



Kajian Parameter 3d Printing Terhadap Ketangguhan Material dan Kualitas Permukaan Menggunakan Metode Taguchi

Muhammad Arifin

Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik dan Komputer, Universitas Harapan Medan, Medan, Indonesia

arfiin91@gmail.com

Abstrak-Pencetakan 3D Fused Deposition Modeling (FDM) adalah mencetak bahan termoplastik lapis demi lapis untuk membentuk produk tiga dimensi di mana adhesi antar lapisan harus dikontrol dengan baik untuk mendapatkan kinerja mekanik yang tinggi dan integritas produk. Penelitian bertujuan menyelidiki pengaruh suhu nozel, suhu meja dan model pengisi pada kekuatan mekanis dan kualitas permukaan produk. Filament PLA digunakan pada penelitian ini, desain experimental pengambilan data menggunakan Taguchi L8 dengan factor dan level $(2)^4$ dua parameter suhu nozel, dua parameter model infill, dua parameter kecepatan cetak dan suhu meja pencetak. Ketangguhan dan kualitas produk menjadi focus penelitian ini, analisa data menggunakan metode statistic robust desain S/N Ratio. Hubungan kekasaran terhadap kekuatan mekanis juga dibahas. Suhu nozel menjadi pengaruh besar terhadap ketangguhan produk untuk kekasaran permukaan yang menjadi pengaruh besar bukan dari suhu nozel namun dari model infill/pengisi.

Kata kunci: Pencetakan 3D; Filament PLA; Ketangguhan Material; Kualitas Permukaan; Metode Taguchi.

Abstract- 3D Printing Fused Deposition Modeling (FDM) is the printing of thermoplastic material layer by layer to form a three-dimensional product in which the adhesion between layers must be well controlled to obtain high mechanical performance and product integrity. The research aims to investigate the influence of the nozzle temperature, table temperature, and filling model on the mechanical strength and surface quality of the product. The PLA filament used in this study, the experimental data capture design using the Taguchi L9 with factor and level $(2)^4$ two nozzle temperature parameters, two model infill parameters, two print speed parameters, and printer table temperature. The durability and quality of the product are the focus of this compilation, and data analysis using robust statistical methods of S/N Ratio design. The relationship of rigidity to mechanical force is also discussed. The temperature of the nozzle becomes a major influence on the firmness of the product for the surface hardness which is a big influence not of the temperature but of the model of the infill

Keywords: 3D Printing; Pla Filament; Material Durability; Surface Quality; Taguchi Method.

1. PENDAHULUAN

Aditif manufaktur adalah satu terobosan teknologi yang berkembang pesat, FDM fuse deposition modeling adalah jenis pencetakan yang digunakan untuk membuat prototype desain dengan bantuan computer, dengan metode cetak lapis demi lapis dan menghasilkan produk yang berlapis [1]. Teknologi FDM sangat menonjol dikarenakan kemudahan penggunaan dan ketersediaan bahan baku yang dapat di produksi secara mandiri dan sederhana, Beberapa keunggulan dari teknologi additive manufacturing dibandingkan manufaktur konvensional diantaranya, biaya produksi yang rendah, proses manufaktur yang lebih cepat dari desain sampai membuat produk jadi, dan mengurangi limbah material [2] Namun pada proses pencetakan dengan melelehkan filament dari hasil ekstrusi hasil lapisan ini memiliki ikatan *interlayer* yang buruk bila dibandingkan dengan produk cetakan kompresi dan injeksi [3]. Mohanty dkk pada penelitiannya membandingkan sifat mekanik jenis material PLA dari hasil cetakan injeksi dengan cetakan 3D, melaporkan sifat sampel yang dicetak dengan suhu meja 105°C memiliki sifat yang paling menjanjikan mirip dengan sampel hasil cetakan injeksi pada pengujian impact izod [4]. Upaya peningkatan kekuatan sifat mekanik pada material PLA pada pencetakan 3d printing juga telah dilakukan Cang Tang dan Jun Wei [5] pada *journal composite* mereka mempelajari sifat mekanik struktur PLA hasil cetakan dengan menggunakan korelasi citra digital (DIC) dan efek parameter proses pada sifat mekanis PLA, mereka





