

Pengaruh Parameter Proses 3D *Printing* Terhadap Elastisitas Produk Yang Dihasilkan

Hasdiansah¹, Herianto²,

^{1,2}, Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada Yogyakarta

E-mail: ^{*1}phianntarah@yahoo.co.id, ²herianto@ugm.ac.id

Abstrak – Teknologi 3D *Printing* merupakan teknologi yang digunakan untuk membuat prototype dan produk jadi. Salah satu teknologi 3D *Printing* yang paling murah dan terkenal adalah Fused Deposition Modelling (FDM). Penelitian 3D *Printing* terhadap filamen flexible masih memiliki permasalahan, karena tidak semua mesin 3D Printer dengan teknologi FDM yang mampu mencetak filamen flexible. 3D *Printing* filamen flexible memiliki potensi yang cukup besar dalam dunia manufaktur dalam menghasilkan produk siap pakai. Penelitian ini dilakukan menggunakan variasi parameter proses 3D *Printing* seperti ekstruder temperature dan layer thickness, dengan printing speed 30mm/s dan shell thickness 2 mm. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui efek parameter proses terhadap tingkat elastisitas material thermoplastic polyurethane (TPU). Pengujian tingkat elastisitas produk jadi dengan cara mengkaitkan neraca digital dengan jarak yang sama pada spesimen. Dari penelitian ini diperoleh bahwa tingkat elastisitas produk dipengaruhi oleh variasi ekstruder temperature dan layer thickness. Extruder temperature memberikan pengaruh terhadap tingkat elastisitas produk jadi, namun layer thickness memberikan efek yang paling dominan dalam menghasilkan tingkat elastisitas produk. Tiga variasi ekstruder temperature dengan layer thickness 0,2 mm memiliki nilai rata-rata pengujian elastisitas yang relatif sama. Dengan adanya penelitian ini, diharapkan kepada para penggiat 3D *Printing* terutama yang berkaitan dengan material fleksibel atau elastomer dapat mengembangkannya dalam berbagai bidang.

Kata Kunci —3D *Printing*, Fused Deposition Modelling, Thermoplastics Polyurethane, Elastisitas

1. PENDAHULUAN

Teknologi 3D *Printing* membawa perubahan besar pada dunia. Teknologi yang juga dikenal dengan sebutan *Additive Layer Manufacturing* ini sebenarnya sudah ada sejak tahun 1980-an. 3D *Printing* merupakan sebuah terobosan baru dalam dunia teknologi. Terobosan ini sangatlah populer di seluruh belahan dunia, terutama di kalangan akademisi dan industri. Munculnya teknologi 3D *Printing* sangat berpengaruh pada beberapa bidang industri, terutama dari segi ekonomi. *Rapid prototyping* pada komponen mekanik dengan teknik-teknik dan volume produksi yang rendah dalam memproduksi *prototype* dengan cepat [1].

Salah satu teknologi 3D *Printing* yang paling terkenal dan murah adalah FFF (*Fused Filament Fabrication*) teknologi tersebut juga dikenal *Fused Deposition Modelling* (FDM), prinsip kerja FDM adalah dengan cara ekstrusi *thermoplastic* melalui *nozzle* yang panas pada *melting temperature* selanjutnya *part* dibuat *layer by layer*. Dua material yang paling umum digunakan adalah ABS dan PLA sehingga sangat penting mengetahui akurasi dimensi produk. Teknologi 3D *Printing* FDM mampu membuat produk duplikat dengan akurat material ABS [2]. Ada beberapa jenis teknologi *rapid prototyping* yang umum digunakan saat ini memiliki kelebihan dan kelemahan yang berbeda-beda, terutama parameter proses seperti *layer thickness*, *system accuracy*, dan *operation speed* [3]. Kualitas produk hasil kerja mesin 3D *Printing* berbasis

