

Optimasi Multirespon pada Proses 3D Printing Material ABS dengan Metode Taguchi-PCR Topsis

Yopi Yusuf Tanoto*, Vincensius Filbert, Ronaldo Febrian, Nicholas Adriel

Program Studi Teknik Mesin Universitas Kristen Petra
Jl. Siwalankerto 121-131, Surabaya, Indonesia 60236

Abstrak

Teknologi 3D printing atau yang umum disebut sebagai additive manufacturing merupakan salah satu metode rapid prototyping yang saat ini semakin luas digunakan. Acrylonitrile butadiene styrene (ABS) merupakan salah satu jenis material yang penggunaannya cukup masif dalam teknologi 3D printing. Penelitian ini menggunakan metode desain eksperimen orthogonal arrays L9 (3^3). Adapun parameter proses yang digunakan adalah temperature nozzle, temperature base plate/bed dan orientasi, serta dengan tiga variasi level pada setiap parameter proses (230°C, 240°C, 250°C, 90°, 100°, 110°C, 0°, 45°, 90°). Penelitian ini bertujuan untuk mencari parameter proses yang paling optimal terhadap hasil respon waktu pengerjaan, sifat mekanik kekuatan lentur, dan akurasi dimensi. Parameter tersebut digunakan untuk kombinasi metode Taguchi dan PCR-TOPSIS dalam menyelesaikan persoalan multirespon. Berdasarkan hasil analisis ANOVA, parameter dengan level yang menghasilkan respon gabungan paling optimal adalah terletak pada spesimen kondisi ke-3, yaitu dengan nilai temperature nozzle sebesar 230°C; temperature base plate/bed sebesar 110°C; dan arah orientasi printing sebesar 90°. Hasil analisis dari PCR-Topsis terhadap 3 parameter proses menunjukkan bahwa parameter yang memiliki pengaruh yang paling tinggi secara berurutan adalah orientasi 33%, temperature base plate/bed 28% dan temperature nozzle 18%.

Kata kunci: 3D printing; ABS material; akurasi dimensi; desain faktorial; kekuatan lentur; multirespon; orientasi; pcr-topsis; taguchi; waktu pengerjaan

Abstract

[Title: Multi response Optimazion In 3D Printing ABS Materials With Taguchi-PCR Topsis Method] The use of 3D printing technology, commonly referred to as additive manufacturing, is increasingly widespread as a rapid prototyping method. Acrylonitrile butadiene styrene (ABS) is one type of material whose use is quite massive in 3D printing technology. In this study, nine experiments were carried out using the experimental design method orthogonal arrays L9 (3^3), and three process parameters were used, namely nozzle temperature, base plate/bed temperature, and orientation, as well as with three levels of variation for each process parameter (230oC, 240oC, 250oC, 90oC, 100oC, 110oC, 0o, 45o, 90o). This study aimed to find the optimal process parameters for the processing response time, mechanical properties of flexural strength, and dimensional accuracy. Thus, a combination of the Taguchi and PCR-TOPSIS methods was used to solve the multiresponse problem. Based on the results of ANOVA analysis, the parameter with the level that produces the most optimal combined response is located in the third condition specimen (that is, the nozzle temperature value is 230°C; the base plate/bed temperature is 110°C, and the printing orientation direction is 90°). The results of the PCR-Topsis analysis on three process parameters shows that the parameters that have the highest influence in sequence are orientation at 33%, bed temperature at 28%, and nozzle temperature at 18%.

Keywords: 3D printing; ABS material; dimensional accuracy; factorial design; flexural strength; multiresponse; orientation; pcr-topsis; taguchi; machining time

*) Penulis Korespondensi.

E-mail: c12180040@john.petra.ac.id

1. Pendahuluan

Saat ini perkembangan teknologi dalam bidang manufaktur berkembang dengan semakin pesat. Munculnya 3D *printing* sebagai salah satu pilihan untuk memproduksi sebuah benda merupakan bagian dari perkembangan tersebut. Proses 3D *printing* adalah proses dimana sebuah obyek padat dihasilkan dari sebuah file digital. Proses pembuatan obyek tiga dimensi ini merupakan bagian dari *additive process* (Mahamood et al., 2016). Teknologi 3D *printing* yang menggunakan *additive manufacturing process*, dimana produk dibuat atau dicetak berdasarkan lapis demi lapis (*layer by layer*) dengan serangkaian *cross sectional slices* (Berman, 2012). Adapun hal yang perlu diperhatikan sebelum proses pencetakan berlangsung, yaitu membuat pemrogramannya terlebih dahulu agar hasil cetakan sesuai dengan yang diinginkan. Lebih lanjut, terdapat berbagai teknologi *additive manufacturing* yang telah digunakan baik oleh industri besar maupun industri rumah tangga, diantaranya adalah *fused deposition modeling* (FDM), *selective lasersintering* (SLS), *direct metal deposition* (DMD), dan *inkjet modeling* (IJM) (Mohamed et al., 2015).

Dari berbagai macam teknologi *additive manufacturing* yang paling sering digunakan adalah *Fused Deposition Modeling* (FDM). Hal ini bisa dilihat dari banyaknya pengembangan teknologi FDM ini untuk berbagai bidang yaitu seperti: pembuatan *dummy*, arsitektur, industri manufaktur, makanan, industri otomotif, *fashion*, kesehatan, dan masih banyak lagi di bidang lainnya (Taufik et al., 2020). Cara kerja dari FDM adalah dengan cara mengekstrusikan bahan *thermoplastic* melalui *extruder* yang panas pada *rheology temperature*. Selanjutnya produk disusun lapis demi lapis. ABS (*Acrylonitrile Butadiene Styrene*) dan PLA (*Poly Lactide Acid*) merupakan jenis material yang paling sering digunakan. Akurasi dari produk yang dihasilkan dengan bahan tersebut penting untuk diketahui (Pristiansyah et al., 2019). Dengan teknologi FDM, produk duplikat dari bahan ABS dapat dibuat dengan bentuk dan dimensi yang sama dari produk contohnya (Satyanarayana & Prakash, 2015).

Pengaruh parameter proses FDM berbahan ABS terhadap kekuatan telah dipelajari oleh Supphachai dan Worrasid. Dari penelitian tersebut, ditemukan nilai dari masing-masing parameter (orientasi, *layer height*, *printing speed*, *nozzle temperature* dan *bed temperature*) yang menghasilkan nilai *compressive yield stress* terbaik (Nathaphan & Trutassanawin, 2021).