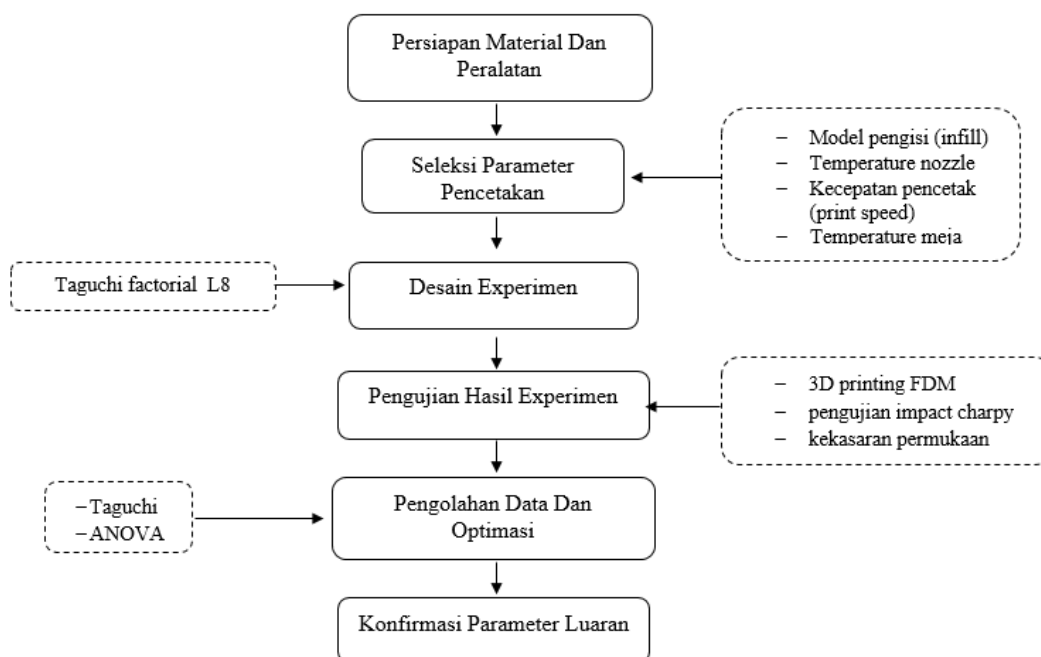
melaporkan dalam hasil percobaannya dengan meningkatnya suhu pencetakan kekuatan tarik dan modulus elastisitas cenderung naik, parameter yang terbaik dilaporkan berada pada suhu nozel 200°C dan kecepatan 60 mm/s. Hal yang serupa juga dilakukan oleh chamil abeykom [6] dengan menambahkan parameter model pola pengisian pada penelitiannya melaporkan untuk parameter optimal paling tepat berada pada suhu nozel 215°C, kecepatan cetak 80 mm/s dengan pola pengisian linier. Tahun berikutnya Kafshgar melakukan penelitian pada jenis material yang sama PLA+ mencari nilai optimasi pencetakan dengan membandingkan beberapa model optimasi model taguchi dan multi objective methodologies, dalam penelitiannya menyampaikan optimasi yang dilakukan, untuk nilai kekuatan tarik dan ketangguhan, parameter input pencetakan 3D yang optimal diperoleh pada kepadatan infill 60%, suhu ekstrusi 200°C, sudut raster 45/-45, dan ketebalan lapisan 0,2mm [7] selanjutnya penelitian dengan membandingkan dua jenis material yang berbeda PLA+ dan ABS pada 3D printing FDM yang dilaporkan oleh kiswanto [8] melakukan kajian dengan menganalisa variasi ketebalan lapisan dengan tiga tingkatan 0.1 mm – 0.3 mm untuk mencari ketangguhan dari material hasil cetakan spesimen yang mengacu pada standar ASTM D256 untuk uji impact charpy mendapatkan hasil bahwa material ABS lebih unggul dibandingkan dengan material PLA+, nilai dari hasil uji impact yang didapatkan 0.078 J/mm² tercatat sebagai nilai tertinggi pada material ABS dengan ketebalan infill 0.10 mm sedangkan untuk hasil terendah berada pada material PLA dengan ketebalan 0.30 mm dan nilai ketangguhan 0.047 J/mm². Cristina valen dkk [9] dalam penelitiannya menyajikan bahwa pada proses pencetakan material PLA pada proses FDM peningkatan jumlah lapisan menyebabkan penurunan kekuatan Tarik, berbeda dengan kajian yang dilakukan M. Hikmat [10] dengan menggunakan kajian ANOVA untuk menentukan parameter yang mempengaruhi kekuatan Tarik pada material PLA melaporkan bahwa pengaruh paling tinggi pada orientasi bentuk infill, selanjutnya diameter nozel dan terakhir kepadatan pengisi, hal serupa juga dilaporkan oleh afroze [11] bahwa orientasi paling berpengaruh pada kekuatan tarik. Dua parameter yang dianalisis oleh Ansari dan kamil [12] kecepatan dan suhu nozle untuk PLA. Hasil dari analisa menunjukkan bahwa kedua sifat tersebut memainkan peran penting, suhu ekstrusi optimal adalah 210°C, untuk batas atas 230°C dan batas bawah 190°C, mengenai kecepatan cetak paling optimum 30 mm/s mempunyai pengaruh positif hingga mencapai 53 MPa.

