

INVESTIGASI EKSPERIMENTAL KARAKTERISTIK KEKUATAN TARIK PADUAN RESIN FLEKSIBEL-STANDAR UNTUK MATERIAL 3D *PRINTING*

Gilang Argya Dyaksa ¹⁾, Felix Krisna Aji Nugraha ²⁾, Oktavianus Nekson Hermawan ¹⁾, Mahendra Pratama Putra ¹⁾, Achilles Hermawan Astyanto ^{1,3)} ✉

¹⁾ Program Studi Teknik Mesin
Universitas Sanata Dharma
Kampus III USD Maguwoharjo,
Yogyakarta, 55282, INDONESIA
gilangargyadyaksa@usd.ac.id
235214039@student.usd.ac.id
235214055@student.usd.ac.id

²⁾ Program Studi Teknologi Rekayasa
Mekatronika
Universitas Sanata Dharma
Kampus III USD Maguwoharjo,
Yogyakarta, 55282, INDONESIA
felix@usd.ac.id

³⁾ Pusat Kajian Teknologi Cerdas
Universitas Sanata Dharma
Kampus III USD Maguwoharjo,
Yogyakarta, 55282, INDONESIA
achil.herma@usd.ac.id

Abstract

Over the years, technologies of 3D printing have enhanced the opportunity to ease the production of complex geometries. In particular, it further implies that the flexibility of materials is of a great importance. Therefore, the works covering studies of applicability on novel materials in rapid prototyping contribute to the development of additive manufacturing. The present work experimentally investigates a mechanical property, namely tensile strength, of 3D printing materials on the basis of the concentration of flexible-standard resins. Tensile strengths were obtained by a series of tensile tests. Here, the result reveals that the tensile strength monotonously decreases as the increase of the concentration of flexible resin's concentration. Moreover, an ANOVA analysis strongly implies a consistent relationship between the tensile strength and the material's mixture.

Keywords: 3D Printing, Flexible-Standard Resins, Tensile Strength, ANOVA.

1. PENDAHULUAN

Teknologi manufaktur aditif (*additive manufacturing*) yang berkembang pesat dalam beberapa dekade terakhir memantik inovasi cetak tiga dimensi melalui teknik lapis (*layering*) yang disebut *3D printing* ^[1]. Metode yang memungkinkan pembuatan objek tiga dimensi lapisan demi lapisan ini menawarkan kemudahan dan kecepatan (*rapid prototyping*) dalam pembuatan benda jadi siap pakai ^[2]. Dalam perkembangannya pemilihan jenis *resin* menjadi hal fundamental pada teknologi ini.

Pemilihan jenis *resin* 3D printing disesuaikan dengan aplikasinya. *Resin hi-temp* dimanfaatkan untuk pembuatan benda yang memiliki ketahanan suhu tinggi, sedangkan *resin wax* digunakan untuk proses pengecoran. *Resin dental* dipakai untuk pembuatan objek gigi yang *biocompatible* terhadap tubuh manusia, sementara *resin tough* digunakan untuk benda-benda fungsional. Pemanfaatan *resin* fleksibel menjadi pilihan untuk benda-benda bergeometri kompleks.

Jenis *resin* fleksibel yang umum digunakan dalam 3D printing adalah *stereolithography* (SLA). Jenis ini memiliki prinsip kerja membentuk objek 3D lapisan demi lapisan menggunakan bahan *resin* cair yang dimasukkan ke dalam bak mesin, dan

Corresponding Author:

✉ Achilles Hermawan A.

Received on : 2024-08-01

Revised on : 2025-01-24

Accepted on : 2025-02-08

<https://rekayasamesin.ub.ac.id/>

DOI: [10.21776/jrm.v16i1.1913](https://doi.org/10.21776/jrm.v16i1.1913)



Copyright: © 2023 by the authors.

kemudian memadat akibat terkena pancaran sinar *ultraviolet* (UV) ^[3]. Penggunaan SLA memungkinkan untuk pembuatan objek yang lebih detail daripada *Fused Deposition Modeling* (FDM) berbahan plastik ^[4]. Hal ini dikarenakan mesin SLA tidak menggunakan perantara nosel seperti pada mesin FDM. Pada mesin SLA, *resin* dapat langsung mengeras pada titik tertentu dengan bantuan cahaya UV. Alhasil, *resin* fleksibel menjadi bahan yang menarik perhatian dalam 3D printing karena karakteristik mekanisnya. Sifat elastisitasnya yang tinggi mendukung pembuatan geometri kompleks dengan ketahanan baik.