Dizon et al. (2018) melakukan penelitian terkait dengan bagaimana sifat mekanik ABS dan PLA dengan menggunakan FDM. Adapun sampel yang dibuat mengacu pada ASTM D790 tentang kekuatan *flexural*. Penelitian tersebut menggunakan temperatur proses yang difokuskan pada perbedaan temperatur setiap lapisan,

ketebalan, *fill density*, *travel speed* pada pembuatan produknya sebagai parameter yang diuji. Dari percobaan dan analisis yang dilakukan, disimpulkan bahwa ketebalan dari spesimen dapat mempengaruhi hasil pengujian lentur pada material ABS.

Penelitian lain mempelajari bagaimana material ABS diuji kekuatan tarik dan lentur (Christiyan et al., 2016). Parameter proses yang digunakan adalah ketebalan lapisan (0,2 mm, 0,25 mm, 0,3 mm) dan kecepatan pencetakan 30 mm/s, 40 mm/s dan 50 mm/s serta *temperature nozzle* 190°C. Studi tersebut menggunakan metode Taguchi untuk mencari respon yang paling optimal

Penelitian terkait dengan optimasi parameter proses 3D printing juga telah dilakukan (Tontowi et al., 2017). Pada penelitian tersebut digunakan metode Taguchi dan *response surface*. Material yang dipelajari adalah PLA. Respon yang diamati adalah kekuatan tarik dan kesalahan dimensi, sedangkan *raster angle* dipilih sebagai parameter prosesnya

Tanoto dan Fefe juga melakukan penelitian tentang FDM lebih mendalam. Penelitian ini menggunakan 4 parameter dengan 3 tingkatan level yang berbeda. Parameter yang digunakan adalah *orientation position*, *fill pattern*, *fill density* dan *layer thickness*. Penelitian ini menggunakan spesimen dengan tipe ASTM D 790-2010 dengan dimensi 120 mm x 15 mm x 15 mm (Tanoto et al., 2021). Penelitian ini juga merupakan optimasi *single* respon dengan menggunakan metode Taguchi untuk mencari hasil yang terbaik. Penelitian tersebut merupakan lanjutan dari penelitian mengenai pengaruh orientasi terhadap kualitas dari material ABS (Tanoto et al., 2017).

Dari ketiga penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, belum ditemukan penelitian yang membahas tentang optimasi multirespon pada proses 3D *printing*. Penelitian yang ada hanya terkait optimasi *single* respon saja. Oleh karena itu, perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai FDM yang lebih dalam dengan menggunakan metode optimasi multirespon. Penelitian ini akan membahas dan menganalisis sifat mekanik kekuatan lentur pada objek hasil 3D *printing* dengan prinsip FDM dengan 3 parameter dan 3 level yang berbeda. Parameter proses yang digunakan dalam penelitian ini meliputi *nozzle temperature*, *base plate/bed temperature* dan orientasi. Material yang digunakan adalah *filament* ABS. Metode penelitian yang digunakan yaitu pendekatan metode optimasi multirespon Taguchi-PCR Topsis. Dadanya penelitian ini dapat diperoleh nilai hasil waktu pengerjaan, akurasi dimensi, dan kekuatan lentur (*flexural strength*) yang paling optimal pada saat proses *printing*.

2. Bahan dan Metode

Pada penelitian ini metode *design of experiment* (DOE) digunakan untuk menentukan variasi parameter

Tabel 1. Parameter proses 3d *printing* beserta levelnya

Parameter	Unit	Level		
		1	2	3
Nozzle Temp (Nt)	°C	230	240	250
Bed Temp (Bt)	°C	90	100	110
Orientation (O)	derajat	0	45	90

dalam pembuatan spesimen. Melalui metode ini, dapat ditentukan data variasi parameter untuk menentukan jumlah eksperimen dan mendapatkan informasi faktor mana saja yang memiliki pengaruh terhadap respon yang diamati.

Dalam penelitian ini digunakan tiga variasi parameter dan tiga level. Parameter yang digunakan antara adalah *nozzle temperature* (°C), *base plate/bed temperature* (°C), dan orientasi (°). Nilai dari masing-masing level parameter yang digunakan dalam penelitian ini ditentukan dari spesifikasi data material ABS, dan juga dari studi literatur penelitian terdahulu. Parameter proses beserta level yang akan digunakan pada saat proses *printing* dapat dilihat pada Tabel 1.

Pada penentuan parameter *temperature* yang ditetapkan dalam proses pencetakan spesimen mengacu pada filamen yang digunakan pada penelitian ini, yaitu material ABS. Untuk spesifikasi dan gambar dari filamen ABS dapat dilihat pada Tabel 2 dan Gambar 1. Rincian parameter yang ditetapkan adalah: (1) *Nozzle Temperature*, yang ditentukan dari level *temperature* yang digunakan, yaitu level satu pada 230°C, level dua adalah 240°C, dan level tiga pada 250°C; (2) *Base Plate/Bed Temperature*, yang ditentukan dari level *temperature* yang digunakan, yaitu level satu menggunakan 90°C, level dua adalah 100°C, sedangkan untuk level tiga sebesar 110°C; (3) *Orientation*, dimana tiga arah orientasi yang berbeda diterapkan dalam proses pencetakan polimer ABS yaitu 0° (orientasi pertama), 45° (orientasi kedua), dan 90° (orientasi ketiga).

Adapun variabel respon dari produk yang akan diamati atau diukur yaitu meliputi waktu proses

Tabel 2. Spesifikasi Filamen ABS merk Sunlu

Spesifikasi	Nilai
Material	ABS
Diameter	1.75 mm
Warna	Grey / Abu-Abu
Berat Bersih	1 kg
Temperature Print	230 – 250 8C

pencetakan, akurasi dimensi produk, dan juga kekuatan uji lentur. Untuk hasil dari kekuatan uji lentur, akurasi dimensi produk, serta waktu proses pencetakan dapat dianalisis menggunakan metode Taguchi-PCR Topsis. ANOVA dapat digunakan untuk menganalisa pengaruh dari parameter dan levelnya terhadap respon.

Desain eksperimen pada penelitian ini dibuat menggunakan aplikasi Minitab. Pada penelitian ini digunakan *array orthogonal* (AO) L9 (3³) (Qoryah et al., 2020). Percobaan dilakukan sebanyak sembilan kali dengan 5 replikasi dengan nilai dari masing-masing parameternya yang dapat dilihat pada Tabel 3.