Pembahasan ketangguhan dan kualitas permukaan material filament PLA+ masih sedikit informasi dimana aplikasi material hasil cetakan FDM 3D printing pada industri teknik dan aplikasi medis sangat berkaitan dengan ketangguhan material dan kulit permukaan salah satunya pembuatan kaki palsu yang memerlukan ketangguhan material pada saat tersandung dan turun tangga, alasan ini yang mendasari dilakukannya penelitian ini untuk memperoleh kaki palsu yang tangguh dan halus, saat ini kaki palsu diproduksi menggunakan injection molding memakan waktu dan biaya produksi besar. Dimulai dari penelitian dasar untuk memperoleh optimasi pencetakan yang halus dan tangguh agar sesuai dengan kebutuhan pengguna produk, maka penelitian ini fokus menyelidiki hubungan variabel Parameter 3d Printing terhadap ketangguhan material dan kualitas permukaan hasil cetakan material yang digunakan PLA+ berdiameter 1.75 mm dicetak pada mesin 3d printing ender 3 v2, parameter suhu nozel, kecepatan cetak dan pola pengisi divariasikan. Data yang tercatat dievaluasi dari statistik berdasarkan desain factorial untuk mendapatkan interaksi antara variabel penelitian. Demikian juga untuk menentukan kondisi optimum menggunakan desain faktorial orthogonal array L8 (2)⁴.

2. METODE PENELITIAN

Metode penelitian ini menggunakan metode experimental pada mesin dengan memvariasikan parameter pencetakan dan model pencetakan. Semua kegiatan penelitian dilakukan pada laboratorium Fenomena Dasar Mesin Universitas Harapan Medan, instrument dan peralatan pendukung yang digunakan pada penelitian ini semua menggunakan fasilitas laboratorium. Peta jalan dan tahapan pelaksanaan pada penelitian ini disajikan dalam bentuk diagram alir pada gambar 1.





Gambar 1. Tahapan pelaksanaan penelitian

2.1 Material

Material yang digunakan pada penelitian ini jenis filament PLA+ diameter 1.75mm dengan spesifikasi mekanikal bahan tersaji pada tabel 2.1 dimana untuk material filament PLA+ didapatkan secara komersial.

Tabel 1. Data teknis filament 3d printing PLA+ [13]

Technical Specification			
Use	Is a material for the fdm (FFF) 3d printing additive technology		
Material	Polylactid acid ,biodegradabilic material, non petroleum product		
Diameters	1,75 mm		
Tolerance	± 0,05 mm		
Weight	1,0 kg netto ± 5% / 1,3 kg brutto ± 5%		
Printing Properties			
Temperature HE	Ø1,75: 190 – 210 °C		
Temperature HB	20-60 °C		
Surface bed	kapton, ultem, PET foil, commons for FDM printing		
Nozzle	All diameters		
Material Properties			
Thermal	vicat softening temperature	ISO 306	55 °C
	heat deflection temperature	ISO 75	55 °C
Mechanical	impact strength	ISO 179	64.5 kJ/m2
	flexural modulus	ISO 178	3000 MPa
Physical	Density	ISO 1183/B	1,25 g/cm3
	Melt Flow Index	ISO 1133	3 g/10 mi

2.2 Peralatan Pencetak dan instrumen pengujian

Printer 3D yang digunakan pada penelitian ini adalah Ender-3 V2 Neo dengan spesifikasi teknis tersaji pada tabel 2.