deposisi lelehan material (FDM), yang umumnya diungkapkan dalam bentuk (a) kehalusan detail permukaan produk termasuk jika permukaan bertekstur (*surface finish*), (b) ketelitian dan presisi ukuran produk (akurasi dimensi), (c) jumlah warna yang bisa ditampilkan (warna dari materialnya bukan merupakan pewarnaan tambahan yang dilakukan di luar proses), dan (d) densitas dan kesesuaian spesifikasi (densitas, kuat tarik/tekan, kuat impak, keuletan, fleksibilitas, dan sebagainya sesuai dengan kebutuhan) dengan desain awal bergantung pada optimasi parameter proses [4]. Penelitian terhadap tiga material elastomer seperti TPE 90A, Ninjaflex 85A, dan semiflex 98A dengan bentuk objek berupa roda lego dengan beberapa bentuk untuk menginvestigasi parameter friksi roda terhadap permukaan aluminium. Variasi gaya friksi yang diberikan 20 N, 40 N, dan 60 N. Pemberian gaya gesek pada roda tersebut dapat memberikan informasi koefisien gesek tiap material elastomer [5].

3D *Printing flexible filament* memiliki potensi yang besar dalam dunia manufaktur saat ini, namun masih banyak permasalahan yang ditemukan pada proses pencetakan *flexible filament* ini. Terutama pada proses pencetakan *flexible filament* dengan menggunakan teknologi *Fuse Deposition Modelling* (FDM) masih memerlukan studi mendalam. Dalam pencetakan *flexible filament* terdapat dua hal penting yaitu keseimbangan antara *flexibility (softness)* dan kemampuan cetak (*printability*). Semakin keras material (*less flexible*) semakin mudah untuk dicetak, semakin *flexible material* semakin sulit untuk dicetak.

Ada beberapa jenis *flexible filament* seperti *Thermoplastic Elastomer (TPE)*, *flexible PLA*, *thermoplastic polyurethane (TPU)*, *thermoplastic Co-Polyester (TPC)*, *Flexible Polyester (FPE)*. Salah satu permasalahan pada teknologi *3D Printing Flexible Filament* adalah banyaknya mesin *3D Printer* yang mengalami kesulitan dalam mencetak *flexible filament* karena *jam extruder* (macet pada ekstruder). Oleh karena itu, diperlukan analisis mengenai parameter yang mempengaruhi *printability* dan kualitas produk *3D Printing flexible filament*. Pada penelitian ini akan dibahas parameter proses *3D Printing* yang mempengaruhi kualitas produk hasil proses *3D Printing flexible filament* atau *elastomer Thermoplastic Polyurethane (TPU)* dengan teknik *FDM* menggunakan *3D Printer* jenis *Cartesian*. Dari penelitian ini, diharapkan dapat menghasilkan analisis efek parameter mesin *3D Printer* terhadap tingkat elastisitas produk yang diinginkan dan *printability* material fleksibel yang nantinya bisa diterapkan pada industri percetakan *3D Printing*.

2. METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini menentukan parameter proses yang memberikan pengaruh terhadap elastisitas dalam mencetak material fleksibel TPU dengan menggunakan *3D Printing* teknologi *FDM*.

2.1 Objek Penelitian

Objek dari penelitian ini adalah mesin *3D Printer DIY* spesifikasi *frame* 200 mm × 200 mm × 100 mm dan memiliki satu *nozzle* berukuran 0.4 mm digunakan untuk mencetak *3D* objek penelitian. Filamen yang akan diproses memiliki diameter 1,75 mm

2.2 Bahan Baku Penelitian

Bahan baku dalam penelitian ini menggunakan filamen *thermoplastic polyurethane (TPU)*. Spesifikasi teknik filamen TPU ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi Filamen TPU 95A

<i>Filament Diameter</i>	1.75 mm
<i>Shore Hardness (A)</i>	95 A (pretty soft)
<i>Recommended Extruder Temperature</i>	210-230 °C
<i>Recommended Platform Temperature</i>	40-60 °C
<i>Density</i>	1.21 gr/cm ³
<i>Abrasion Resistance</i>	High
<i>Chemical Resistance</i>	Medium to High
<i>Shrinkage</i>	0.8-1.8%

Penelitian ini menggunakan filamen TPU dengan ukuran 1.75 mm dapat dilihat pada Gambar 1.