Salah satu aplikasi SLA untuk 3D printing adalah pembuatan model anatomi dari hasil *computed tomography* (CT) scan maupun *magnetic resonance imaging* (MRI) ^[7]. Aplikasi SLA mampu memenuhi tuntutan geometri kompleks dalam bidang medis tersebut. Model anatomi seperti *ventricular system*, saluran pembuluh darah pada paru-paru, hingga *thoracic aortic aneurysm* telah dilaporkan keberhasilan pembuatannya ^[10]. SLA juga dilaporkan telah berhasil mendukung pembuatan geometri gigi sintesis sesuai hasil dari CT scan ^[8].

Dalam perkembangannya, investigasi aplikasi bahan biomaterial untuk membentuk *bio-print* telinga manusia sintetis dengan memanfaatkan teknologi 3D printing turut dilaporkan ^[9]. Model anatomi lain seperti bentuk tulang kepala yang sebelumnya sulit dibuat berbasis teknologi manufaktur konvensional pun telah berhasil dikonstruksi dengan mengaplikasikan teknologi ini ^[10]. Keberhasilan ini kemudian turut digunakan untuk pembuatan anatomi tubuh manusia sebagai media belajar alternatif pengganti *cadaver* bagi mahasiswa kedokteran ^[11].

Tidak hanya itu, teknologi 3D printing berhasil merekonstruksi wajah janin hasil dari CT-Scan melalui pengembangan alur kerja rekonstruksi wajah sebagai identifikasi awal tim dokter terhadap kelainan janin ^[12]. Hasil rekonstruksi 3D printing dari wajah janin turut memberikan orang tua kesempatan untuk melihat wajah serta merasakan sentuhan yang berdampak pada peningkatan interaksi dan pengalaman. Bahan *resin* 3D printing yang dicampur dengan *titanium* pun dikembangkan sebagai bahan alternatif implan pada tulang ^[13]. Satu catatan penting adalah selain pertimbangan sifat mekanis, penggunaan implan dari bahan *resin* 3D printing masih perlu dikembangkan dengan memperhatikan *biocompatibility* agar dapat diterima oleh tubuh, dan tidak menimbulkan reaksi berlebih di kemudian hari pasca pemasangan.

Pertimbangan karakteristik mekanis *resin* fleksibel untuk berbagai aplikasi produk 3D printing turut menuntun pada pentingnya uji tarik sebagai parameter kritis dalam evaluasi performa *resin*. Uji tarik memberikan pemahaman tentang daya tahan material terhadap beban eksternal ^[4]. Didasarkan hal tersebut, aplikasi produk 3D printing dilaporkan perlu memperhatikan pengaruh kombinasi campuran bahan *resin* fleksibel terhadap tegangan tarik spesimen *resin* fleksibel. Oleh karenanya, suatu kajian pemanfaatan bahan SLA pada 3D printing yang telah dilaporkan mampu mempercepat pembuatan prototipe ortotik tangan turut memperhatikan pentingnya investigasi terhadap parameter fisis berupa karakteristik kekuatan tarik ^[14].

Penelitian ini menginvestigasi dan menganalisis karakteristik tegangan tarik pada *resin* fleksibel 3D printing. Spesimen uji tarik mengikuti standar *American Society for Testing and Materials* (ASTM) D412 yaitu *Standard Test Methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomer* ^[15]. Hasil penelitian ini menawarkan wawasan komprehensif tentang performa sifat mekanis *resin* fleksibel. Hal ini memungkinkan pengembangan aplikasi lebih lanjut di berbagai industri, seperti pembuatan produk kesehatan, komponen mekanikal, bahkan komponen elektronik yang memerlukan fleksibilitas, sekaligus ketahanan.