Gambar 2. Peralatan cerak printer 3D Ender V 2.

Tabel 2. Spesifikasi mesin printer 3D

General Teknis	
Product model	Ender-3 V2
Modeling dimensions	220*220*250mm
Nozzle diameter	Standard 0.4mm
Precision	±0.1mm
Supported file format	STL/OBJ/AMF
Input voltage	100-120V~, 200-240V~, 50/60Hz
Rated power	350W
Hotbed temperature	≤100°C
Nozzle temperature	≤250°C
Printing speed	≤ 120 mm/s, generally 50 mm/s

2.3 Instrument pengujian

Alat uji impact yang digunakan tipe HT-0841 sesuai dengan standar ASTM E23, JIS K-7111 sesuai dengan standar pengujian impact charpy (Gambar 3). Alat pengukur kekasaran permukaan yang digunakan pada pengujian hasil dari cetakan printer 3D mitutoyo Sj-210 standard ISO 1997 (Gambar 4).



(a)



(b)

Gambar 3. Alat pengujian impact charpy (a), stylus profilometer (b)

Persamaan Perhitungan uji impact charpy

$$HI = \frac{E}{A} \quad (1)$$

Dimana :

- E = $W.R (\cos \beta - \cos \alpha).G$ (J/m²)
- W = Massa pendulum (kg)
- R = Jari-jari lengan ayun (m)
- $\cos \beta$ = Sudut akhir lengan (⁰)
- $\cos \alpha$ = Sudut awal lengan (⁰)
- A = Luas penampang spesimen (m²)

Aritmatika nilai rata-rata standar deviasi kekasaran permukaan (Ra)

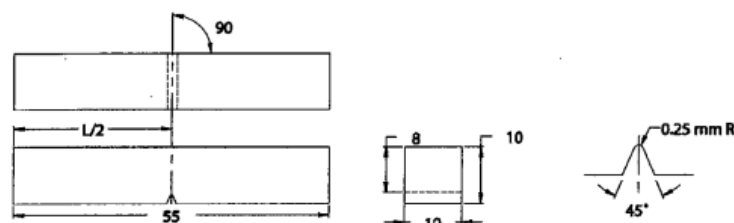
$$Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Y_i| \quad (2)$$

Dimana :

- Y_i = Nilai mean simpangan absolute dari garis

2.4 Desain Experimental Pengujian

Desain data experimental digunakan karena memiliki kemampuan yang handal untuk menghasilkan data yang relevan dalam pengerjaan penelitian. Metode yang paling umum digunakan adalah desain faktorial yang terdiri dari faktor dan level pengukuran. Tabel 3 menunjukkan desain dua level empat factorial 2⁴ dengan analisa taguchi S/N ratios L8 dengan kepadatan pengisi (infill) 50%, analisa dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak MINITAB versi 18. Experimental yang dilakukan pada tahap proses pencetakan terdapat 2 model pola pengisi, begitu juga untuk temperatur nozzle, kecepatan cetak dan temperature meja, jenis dan model cetakan tersaji dalam gambar 5. Dimensi yang digunakan pada pengujian impact charpy mengikuti standar ASTM E27 yang tersaji pada gambar 4. Penentuan kondisi pencetakan yang digunakan pada tahapan ini diambil dari beberapa aspek pertimbangan jenis filament dan kondisi pencetakan, dari sumber referensi [4-9] bahwa pengaruh lingkungan pada proses pencetakan sangat mempengaruhi hasil cetakan.



Gambar. 4. Dimensi spesimen menurut ASTM E23 uji impact charpy



Gambar 5. Model Pola Pengisi

Tabel 3. Parameter mesin pencetak.

NO	PARAMETER	NILAI	
1	Model Pengisi	CUBIC SUBDIVISION	LINE
2	Suhu nozzle °C	200 °C	230 °C
3	Speed mm/s	80 mm/s	100 mm/s
4	Suhu meja	70 °C	100 °C

Tabel 4. Desain experimental pencetakan menggunakan orthogonal array.