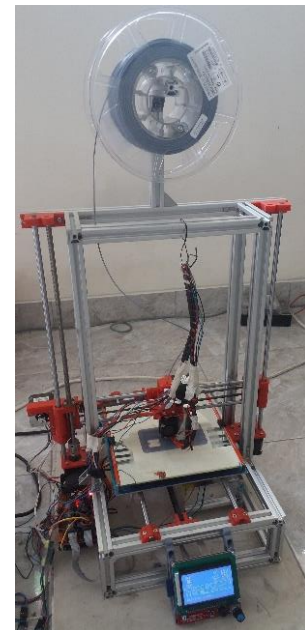


Gambar 1. Filamen TPU Diameter 1,75 mm

2.3 Peralatan Penelitian

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

1. Mesin *3D Printer Cartesian DIY (Do It Yourself)* dengan *build size (X,Y,Z)* 200mm × 200 mm × 300 mm



Gambar 2. Mesin *3D Printer Cartesian* DIY

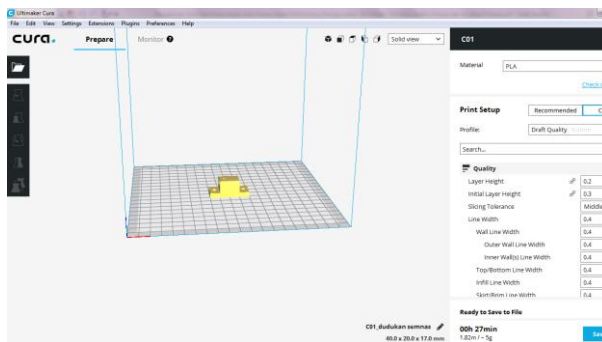
2. Laptop/komputer dengan spesifikasi *3D modelling merk Dell E6330*. Laptop digunakan untuk melakukan proses desain objek *3D*. Selain itu, laptop juga digunakan untuk menjalankan *software slicing* yang digunakan dalam penelitian ini dalam mengatur parameter proses *3D Printing*.



Gambar 3. Laptop Merk Dell E6330

3. Aplikasi *slicing software Ultimaker Cura 3.1.0-win64*. *Software* Ultimaker Cura digunakan untuk mengolah file *STL* objek *3D* menjadi *slice* beserta parameter proses

yang akan ditentukan dalam penelitian ini. Penentuan variasi parameter proses dapat dilakukan pada aplikasi ini. Tampilan *interface software* dapat ditunjukkan pada Gambar 4. sebagai berikut. Software ini digunakan untuk menentukan parameter proses seperti *layer thickness*, *printing speed*, *bed temperature*, *extruder temperature*, *shell thickness*, *infill*, dan lain-lain.



Gambar 4. Tampilan Interface Software Cura Ultimaker

4. Neraca digital yang digunakan sebagai alat ukur beban atau gaya dalam pengujian elastisitas objek cetak atau produk yang dihasilkan dapat ditunjukkan pada Gambar 5. sebagai berikut.



