* dan *layer height*, yang meningkatkan kekompakan material saat pencetakan. Sebaliknya, spesimen 3, yang memiliki kekerasan terendah, kemungkinan disebabkan oleh penggunaan *print speed* yang tinggi dan *temperature printing* yang lebih rendah, sehingga menghasilkan material yang kurang padat.

Perbedaan nilai kekerasan di antara spesimen mencerminkan variasi dalam proses pencetakan, yang dapat mempengaruhi kekuatan material akhir. Nilai kekerasan yang lebih tinggi menunjukkan material yang lebih tahan terhadap deformasi, sedangkan nilai yang lebih rendah mengindikasikan fleksibilitas yang lebih tinggi. Pemahaman mengenai variasi ini penting untuk aplikasi yang memerlukan kombinasi kekuatan dan elastisitas, seperti penggunaan pada polisi tidur yang dihasilkan dari filamen eFlex TPU-95A. Secara keseluruhan, hasil uji kekerasan ini menunjukkan bahwa parameter pencetakan memainkan peran penting dalam menentukan sifat mekanik material yang dicetak. Dengan demikian, pengaturan parameter proses yang optimal diperlukan untuk mencapai kekerasan yang sesuai dengan kebutuhan aplikasi.

3.2. Analisis Kekuatan Tarik dan Keuletan

Pengujian kekuatan tarik dan keuletan dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan material eFlex TPU-95A dalam menahan beban serta mengalami deformasi saat berada di bawah tegangan (*stress*). Kekuatan tarik mengukur sejauh mana

material dapat menahan gaya tarik tanpa mengalami kerusakan, sementara keuletan menunjukkan kemampuan material untuk mengalami deformasi sebelum mencapai titik patah.

Data hasil pengujian disajikan dalam Tabel 4, yang mencakup rata-rata hasil dari tiga kali pengulangan untuk setiap spesimen. Pengulangan ini bertujuan memastikan akurasi dan konsistensi hasil pengujian. Nilai yang diperoleh meliputi tensile strength (kekuatan tarik maksimum) dan elongation at break (persentase perpanjangan sebelum material putus).

Variasi hasil pengujian menunjukkan pengaruh parameter pencetakan, seperti suhu, kecepatan cetak, dan tinggi lapisan, terhadap sifat mekanik material. Analisis ini penting untuk menentukan pengaturan optimal dalam menghasilkan produk dengan kekuatan mekanik dan keuletan yang sesuai dengan kebutuhan aplikasi, khususnya untuk polisi tidur yang memerlukan fleksibilitas dan daya tahan tinggi terhadap beban berulang.

Tabel 4. Hasil Kekuatan Tarik dan Keuletan

Sampel	Kekuatan Tarik (kgf/cm ²)	Keuletan
1	251,06	1,14
2	259,86	1,31
3	282,06	1,35
4	287,18	1,30
5	291,20	1,37
6	282,92	1,29
7	292,59	1,34
8	303,49	1,52
9	329,02	1,56

Berdasarkan analisis tabel tersebut, dapat diamati bahwa nilai kekuatan tarik minimum diperoleh pada sampel 1 dengan rata-rata sebesar 251,06 kgf/cm², sementara nilai maksimum terukur pada sampel 9 dengan rata-rata 329,02 kgf/cm². Peningkatan kekuatan tarik sejalan dengan variasi parameter pencetakan, di mana perubahan dalam printing temperature, print speed, dan layer height berkontribusi pada peningkatan densitas dan kualitas struktur material.

Selanjutnya, keuletan menunjukkan nilai minimum yang sama pada sampel 1 dengan rata-rata 1,14, dan maksimum pada sampel 9 dengan rata-rata 1,56. Hal ini menunjukkan bahwa spesimen dengan kekuatan tarik lebih tinggi cenderung memiliki keuletan yang lebih baik, menunjukkan hubungan positif antara kekuatan dan keuletan.

Korelasi antara kekuatan tarik dan keuletan yang baik dalam material ini mengindikasikan bahwa penyesuaian parameter pencetakan yang tepat dapat meningkatkan performa mekanik eFlex TPU-95A, yang menjadikannya lebih sesuai untuk aplikasi yang memerlukan kombinasi daya tahan dan fleksibilitas. Analisis lebih lanjut diperlukan untuk mengeksplorasi pengaruh masing-masing parameter proses terhadap sifat-sifat mekanik ini secara lebih mendalam, termasuk uji statistik untuk memvalidasi signifikan perbedaan antar sampel.

3.3. Analisis Kelayakan Produk 3D Printer Berfilamen TPU-95A Untuk Polisi Tidur

Produk polisi tidur, yang berfungsi untuk mengatur lalu lintas, memerlukan karakteristik material yang optimal, seperti yang terdapat pada karet, termasuk kekerasan, kekuatan tarik, dan keuletan. Filamen TPU-95A telah diidentifikasi sebagai material yang memiliki sifat mirip karet, sehingga relevan untuk aplikasi ini [3], [28].

