

AKURASI DIMENSI PRODUK FILAMEN 3D PRINTING BERBAHAN POLIPROPILEN MENGGUNAKAN MESIN EKSTRUSI

DIMENSIONAL ACCURACY OF 3D PRINTED POLYPROPYLENE FILAMENT USING EXTRUSION MACHINE

Mochamad Edoward Ramadhan, Mahros Darsin,
Sains Ilham Akbar, dan Danang Yudistiro*
Fakultas Teknik, Universitas Jember

Submitted:04-02-2021; Revised:08-11-2021; Accepted:09-11-2021

ABSTRACT

Additive manufacturing (AM) has been trending topic in industrial revolution 4.0. One technique and the most widely used AM is fused deposition modeling (FDM), which uses a melted filament and deposited it layer by layer. The common filaments used are made of PLA, PP, and ABS, which are available at the online market with variety of prices depend on the quality. It is an advantage if we can make these filaments. In filament manufacturing, the dimensional accuracy is one of the most important factors to comply with the existing 3D printers. The aim of this research is to fabricate a filament made of PP, then assessed the quality based on the accuracy of the targeted diameter of 1.75 mm. The manufacturing process used a self-made plastic extrusion machine. Variations were made on three variables with three levels each. There are (i) heater band temperature with a minimum and maximum range (150/170 °C, 155/175 °C and 160/180 °C), (ii) winding speed (13 mm/s, 16 mm/s and 19 mm/s), and (iii) roll distance to the nozzle set point (200 mm, 500 mm and 700 mm). Taguchi L9 design was used to design the experiments and analysis. Minitab 19 was employed to find the S/N ratio and analysis the variance (ANOVA). The results of the analysis state that two parameters have a significant effect on the dimensions of the filament, i.e. temperature and roll distance to the nozzle, while, the winding speed has no dominant effect. The best accuracy of filaments diameter was achieved when applying a combination of temperature (160/180°C), the distance between the nozzle to the roll of 700 mm, and winding speed of 13 mm/s.

Keywords: *Dimensional accuracy; FDM 3D printing; Filament design; Taguchi.*

ABSTRAK

*Additive manufacturing (AM) menjadi salah satu topik terkini pada revolusi industri 4.0. Salah satu teknik AM adalah fused deposition modeling (FDM), yang cara kerjanya dengan mendepositkan lelehan filamen lapis demi lapis. Bahan filamen yang sering digunakan adalah PLA, PP, dan ABS yang banyak tersedia di pasar daring, dengan harga bervariasi sesuai mutunya. Adalah sebuah keunggulan jika kita dapat membuat sendiri filamen tersebut. Pada pembuatan filamen keakuratan dimensi adalah salah hal yang terpenting supaya sesuai dengan mesin 3D printer yang ada. Tujuan penelitian ini adalah untuk membuat filamen berbahan PP, kemudian mengujinya berdasar akurasi diameter target yakni 1.75 mm. Pembuatan filamen dengan mesin ekstrusi plastik buatan sendiri. Variasi dibuat terhadap tiga variable dengan masing-masing terdiri atas tiga level. Variable dan level yang dimaksud adalah: (i) temperatur *heater band* dengan rentang*

* Corresponding author: mahros.tenik@unej.ac.id

Copyright ©2022 THE AUTHOR(S). This article is distributed under a Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International license. Jurnal Teknosains is published by the Graduate School of Universitas Gadjah Mada.

minimum dan maksimum (150/170 °C, 155/175 °C dan 160/180 °C), (ii) kecepatan penggulangan (13 mm/s, 16 mm/s dan 19 mm/s), dan (iii) jarak *roll* dengan *nozzle* set point (200 mm, 500 mm dan 700 mm). Desain Taguchi L9 digunakan untuk menyusun eksperimen penelitian dan analisisnya. Perangkat lunak Minitab 19 diaplikasikan untuk analisis rasio S/N dan ANOVA. Hasil analisis menyatakan bahwa dua parameter berpengaruh nyata terhadap dimensi filamen, yaitu temperatur dan jarak *roll* terhadap *nozzle*, sedangkan kecepatan penggulangan tidak berpengaruh secara signifikan. Hasil dimensi dan diameter filamen terbaik terjadi pada kombinasi variabel temperatur (160/180°C), jarak *nozzle* terhadap *roll* (700 mm), serta kecepatan penggulangan (13 mm/s).

Kata Kunci : *Akurasi dimensi; FDM 3D printing; Disain Filamen; Taguchi.*

PENGANTAR

Munculnya teknologi *3D Printing* sangat berpengaruh pada beberapa bidang industri, terutama dari segi ekonomi (Ikhsanto & Zainuddin, 2020). Salah satu teknik *3D printing* adalah *Fused Deposition Modeling* (FDM). Dengan teknologi dari *3D printing*, perusahaan dapat membuat sebuah *prototype* (purwarupa) tanpa harus menghabiskan bahan baku ataupun material (Rahman dkk., 2019). Hal ini yang membuat *3D printing*, terutama teknik FDM, memiliki potensi besar di dunia manufaktur (Jeffrey dkk., 2016). *Trend* ini diikuti dengan pembuatan berbagai jenis mesin mulai dari yang area cetak dengan ruangan kecil hingga yang besar.