Rancangan matriks *orthogonal* dibuat, kemudian dilakukan desain pada spesimen menggunakan *software* Inventor 2019. Desain dibuat menggunakan format .STL sebagai format yang dapat dikonversi oleh *software slicing* yaitu menggunakan Cura 4.10.0. Proses ini menghasilkan desain siap cetak yang selanjutnya akan diatur ke dalam parameter proses pencetakan. Desain spesimen yang digunakan dalam penelitian ini merujuk pada ASTM D790 (125 x 12.7 x 3.2 mm) untuk uji *flexural* sesuai dengan standar ASTM Internasional D790-03 tahun 2003 yang dapat dilihat pada Gambar 2 dan Gambar 3.

Proses *printing* pada penelitian ini ditetapkan pada posisi tidur. Hal ini karena pada posisi ini, uji lentur akan mendapatkan hasil paling baik serta minim terjadinya pengangkatan atau gagal pencetakan. Arah orientasi yang digunakan yaitu terdiri dari 3 arah (0°, 45°, dan 90°) seperti pada Gambar 4.

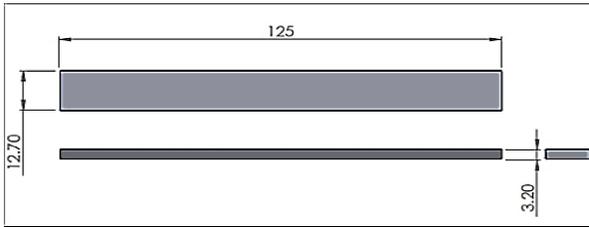
Pengaturan pada aplikasi Cura juga harus diperhatikan dengan baik. Ketika sudah ditemukan



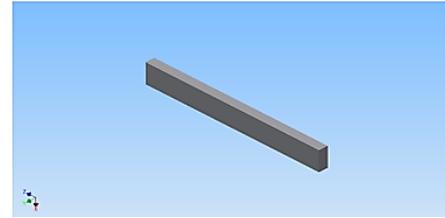
Gambar 1. Filamen ABS merk Sunlu diameter 1.75mm

Tabel 3. Matriks Orthogonal L9 (3³)

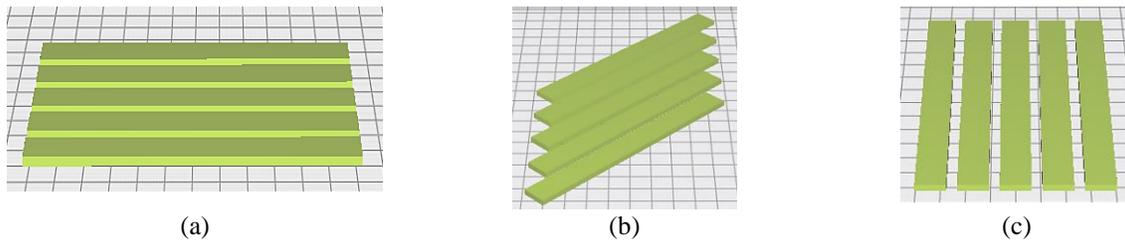
	Nozzle Temp	Bed Temp	Orientation
1	230	90	0
2	230	100	45
3	230	110	90
4	240	90	45
5	240	100	90
6	240	110	0
7	250	90	90
8	250	100	0
9	250	110	45



Gambar 2. Spesimen ASTM D790

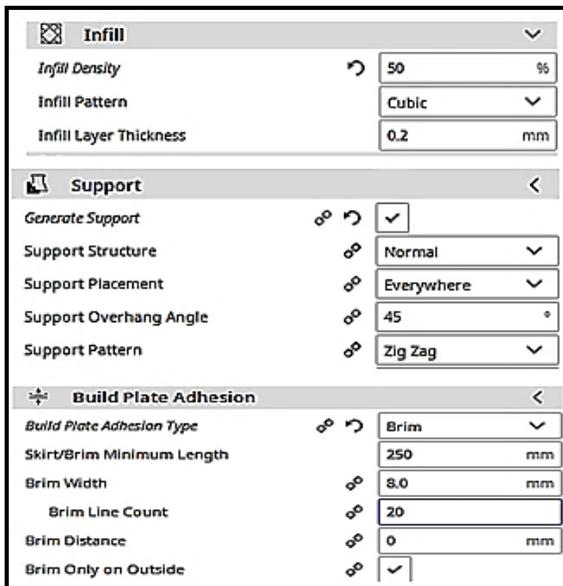


Gambar 3. Desain CAD spesimen



Gambar 4. Orientasi (a) 0°, (b) 45°, (c) 90°

pengaturan yang sesuai, maka pengaturan ini tidak boleh dirubah-dirubah. Pengaturan ini akan digunakan pada proses pencetakan dari kondisi 1 hingga kondisi 9 hingga selesai. Pengaturan yang digunakan pada saat proses *printing* percobaan ini adalah sebagai berikut: *support (on)*, *adhesion (on)*, *infill layer thickness (0.2 mm)*, *infill density (50%)*, *Infill pattern (cubic)* atau dapat dilihat pada gambar 5.

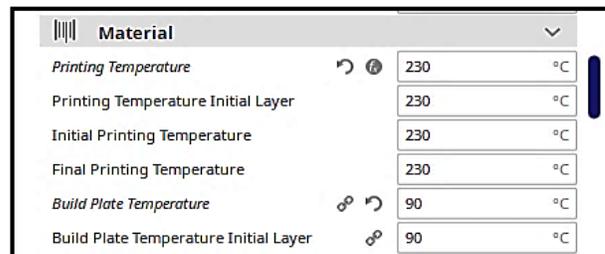


Gambar 5. Pengaturan (*setting*) *printing* pada Cura untuk spesimen ASTM D790

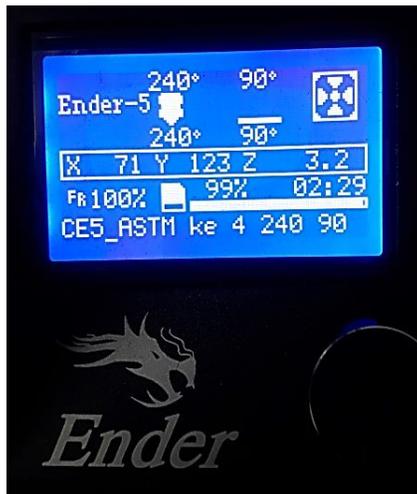
Selanjutnya, untuk melakukan pengaturan *Nozzle Temperature* dan *Bed Temperature* pada mesin 3D *Printing* bisa dilakukan juga di aplikasi Cura sebelum melakukan proses pencetakan seperti pada gambar 6 diatas. Untuk pengaturan nilai *temperature* yang diinginkan pada saat proses *printing* spesimen bisa dirubah sesuai dengan keinginan tidak seperti pengaturan untuk *infill*, *support*, *adhesion*, dan ada beberapa menu lainnya yang tidak boleh dirubah jika sudah menemukan pengaturan (*setting*) yang pas.