Kebutuhan untuk produk polisi tidur di lingkungan lalu lintas yang tinggi mengharuskan material tersebut mampu menahan beban dinamis dari kendaraan berat serta beradaptasi dengan berbagai kondisi cuaca. Analisis kelayakan produk

3D printer dengan filamen TPU-95A dilakukan berdasarkan hasil pengujian kekerasan, kekuatan tarik, dan keuletan, sebagai berikut:

Kekerasan material karet untuk polisi tidur berkisar antara 60-70 HA [29]. Berdasarkan hasil pengujian, produk 3D printing dengan filamen TPU-95A menunjukkan nilai kekerasan antara 63,5-74,9 HA. Meskipun sebagian besar sampel menunjukkan kekerasan yang memadai, hanya sampel eksperimen 1, 3, dan 4 yang memenuhi kriteria kekerasan yang sesuai untuk aplikasi polisi tidur [29]. Hal ini menunjukkan bahwa parameter proses pencetakan 3D harus dipilih dengan perlahan untuk mencapai karakteristik kekerasan yang diinginkan.

Kekuatan tarik material karet pada polisi tidur berkisar antara 200-300 kgf/cm² [29]. Dalam pengujian, produk 3D printing dengan TPU-95A menunjukkan nilai kekuatan tarik antara 251,06 hingga 329,02 kgf/cm². Dengan demikian, hanya sampel eksperimen 1 hingga 7 yang menunjukkan kekuatan tarik yang sesuai dengan spesifikasi yang dibutuhkan untuk polisi tidur, sementara beberapa sampel lainnya mungkin tidak memenuhi standar tersebut.

Keuletan produk 3D printing TPU-95A berkisar antara 1,14 hingga 1,56, menunjukkan kemampuan deformasi yang sangat baik. Ini memberikan ketahanan terhadap kerusakan akibat beban berulang, suatu kondisi yang umum dialami oleh produk polisi tidur di lingkungan lalu lintas. Kemampuan material ini untuk kembali ke bentuk semula setelah mengalami deformasi menjadikannya pilihan yang menarik untuk aplikasi yang membutuhkan daya tahan tinggi.

Berdasarkan analisis di atas, dapat disimpulkan bahwa produk 3D printing berfilamen TPU-95A, khususnya dari sampel eksperimen 1, 3, dan 4, sangat layak untuk digunakan sebagai bahan alternatif dalam pembuatan polisi tidur. Keunggulan material ini terletak pada fleksibilitasnya dan ketahanan terhadap deformasi, yang memungkinkan produk ini untuk berfungsi secara efektif di lingkungan dengan beban dinamis tinggi. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengeksplorasi lebih dalam tentang pengaruh variasi parameter proses pencetakan terhadap sifat-sifat mekanik material serta dampak jangka panjangnya dalam aplikasi nyata.

4. Kesimpulan

Produk yang dihasilkan melalui 3D printing dengan filament TPU-95A, khususnya dari sampel eksperimen 1 (suhu cetak 220 °C, kecepatan cetak 0 mm/s, dan tinggi lapisan 0,15 mm), sampel eksperimen 3 (suhu cetak 220 °C, kecepatan cetak 90 mm/s, dan tinggi lapisan 0,25 mm), serta sampel eksperimen 4 (suhu cetak 230 °C, kecepatan cetak 70 mm/s, dan tinggi lapisan 0,2 mm), menunjukkan kelayakan yang signifikan untuk digunakan sebagai bahan alternatif dalam pembuatan polisi tidur. Hasil analisis menunjukkan bahwa variasi parameter cetak, seperti suhu dan kecepatan cetak, berpengaruh terhadap karakteristik fisik dan mekanik produk akhir, yang mendukung potensi penggunaan TPU-95A dalam aplikasi ini. Diharapkan, penelitian ini dapat dilanjutkan oleh peneliti selanjutnya ke tahap pengembangan desain dan prototipe produk polisi tidur yang lebih efektif, dengan mempertimbangkan hasil analisis yang telah dilakukan.

Ucapan terima kasih

Terima kasih kepada KEMENRISTEKDIKTI yang sudah mendanai penelitian ini dalam program Penelitian Dana Pemula (PDP).

Daftar Pustaka

- [1] A. Sidiq, G. R. F. Syahrillah, and M. . Isra, "Studi Experimental Pemanfaatan Speed Bumper (Polisi Tidur) Menjadi Energi Listrik Menggunakan Piezoelektrik," *Al-Jazari J. Ilm. Tek. Mesin*, vol. 6, no. 2, 2021, doi: 10.31602/al-jazari.v6i2.6055.