Terkait dengan teknik FDM, secara garis besar ada tiga kelompok penelitian untuk mengembangkan teknik ini. Pertama, riset tentang mesin 3D printingnya. Ada yang membuat tipe portabel sehingga mudah dibawa (Patil dkk., 2017). Periset lain mengembangkan teknik FDM untuk metal dengan menggantikan *nozzle* dengan brander las (Rosli dkk., 2018). Ada juga yang mendesain, membuat simulasi, dan manufaktur dengan frame tipe yang lebih sederhana dan sistem kendali Arduino untuk memperoleh rancangan yang kuat, namun lebih ekonomis (Ivan WCS dkk., 2021). Kelompok kedua, mereka berusaha memadukan dan

mengombinasi berbagai parameter pencetakan untuk mendapat sifat mekanis yang memadai (Putri dkk., 2017; Setiawan, 2017; Nugroho dkk., 2019; Andriyansyah dkk., 2018). Selain sifat mekanis, periset telah dan sedang berupaya meningkatkan kualitas hasil cetak dari segi kehalusan permukaan (Tontowi & Setiawan, 2016; Darsin dkk., 2021). Kelompok ketiga, peneliti berusaha membuat filamen dari berbagai bahan dengan tujuan menghasilkan filamen pengumpan mesin FDM 3D printer dengan kualitas baik dan harga lebih ekonomis. Paper ini merupakan pemaparan hasil riset yang masuk kategori kelompok ketiga.

Berbagai penelitian sebelumnya telah berusaha membuat sendiri filamen untuk umpan 3D printer teknik FDM ini. Miron dkk. telah berupaya membuat filamen dengan mesin ekstrusi (Mirón dkk., 2017). Namun tidak dijelaskan mekanisme kerja dan detil dari mesin ekstrusi yang dipakai. ABS bekas atau buangan hasil 3D printing telah berhasil dicetak menjadi filamen baru dengan mesin ekstrusi sederhana. Hasilnya, kekuatan filamen turun sedikit dari filamen ABS original dari 724N menjadi 713 N (Aris dkk., 2020). Usaha mencetak sendiri filamen PLA juga pernah dilakukan periset sebelumnya dengan mesin ekstrusi portabel. Sebelum dimasukkan ke *extruder*, *pellet* PLA digerus dengan mesin gerinda. Dua parameter yang divariasikan yakni suhu *extruder* dan *screw speed* (Liu dkk., 2018). Secara umum upaya pembuatan filamen dari plastik bekas telah mengurangi pencemaran dan sekaligus menaikkan nilai ekonomi sampah plastik (Mikula dkk., 2021). Salah satu upaya mendesain mesin ekstruder untuk mencetak filamen dilaporkan telah berhasil membuat filamen tanpa gelembung dan berbentuk sangat sederhana dengan tambahan kontrol suhu *barrel* (Ravichandran dkk., 2020). Lebih jauh lagi, berbagai upaya mengganti sistem umpan filamen pada teknik FDM dengan pengumpanan langsung bentuk *pellet* atau *granule* dengan dilewatkan ekstruder yang didesain menempel pada mesin 3D printer. Teknik yang dipakai sudah modern dan canggih. Dari tinjauan terhadap mesin pencetak filamen, desain yang paling baik adalah karya Mahor, namun masih membutuhkan investasi

yang cukup mahal (Shaik dkk., 2021). Sebuah mesin ekstrusi-pultrusi untuk memproduksi pellet dari termoplastik yang diperkuat serat telah berhasil dibuat oleh tim peneliti dari Indonesia (Budiyantoro dkk., 2021). Mesin yang digunakan terdiri atas dua sistem atau dua tahap untuk mendapatkan bentuk filamen sesuai spesifikasi.

Berdasarkan *review* beberapa penelitian di atas menunjukkan bahwa riset tentang pembuatan filamen untuk mesin 3D printer teknik FDM masih dapat dikembangkan. Ide yang ditawarkan adalah kesederhanaan mesin, harga yang ekonomis, dengan target kualitas yang memadai. Penelitian ini bertujuan mendesain dan membuat sendiri filamen berbahan PP murni dan baru, dengan target diameter yang dihasilkan pada kisaran 1.75 mm dengan mesin ekstrusi plastik yang dimodifikasi. Alasan dipilih material PP adalah bahwa bahan ini dapat digunakan pada berbagai aplikasi, di antaranya pengemasan, tekstil, alat tulis, perlengkapan laboratorium, pelantang suara, komponen otomotif, dan uang kertas polimer (Hartono, 2012). Target filamen berdiameter 1.75 mm berdasarkan kelaziman ukuran filamen pengumpan mesin 3D *printing* tipe FDM. Analisis dilakukan terhadap tingkat akurasi dimensi filamen yang dihasilkan. Variabel yang digunakan dalam pembuatan filamen berbahan PP ini meliputi: temperatur, kecepatan penggulangan, dan jarak rol penggulangan.

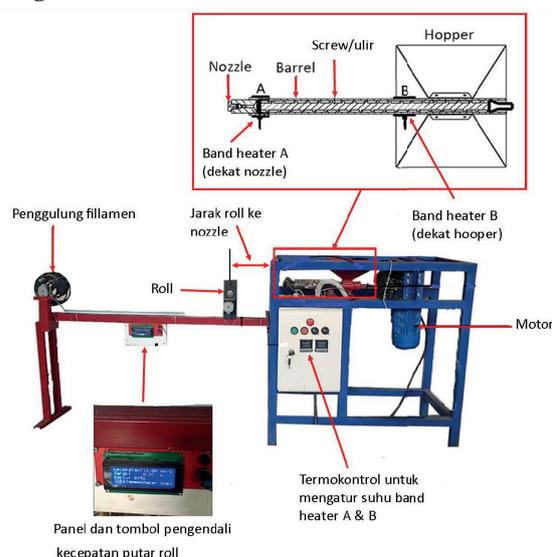
Manfaat yang diperoleh jika pembuatan filamen ini berhasil adalah mengurangi ketergantungan filamen yang didapat dari pembelian di pasaran daring yang kualitasnya sangat bervariasi, berdasar pengalaman peneliti, beda pamanufaktur beda kualitas. Selain itu, sebagai akademisi akan dijadikan dasar pengembangan pembuatan filamen berbahan lain, misalnya campuran metal dan plastik.