Durasi proses heating pada nozzle dan bed dapat diketahui dari indikator di layar mesin 3d *printing* (Gambar 7). Ini menunjukkan berapa lama waktu proses hingga mencapai nilai *temperature* yang sudah ditentukan pada mesin 3d *printing*, sebelum proses pencetakan berjalan.

Mesin *printing* yang digunakan dalam proses pencetakan spesimen merupakan mesin 3D *Printing* FDM yaitu 3D *Printer* Ender-5 (Prusa-i5) dengan



Gambar 6. Pengaturan (*setting*) *bed temperature* dan *nozzle temperature* pada Cura



Gambar 7. Tampilan lama waktu *heating bed* dan *nozzle* di mesin 3D printing



Gambar 8. Mesin 3D printing Ender-5 (Prusa-I5)

kapasitas 220mm x 220mm x 300mm (Gambar 8). Spesimen yang telah selesai dicetak, kemudian diukur untuk mengetahui akurasi dimensi produk desain dengan produk jadi. Pengukuran ini bertujuan untuk mencari nilai simpangan atau nilai selisih dari dimensi spesimen sebenarnya dengan dimensi spesimen hasil pencetakan. Dimensi yang termasuk dalam pengukuran, yaitu *overall length* (L), *width* (B), *thickness* (H).

Tabel *properties* pengukuran dimensi merujuk pada standar ASTM D790 yang ditunjukkan pada Tabel 4. Alat bantu yang digunakan untuk pengecekan akurasi yang tinggi berupa jangka sorong digital (Gambar 9). Alat bantu ini selain memiliki akurasi tinggi juga memiliki tampilan layar yang menunjukkan angka hasil pengukuran. Jangka sorong digital memiliki akurasi sebesar 0.01 mm. Satuan pengukuran yang terdapat pada jangka sorong digital ini terdiri dari satuan mm dan *inch*.

Pengukuran dimensi dilakukan satu per satu dari 45 spesimen hasil pencetakan dengan mengukur 5 (lima) titik bagian untuk sisi dimensi Lo dan Wo, sedangkan 3 (tiga) titik bagian untuk sisi dimensi T. Setiap sisi dibagi

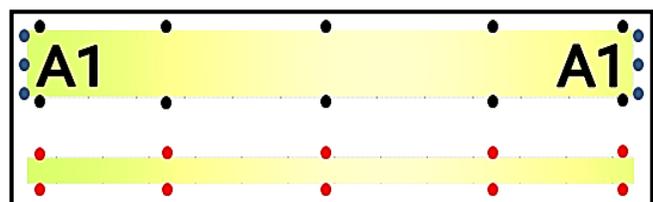
menjadi beberapa titik pengukuran untuk mengetahui akurasi dimensi pada setiap spesimen yang diperoleh dari nilai simpangannya (selisih dari ukuran sebenarnya). Titik-titik pengukuran dimensi spesimen pada sisi Lo (panjang), Wo (lebar) dan T (tebal) dapat dilihat pada Gambar 10.

Pengukuran dimensi spesimen dilanjutkan dengan pengujian uji kelenturan (*flexural*), menggunakan mesin uji polimer. Mesin uji ini dipilih karena material yang akan diuji merupakan material plastik. Mesin uji polimer yang tersedia di Laboratorium Metalurgi Universitas Kristen Petra merupakan mesin keluaran dari pabrik J.T.M *Technology* serta kapasitas pengujian sebesar 20 kN atau 2 ton (Gambar 11).

Sebelum uji *flexural* dilakukan, spesimen hasil pencetakan harus didiamkan selama kurang lebih 40 jam di dalam ruangan laboratorium untuk penetralkan. Penetralkan menggunakan *dehumidifier*. *Dehumidifier* merupakan alat elektronik yang dapat menurunkan kelembapan udara dengan mengubah udara lembap menjadi air. Kelembapan suhu ruangan untuk uji *flexural*



Gambar 9. Jangka sorong digital merk Wipro



Gambar 10. Titik-titik pengukuran dimensi (Lo = Biru, Wo = Hitam, T = Merah)

Keterangan: Titik berwarna biru untuk sisi Lo atau panjang (simbol L1, L2, L3); Titik berwarna Hitam untuk sisi Wo atau lebar (simbol W1, W2, W3, W4, W5); Titik berwarna merah untuk sisi T atau tebal (simbol T1, T2, T3, T4, T5).



Gambar 11. Mesin uji polimer J.T.M Technology

diatur sebesar 55%. Pengaturan kelembapan pada rentang 50 ± 5 % agar spesimen memiliki kondisi yang sama dengan yang ada pada aturan uji *flexural* ASTM D790. Ini dimaksudkan agar pada saat dilakukan uji *flexural*

Tabel 5. Pencatatan waktu pada saat proses pencetakan spesimen beserta nilai rata-ratanya

Kondisi	Cura (Menit)	Ender-5 (Menit)	Heating Bed & Nozzle (Menit)	Total Ender-5 (Menit)	Rata-rata (Menit)
1	156	150	10.6	139.4	147.7
2	149	141	8.67	132.33	140.67
3	156	155	5.45	149.55	152.78
4	149	143	7.53	135.47	142.24
5	156	153	5.21	147.79	151.9
6	156	151	12.14	138.86	147.43
7	156	155	6.32	148.68	152.34
8	156	152	11.3	140.7	148.35
9	149	142	7.39	134.61	141.81

Tabel 7. Data hasil perhitungan keseluruhan *flexural strength* beserta nilai rata-ratanya (dalam satuan MPa)

Kondisi	A	B	C	D	E	Rata-rata
1	37.98	37.41	39.11	38.63	38.62	38.351
2	34.44	31.92	31.71	35.64	35.82	33.906
3	39.38	40.31	39.97	38.75	40.27	39.734
4	37.41	36.64	36.67	36.01	37.01	36.765
5	37.77	37.62	36.89	38.41	38.29	37.795
6	38.77	40.73	41.46	40.72	40.11	40.362
7	39.23	39.42	39.36	38.69	39.05	39.149
8	37.65	40.49	40.15	37.34	40.76	39.277
9	35.15	36.01	35.31	34.99	35.69	35.430

Tabel 4. Dimensi spesimen ASTM D790

Bagian	Ukuran Standar (mm)
LO (<i>Length Overall</i>)	125
WO (<i>Width Overall</i>)	12.7
T (<i>Thickness</i>)	3.2

diperoleh hasil nilai *flexural strength* yang sesuai dengan aturan ASTM.