Run	Model Pengisi	Suhu nozzle °C	Speed mm/s	Suhu meja	Densitas pengisi
Sp 1	CUBIC SUBDIVISION	200 °C	60	70 °C	50%
Sp 2	CUBIC SUBDIVISION	200 °C	100	100 °C	
Sp 3	CUBIC SUBDIVISION	230 °C	60	100 °C	
Sp 4	CUBIC SUBDIVISION	230 °C	100	70 °C	
Sp 5	LINE	200 °C	60	100 °C	
Sp 6	LINE	200 °C	100	70 °C	
Sp 7	LINE	230 °C	60	70 °C	
Sp 8	LINE	230 °C	100	100°C	

Kode Sp 1 s/d Sp 8 didalam kolom pertama pada desain experimental merupakan simbol dari spesimen uji pertama, kode ini dibuat bertujuan untuk memudahkan analisa statistik agar tidak keliru dengan angka hasil luaran analisis.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil dari pengujian experiment impact charpy dan kekasaran dilakukan secara langsung, data keluaran dari hasil pengujian berupa angka yang dikeluarkan dari pengukuran oleh alat uji, selanjutnya data hasil dari pengukuran dianalisa menggunakan model statistika factorial, untuk menganalisa dan pengambilan keputusan menggunakan perangkat lunak minitab 18, sebelum menganalisa ke model taguchi pengujian normalitas data dilakukan guna mengetahui sebaran data, jika data yang didapat terdistribusi normal maka data boleh dilakukan dengan uji parametik selanjutnya.

3.1 Uji Impact Charpy

Hasil pengujian yang dilakukan sesuai dengan desain experimental pada pengujian impact charpy hasil cetakan 3d printing disajikan dalam bentuk tabel yang tertera pada tabel 5.

Tabel 5. Hasil pengujian data impact charpy

No	Specimen	λ (*)	B (*)	A (m2)	G (kg)	R (m)	g (m/s2)	E (J)	Hi (J/m2)
1	Sp 1	150	125	0,00008	0,71	0,2238	9.81	0,456	5698,329
2	Sp 2	150	112	0,00008	0,71	0,2238	9.81	0,766	9575,230
3	Sp 3	150	117	0,00008	0,71	0,2238	9.81	0,642	8028,445
4	Sp 4	150	120	0,00008	0,71	0,2238	9.81	0,571	7131,956
5	Sp 5	150	117	0,00008	0,71	0,2238	9.81	0,642	8028,445
6	Sp 6	150	99	0,00008	0,71	0,2238	9.81	1,106	13826,285
7	Sp 7	150	125	0,00008	0,71	0,2238	9.81	0,456	5698,329
8	Sp 8	150	119	0,00008	0,71	0,2238	9.81	0,594	7427,939

Tabel 5 menunjukkan hasil dari pengujian impact charpy dimana pada experimental ke 6 memiliki hasil kekuatan yang paling tinggi dari semua kondisi, dari tabel 5 pada experimental ke 6 nilai energi yang dihasilkan mencapai

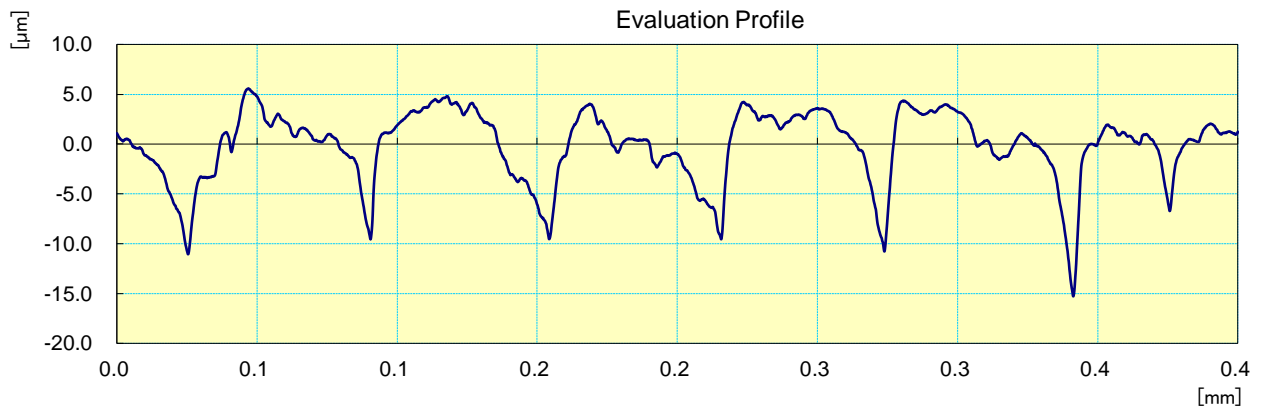
1.106 J dengan harga impact 13826,285 J/m². Dan pada kondisi experimental pertama dan ke 7 memiliki nilai impact yang sama dan nilai ini pun yang paling rendah dari semua experimntal. Kondisi experimental yang paling rendah memiliki parameter yang hampir sama pada kecepatan print dan suhu meja cetakan untuk kecepatan cetak berada pada 60 mm/s dan suhu meja berada pada 70 °C, hal disebabkan oleh faktor suhu lingkungan sekitar pencetakan seperti yang dilaporkan oleh Supaphorn Thumsorn [14] inkonsistensi suhu lingkungan yang dominan tidak stabil mengakibatkan ikatan antar layer tidak mengikat sempurna, walaupun suhu nozel berada pada kondisi maksimum di experimental ke 7 hal ini tidak menjamin ikatan antar lapisan filament tidak mengikat lebih. Untuk parameter kecepatan pencetakan kondisi 60 mm/s merupakan hasil yang terbaik untuk beberapa hasil laporan [15] [16]