METODE

Alat, Mesin dan Bahan

Penelitian ini menggunakan mesin ekstrusi (Gambar 1) dengan penggerak mula motor listrik 3 *phase* dengan daya 1/4 hp dan putaran maksimum 1350 rpm. Dari putaran motor listrik ditransmisikan oleh *gear box* menuju

kecepatan putaran *screw* sebesar 23.2 rpm. Untuk melelehkan material, pada bagian *barrier* ditempelkan 2 buah *band heater* dengan sumber tenaga listrik 1 *phase* dengan tegangan 220 volt dan dilakukan *setting* parameter temperatur di rentang 150°C-180°C. Sedangkan untuk penggulangan produk filamen dari bahan dasar biji plastik *Polypropilene* (PP) menggunakan motor *stepper* dengan mikrokontroler Arduino tipe mega 2560. Pengukuran keakuratan dimensi dilakukan dengan cara memotong hasil ekstrusi filamen PP yang sudah dingin sepanjang 50 mm. Alat ukur yang digunakan pada penelitian ini adalah: (i) jangka sorong untuk mengukur dimensi filamen yang keluar melalui mesin ekstrusi, (ii) *thermometer infra red* untuk mengukur suhu yang dihasilkan oleh *band heater*, dan (iii) *micrometer screw* untuk pengukuran kebulatan dari filamen yang dihasilkan.



Gambar 1.

Skema mesin ekstrusi untuk mencetak filamen dan komponen utamanya.

Sumber: Logbook tim peneliti (2021)

Desain Eksperimen dan Pengaturan Variabel

Demi kepraktisan, desain Taguchi digunakan untuk penelitian ini. Metode Taguchi menjanjikan jumlah eksperimen yang lebih sedikit dengan hasil yang dapat dipercaya (Islam & Pramanik, 2016) a three-level, four-parameter, full factorial DOE was conducted for finding the effects of machining parameters

on the surface roughness (arithmetic average, (Khanna dkk., 2019). Penulis juga sering menggunakan metode Taguchi ini untuk mendesain dan menganalisis penelitian sebelumnya untuk berbagai aplikasi (Amin dkk., 2020; Darsin dkk., 2017; Darsin dkk., 2018). Pemilihan dan pengaturan variabel berdasarkan hasil riset sebelumnya yang telah dijelaskan ditambah dengan eksperimen

pendahuluan yang telah dilakukan oleh tim peneliti. Ada tiga variabel yang dipilih yaitu; (i) temperatur *barrel* dan *nozzle*, (ii) kecepatan penggulungan, dan (iii) jarak *roll* terhadap *nozzle*. Untuk penyederhanaan penyebutan selanjutnya ketiga variabel akan ditulis sebagai: (i) temperatur, (ii) kecepatan, dan (iii) jarak. Masing-masing variabel memiliki tiga level seperti tersaji pada Tabel 1.

Tabel 1.
Variabel pada proses ekstrusi

Kode	Variabel	Satuan	Level 1	Level 2	Level 3
A	Temperatur	°C	150/170	155/175	160/180
B	Kecepatan	mm/s	13	16	19
C	Jarak	mm	200	500	700

Sumber: *Logbook* tim peneliti (2021).

Penentuan Nilai Ortogonal

Penentuan matriks ortogonal berdasar pada parameter dan *level* dari setiap parameter kendali. Matriks ortogonal harus memiliki derajat kebebasan yang lebih besar atau sama daripada derajat kebebasan parameter yang ditetapkan. Derajat kebebasan parameter kendali dihitung menggunakan persamaan pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2.

Jumlah derajat kebebasan parameter kendali

No.	Parameter Kendali	Jumlah Level	df = k-1
1	Temperatur	3	2
2	Kecepatan	3	2
3	Jarak	3	2
Total			6

Sumber: Analisis data (2021).

Tabel 2 menunjukkan total derajat kebebasan di parameter kendali adalah 6, maka matriks ortogonal yang sesuai pada percobaan ini adalah dengan derajat kebebasan 6 adalah L9(3³). Tabel 3 matriks ortogonal L9 adalah sebagai berikut.

Tabel 3.
Matriks ortogonal L9

No Percobaan	Parameter Kendali		
	A	B	C
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

Sumber: Krishnaiah & Shahabudeen (2012).

Pengukuran diameter filamen dapat dilakukan dengan menggunakan alat ukur yang memiliki dua sensor yang saling bertolak belakang (180°), misalnya *micrometer screw* [12]. Filamen dipotong-potong secara acak sepanjang 50 mm guna memudahkan pada saat menentukan pengukuran. Pengukuran pada tempat acak sepanjang 50 mm sebanyak sepuluh kali. Data hasil pengukuran diameter filamen terbaik dan terburuk ditunjukkan pada Tabel 4 dan Tabel 5.

Tabel 4.
Data pengukuran diameter filamen terbaik

Diagonal	Diameter spesimen (mm)										Rata-rata
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	1,77	1,78	1,76	1,77	1,78	1,76	1,78	1,77	1,78	1,77	1,77
2	1,74	1,74	1,75	1,72	1,74	1,72	1,75	1,76	1,74	1,75	1,74
Selisih	0,03	0,04	0,01	0,05	0,04	0,04	0,03	0,01	0,04	0,02	0,03

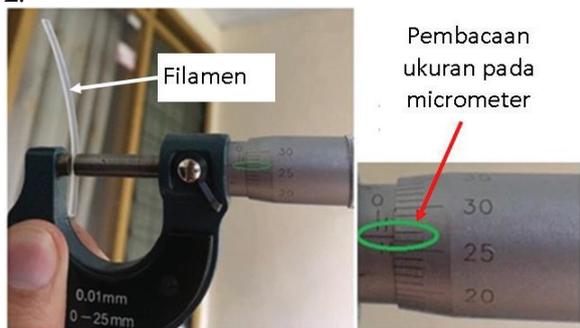
Sumber: analisis data (2021).