Penelitian ini memberikan pemahaman tentang karakteristik *resin* fleksibel yang dihasilkan. Hasil penelitian ini juga mendeskripsikan potensi aplikasi *resin* fleksibel sebagai bahan alternatif dalam bidang manufaktur yang selama ini pembuatan benda dengan bahan elastomer menggunakan metode *injection molding* dan *hot press*. Pada

akhirnya, penelitian ini memberikan kontribusi positif terhadap pengembangan teknologi *3D printing* dan meningkatkan aplikabilitas *resin* fleksibel dalam berbagai bidang industri.

2. METODOLOGI

Dalam penelitian ini, pemilihan bahan *resin* fleksibel maupun *resin* standar mempertimbangkan ketersediaannya di pasar lokal. Oleh sebab itu, *resin* standar *Anycubic* yang mudah diperoleh menjadi pilihan, sedangkan *Esun eResin-Flex* digunakan sebagai *resin* fleksibel. Properti fisis dan mekanis kedua *resin* diberikan di Tabel 1.

Tabel 1. Sifat fisis *resin* standard dan fleksibel yang dipergunakan dalam penelitian.

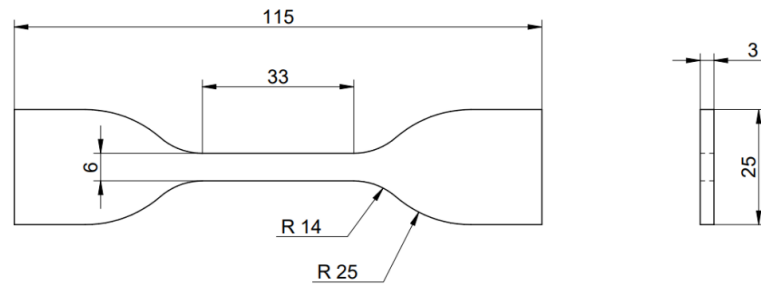
Parameter	<i>Anycubic</i>	<i>Esun eResin-Flex</i>
Viskositas (mPa.s)	150 – 200	600 – 1400
Densitas (g/cm ³)	1,05 – 1,25	1,02 – 1,05
Tensile strength (MPa)	36 – 45	4 – 10
Elongation (%)	8 – 12	100 – 350
Hardness (D)	82	60 – 90
Flexural strength (MPa)	50 – 65	-

Geometri spesimen didesain sesuai dengan standar ASTM D412 untuk uji tarik bahan elastomer termoplastik. Geometri dan ukuran spesimen yang digunakan diperlihatkan di Gambar 2. Pembuatan desain spesimen menggunakan perangkat desain komputer (*computer aided design/CAD*) *Solid Edge Community Edition*. Dimensi yang akan digunakan uji akurasi dimensi adalah panjang total 115 milimeter (mm), lebar total 25 mm, tebal total 3 mm dan lebar leher 6 mm.

Tabel 2. Spesifikasi mesin cetak *Anycubic Mono Photon X*.

Spesifikasi	Dimensi	Unit
Ukuran mesin	270 × 290 × 475	mm
Ukuran bed	192 × 120 × 245	mm
Light source	High quality filament (405 nm of wavelength)	4 – 10
Resolusi xy	0,050 (3840 × 2400)	mm
Resolusi z	0,01	mm
Resolusi layer	0,01 – 0,15	mm
Kecepatan cetak	Maks. 60	mm/h
Material	405 (UV resin)	nm
Teknologi	LCD-based SLA	-

Spesimen uji dicetak menggunakan mesin SLA *Anycubic Photon Mono X* dengan spesifikasi sebagaimana diberikan di Tabel 2. Spesimen dicetak sejumlah tiga untuk setiap variasi campurannya, sehingga jumlah total spesimen adalah tiga puluh. Konsentrasi campuran *resin* fleksibel dan *resin* standar pada masing-masing spesimen dapat dilihat pada Tabel 3.