Gambar 5. Neraca Digital

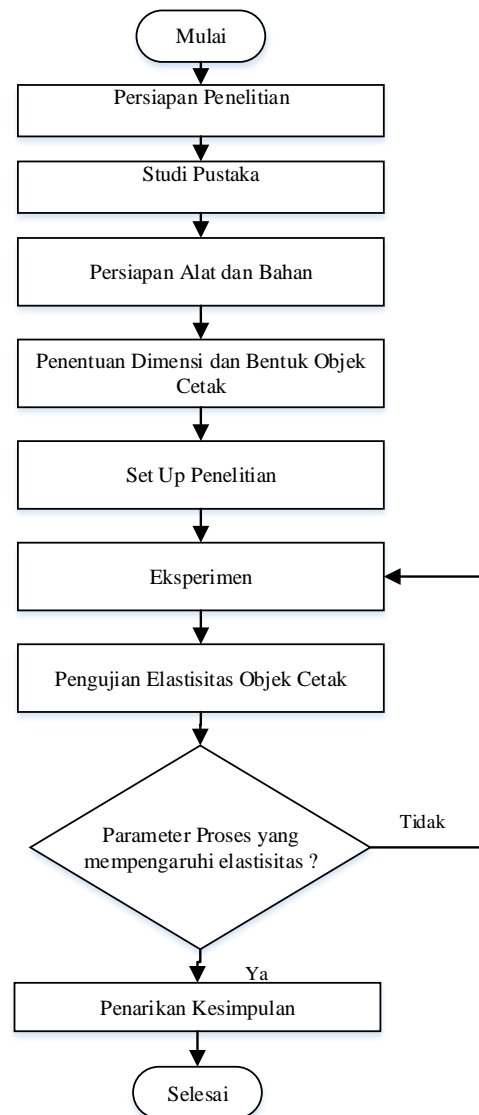
5. Perangkat Uji Elastisitas produk atau objek Cetak, peralatan ini digunakan untuk mengukur tingkat elastisitas produk atau objek cetak, yang dilengkapi neraca digital dalam mengukur beban atau yang ditimbulkan oleh elastisitas spesimen uji dapat ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Perangkat Uji Elastisitas Objek Cetak

2.4 Diagram Alir Penelitian

Tahapan penelitian yang akan dilakukan secara visual dapat dilihat pada diagram alir pada Gambar 7. sebagai berikut.



Gambar 7. Diagram Alir Penelitian

2.5 Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Persiapan Penelitian

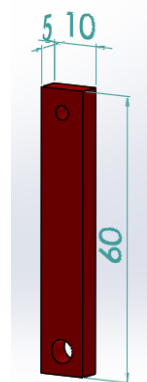
Tahapan ini dimulai dengan mengidentifikasi permasalahan yang ada pada 3D Printing FDM terutama filamen fleksibel. Dari permasalahan yang telah diidentifikasi tersebut, selanjutnya ditentukanlah objek penelitian. Beberapa hal yang menjadi pokok latar belakang dari penelitian ini adalah tentang parameter proses 3D Printing dengan menggunakan teknologi FDM. Beberapa parameter proses 3D Printing yang mempengaruhi tingkat elastisitas objek tiga dimensi yang menjadi perhatian utama dalam penelitian ini. Selanjutnya metode penelitian dibuat untuk menyusun urutan langkah-langkah kegiatan selama penelitian ini dilakukan. Pada tahap ini menyiapkan perangkat utama penelitian, bahan baku berupa filamen material fleksibel TPU, alat bantu, dan alat ukur, yang diperlukan untuk mengolah data dalam mendukung penelitian ini.

2. Studi Pustaka

Studi Pustaka merupakan langkah untuk mengkaji ulang penelitian sebelumnya yang memiliki kaitan dengan penelitian ini. Hal ini dilakukan untuk memahami penelitian-penelitian sebelumnya, sehingga dapat memberikan informasi yang dapat diaplikasikan untuk penelitian ini

3. Persiapan Alat dan Bahan

Pada tahap ini, semua alat dan bahan yang berhubungan dengan penelitian akan disiapkan sebaik mungkin supaya proses penelitian berjalan dengan lancar. Berdasarkan studi pustaka yang telah dilakukan pada tahapan sebelumnya, maka proses penentuan dimensi objek tiga dimensi dapat dilakukan. Pada penelitian ini akan ditentukan bentuk objek tiga dimensi berbentuk balok dengan dimensi (panjang 60 mm, lebar 10 mm, tebal 5 mm). Spesimen tersebut didesain agar dapat digunakan pada perangkat uji elastisitas.