- [2] S. R. Samal, M. Mohanty, and D. R. Biswal, "A review of effectiveness of speed reducing devices with focus on developing countries," *Trans. Transp. Sci.*, vol. 13, no. 1, pp. 65–73, 2022, doi: 10.5507/tots.2021.018.
- [3] Menteri Perhubungan Republik Indonesia, *Peraturan Menteri Perhubungan Republik Indonesia Nomor PM 14 Tahun 2021 Tentang Perubahan Atas Peraturan Menteri! Perhubungan Nomor Pm 82 Tahun 2018 Tentang Alat Pengendali dan Pengaman Pengguna Jalan*. Indonesia: BN.2021/No.408, jdih.dephub.go.id : 24 hlm., 2021, p. 90. [Online]. Available: <https://peraturan.bpk.go.id/Details/169237/permenhub-no-14-tahun-2021>
- [4] M. M. Parmar, "Non-Newtonian Fluid Speed Breaker," *Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Technol.*, vol. 9, no. VI, pp. 827–831, 2021, doi: 10.22214/ijraset.2021.35250.
- [5] A. Setiawan and N. Chayati, "Efektifitas Polisi Tidur (Road Humps) dalam Mereduksi Kecepatan pada Ruas Jalan H.M. Syarifudin di Kota Bogor," *J. Komposit J. Ilmu-ilmu Tek. Sipil*, vol. 7, no. 1, pp. 17–23, 2023, [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.32832/komposit.v7i1.8029>
- [6] L. Di Angelo, P. Di Stefano, A. Dolatnezhadsomarin, E. Guardiani, and E. Khorram, "A reliable build orientation optimization method in additive manufacturing: the application to FDM technology," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 108, no. 1–2, pp. 263–276, 2020, doi: 10.1007/s00170-020-05359-x.
- [7] G. S. Lubis, M. Taufiqurrahman, and M. Ivanto, "Analisa Pengaruh Parameter Proses Terhadap Uji Tarik Produk Hasil 3D Printing Berbahan Polylactic Acid," *J. Engine Energi, Manufaktur, dan Mater.*, vol. 5, no. 2, p. 39, 2021, doi: 10.30588/jeemm.v5i2.877.
- [8] P. Pristiansyah, H. Hasdiansah, and A. Ferdiansyah, "Pengaruh Parameter Proses Pada 3D Printing FDM Terhadap Kekuatan Tarik Filament ABS CCTREE," *Manutech J. Teknol. Manufaktur*, vol. 14, no. 01, pp. 15–22, 2022, doi: 10.33504/manutech.v14i01.210.
- [9] M. H. Nadhif *et al.*, "Anatomically and Biomechanically Relevant Monolithic Total Disc Replacement Made of 3D-Printed Thermoplastic Polyurethane," *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 19, 2022, doi: 10.3390/polym14194160.
- [10] J. Pratama and A. Z. Adib, "Pengaruh Parameter Cetak Pada Nilai Kekerasan Serta Akurasi Dimensi Material Thermoplastic Elastomer (TPE) Hasil 3D Printing," *J. Ilm. Giga*, vol. 25, no. 1, p. 35, 2022, doi: 10.47313/jig.v25i1.1712.
- [11] D. Mardiyana, Z. Sulaiman, S. Ihsan, F. Ridha, and T. Rahman, "Rancang Bangun 3D Printer FDM Model Cartesian Berbasis Arduino," *JMPM (Jurnal Mater. dan Proses Manufaktur)*, vol. 7, no. 1, pp. 63–72, 2023, doi: 10.18196/jmpm.v7i1.16866.
- [12] M. Hikmat, S. Rostam, and Y. M. Ahmed, "Investigation of tensile property-based Taguchi method of PLA parts fabricated by FDM 3D printing technology," *Results Eng.*, vol. 11, p. 100264, 2021, doi: 10.1016/j.rineng.2021.100264.
- [13] H. Gonabadi, A. Yadav, and S. J. Bull, "The effect of processing parameters on the mechanical characteristics of PLA produced by a 3D FFF printer," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 111, no. 3–4, pp. 695–709, 2020, doi: 10.1007/s00170-020-06138-4.
- [14] F. Yilan, İ. B. Şahin, F. Koç, and L. Urtekin, "The Effects of Different Process Parameters of PLA+ on Tensile Strengths in 3D Printer Produced by Fused Deposition Modeling," *El-Cezeri J. Sci. Eng.*, vol. 10, no. 1, pp. 160–173, 2023, doi: 10.31202/ecjse.1179492.
- [15] C. Abeykoon, P. Sri-Amphorn, and A. Fernando, "Optimization of fused deposition modeling parameters for improved PLA and ABS 3D printed structures," *Int. J. Light. Mater. Manuf.*, vol. 3, no. 3, pp. 284–297, 2020, doi: 10.1016/j.ijlmm.2020.03.003.