Proses uji *flexural* pada spesimen dilanjutkan dengan analisis hasil pengukuran berdasarkan waktu proses pencetakan, akurasi dimensi dan kekuatan lentur. Hasil kekuatan uji lentur, akurasi dimensi produk, serta waktu pengerjaan dianalisis menggunakan metode PCR-Topsis. ANOVA dapat digunakan untuk melihat hasil pengaruh pada setiap spesimen yang diberikan parameter proses pada produk 3D *printing*.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Pencatatan Waktu Proses Pencetakan

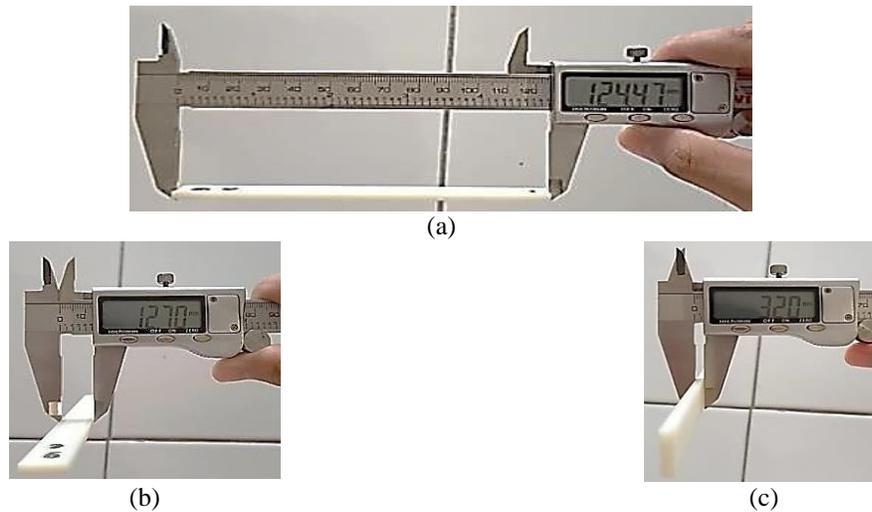
Data hasil pencatatan waktu proses pencetakan spesimen ditunjukkan pada Tabel 5. Tabel ini menunjukkan perbedaan nilai waktu proses pencetakan dari setiap spesimen pada masing-masing parameter.

Tabel 6. Hasil pengukuran rata-rata simpangan dimensi spesimen (panjang, lebar, tebal)

Kondisi	Simp. Panjang	Simp. Lebar	Simp. Tinggi	Rata-rata
1	0.2433	0.0636	0.0128	0.1066
2	0.2580	0.0252	0.0232	0.1021
3	0.2713	0.0292	0.0252	0.1086
4	0.1420	0.074	0.0196	0.0785
5	0.2203	0.03	0.0248	0.0917
6	0.2490	0.0264	0.0236	0.0997
7	0.1867	0.0568	0.0304	0.0913
8	0.1500	0.024	0.0192	0.0644
9	0.2167	0.0564	0.018	0.0970

Tabel 8. Matriks *orthogonal* L9

Kondisi	Nozzle Temp	Bed Temp	Orientasi
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2



Gambar 12. Proses pengukuran dimensi pada spesimen (a) Panjang, (b) Lebar, (c) Tebal

Faktor yang memberi pengaruh besar terhadap nilai waktu proses pencetakan adalah arah orientasi pencetakan. Parameter *nozzle temperature* dan *base plate temperature* tidak memberi pengaruh yang signifikan terhadap nilai proses waktu pencetakan. Hal tersebut dikarenakan pada saat proses *slicing* di aplikasi Cura dengan nilai ekstrusi sebesar 0.2 mm. Hal ini mengakibatkan hasil lintasan (*line*) yang lebih banyak dan panjang, sehingga *print head* pada mesin 3D *printing* akan melakukan proses pencetakan dengan lebih lama agar lapisan spesimen terisi sepenuhnya dan menghasilkan bentuk yang lebih padat pada setiap lapisannya.

3.2 Pengukuran Dimensi Spesimen

Pengukuran dimensi spesimen berpedoman pada ukuran standar dari ASTM D790 yang meliputi *length* (Lo), *width* (Wo), dan *thickness* (T). Pengukuran dimensi spesimen dengan menggunakan jangka sorong digital ini dilakukan satu per satu dengan mengukur 5 (lima) titik bagian untuk sisi dimensi Lo dan Wo, sedangkan 3 (tiga) titik bagian untuk sisi dimensi T seperti terlihat pada Gambar 12.

Pengukuran dimensi dari 45 spesimen hasil pencetakan diikuti dengan input nilai ke dalam Microsoft Excel. Nilai ini sudah dikurangi dengan nilai akurasi dari jangka sorong yaitu sebesar 0.01 mm. Langkah ini diikuti dengan penghitungan nilai rata-rata simpangan dari masing-masing sisi dimensi pada setiap spesimen. Tabel hasil pengukuran dimensi Lo, Wo, T beserta nilai simpangannya ditunjukkan pada Tabel 6.

Pengukuran nilai simpangan rata-rata, yakni ukuran dimensi spesimen hasil *printing* dikurangi dengan ukuran dimensi sebenarnya, dilakukan. Simpangan *length orientation* (panjang) di setiap spesimen dari kondisi 1 sampai 9 menunjukkan data pengukuran yang

kurang optimal, bila dibandingkan dengan standar ASTM D790. Hal tersebut dikarenakan terjadinya fenomena pemotongan *raft* di sekeliling spesimen saat setelah proses pencetakan.

3.3 Uji Flexural

Uji lentur atau *flexural* menggunakan kecepatan uji sebesar 0.82 mm/mm/menit sesuai dengan standar mesin uji. Data hasil perhitungan *flexural strength* ditunjukkan pada tabel 7.

3.4 Menghitung PCR-Topsis Karakteristik Kualitas

Parameter pengujian berupa *nozzle temperature*, *base plate/bed temperature*, serta arah orientasi sangat berpengaruh terhadap hasil kekuatan uji lentur atau *flexural strength*. Nilai dari ketiga respon tersebut kemudian dianalisis menggunakan metode PCR-Topsis. Metode PCR-Topsis digunakan untuk menganalisis data multirespon dalam mengoptimasi pengaturan nilai level dari parameter, sehingga dapat diperoleh hasil dari masing-masing respon yang terdapat pada pada Tabel 8 dan Tabel 9.