Gambar 1. Geometri spesimen menurut standar ASTM D412 (satuan dalam mm)

Tabel 3. Konsentrasi campuran *resin* standar dan fleksibel pada spesimen

Notasi spesimen	Resin fleksibel (%)	Resin standard (%)
RF10	10	90
RF20	20	80
RF30	30	70
RF40	40	60
RF50	50	50
RF60	60	40
RF70	70	30
RF80	80	20
RF90	90	10
RF100	100	0

Untuk mendapatkan nilai kekuatan tarik masing-masing spesimen, dilakukan uji tarik menggunakan mesin JTM-UTC 220 serial 6604. Pada pengujian ini, kecepatan uji tarik diatur sebesar 10 mm/menit dengan nilai interval pembebanan adalah 0,01 kilogram gaya (kilogram *force*/kgf).

Tabel 4. Parameter pencetakan spesimen.

Paramater	Nilai	Satuan
<i>Exposure time</i>	10	s
<i>Bottom layer count</i>	5	layer
<i>Bottom exposure time</i>	55	s
<i>Lifting distance</i>	10	mm
<i>Lifting speed</i>	50	mm/min
<i>Retracting speed</i>	100	mm/min

Setelah uji tarik, dilakukan analisis statistik ANOVA. Dari uji analisis varians satu jalur (*one-way ANOVA*) diperoleh legitimasi pengaruh konsentrasi *resin* fleksibel terhadap kekuatan tarik spesimen. Lebih lanjut, data yang dianalisis menggunakan ANOVA menawarkan dua pengujian hipotesis. Yang pertama adalah tidak ada pengaruh variasi *resin* terhadap tegangan tarik pada material (H_0), dan yang kedua adalah ada pengaruh variasi *resin* terhadap tegangan tarik (H_1). Di sini, formulasi alur perhitungan diberikan oleh Pers. (1) hingga (4).

$$SS_{treatments} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \underline{y}_{..})^2 \quad (1)$$

$$SS_T = SS_{treatments} + SS_E \quad (2)$$

$$MS_{treatments} = \frac{SS_{treatments}}{a-1} \quad (3)$$

$$MS_E = \frac{SS_E}{(a-1)} \quad (4)$$

dengan:

- SS_T : Total dikoreksi dari kuadrat penjumlahan
 $SS_{treatment}$: Kuadrat penjumlahan akibat perlakuan
 SS_E : Kuadrat penjumlahan akibat kesalahan
 $MS_{treatment}$: Kuadrat perlakuan
 MS_E : Total dikoreksi dari kuadrat dari kesalahan

Selanjutnya, uji statistik digunakan mencari statistik F (F_{hit}) dengan menggunakan Pers. (5).

$$F_{hit} = \frac{SS_{treatments} / (a-1)}{SS_E / (N-a)} = \frac{MS_{treatments}}{MS_E} \quad (5)$$

Pada akhirnya, hipotesis harus ditolak (H_0) apabila diperoleh perbedaan konsentrasi resin fleksibel jika tidak memenuhi Pers. (6).

$$F_{hit} > F_{tabel} \quad (6)$$

Tabel 5. Instrumentasi penelitian.

Instrumentasi	Tipe	Spesifikasi
Mesin cetak	<i>Anycubic Photon Mono X</i>	SLA
Perangkat keras	<i>Laptop</i>	Intel i5, memori 16GB, VGA Gen 12 th
Perangkat lunak CAD	<i>Solid Edge</i>	<i>Community edition</i>
Mesin uji tarik	JTM-UTC 220 serial 6604	Maks. 5 ton
Jangka sorong	<i>Mitutoyo 505-730 dial caliper</i>	Maks. 150 mm, akurasi 0,02 mm