Tabel 5.
Data pengukuran diameter filamen dengan penyimpangan terbesar

Diagonal	Diameter spesimen (mm)										Rata-rata
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	1,74	1,72	1,74	1,73	1,75	1,74	1,73	1,75	1,74	1,74	1,74
2	1,50	1,50	1,51	1,56	1,52	1,51	1,52	1,50	1,51	1,52	1,51
Selisih	0,24	0,22	0,23	0,17	0,23	0,23	0,21	0,25	0,23	0,22	0,22

Sumber: analisis data (2021).

Dari hasil pengukuran kebulatan yang dilakukan, rata-rata selisih diameter filamen yang terbaik adalah 0,03 mm dan untuk hasil pengukuran filamen dengan penyimpangan terbesar adalah 0,22 mm sehingga dapat dikatakan bahwa hasil dari penelitian yang telah dilakukan mampu menghasilkan filamen dengan tingkat kebulatan yang baik. Pengukuran filamen ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2.

Pengukuran diameter filamen
Sumber: Logbook tim peneliti (2021).

HASIL DAN PEMBAHASAN Data Hasil Diameter Filamen

Dari hasil penelitian yang dilakukan didapatkan data diameter filamen sesuai dengan Tabel 6. Data pada kolom 5, 6, dan 7 adalah hasil rata-rata pengukuran per filamen

dengan kombinasi tertentu sesuai yang telah disajikan sebelumnya (Tabel 4 dan 5).

Berdasarkan data filamen pada Tabel 6 akan dibandingkan nilai diameter yang terbaik pertama dan kedua. Hasil terbaik yang dimaksud adalah rata-rata diameter filamen yang diperoleh paling mendekati diameter yang menjadi target, yakni 1.75 mm (Tabel 6 kolom 8). Hasil diameter terbaik dengan kombinasi parameter kecepatan 13 mm/s, temperatur (160/180°C) dan jarak 700 mm dengan rata-rata diameter sebesar 1,73 mm. Pengulangan pertama dan kedua memiliki nilai -0,03 mm dari target 1,75 mm. Sedangkan untuk pengulangan ketiga memiliki nilai +0,01 dari target. Sehingga rentang dari hasil pengulangan rentang kisaran antara -0,03 sampai +0,01 atau sebesar 0,04 mm. Sedangkan untuk yang terbaik kedua dengan kombinasi parameter kecepatan 13 mm/s, temperatur (150/170°C) dan jarak 200 mm dengan dihasilkan rata-rata diameter sebesar 1,74 mm. Rentang kisaran yang dihasilkan di setiap pengulangan sangat bervariasi, dimulai dari yang pertama dengan nilai +0,01 mm kemudian di pengulangan kedua +0,03 mm dan pada pengulangan ketiga mengalami penurunan yang cukup signifikan yakni -0,06 mm. Sehingga menjadikan rentang yang dihasilkan terlalu lebar yakni -0,06 sampai +0,03 atau sebesar 0,09 mm.

Tabel 6.
Data hasil penelitian

No	Control Factor			Diameter (mm)			Rata-rata	S/N Ratio
	Kecepatan (mm/s)	Temperatur (°C)	Jarak (mm)	Replikasi				
				I	II	III		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	13	150/170	200	1,76	1,78	1,69	1,74	24,36125
2	13	155/175	500	1,69	1,54	1,75	1,66	16,82973
3	13	160/180	700	1,72	1,72	1,76	1,73	30,4278
4	16	150/170	500	1,57	1,64	1,46	1,56	17,72965
5	16	155/175	700	1,48	1,36	1,38	1,41	19,658
6	16	160/180	200	1,71	1,70	1,66	1,69	29,10212
7	19	150/170	700	1,27	1,29	1,26	1,27	31,35818
8	19	155/175	200	1,58	1,48	1,57	1,54	22,01312
9	19	160/180	500	1,21	1,17	1,18	1,19	28,04003

* Biru; terbaik pertama * Kuning; terbaik ke-dua
Sumber: analisis data (2021).

Data Perhitungan Rasio S/N

Rasio S/N pada hakekatnya adalah mencari perbandingan antara signal (S) yang berupa parameter atau variabel yang divariasikan pada eksperimen ini dengan noise (S) variabel yang dibuat konstan. Semakin tinggi rasio S/N semakin baik, berarti variabel pada eksperimen dominan mempengaruhi hasil penelitian, dan sebaliknya. Berdasarkan perhitungan rasio S/N menggunakan