- [16] D. Villani, M. Savi, M. A. B. Andrade, L. L. Campos, and M. P. A. Potiens, "Characterization of ABS + W and ABS + Bi 3D printing filaments attenuation for different photon beams," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1826, no. 1, 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1826/1/012037.
- [17] W. H. Pratama, H. -, and H. -, "Optimasi Parameter Proses 3D Printing Terhadap Kuat Tarik Material Filamen PLA + Menggunakan Metode Taguchi," *Sprocket J. Mech. Eng.*, vol. 3, no. 1, pp. 39–45, 2021, doi: 10.36655/sprocket.v3i1.568.
- [18] B. W. Karuniawan, F. Rachman, and M. T. Yoningtias, "Metode Taguchi Untuk Optimasi Parameter Mesin Printer 3D Terhadap Kualitas Produk Material ABS," *Austenit*, vol. 14, no. 2, pp. 61–68, 2022, doi: 10.53893/austenit.v14i2.4631.
- [19] E. I. Riza, C. Budiyanoro, and A. W. Nugroho, "Peningkatan Kekuatan Lentur Produk 3D Printing Berbahan Petg Dengan Optimasi Parameter Proses Menggunakan Metode Taguchi," *Media Mesin Maj. Tek. Mesin*, vol. 21, no. 2, pp. 66–75, 2020, doi: 10.23917/mesin.v21i2.10856.
- [20] F. C. P. Sales, R. M. Ariati, V. T. Noronha, and J. E. Ribeiro, "Mechanical characterization of PDMS with different mixing ratios," *Procedia Struct. Integr.*, vol. 37, no. C, pp. 383–388, 2021, doi: 10.1016/j.prostr.2022.01.099.
- [21] D. Derlini and A. Jusuf Zulfikar, "Penyelidikan Kegagalan pada Alat Pemisah Karet Alam Jenis LRH 410," *IRA J. Tek. Mesin dan Apl.*, vol. 1, no. 3, pp. 51–61, 2023, doi: 10.56862/irajtma.v1i3.34.
- [22] Binyamin, A. S. Nurrokatyati, Bagas Bayu Prasetyo, S. F. Rahman, and B. W. Febriantoko, "Rekayasa Pembuatan Kampas Rem Berbahan Dasar Serbuk Tempurung Kelapa Bermatriks Phenolic Resin Terhadap Performa Gesek Pengereman," *TRAKSI Maj. Ilm. Tek. Mesin*, vol. 20, no. 1, pp. 45–58, 2020.
- [23] N. I. Gonçalves, F. Z. Pierre, A. L. S. Borges, J. M. F. Da Silva, and E. S. Uemura, "Analyzing SHORE A hardness to assess the durability of soft denture lining materials," *Brazilian Dent. Sci.*, vol. 26, no. 4, 2023, doi: 10.4322/bds.2023.e3986.
- [24] S. Ishikawa, Y. Yoshikawa, H. Kamata, U. Chung, and T. Sakai, "Injectable hydrogels with phase-separated structures that can encapsulate live cells," pp. 1–28, 2022.
- [25] S. Agung and E. Prayogi, "Penggunaan Karbon Hitam terhadap Karakteristik Karet Nitril sebagai Karet Perapat Katup Tabung LPG," *Proceeding SENDIU*, no. April, pp. 441–446, 2020.
- [26] C. W. Wullur and A. Andriyono, "Analisis Perbandingan Kekuatan Tarik Roller Chain (Suzuki Genuine Parts) Dan (Indoparts) Satria Fu 150," *Mustek Anim Ha*, vol. 8, no. 2, pp. 132–140, 2019, doi: 10.35724/mustek.v8i2.2533.
- [27] R. S. Saputra, S. T. Hidayat, and T. Dwi, "Optimasi Uji Tegangan Tarik Pengelasan Tungsten Inert Gas pada Penggabungan Beda Material Baja Galvanish (SGCC) dengan Baja Karbon Rendah (SPCC-SD)," vol. 04, no. 01, pp. 36–47, 2024.
- [28] A. Allan, C. Kealley, A. Squelch, Y. H. Wong, C. H. Yeong, and Z. Sun, "Patient-specific 3D printed model of biliary ducts with congenital cyst," *Quant. Imaging Med. Surg.*, vol. 9, no. 1, pp. 86–93, 2019, doi: 10.21037/qims.2018.12.01.
- [29] D. F. Kruse and R. C. Edwards, "Automotive suspension bumpers - A correlation of parameters affecting impact response and a technique for achieving effective design," *SAE Tech. Pap.*, vol. 77, no. 1968, pp. 1868–1895, 1968, doi: 10.4271/680471.