3. HASIL DAN DISKUSI

3.1. Karakteristik Kekuatan Tarik

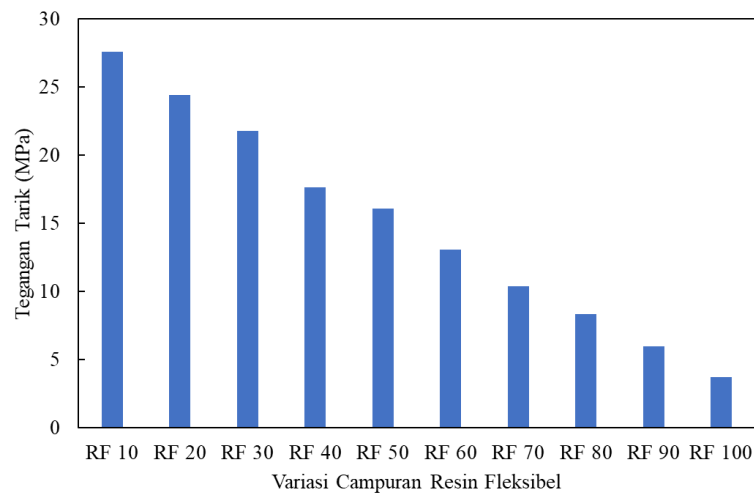
Gambar 2 memperlihatkan visualisasi hasil uji tarik pada spesimen. Meskipun dari gambar terlihat bahwa tidak terlihat adanya *necking* pada pola patahan, detail uji tarik justru menunjukkan ada *displacement* yang cukup besar sebelum terjadi patahan. Hasilnya, karakteristik patahan tersebut termasuk ke dalam jenis ductile fracture yang artinya spesimen dengan konsentrasi resin fleksibel dominan memiliki sifat elastisitas yang semakin tinggi. Di sini, semakin sedikit konsentrasi resin fleksibel maka *displacement* yang dihasilkan juga semakin kecil.

Nilai kekuatan tarik masing-masing spesimen diberikan di Gambar 3. Dari gambar terlihat bahwa kekuatan tarik tertinggi didapatkan dari spesimen RF10 dengan hasil 27,56 MPa, sedangkan kekuatan tarik terendah diperoleh dari spesimen RF100 dengan hasil 3,72 MPa. Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi resin fleksibel menurunkan kekuatan tarik spesimen.



Gambar 2. Visualisasi spesimen paska uji tarik.

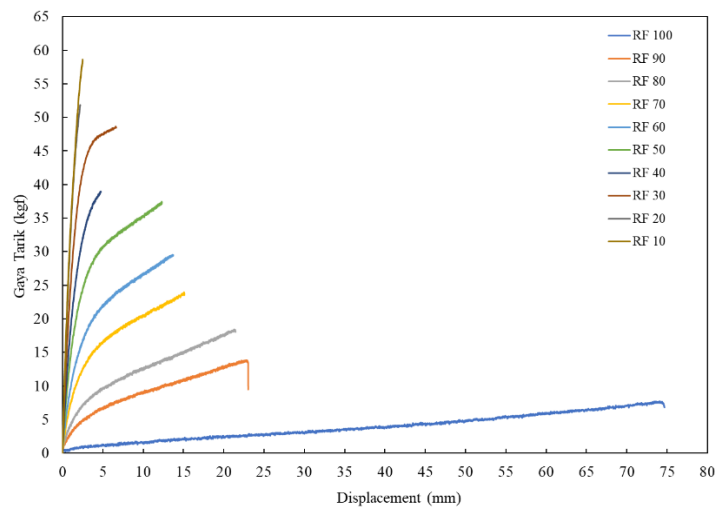
Lebih detail, Gambar 4 memperlihatkan karakteristik rerata displacement sebagai fungsi gaya tarik yang diberikan untuk setiap variasi campuran *resin*. Dari gambar terungkap kesesuaian dengan data hasil uji tarik dimana elongasi sebelum patah paling kecil terdapat pada spesimen RF10 yaitu 2,42% sementara elongasi maksimal diperoleh dari RF100 sebesar 66,04%. Hasil ini mengimplikasikan bahwa setiap variasi spesimen memberikan modulus elastisitas yang bervariasi tergantung pada konsentrasi *resin* fleksibel, sekaligus menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi *resin* fleksibel menurunkan kekuatan tarik di satu sisi, namun meningkatkan elongasi di sisi lain. Tren ini sesuai dengan hasil yang telah dilaporkan oleh Gallos dkk.^[17] serta Asaletha dkk.^[18] Pada penelitiannya, Gallos dkk.^[17] melaporkan bahwa polimer termoplastik *polylactic-acid* (PLA) ditambahkan aditif berbasis asam *ferulat* (*ferulic acid-derived biobased additive*/BDF) dengan rasio dari 10% - 40% menghasilkan bahan elastomer, dimana semakin banyak aditif BDF, semakin besar elongasi spesimen dan sebaliknya. Sepaham dengan itu, Aseletha dkk.^[18] Sebelumnya juga melaporkan bahwa *elastomer polyurethane* (PU) dicampurkan dengan filler berupa serbuk silika, serbuk alumina, dan serbuk karbon untuk mengetahui pengaruh jenis *filler* terhadap sifat mekanis PU. Di sini, penambahan setiap jenis pengisi (*filler*) pada PU meningkatkan tegangan tarik dan ketahanan geser, namun elastisitas dari PU berkurang.