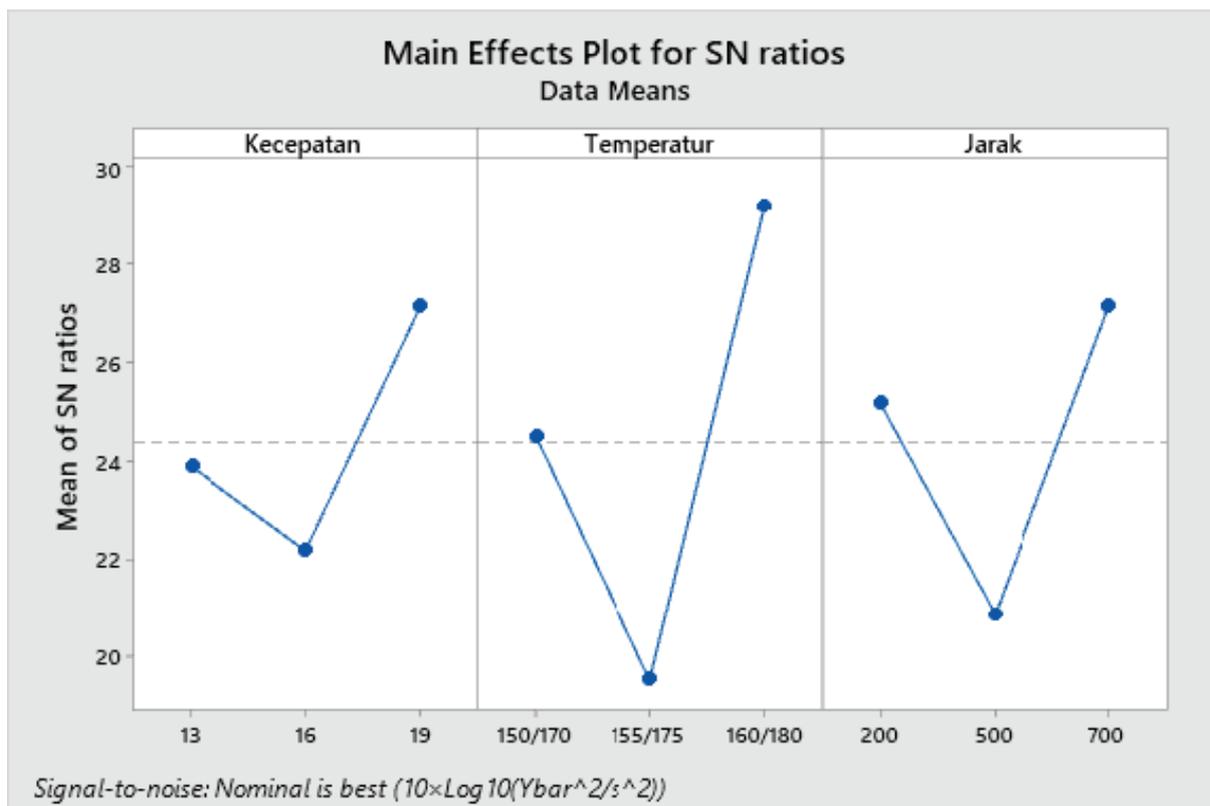
bantuan aplikasi Minitab 19 didapatkan data perhitungan Rasio S/N pada Tabel 6 kolom terakhir, Kemudian, respon rata-rata nilai Rasio S/N pada tiap level parameter yang ditunjukkan pada Tabel 7. Harga rasio S/N pada Tabel 7 berbeda dari yang tersaji pada Tabel 6, karena Tabel 6 menyajikan Rasio S/N untuk tiap kombinasi faktor (parameter), Sedangkan Tabel 7 hasil Rasio S/N tiap parameter sesuai level.

Tabel 7.
Respon rata-rata nilai rasio S/N pada setiap level parameter

Parameter	Level 1	Level 2	Level 3	Selisih (max-min)
Kecepatan	23,8729	22,1633	27,1371	3,2642
Temperatur	24,483	19,5003	29,1900	9,6897
Jarak	25,1588	20,8665	27,1480	6,2815
Rata-rata	24,3911			

Sumber: analisis data (2021).

Dari data pada Tabel 7 didapatkan plot rasio S/N pada Gambar 3 berikut.



Gambar 3.
 Plot for S/N Ratio (Minitab 19)
 Sumber: analysis data (2021).

Berdasarkan perhitungan rasio S/N dan *plot for S/N Ratio* didapatkan hasil bahwa parameter kecepatan 19 m/s memiliki S/N yang tertinggi dengan nilai 27,1371 dibandingkan dengan *setting* parameter kecepatan 13 m/s dan 16 m/s dengan hasil di bawah nilai rata-rata. Kemudian parameter temperatur S/N ratio tertinggi dihasilkan oleh *setting* temperatur 160/180 °C dengan nilai 29,19. Untuk *setting* temperatur 150/170 °C berada di tengah-tengah yakni dengan nilai 24,483. Sedangkan untuk 155/175 °C berada di bawah sebesar 19,5. *Setting* parameter jarak yang mampu memberi pengaruh tertinggi yakni 700 mm dengan nilai 27,148 kemudian *setting* parameter jarak tertinggi ke dua dengan jarak 200 mm dengan nilai sebesar 25,1588. Kedua *setting* parameter tersebut masih di atas nilai rata-rata, sedangkan yang paling kecil memberikan nilai

sebesar 20,866 dari *setting* parameter jarak 500 mm. Dari ketiga parameter yakni kecepatan, temperatur, dan jarak yang memiliki kontribusi tertinggi adalah *setting* parameter temperatur 160/180 °C dengan selisih nilai kisaran 2 yang terjadi di level 3. Keadaan optimal ini dibatasi oleh hanya tiga level yang dipilih pada saat menyusun desain eksperimen. Mungkin saja di luar level ini, akan didapatkan hasil yang lebih optimum. Perlu penelitian lanjutan untuk membuktikannya.