Gambar 8. Objek Cetak

4. Set Up Penelitian

Pada tahapan ini penentuan parameter awal juga ditentukan berdasarkan studi pustaka dan

rekomendasi pabrik pembuat filamen fleksibel TPU. Pada tahap ini kegiatan mengkalibrasi 3D Printer seperti mendatarkan *bed* dan pengkalibrasian temperatur 3D Printer dengan menggunakan *Thermometer Infrared*. Pembuatan 3D objek dengan menggunakan CAD. Selanjutnya objek tersebut diolah pada *software slicing* (Ultimaker Cura 3.1.0-win64), pada tahap ini objek tiga dimensi atau spesimen uji akan dibuat *layer by layer* dengan tiga variasi *layer thickness*, dan tiga variasi *extruder temperature*. Parameter proses tetap seperti kecepatan cetak (*printing speed*), *Infill* 100%, *bed temperature* 60°C dan *shell thickness* 2 mm akan diatur pada mesin 3D Printer.

5. Eksperimen

Parameter proses yang akan digunakan pada penelitian ini adalah parameter proses yang akan memberikan efek terhadap tingkat elastisitas produk yang dihasilkan oleh 3D Printing. Parameter-parameter tersebut adalah *layer thickness*, *extruder temperature*, dengan. Penelitian ini menggunakan dua faktor dan masing-masing faktor terdiri dari tiga level dengan menggunakan parameter proses *printing speed*, *bed temperature*, *infill*, *flowrate*, dan *shell thickness* yang tetap. Tabel 2. berikut ini menunjukkan setting parameter proses yang ditentukan pada *software Cura* Ultimaker 3.1.0 pada mesin 3D Printing FDM terhadap filamen TPU.

Tabel 2. Parameter Proses Filamen TPU

<i>Extruder Temperature</i> (°C)	<i>Printing Speed</i> (mm/s)	<i>Layer Thickness</i> (mm)	<i>Shell Thickness</i> (mm)
205	30	0.1	2
210	30	0.15	2
215	30	0.2	2

6. Pengujian Elastisitas Objek Cetak

Tahapan pengujian tingkat elastisitas objek cetak dengan parameter proses yang telah dilakukan dengan menggunakan timbangan digital sebagai alat ukur gaya atau beban. Tiap spesimen dalam penelitian ini akan diuji elastisitasnya dengan cara ditarik dengan jarak yang sama dengan menggunakan perangkat uji elastisitas.

7. Penarikan Kesimpulan

Langkah terakhir penelitian ini adalah membuat kesimpulan dari seluruh tahapan dalam penelitian ini. Tahapan ini memberikan gambaran jawaban atas permasalahan yang melatarbelakangi dalam penelitian ini. Selain itu, tahapan ini dapat memberikan sebuah gambaran ide atau saran pada penelitian lebih lanjut yang berkaitan dengan penelitian ini. Tahapan ini memberikan informasi parameter proses 3D Printing terhadap variasi elastisitas produk yang dihasilkan dengan

menggunakan parameter proses yang telah dipilih dalam penelitian ini.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah dilakukan eksperimen dengan menggunakan 3D *Printing* terhadap filamen TPU maka menghasilkan sembilan (9) variasi spesimen uji dengan parameter proses menggunakan aplikasi *slicing* Cura Ultimaker 3.1.0. Variasi parameter proses dapat ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Variasi Parameter Proses Filamen TPU

No	Extruder Temperature (°C)	Printing Speed (mm/s)	Layer Thickness (mm)	Shell Thickness (mm)
1	205	30	0.10	2
2	205	30	0.15	2
3	205	30	0.20	2
4	210	30	0.10	2
5	210	30	0.15	2
6	210	30	0.20	2
7	215	30	0.10	2
8	215	30	0.15	2
9	215	30	0.20	2

Pada Gambar 9. ditunjukkan sembilan (9) spesimen uji hasil cetak dengan menggunakan 3D *Printing*.