3.4.1 Menghitung Mean

Setelah memperoleh nilai masing-masing respon, maka langkah selanjutnya yaitu mencari nilai rata-rata (*mean*). Langkah ini dilanjutkan dengan perhitungan PCR sebelum masuk ke tahap akhir yaitu Topsis. Hasil perhitungan *mean* untuk karakteristik kualitas waktu proses pencetakan, akurasi dimensi, dan hasil uji kekuatan bending selengkapnya disajikan pada Tabel 10.

3.4.2 Menghitung PCR-Mean untuk Setiap Respon

Tujuan penghitungan PCR-*mean* dari setiap respon adalah agar nilai yang diperoleh berada di antara spesifikasi atas dan bawah. Indeks kemampuan proses (*Cpk*) digunakan untuk mengkalkulasi perbandingan antara nilai yang diinginkan dan yang baik dari suatu produk yang dihasilkan. Penghitungan PCR-*Mean* dapat

Tabel 9. Nilai masing-masing respon

Waktu		Akurasi Dimensi			Flexural
t-Cura	t-Ender 5	Lo	Wo	T	
156	139.4	0.2433	0.0636	0.0128	38.5306
149	132.33	0.2580	0.0252	0.0232	33.9058
156	149.55	0.2713	0.0292	0.0252	39.7346
149	135.47	0.1420	0.074	0.0196	36.7654
156	147.79	0.2203	0.03	0.0248	37.7958
156	138.86	0.2490	0.0264	0.0236	40.3627
156	148.68	0.1867	0.0568	0.0304	39.1493
156	140.7	0.1500	0.024	0.0192	39.2774
149	137.61	0.2167	0.0564	0.018	35.4301

Tabel 10. Hasil perhitungan *mean* terhadap waktu proses, akurasi dimensi, dan uji *flexural*

Outer Array (OA)		
Mean		
t	V	Fs
147.7	0.1066	38.3506
140.665	0.1021	33.9058
152.775	0.1086	39.7346
142.235	0.0785	36.7654
151.895	0.0917	37.7958
147.43	0.0997	40.3627
152.34	0.0913	39.1493
148.35	0.0644	39.2774
141.805	0.0970	35.4301

Tabel 11. Nilai PCR-Mean untuk respon waktu proses, akurasi dimensi, dan uji *flexural*

Kondisi	PCR-Mean		
	t	V	Fs
1	-0.1145	0.0101	-0.1018
2	-0.1594	-0.0181	-0.2085
3	-0.0821	0.0227	-0.0686
4	-0.1494	-0.1675	-0.1399
5	-0.0878	-0.0841	-0.1152
6	-0.1163	-0.0337	-0.0536
7	-0.0849	-0.0867	-0.0827
8	-0.1104	-0.2570	-0.0796
9	-0.1521	-0.0504	-0.1719

Tabel 12. Solusi ideal positif dan solusi ideal negatif

d^{i+}	d^{i-}
0.0646	0.2911
0.1731	0.2389
0.0435	0.3221
0.1852	0.1132
0.0904	0.2092
0.0375	0.2752
0.0746	0.2244
0.2420	0.1379
0.1412	0.2099

Tabel 13. Hasil Perhitungan PCR-TOPSIS

Kondisi	PCR-TOPSIS (S^i)
1	0.818
2	0.580
3	0.881
4	0.379
5	0.698
6	0.880
7	0.750
8	0.363
9	0.598

Tabel 14. Perhitungan analisis ANOVA PCR-TOPSIS

Analysis of Variance for Means						
Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Nozzle Temp	2	0.05413	0.0541	0.02706	0.82	0.55
Bed Temp	2	0.08648	0.0865	0.04324	1.31	0.43
Orientasi	2	0.10257	0.1026	0.05129	1.55	0.39
Residual Error	2	0.0661	0.661	0.03305		
Total	8	0.30929				

dilakukan dengan menggunakan nilai *Mean* dari tiap variabel respon. Ini dilakukan dengan menggunakan persamaan *Cpk* sehingga diperoleh nilai PCR-Mean yang dapat dilihat pada Tabel 11. Nilai dari solusi ideal positif serta solusi ideal negatif bisa dilihat pada Tabel 12. Untuk mencari nilai PCR-Mean maka diperlukan beberapa persamaan pada saat sebelum masuk kedalam tahap pencarian nilai TOPSIS. Persamaan 1 adalah persamaan untuk mencari nilai rata-rata (*mean*) karakteristik kualitas pada spesimen.

$$\bar{x}_{\eta j} = \frac{\sum_{i=1}^m \eta_j^i}{m-1} \tag{1}$$

Dimana $\bar{x}_{\eta j}$ adalah rata-rata sampel untuk *Mean* pada respon ke-*j*, η_j^i adalah kontribusi kualitas yang maksimal untuk respon ke-*j*, dan *m* adalah jumlah kondisi pada saat percobaan.

Persamaan 2, adalah persamaan yang digunakan untuk mencari nilai standar deviasi PCR-Mean karakteristik kualitas pada spesimen.

$$S_{\eta j} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (\eta_j^i - \bar{x}_{\eta j})^2}{m-1}} \tag{2}$$

Tabel 15. Rekapitulasi PCR-Topsis

Kondisi	Faktor dan Level			PCR-TOPSIS (S ⁱ)
	Nozzle Temp	Bed Temp	Orientasi	
1	230	90	0	0.818
2	230	100	45	0.580
3	230	110	90	0.881
4	240	90	45	0.379
5	240	100	90	0.698
6	240	110	0	0.880
7	250	90	90	0.750
8	250	100	0	0.363
9	250	110	45	0.598

Tabel 16. Tabel respon PCR-Topsis untuk nilai rata-rata Eksperimen Taguchi (*Larger is Better*)

Level	Nozzle Temp	Bed Temp	Orientasi
1	0.7598	0.6494	0.6871
2	0.6525	0.5470	0.5190
3	0.5704	0.7863	0.7765
Delta	0.1894	0.2393	0.2575
Rank	3	2	1

Dimana $S_{\eta j}$ adalah standar deviasi sampel untuk *Mean* dalam respon ke- j , $\bar{x}_{\eta j}$ adalah rata-rata sampel untuk *Mean* pada respon ke- j , η_j^i adalah kontribusi kualitas yang maksimal untuk respon ke- j , dan m adalah jumlah kondisi pada saat percobaan.