3.2 Kekasaran Permukaan

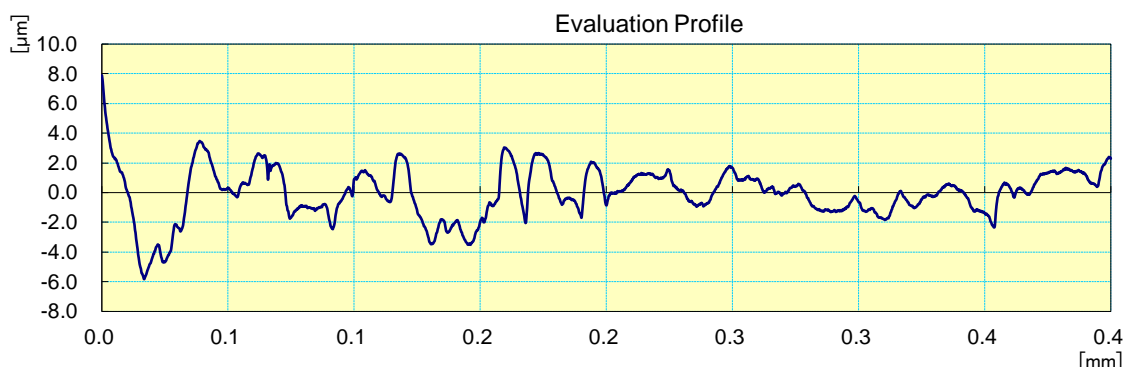
Dari hasil pengujian yang dilakukan sesuai dengan desain experimental pada kekasaran permukaan pada material hasil cetakan 3d printing disajikan dalam bentuk tabel yang tertera pada tabel 6.

Tabel 6 hasil pengujian kekasaran permukaan

No	Ra 1	Ra 2	Ra 3	Rata-rata
Sp 1	1.996 μm	1.108 μm	1.441 μm	1,515 μm
Sp 2	0.962 μm	1.180 μm	1.294 μm	1,237 μm
Sp 3	1.583 μm	1.748 μm	1.582 μm	1,638 μm
Sp 4	1.444 μm	1.376 μm	1.364 μm	1,395 μm
Sp 5	2.637 μm	2.685 μm	2.673 μm	2,665 μm
Sp 6	2.685 μm	2.695 μm	2.689 μm	2,690 μm
Sp 7	2.153 μm	1.751 μm	1.271 μm	1,725 μm
Sp 8	1.724 μm	1.642 μm	1.619 μm	1,662 μm