Perhitungan ANOVA

Analysis of variance (ANOVA) bertujuan untuk menentukan kontribusi pada tiap parameter terhadap respon yang diteliti. Di bawah ini adalah contoh perhitungan ANOVA dengan nilai rasio S/N:

- a. Menghitung jumlah kuadrat total (*sum of square*)

$$SST = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$$

$$SST = (24,3612 - 24,3911)^2 + (16,8297 - 24,3911)^2 + (30,4278 - 24,3911)^2 + (17,7296 - 24,3911)^2 + (19,6580 - 24,3911)^2 + (29,1021 - 24,3911)^2 + (31,3582 - 24,3911)^2 + (22,0131 - 24,3911)^2 + (28,0400 - 24,3911)^2$$

$$SST = 250,0976$$

- b. Jumlah kuadrat setiap parameter

$$SSA = nA \sum_{i=1}^n (A_i - \bar{y})^2$$

$$SSA = 3 \times ((23,8729 - 24,3911)^2 + (22,1633 - 24,3911)^2 + (27,1371 - 24,3911)^2)$$

$$SSA = 38,3171$$

- c. Rata-rata kuadrat tengah (*means of square*)

$$MSA = \frac{SSA}{df_A}$$

$$MSA = \frac{38,3171}{2}$$

$$MSA = 19,1585$$

Setelah melakukan perhitungan di atas, maka dibutuhkan perhitungan persen kontribusi guna mengetahui seberapa besar

pengaruh pada tiap-tiap parameter terhadap total variasi respon yang ada. Apabila nilai dari persentase kontribusi residual pada tiap parameter kurang dari 15%, maka parameter berpengaruh pada penelitian ini. Sebaliknya apabila persentase kontribusi residual pada tiap variasi lebih dari 15%, maka ada parameter yang berpengaruh terabaikan pada penelitian. Di bawah ini merupakan perhitungan persen kontribusi dari hasil ANOVA:

$$SS'_A = SSA - df_A \cdot MS_{Res}$$

$$SS'_A = 38,3171 - 2 \cdot 4,5341$$

$$SS'_A = 29,2478$$

$$P_A = \frac{SS'_A}{SST} \times 100\%$$

$$P_A = \frac{29,2478}{250,0976} \times 100\%$$

$$P_A = 12\%$$

Hasil perhitungan persen kontribusi nilai ANOVA yang telah dikonversi ke nilai rasio S/N ditunjukkan pada Tabel 8 berikut:

Tabel 8.
Hasil ANOVA dan kontribusi parameter dengan perhitungan rasio S/N

Parameter	DF	SS	MS	F-value	Persen
Kecepatan	2	38,3171	19,1585	4,2254	12%
Temperatur	2	140,8735	70,4367	15,5347	53%
Jarak	2	61,8387	30,9194	6,8192	21%
Residual error	2	9,0683	4,5341		14%
Total	8	250,0976			100%

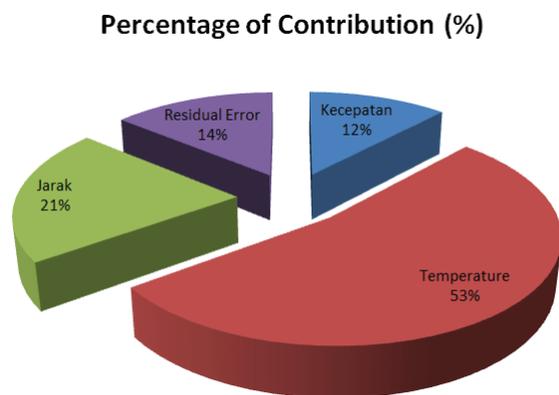
Sumber: analisis data (2021).

Berdasarkan hasil perhitungan di atas, maka parameter yang paling berpengaruh adalah parameter yang memiliki nilai F_{value} lebih besar dari pada F_{tabel} . Pada penelitian ini taraf signifikan yang digunakan adalah 5%. Untuk nilai F_{tabel} dengan nilai $(F_{0,05;2;6}) = 5,14$. Berarti hanya dua variabel yang berpengaruh signifikan, yakni temperatur dan jarak. Sedangkan kecepatan pengerolan tidak berpengaruh signifikan terhadap diameter akhir filamen. Dibandingkan dengan hasil

penelitian serupa dengan menggunakan mesin *portable extrusion* dengan material ABS, diperoleh hasil yang setara dengan tingkat *dimensional error* 15% (Garsiman, 2018).

Pembahasan Pengaruh Parameter

Pengaruh tiap parameter terhadap akurasi dimensi dalam persentase disajikan pada Gambar 4. Analisis atas pengaruh tiap parameter ini disajikan pada beberapa paragraf selanjutnya.



Gambar 4.

Persentase kontribusi masing-masing parameter terhadap akurasi dimensi (diameter)
 Sumber: Logbook tim peneliti (2021)

a. Temperatur *band heater*

Dari pengambilan data yang diperoleh parameter temperatur memiliki pengaruh yang paling signifikan dengan persen kontribusi terbesar yaitu 53% dan nilai F_{value} sebesar 15,5347. Ini terjadi dikarenakan berhubungan dengan distribusi filamen yang keluar dari *nozzle*. Ketika temperatur pada *barrel* terlalu kecil dan tidak terdistribusi secara merata, maka biji plastik yang terdapat di dalamnya tidak akan mencair dengan rata sehingga distribusi filamen yang dikeluarkan tidak akan stabil. Ketika dilakukan penggulungan filamen yang dihasilkan tidak bisa seragam dikarenakan *volume* filamen yang keluar tidak stabil. Oleh karena itu, pengaturan temperatur pada *barrel* sangat penting sehingga memerlukan temperatur yang tepat dengan kombinasi temperatur *band heater* 160°C pada jarak terdekat (50 mm) dengan *nozzle* dan 180°C pada jarak terdekat (35mm) dengan *hopper* dengan rentang 180 - 200°C untuk menghasilkan distribusi filamen dengan bahan dasar *polypropylene* yang konsisten. Bahwa temperatur paling dominan berpengaruh terhadap akurasi dimensi filamen hasil FDM 3D printer adalah sesuai dengan temuan (Herianto dkk., 2020) menggunakan bahan PP bekas (*recycled*), lebih dominan dari pada parameter kecepatan penggulungan.