Gambar 3. Pengaruh konsentrasi *resin* fleksibel terhadap kekuatan tarik spesimen

Penjelasan yang logis adalah pada dasarnya spesimen dalam penelitian ini merupakan campuran polimer termoplastik (*resin* standar) dan elastomer termoplastik (*resin* fleksibel) dengan variasi konsentrasi campuran. Besarnya konsentrasi masing-masing *resin* dalam pencampuran berdampak pada kekuatan tarik maupun elongasi yang diperoleh. *Resin* fleksibel memiliki kekuatan tarik lebih rendah daripada *resin* standar.

Oleh karenanya, peningkatan konsentrasi *resin* fleksibel menurunkan kekuatan tarik paduan.



Gambar 4. Karakteristik rerata displacement terhadap beban tarik yang diberikan.

Penambahan konsentrasi *resin* fleksibel pada spesimen justru meningkatkan elongasi dari spesimen yang terlihat dari peningkatan nilai displacement. Oleh karena itu, keseimbangan antara kekuatan tarik dan elongasi dipengaruhi oleh tingkat konsentrasi dari *resin* fleksibel dan *resin* standar. Peningkatan *resin* fleksibel menyebabkan penurunan kekuatan tarik di satu sisi, namun meningkatkan elongasi karena adanya perubahan dalam mekanisme deformasi dan distribusi tegangan di dalam struktur material. Alhasil, elongasi terkecil diperoleh dari RF20 dengan nilai 2,37% sementara elongasi terbesar didapatkan dari RF100 sebesar 66,04%.

Dari Gambar 4 yang memperlihatkan grafik karakteristik displacement terhadap gaya tarik yang diberikan pada setiap variasi spesimen, juga terungkap bahwa setiap variasi memberikan modulus elastisitas yang beragam, tergantung pada konsentrasi campuran *resin*. *Displacement* terendah didapatkan dari spesimen dengan konsentrasi *resin* fleksibel paling kecil yaitu RF20 dengan harga 2,19 mm, sementara displacement tertinggi sebesar 74,68 mm diperoleh dari spesimen dengan konsentrasi *resin* fleksibel terbanyak yaitu RF100. Di sini, observasi memperlihatkan bahwa spesimen RF100 mengalami pertambahan panjang saat proses uji tarik, namun ketika spesimen mengalami patah, panjangnya kembali seperti semula. Hal ini menunjukkan bahwa spesimen dengan konsentrasi *resin* fleksibel dominan mengalami deformasi elastis. Tren ini terjadi pada seluruh spesimen yang memiliki konsentrasi *resin* fleksibel lebih banyak dari *resin* standar.

3.2. Analisis ANOVA

Analisis ANOVA dilakukan untuk menguji variasi campuran *resin* fleksibel berpengaruh terhadap tegangan tarik dari spesimen. Dalam penelitian ini, uji ANOVA memanfaatkan data uji tarik. Jumlah sampel adalah 30 sesuai dengan banyaknya spesimen yang digunakan. Berdasarkan Tabel 6 dilakukan penjumlahan total pada jumlah dari sampel 1 sampai sampel 3 dan rerata dari masing-masing variasi.

Tabel 7. Tabel jumlah total sampel dan rerata masing-masing variasi spesimen.