Gambar 6. Gelombang hasil uji kekasaran experiment pengujian ke 6

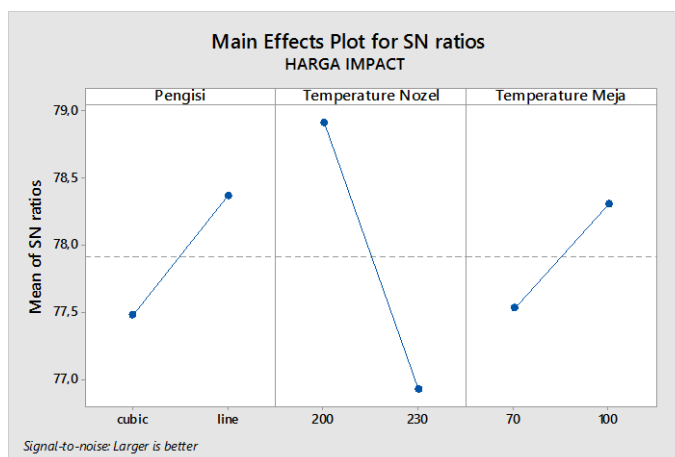


Gambar 7. Gelombang hasil uji kekasaran experiment pengujian ke 2

Pola yang didapatkan pada waktu pengujian untuk kekasaran permukaan bisa diamati dari gambar 6 gelombang yang terdapat pada material pengujian ke 6 memiliki pola yang stabil dari *batch* 1 s/d 8 seragam, berbeda dengan hasil pengujian pada material ke 2, gelombang yang dihasilkan dominan tidak sama namun nilai kekasaran pada material pengujian ke 2 lebih rendah/halus dibandingkan dengan material pengujian ke 6, jika dilihat dari model pengisi tipe CUBIC SUBDIVISION memang memiliki garis bentuk yang tidak seragam berbeda dengan model pengisi LINE yang mempunyai garis bentuk yang seragam, ketidak seragam model pengisi menjadi salah satu factor penentu dari kekuatan struktur ikatan lapisan, kekasaran yang terjadi dari hasil pengukuran pada material ke 6 disebabkan oleh densitas pengisi yang hanya 50% artinya setengah dari kuantitas material kosong demi mendapatkan optimasi penghematan kebutuhan bahan baku dan waktu pencetakan yang optimum. Jika ingin mendapatkan hasil kekasaran yang bagus maka ada pertimbangan kebutuhan material yang lebih untuk mendapatkan hasil kekasaran permukaan halus.

3.3 S/N ratio

Analisa sn ratio digunakan untuk penetapan nilai optimum dari semua kondisi yang sudah dilakukan, analisa yang digunakan pada sn ratio untuk hasil kekuatan impact charpy yaitu analysis taguchi design *Larger Is Better* yaitu mendapatkan nilai yang paling optimum (tinggi) dari respon parameter, suhu nozel, suhu meja, kecepatan cetak dan model pengisi dimana hasil dari respon semua parameter akan menghasilkan parameter baru yang direkomendasikan. Berbeda untuk analisa kekasaran permukaan analysis taguchi yang digunakan yaitu *Smaller Is Better* dimana nilai paling rendah menjadi nilai yang paling bagus. Hasil dari analisa menggunakan taguchi dsajikan dalam bentuk gambar 8 dan gambar 9.

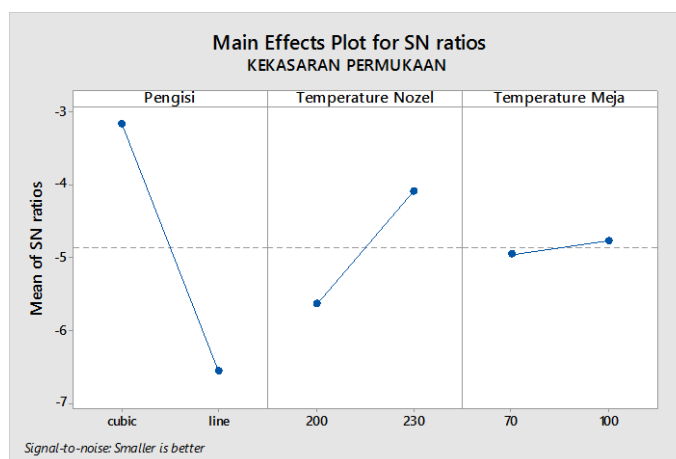


Gambar 8 . Analisa larger is better untuk harga impact charpy

Tabel 7. Response Table for Signal to Noise Ratios

Level	Larger is better		
	Pengisi	Temperature Nozel	Temperature Meja
1	77,47	78,91	77,53
2	78,36	76,92	78,31
Delta	0,89	1,99	0,78
Rank	2	1	3

Pembahasan pada hasil analisa taguchi respon tertinggi terjadi pada temperature nozel dengan nilai perbedaan delta atau signal 1,99 selanjutnya pada pola pengisi dengan nilai 0,89 dan terakhir pada temperatur meja 0,78.


Gambar 9 . Analisa larger is better untuk kekasaran permukaan..