Sedangkan laju ekstrusi tidak berpengaruh signifikan terhadap akurasi diameter yang diperoleh.

b. Jarak antara *roll* terhadap *nozzle*

Hasil pengolahan data menunjukkan bahwa parameter jarak memiliki persen kontribusi sebesar 21% dan F_{value} sebesar 6,8192. Jarak *roll* berpengaruh signifikan terhadap hasil dimensi dan diameter filamen. Ketika filamen masih berada pada tahap transisi dari bentuk cair ke bentuk solid kemudian masuk *roll* akan mengakibatkan filamen memipih karena tekanan oleh *roll* ketika jaraknya terlalu dekat. Filamen menjadi pipih dikarenakan filamen belum berada pada kondisi solid ketika mendapat tekanan dari *roll*. Oleh karena itu, untuk memastikan filamen sudah menjadi *solid* maka jarak *roll* dengan *nozzle* harus jauh. Jarak terbaik dari hasil penelitian yang dilakukan yaitu 700 mm dari *nozzle*. Upaya lain yang dapat dikerjakan untuk meningkatkan mutu filamen yang dihasilkan adalah penambahan pendinginan eksternal pada mesin ekstrusi yang digunakan.

c. Parameter kecepatan penggulungan

Berdasarkan pengolahan data menggunakan metode *Taguchi* dengan bantuan aplikasi Minitab19, didapatkan F_{value} lebih kecil dari F_{tabel} . Ini membuktikan bahwa parameter kecepatan penggulungan memiliki pengaruh yang tidak signifikan terhadap diameter filamen yang dibuat. Temuan ini berbeda dari yang didapat oleh (Herianto dkk., 2020) seperti yang sudah disebutkan sebelumnya. Perbedaan ini mungkin dipengaruhi oleh perbedaan bahan yang dipakai. Riset ini menggunakan bahan baku PP baru berbentuk *granule*, sedangkan (Herianto dkk., 2020) menggunakan bahan PP hasil daur ulang.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis dan pengolahan data menggunakan metode *Taguchi* dengan bantuan aplikasi Minitab19 didapatkan bahwa di antara tiga parameter yang divariasikan, temperatur dan jarak antara *nozzle* terhadap *roll*

penggulung filamen berkontribusi signifikan terhadap akurasi dimensi filamen masing masing sebesar 53% dan 21%. Sedangkan parameter kecepatan putar *roll* tidak memberikan pengaruh signifikan. Parameter terbaik jika menggunakan kombinasi temperatur 160/180°C, jarak *nozzle* dengan *roll* 700 mm, serta kecepatan penggulangan 19 mm/s. Kombinasi ini menghasilkan diameter sesuai target dengan deviasi 0.03 mm.

Pada riset berikutnya untuk mempercepat pembekuan filamen diperlukan pendingin tambahan (eksternal) sesaat setelah filamen keluar dari *nozzle*. Pendingin tambahan dapat berupa bak air, tempat dilewatkannya filemen sebelum ke *roll*. Selain itu, masih terbuka untuk dicoba level faktor lain yang dari hasil penelitian ini terlihat kecenderungan nilai means S/N-nya naik.

DAFTAR PUSTAKA

- Amin, M. S., Darsin, M., & Sanata, A. (2020). Optimasi Kekuatan Tarik Proses Electroplating SS400 Menggunakan Metode Taguchi. *Jurnal Riset Teknologi Industri*, 14(1), 54. <https://doi.org/10.26578/jrti.v14i1.5839>
- Andriyansyah, D., Herianto, & Purfaji. (2018). Optimasi Parameter Proses 3D Printing Terhadap Kuat Tarik Filamen PLA Menggunakan Metode Taguchi. *Seminar Nasional Pendidikan Teknik Otomotif*, ISSN : 2338-0284, 61-68.
- Aris, M. A. 'Ilman Z., Mat, S., Sam, M. S., Ramli, F. R., Alkahari, M. R., & Kudus, S. I. A. (2020). Design and development of 3D printer filament extruder. *Proceedings of Mechanical Engineering Research Day 2020*, Pp. 293-294, December 2020, 293-294. Design and development of 3D printer filament extruder
- Budiyantoro, C., Rochardjo, H. S. B., & Nugroho, G. (2021). Design , Manufacture , and Performance Testing of Extrusion-Pultrusion Machine for Fiber-Reinforced Thermoplastic Pellet Production. *Machines*, 9(42), 3-17. <https://doi.org/doi.org/10.3390/machines9020042>
- Darsin, M., Pasang, T., & Chen, Z. (2017). Performance of TiAlN PVD Coated Carbide Drill when Drilling Titanium 6246 Alloy. *MATEC Web of Conferences*, 109. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201710902001>
- Darsin, Mahros, Mahardika, N. A., Jatisukanto, G., Edoward, M., Fachri, B. A., & Hussin, M. S. (2021). Coalesce Research Group Journal of 3D Printing and Additive Manufacturing Effect of 3D Printing Parameters on Dimensional Accuracy Using eSteel Filaments. 1(1), 1-7.
- Darsin, Mahros, Pasang, T., & Chen, Z. (2018). Forces Perspective of Drillability of Titanium Alloy 6Al-2Sn-4Zr-6Mo. *Journal of Energy, Mechanical, Material and Manufacturing Engineering*, 3(1), 23. <https://doi.org/10.22219/jemmme.v3i1.5825>
- Garsiman, G. (2018). *Studi Rancang Bangun Mesin Single Screw Extruder Portable Untuk Aplikasi Produksi Filament 3D Printer* [Institut Teknologi Sepuluh Nopember]. https://repository.its.ac.id/53053/1/02511440000060_undergraduate-theses.pdf
- Hartono, M. (2012). Meningkatkan Mutu Produk Plastik Dengan Metode Taguchi. *Jurnal Teknik Industri*, 13(1), 93. <https://doi.org/10.22219/jtiumm.vol13.no1.93-100>
- Herianto, Atsani, S. I., & Mastrisiswadi, H. (2020). Recycled Polypropylene Filament for 3D Printer: Extrusion Process Parameter Optimization. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 722(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/722/1/012022>
- Ikhsanto, L. N., & Zainuddin. (2020). Analisa Kekuatan Bending Filamen ABS dan