Notasi spesimen	Beban tarik (kgf/mm ²)				
	Sampel 1	Sampel 2	Sampel 3	Total	Rerata
RF10	2,82	2,78	2,83	8,43	2,81
RF20	2,51	2,57	2,38	7,46	2,49

RF30	2,20	2,24	2,21	6,65	2,22
RF40	1,87	1,82	1,71	5,40	1,80
RF50	1,63	1,67	1,61	4,91	1,64
RF60	1,35	1,35	1,30	4,00	1,33
RF70	1,05	1,08	1,05	3,18	1,06
RF80	0,82	0,88	0,84	2,54	0,49
RF90	0,59	0,72	0,52	1,83	0,61
RF100	0,32	0,47	0,35	1,14	0,38
Grand total				45,54	1,52

Hasil analisis ANOVA dapat dilihat pada Tabel 8. Dari tabel diperoleh nilai derajat kebebasan (*degree of freedom*) perlakuan sebesar 9 dengan galat, $\epsilon = 11$ dari total sebanyak 20. Nilai jumlah kuadrat perlakuan dan kuadrat total perlakuan masing-masing sebesar 18,0101 dan 2,0011, sedangkan nilai galat total koreksi dalam perlakuan diperoleh sebesar 0,07373 dan kuadrat total perlakuan sebesar 0,0067. Hasil perhitungan nilai F_{hit} diperoleh sebesar 298,541. Nilai kritis (F_{tab}) dengan dengan tingkat ketelitian 1% atau tingkat kepercayaan sebesar 99% diperoleh sebesar 2,8962.

Tabel 8. Tabel perhitungan ANOVA.

SK	DB	JK	KT	F_{hit}	F_{tab}	Ket.
					0,01	
Perlakuan	9	18,0101	2,0011	298,5407	4,6315	**
Galat/sisa	11	0,0737	0,0067	-	-	-
Total	20	18,0838	-	-	-	-

4. KESIMPULAN

Karakteristik sifat mekanis berupa kekuatan tarik paduan *resin* fleksibel-standar untuk material 3D *printing* telah diinvestigasi secara eksperimental. Uji tarik dilakukan menggunakan mesin JTM-UTC 220 serial 6604 dengan kecepatan pembebanan sebesar 10 mm/menit dengan geometri spesimen berbasis standar ASTM D412. Dari hasil yang diperoleh terungkap bahwa peningkatan konsentrasi *resin* fleksibel pada paduan menurunkan kekuatan tarik di satu sisi, serta meningkatkan elongasi specimen di sisi lain. Kekuatan tarik tertinggi diperoleh dari RF10 sebesar 27,56 MPa, sedangkan kekuatan tarik terendah didapatkan dari RF100 sebesar 3,72 MPa. Selanjutnya, displacement terbesar terdapat pada RF100 dengan nilai 74,68 mm, sedangkan displacement terkecil terdapat pada RF20 dengan hasil 2,19 mm. Lebih lanjut, didasarkan analisis ANOVA dengan persentase galat 0,01 diperoleh $F_{hit} > F_{tab}$ sehingga menjawab hipotesis bahwa variasi komposisi campuran *resin* mempengaruhi kekuatan tarik dimana $F_{hit} = 298,5407$ dan $F_{tab} = 4,6315$.

PERNYATAAN TERIMA KASIH

Atas pendanaan riset, peneliti berterima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat, Universitas Sanata Dharma. Peneliti juga mengapresiasi bantuan Martana Dwiyaning Nugroho dan Laboratorium Ilmu Logam Universitas Sanata Dharma atas diskusi hingga dukungan teknis dalam uji tarik spesimen.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. I. Tay, L. T. Chuan, A. H. Nor Aziati, and A. N. A. Ahmad, "An Overview of Industry 4.0: Definition, Components, and Government Initiatives," *J. Adv. Res.*