Tahap akhir, yaitu mencari nilai PCR-Mean karakteristik kualitas spesimen setelah selesai mencari nilai rata-rata (*mean*) dan standar deviasi. Ini dilakukan dengan menggunakan Persamaan 3.

$$C_j^i = \frac{\eta_j^i - \bar{x}_{\eta j}}{3S_{\eta j}} \quad (3)$$

Dimana C_j^i adalah PCR-Mean dalam respon ke- j untuk percobaan ke- i , η_j^i adalah kontribusi kualitas yang maksimal untuk respon ke- j , $\bar{x}_{\eta j}$ adalah rata-rata sampel untuk *Mean* pada respon ke- j , $S_{\eta j}$ adalah standar deviasi sampel untuk *Mean* dalam respon ke- j .

3.4.3 Menghitung TOPSIS Hasil PCR-Mean

TOPSIS adalah salah satu metode pengambilan keputusan multikriteria. Ide dasarnya adalah bahwa alternatif yang dipilih memiliki jarak terdekat dengan solusi ideal dan yang terjauh dari solusi ideal negatif. Langkah-langkah untuk mencari nilai Topsis dari hasil PCR-Mean dilakukan dengan mengacu pada Persamaan 4,5,6

$$d^{i+} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (C_j^i - C_j^+)^2} \quad (4)$$

$$d^{i-} = \sqrt{\sum_{j=1}^n (C_j^i - C_j^-)^2} \quad (5)$$

$$S^i = \frac{d^{i-}}{d^{i+} + d^{i-}} \quad (6)$$

dimana d^{i+} untuk $i = 1, \dots, m$ (adalah Jarak percobaan ke- i untuk solusi ideal positif), d^{i-} untuk $i = 1, \dots, m$ (adalah Jarak percobaan ke- i untuk solusi ideal negatif), $C_j^+ = \max \{C_j^i, \text{ untuk } i = 1, 2, \dots, m\}$, $\forall C_j^i (i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n)$, $C_j^- = \min \{C_j^i, \text{ untuk } i = 1, 2, \dots, m\}$, $\forall C_j^i (i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n)$, S^i adalah nilai PCR-Topsis.

Berdasarkan perhitungan solusi ideal positif dan solusi ideal negatif pada percobaan ke-1 hingga ke-9 untuk respon ke- j , maka diperoleh nilai PCR-TOPSIS yang dapat dilihat pada tabel 13. Hasil dari nilai PCR-Topsis dianalisis sebagai variabel respon baru yang mewakili tiga respon dari nilai waktu proses pencetakan, nilai akurasi dimensi, dan nilai *flexural strength*.

3.5 Menentukan Persentase Kontribusi dari Faktor-Faktor yang Signifikan dalam Multirespon

Penggunaan Anova pada PCR-Topsis dimaksudkan untuk mengetahui faktor yang berpengaruh secara signifikan terhadap variansi ketiga karakteristik kualitas dari ketiga respon yang dihasilkan. Perhitungan Anova untuk PCR-Topsis dijelaskan pada tabel 14. Adapun untuk menghitung persen kontribusi dari setiap faktor beserta nilai erornya digunakan persamaan 7, 8, 9 dan 10.

a. Menghitung persen kontribusi faktor *Nozzle Temperature*:

$$\rho A = \frac{SqA'}{St} \times 100\% \quad (7)$$

dimana SqA' adalah *sum of squares* faktor A, dan St adalah *sum of squares total* faktor

$$= \frac{0.05413}{0.30929} \times 100\% = 18\%$$

b. Menghitung persen kontribusi faktor *Bed Temperature*:

$$\rho B = \frac{SqB'}{St} \times 100\% \quad (8)$$

dimana SqB' adalah *Sum of squares* faktor B, dan St adalah *Sum of squares total* faktor

$$= \frac{0.08648}{0.30929} \times 100\% = 28\%$$

c. Menghitung persen kontribusi faktor orientasi:

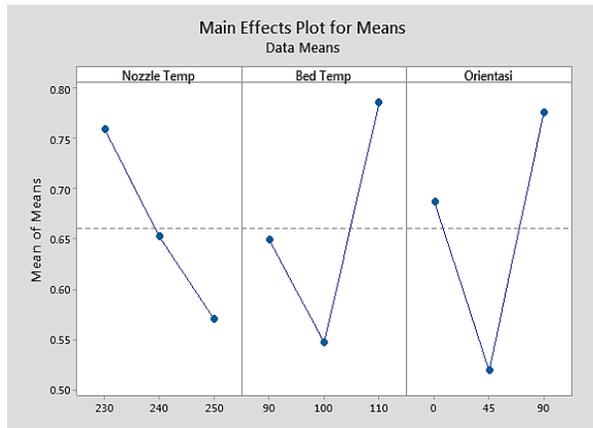
$$\rho C = \frac{SqC'}{St} \times 100\% \quad (9)$$

dimana SqC' adalah *sum of squares* faktor C, dan St adalah *sum of squares total* faktor

$$= \frac{0.10257}{0.30929} \times 100\% = 33\%$$

d. Menghitung persen kontribusi *Residual Error*:

$$\rho e = \frac{Sqe'}{St} \times 100\% \quad (10)$$



Gambar 13. Grafik respon untuk nilai PCR-Topsis terhadap tiga parameter

dimana Sq_e adalah *Sum of squares* faktor E, dan St adalah *sum of squares total* faktor

$$= \frac{0.0661}{0.30929} \times 100\% = 21\%$$

Hasil perhitungan analisis variansi (ANOVA) *means* untuk nilai PCR-Topsis menunjukkan bahwa dari 3 parameter proses yang digunakan, parameter orientasi memberikan pengaruh yang paling besar dengan nilai persen kontribusi sebesar 33%. Urutan berikutnya adalah parameter *bed temperature*, sebesar 28%. Parameter *nozzle temperature* tidak terlalu memberi pengaruh yang besar terhadap variansi karakteristik kualitas nilai waktu proses pencetakan, nilai akurasi dimensi, serta nilai *flexural strength* pada saat proses pencetakan spesimen.

3.6 Penentuan Kondisi Optimal

Penentuan *setting* level faktor optimal dilakukan dengan menggunakan metode PCR-Topsis, yaitu hasil gabungan nilai *mean* dari 3 respon terhadap 3 parameter yang dihitung berdasarkan dari tabel rekapitulasi PCR-Topsis seperti pada Tabel 15.

Langkah ini diikuti dengan membuat tabel respon untuk nilai rata-ratanya:

$$A1 = \frac{0.831 + 0.587 + 0.880}{3} = 0.748$$

Cara perhitungan manual yang sama juga dilakukan untuk masing-masing faktor dan levelnya. Ini bisa juga dilakukan langsung melalui eksperimen Taguchi. Penghitungan memberikan nilai dari efek faktor tersebut. Level faktor yang dipilih adalah level yang memberikan nilai rata-rata PCR-Topsis terbesar. Tabel respon PCR-Topsis (Tabel 6) menunjukkan bahwa faktor orientasi memiliki pengaruh paling besar pada hasil PCR-Topsis dari penggabungan rata-rata 3 respon terhadap 3 parameter. Pada tabel 17 dapat dilihat level optimal dari masing-masing factor.