Gambar 9. Spesimen Uji

Selanjutnya sembilan spesimen uji tersebut diuji tingkat elastisitasnya dengan menggunakan neraca digital dengan jarak yang sama yaitu 23,5cm dengan cara spesimen uji dikaitkan pada neraca digital, selanjutnya neraca digital digantung pada perangkat uji elastisitas, nilai beban akan muncul pada *display* neraca digital, tunggu sampai *lock*, kemudian catat nilai pengujian elastisitas tersebut. Hindari posisi *lock* pada saat pengujian berlangsung karena akan menyebabkan hasil pengujian yang salah. Untuk menghindari kesalahan dapat pengujian, maka dapat dilakukan pengulangan pengukuran hingga enam kali atau lebih sesuai dengan kebutuhan. Perangkat uji elastisitas seperti ditunjukkan pada Gambar 6. Hasil pengujian seluruh spesimen uji tersebut dapat ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Pengujian Elastisitas Spesimen

Spesimen No.	Pengujian Elastisitas (kg)							
	1	2	3	4	5	6	Rata-rata	Deviasi
1	0,345	0,325	0,345	0,345	0,345	0,345	0,342	0,008
2	0,355	0,330	0,325	0,335	0,325	0,315	0,331	0,014
3	0,380	0,360	0,350	0,370	0,365	0,365	0,365	0,010
4	0,365	0,360	0,345	0,340	0,365	0,340	0,353	0,012
5	0,330	0,360	0,335	0,320	0,330	0,320	0,333	0,015
6	0,375	0,360	0,365	0,395	0,360	0,360	0,369	0,014
7	0,345	0,335	0,330	0,345	0,330	0,330	0,336	0,007
8	0,325	0,335	0,345	0,345	0,325	0,325	0,333	0,010
9	0,380	0,375	0,385	0,380	0,375	0,375	0,378	0,004

Berdasarkan data pada Tabel 4. terlihat bahwa spesimen No. 9 memiliki nilai rata-rata tertinggi yaitu 0.378 kg. Parameter proses spesimen No. 9 dapat dilihat pada Tabel 3. Hal ini menunjukkan bahwa pengaruh *extruder temperature* dan *layer thickness* mempengaruhi tingkat elastisitas produk, spesimen No. 9 memiliki setting *extruder temperature* 215°C dan *layer thickness* 0,2 mm.. Spesimen No. 3 juga memiliki nilai rata-rata sebesar 0.365 kg dengan *extruder temperature* 205°C dan *layer thickness* 0,2 mm. Spesimen No. 6 memiliki nilai rata-rata pengujian sebesar 0, 369 kg, dengan *temperature extruder temperature* 210°C dan *layer thickness* 0,2 mm. Spesimen No. 2 memiliki nilai rata-rata pengujian elastisitas paling kecil yaitu 0,331 kg, dengan parameter proses *ekstruder temperature* 205°C dan *layer thickness* 0,15 mm. Sama halnya dengan spesimen No. 5 yang memiliki nilai rata-rata pengujian elastisitas sebesar 0,333 kg, dengan parameter proses *extruder temperature* 210°C dan *layer thickness* 0,15 mm. Spesimen No. 8 dengan parameter proses *extruder temperature* 215°C dan *layer thickness* 0,15 mm memiliki nilai rata-rata pengujian tingkat elastisitas 0,333 kg. Spesimen No. 1 dengan parameter proses *extruder temperature* 205°C dan *layer thickness* 0,1 mm memiliki nilai rata-rata pengujian elastisitas sebesar 0,342 kg. Spesimen dengan *layer thickness* 0,1 mm adalah spesimen No. 4 dengan nilai rata-rata pengujian elastisitas 0,353 kg dengan *extruder temperature* 210°C dan spesimen No. 7 memiliki nilai rata-rata pengujian elastisitas 0,336 kg dengan setting parameter proses *extruder temperature* 215°C.

4. SIMPULAN

Penelitian dengan menggunakan filamen TPU untuk melihat pengaruh parameter proses 3D *Printing* terhadap tingkat elastisitas produk telah dilakukan. Melalui penelitian ini diperoleh bahwa parameter proses yang disetting pada *slicing software* mempengaruhi tingkat elastisitas produk. Semakin kecil nilai yang ditunjukkan oleh neraca digital, maka