- Dyn. Control Syst.*, vol. 10, 2018. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/332440369>
- [2] B. Hadisujoto and R. Wijaya, "Development and Accuracy Test of a Fused Deposition Modeling (FDM) 3D Printing using H-Bot Mechanism," *Indones. J. Comput. Eng. Des. (IJoCED)*, vol. 3, no. 1, pp. 46–53, Apr. 2021.
 - [3] W. A. Loflin, J. D. English, C. Borders, L. M. Harris, A. Moon, and J. N. Holland, "Effect of print layer height on the assessment of 3D-printed models," *Am. J. Orthod. Dentofac. Orthop.*, vol. 156, no. 2, pp. 283–289, Aug. 2019. [Online]. Available: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0889540619303828>
 - [4] A. A. Shanaswara, M. R. N. Aditya, M. I. Rasyid, Herianto, and M. A. Muflikhun, "Optimisasi multiobjektif parameter proses 3D printer jenis fused deposition modelling menggunakan grey relational analysis -Taguchi," *J. Rekayasa Mesin*, vol. 14, pp. 791–820, 2023, doi: 10.21776/jrm.v14i3.1253.
 - [5] M. Lay et al., "Comparison of physical and mechanical properties of PLA, ABS and nylon 6 fabricated using fused deposition modeling and injection molding," *Compos. B Eng.*, 2019.
 - [6] L. Schittecatte, V. Geertsens, D. Bonamy, T. Nguyen, and P. Guenoun, "From resin formulation and process parameters to the final mechanical properties of 3D printed acrylate materials," *MRS Commun.*, vol. 13, no. 3, pp. 357–377, Jun. 2023.
 - [7] F. Rengier et al., "3D printing based on imaging data: Review of medical applications," *Int. J. Comput. Assist. Radiol. Surg.*, 2010.
 - [8] L. Sa, L. Kaiwu, C. Shenggui, and Y. Junzhong, "3D printing dental composite resins with sustaining antibacterial ability," *J. Mater. Sci.*, 2019. [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10853-018-2801-7>
 - [9] A. Saxena and M. Kamran, "A Comprehensive Study on 3D Printing Technology," *MIT Int. J. Mech. Eng.*, vol. 6, Aug. 2016. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/310961474>
 - [10] G. A. Dyaksa, N. Arfian, Herianto, and L. Choridah, "Development of Cranium 3Dimension-Puzzle Products Using 3D Printing," presented at *Conf. in Bali*, Dec. 2020.
 - [11] M. M. Romi, N. Arfian, D. Cahyani, and R. Sari, "Is Cadaver Still Needed in Medical Education?" *J. Pendidik. Kedokteran Indones.*, vol. 8, no. 3, p. 105, Nov. 2019, doi: 10.22146/jpki.46690.
 - [12] D. Speranza et al., "Additive manufacturing techniques for the reconstruction of 3D fetal faces," *Appl. Bionics Biomech.*, 2017.
 - [13] Q. Yan et al., "A Review of 3D Printing Technology for Medical Applications," *Engineering*, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.07.021>
 - [14] U. Umer, S. H. Mian, K. Moiduddin, and H. Alkhalefah, "Exploring Orthosis Designs for 3D Printing Applying the Finite Element Approach: Study of Different Materials and Loading Conditions," *J. Disabil. Res.*, vol. 2, no. 1, 2023.
 - [15] D. Ji, P. Im, S. Shin, and J. Kim, "Specimen Geometry Effect on Experimental Tensile Mechanical Properties of Tough Hydrogels," *Materials*, vol. 16, no. 2, p. 785, Jan. 2023.
 - [16] S. Cahyati and R. A. Putra, "The effect of infill pattern and density parameters on tensile strength of polymer materials in 3D printing," *J. Rekayasa Mesin*, vol. 14, pp. 753–761, 2023, doi: 10.21776/jrm.v14i3.1005.
 - [17] A. Gallos et al., "Blending Ferulic Acid Derivatives and Polylactic Acid into Biobased and Transparent Elastomeric Materials with Shape Memory Properties," *Biomacromolecules*, vol. 22, no. 4, pp. 1568–1578, 2021, doi: 10.1021/acs.biomac.1c00002.

- [18] R. Asaletha, M. G. Kumaran, and S. Thomas, "Thermoplastic elastomers from blends of polystyrene and natural rubber: morphology and mechanical properties," *Eur. Polym. J.*, vol. 35, pp. 253–271, 1999.