Perbedaan nilai pada tabel respon terlihat jelas dengan membandingkan grafik respon pada Gambar 13.

Tabel 17. Level optimal dalam eksperimen

Faktor Eksperimen	Level Optimal	Nilai
Nozzle Temp	1	230
Bed Temp	2	110
Orientasi	3	90

Gambar 13 menunjukkan bahwa faktor orientasi memiliki nilai tertinggi terdapat pada level 3 (90°), faktor *base plate/bed temperature* memiliki nilai tertinggi terdapat pada level 3 (110°C), dan faktor *nozzle temperature* memiliki nilai tertinggi terdapat pada level 1 (230°C). Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa dari 3 parameter yang memiliki level tertinggi hasil perhitungan eksperimen Taguchi terhadap nilai PCR-Topsis baik pada *nozzle temperature*, *bed temperature*, dan orientasi, dimana ketiga level tertinggi tersebut diprint dan terletak pada spesimen kondisi ke-3 (yaitu 230°C, 110°C, 90°).

Adapun spesimen dari kondisi ke-3 tersebut sudah diprint sehingga tidak perlu dilakukan eksperimen konfirmasi dan juga menentukan nilai prediksi respon dan selang kepercayaan. Dikarenakan dari hasil perhitungan PCR-Topsis pada spesimen kondisi ke-3 sudah terbukti menunjukkan hasil yang paling optimal yaitu sebesar 0.881 dari 9 kondisi lainnya yang sudah dilakukan pencetakan.

4. Kesimpulan

Pada penelitian ini dilakukan pengukuran dimensi spesimen, pencatatan waktu proses *printing* serta pengujian *flexural* pada setiap spesimen yang disiapkan. Analisis yang dilakukan dengan menggunakan PCR-Topsis menunjukkan bahwa level parameter yang menghasilkan respon gabungan paling optimal adalah terletak pada spesimen kondisi ke-3 (dengan nilai *temperature nozzle* sebesar 230°C; *temperature base plate/bed* sebesar 110°C; dan arah orientasi *printing* sebesar 90°). Pada parameter tersebut, rata-rata waktu proses sebesar 152.775 menit, simpangan dimensi sebesar 0.1086 mm, dan kekuatan *flexural* sebesar 39.7346 Mpa. Hasil ANOVA juga menunjukkan bahwa parameter yang memiliki pengaruh yang paling tinggi secara berurutan adalah orientasi sebesar 33%, *temperature base plate/bed* sebesar 28%, dan *temperature nozzle* sebesar 18%. Namun hasil analisis ANOVA juga menunjukkan bahwa tidak ada parameter yang memiliki pengaruh signifikan terhadap respon gabungan. Dengan demikian pengaruh dari masing-masing parameter terhadap respon individual perlu diamati.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada LPPM (Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat) Universitas Kristen Petra Surabaya atas hibah penelitian internal yang diberikan. Selain itu, penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Laboratorium *Computer Aided and Design* Universitas Kristen Petra tempat dilaksanakannya penelitian ini serta Laboratorium Metalurgi Universitas Kristen Petra tempat dilaksanakannya pengujian Lentur (*Flexural*).

Daftar Pustaka

- Berman, B. (2012). 3-D printing: The new industrial revolution. *Business Horizons*, 55(2), 155–162. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2011.11.003>
- Christiyan, K. G. J., Chandrasekhar, U., & Venkateswarlu, K. (2016). A study on the influence of process parameters on the Mechanical Properties of 3D printed ABS composite. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 114, 012109. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/114/1/012109>
- Dizon, J. R. C., Espera, A. H., Chen, Q., & Advincula, R. C. (2018). Mechanical characterization of 3D-printed polymers. *Additive Manufacturing*, 20, 44–67. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.12.002>
- Mahamood, S., Khader, M. A., & Ali, H. (2016). Applications of 3-D Printing in Orthodontics: A Review. *D Printing*, 3(11), 4.
- Mohamed, O. A., Masood, S. H., & Bhowmik, J. L. (2015). Optimization of fused deposition modeling process parameters: A review of current research and future prospects. *Advances in Manufacturing*, 3(1), 42–53. <https://doi.org/10.1007/s40436-014-0097-7>
- Nathaphan, S., & Trutassanawin, W. (2021). Effects of process parameters on compressive property of FDM with ABS. *Rapid Prototyping Journal*, 27(5), 905–917. <https://doi.org/10.1108/RPJ-12-2019-0309>
- Pristiansyah, P., Hasdiansah, H., & Sugiyarto, S. (2019). Optimasi Parameter Proses 3D Printing FDM Terhadap Akurasi Dimensi Menggunakan Filament Eflex. *Manutech: Jurnal Teknologi Manufaktur*, 11(01), 33–40. <https://doi.org/10.33504/manutech.v11i01.98>
- Qoryah, R. D. H., Luviandy, A., & Darsin, M. (2020). *Kajian terhadap Tingkat Kerusakan Pahat pada Pembubutan dengan Metode Minimum Quantity Lubrication (MQL)*. 8.
- Satyanarayana, B., & Prakash, K. J. (2015). Component Replication Using 3D Printing Technology. *Procedia Materials Science*, 10, 263–269. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2015.06.049>
- Tanoto, Y. Y., Anggono, J., & Fefe. (2021). Optimization of fused deposition modeling parameters for hips flexural strength with Taguchi method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1034(1), 012094. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1034/1/012094>
- Tanoto, Y. Y., Anggono, J., & Siahaan, I. H. (n.d.). *The effect of orientation difference in fused deposition modeling of ABS polymer on the processing time, dimension accuracy, and strength*. 8.
- Taufik, I., Budiono, H. S., Herianto, H., & Andriyansyah, D. (2020). Pengaruh Printing Speed Terhadap Tingkat Kekasaran Permukaan Hasil Additive Manufacturing Dengan Polylactic Acid Filament. *Journal of Mechanical Engineering*, 4(2). <https://doi.org/10.31002/jom.v4i2.3412>
- Tontowi, A. E., Ramdani, L., Erdizon, R. V., & Baroroh, D. K. (2017). Optimization of 3D-printer process parameters for improving quality of polylactic acid printed part. *International Journal of Engineering and Technology*, 9(2), 589-600.