semakin tinggi tingkat elastisitas produk tersebut. Semakin besar nilai yang ditunjukkan pada neraca digital, maka semakin rendah tingkat elastisitas atau semakin *rigid* produk tersebut. Pengaturan *Layer thickness* 0,2 mm pada saat *slicing* memberikan pengaruh berkurangnya tingkat elastisitas terhadap hasil *printing*. Spesimen dengan *Layer thickness* 0,2 mm seperti spesimen No. 3, spesimen No.6, dan spesimen No.9 memiliki nilai rata-rata pengujian elastisitas yang cenderung sama yaitu 0,365 kg, 0,369 kg, dan 0,378 kg. *Layer thickness* 0,15 mm seperti spesimen No.2, spesimen 5, dan spesimen No.8, menghasilkan produk paling elastis yaitu 0,331 kg, 0,333 kg, dan 0,333 kg bila dibandingkan dengan *layer thickness* 0,1 mm dan 0,2 mm dengan tiga variasi *extruder temperature* 205°C, 210°C, dan 215°C. Perbedaan *extruder temperature* sebesar 5°C dengan *layer thickness* 0,15 mm tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap tingkat elastisitas produk yang dicetak menggunakan filamen TPU. *Layer thickness* 0,1 mm memberikan efek menurunkan elastisitas produk bila dibandingkan dengan *layer thickness* 0,15 mm. *Layer thickness* 0,2 mm dan *extruder temperature* 215°C memiliki tingkat elastisitas yang paling rendah atau paling kaku (*rigid*) seperti yang ditunjukkan spesimen No. 9 dengan nilai deviasi 0,004.

5. SARAN

Penelitian dengan menggunakan teknologi 3D *Printing* terhadap filamen thermoplastics polyurethane (TPU) masih sangat perlu dikembangkan. Ada beberapa saran untuk penelitian yang lebih lanjut dalam rangka pengembangan dan peningkatan penelitian di bidang 3D *Printing* material fleksibel atau elastomer adalah sebagai berikut.

1. Penelitian terhadap tingkat elastisitas filamen TPU dengan menggunakan teknologi FDM dapat menggunakan parameter proses yang lain seperti variasi *flowrate*, variasi *infill*, atau variasi parameter-parameter proses lainnya untuk melihat pengaruhnya terhadap elastisitas produk.
2. Penelitian terhadap filamen TPU dapat dikembangkan dengan cara menambah variasi parameter proses lebih banyak dengan memvariasikan level tiap faktor sehingga diperoleh parameter proses yang lebih optimal dalam menghasilkan tingkat elastisitas produk.
3. Penelitian filamen fleksibel dapat menggunakan variasi material filamen yang lain seperti *Thermoplastic Elastomer* (TPE), *flexible* PLA, dan *Flexible Polyester* (FPE).

4. Penelitian terhadap filamen fleksibel dapat dilanjutkan dengan produk jadi yang bernilai ekonomis baik di bidang manufaktur, robotika, kedokteran, dan dalam bidang-bidang yang lain.
5. Pengujian tingkat elastisitas produk dengan menggunakan filamen fleksibel atau elastomer dapat ditingkatkan dengan menggunakan perangkat uji yang lebih teliti dan dengan menggunakan *Design of Experiment* (DOE) yang lebih baik agar dapat menghasilkan parameter proses yang lebih optimal terhadap tingkat elastisitas produk atau objek cetak.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Mohsen Attaran., 2017. The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing. *Business Horison.*, Volume 60, Issue 5. P. 677-688. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2017.05.011>
- [2] B. Satyanarayana and Kode Jaya Prakash., 2015. Component Replication using 3D Printing Technology. *Procedia Materials Science 10.*, p.263 – 269
- [3] Pham D, Gault R., 1998. A comparison of rapid prototyping technologies, *IntJ Mach Tools Manuf.*, 1998;38:1257–87
- [4] Tontowi, A, E., et al., 2017. Optimization of 3D-Printer Process Parameters for Improving Quality of Polylactic Acid Printed Part, *International Journal of Engineering and Technology (IJET)*, Vol 9 No 2 Apr-May 2017
- [5] Jan Magnus Granheim Farstad et al. 2017. Surface friction of rapidly prototyped wheels from 3D-printed thermoplastic elastomer : An experimental study/ *Procedia CIRP 60* 247-252