- PLA pada Hasil 3D Printer dengan Variasi Suhu Nozzle. *Media Mesin: Jurnal Imiah Teknik Mesin*, 21(1), 9-17.
- Islam, M. N., & Pramanik, A. (2016). Comparison of Design of Experiments via Traditional and Taguchi Method. *Journal of Advanced Manufacturing Systems*, 15(3), 151-160. <https://doi.org/10.1142/S0219686716500116>
- Ivan WCS, I. M., Darsin, M., Jatisukamto, G., & Hussin, M. S. (2021). Design of Portable Cartesian 3D Printer Using Arduino Mega 2560. *Journal 3D Printing and Additive Manufacturing*, 1(1), 1-9. <https://crgjournals.com/3dprinting/articles/design-of-portable-cartesian-3d-printer-using-arduino-mega-2560lt>
- Jeffrey, Utama, D. W., & Soeharsono. (2016). Rancang bangun kontruksi dan sistem gerak sumbu pada mesin. *POROS*, 14(No 2), 99-106.
- Khanna, N., Agrawal, C., Shah, P., Larsen, J. Ø., & Phadnis, V. A. (2019). Eco-friendly machining using retrofitted cryogenic machining system. *Materials Today: Proceedings*, 18(March), 2806-2813. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.147>
- Krishnaiah, K., & Shahabudeen, P. (2012). *Applied Design of Experiments and Taguchi Method*. PHI Learning Private Limited.
- Liu, W., Zhou, J., Ma, Y., Wang, J., & Xu, J. (2018). Fabrication of PLA Filaments and its Printable Performance. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 275(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/275/1/012033>
- Mikula, K., Skrzypczak, D., Izydorczyk, G., Warchoń, J., Moustakas, K., Chojnacka, K., & Witek-Krowiak, A. (2021). 3D printing filament as a second life of waste plastics—a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(10), 12321-12333. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-10657-8>
- Mirón, V., Ferrándiz, S., Juárez, D., & Mengual, A. (2017). Manufacturing and characterization of 3D printer filament using tailoring materials. *Procedia Manufacturing*, 13, 888-894. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.151>
- Nugroho, A., Mahardika, A., & Budiyanoro, C. (2019). Improving the tensile properties of 3D printed PLA by optimizing the processing parameter. *JEMMME (Journal of Energy, Mechanical, Material, and Manufacturing Engineering)*, 4(1), 29-36.
- Patil, A., Patil, B., Potwade, R., Shinde, A., & Shinde, R. (2017). Design and Development of FDM Based Portable 3D Printer. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 8(3), 116-120.
- Putri, N. D. S., Mardiyati, Suratman, R., & Steven. (2017). Pembuatan Filamen Komposit Polypropylene High Impact Berpenguat Serat Rami Dengan Mesin Ekstrusi Sederhana. *Seminar Nasional Metalurgi Dan Material (SENAMM)*, November, 9-15.
- Rahman, H., Saputra, I., Utama, G., & Setyoadi, Y. (2019). Pengaruh Temperatur Nozzle dan Base Plate Pada Material PLA Terhadap Nilai Masa Jenis dan Kekasaran Permukaan Produk Pada Mesin Leapfrog Creatr 3D Printer. *Jurnal Teknologi Dan Riset Terapan (JATRA)*, 1(1 SE-Research Articles), 1-8.
- Ravichandran, P., Anbu, C., Poornachandran, R., Shenbagarajan, M., & Yaswahnthan, K. S. (2020). Design and development of 3d printer filament extruder for material reuse. *International Journal of Scientific and Technology Research*, 9(1), 3771-3775.

- Rosli, N. A., Alkahari, M. R., Ramli, F. R., Maidin, S., Sudin, M. N., Subramoniam, S., & Furumoto, T. (2018). Design and development of a low-cost 3D metal printer. *Journal of Mechanical Engineering Research and Developments*, 41(3), 47-54. <https://doi.org/10.26480/jmerd.03.2018.47.54>
- Setiawan, A. (2017). Pengaruh Parameter Proses Ekstrusi 3D Printer Terhadap Sifat Mekanis Cetak Komponen Berbahan Filament PLA (Poly Lactide Acid). *Jurnal Teknik STTKD*. ISSN : 2460-1608, 4(2), 20-27.
- Shaik, Y. P., Schuster, J., & Shaik, A. (2021). A Scientific Review on Various Pellet Extruders Used in 3D Printing FDM Processes. *OALib*, 08(08), 1-19. <https://doi.org/10.4236/oalib.1107698>
- Tontowi, A. E., & Setiawan, A. (2016). Mechanical Strength of [HA / Bioplastic / Sericin] Composite Part Printed by Bioprinter. *The 2016 Conference on Fundamental and Applied Science for Advanced Technology (ConFAST 2016)*, 020035(978-0-7354-1403-7/\$30.00). <https://doi.org/10.1063/1.4953960>