Tabel 8. Response Table for Signal to Noise Ratios

Level	Smaller is better		
	Pengisi	Temperature Nozel	Temperature Meja
1	-3,158	-5,641	-4,958
2	-6,564	-4,082	-4,765
Delta	3,406	1,560	0,193
Rank	1	2	3

Untuk kekasaran permukaan respon tertinggi berada pada pola pengisi dimana nilai respon signal 3,406 berada dua kali lipat daripada temperature nozel yang memiliki respon signal hanya 1,560 dan terakhir respon terendah berada pada temperature meja, untuk kekasaran permukaan memang parameter yang paling mempengaruhi ialah jenis pola pengisi dengan kecepatan cetak dimana model dan bentuk sangat mempengaruhi kekasaran permukaan.

3.4 Pembahasan

Pada Gambar 8. metode taguchi S/N ratio menyimpulkan bahwa respon yang paling mempengaruhi kekuatan impact charpy adalah temperature nozel Peningkatan temperature nozel berpengaruh dengan peningkatan ketangguhan material seperti dilaporkan oleh supaporn thumsorn dkk [1] [12] [17] dengan peningkatan suhu lingkungan sekitar pencetakan meningkatkan ikatan interlayer yang bagus, dan juga struktur kristal dan sifat dinamis rekatan, hal yang serupa juga dilaporkan oleh atefeh Rajabi Kafshgar [7] bahwa suhu nozel optimum yang



paling baik untuk material PLA berada pada 200-220⁰C. Untuk kekasaran permukaan memiliki karakter berbeda, pada penelitian ini kekasaran permukaan paling baik (halus) yang di prediksi taguchi berada pada level pola pengisi LINE, suhu nozel 230⁰ C dan temperature meja 100⁰C, kekasaran permukaan yang dihasilkan dari hasil pencetakan 3d printing factor paling mempengaruhi adalah kecepatan cetak rendah, jenis pola pengisi, ketebalan interlayer dan suhu nozel yang tinggi seperti yang dilaporkan oleh mushtaq[18],. Namun murat ozen [19] melaporkan bahwa dengan bertambah ketebalan lapisan interlayer maka kekasaran akan berdampak meningkat secara signifikan. Semua analisa dalam penelitian menggunakan metode statistik uji validasi data dilakukan untuk mengkonfirmasi pengujian tingkat lanjut S/N ratio, penggunaan metode taguchi menjadi salah satu opti terbaik untuk model pengujian experimental langsung, dimana dengan menggunakan model desain experiment taguchi lebih sedikit pengujian yang dilakukan. Metodologi yang disajikan dapat digunakan sebagai alat pendekatan pra-pemrosesan yang bertujuan untuk mengoptimalkan apapun sasaran yang diinginkan.

4. KESIMPULAN

Pengaruh parameter terhadap kekuatan impact dan kekasaran permukaan yang di cetak menggunakan 3d printing dengan filament PLA disimpulkan, sifat ketangguhan material pada hasil cetakan sangat dipengaruhi oleh temperature nozel, dimana hasil dari respon taguchi tertinggi pada temperature nozle dengan angka 1,99 selanjutnya berada pada pola pengisi dengan nilai 0,89 dan terakhir pada temperatur meja 0,78. Level parameter terbaik untuk nilai ketangguhan material berada pada suhu nozel 200⁰ C, suhu meja 100⁰ C dan jenis pola pengisi LINE. Untuk kekasaran permukaan respon tertinggi berada pada pola pengisi dimana nilai respon signal 3,406 berada dua kali lipat daripada temperature nozel yang memiliki respon signal hanya 1,560 dan terakhir respon terendah berada pada temperature meja yang hanya memiliki respon 0,193. Level parameter terbaik pada kekasaran permukaan berada pada pola pengisi model CUBIC SUBDIVISION temperature nozle 230⁰C dan temperature meja 100⁰C.

REFERENSI

- [1] S. Thumsorn, W. Prasong, A. Ishigami, T. Kurose, Y. Kobayashi, and H. Ito, "Influence of Ambient Temperature and Crystalline Structure on Fracture Toughness and Production of Thermoplastic by Enclosure FDM 3D Printer," *J. Manuf. Mater. Process.*, vol. 7, no. 1, 2023, doi: 10.3390/jmmp7010044.
- [2] T. C. Lee, R. Ramlan, N. Shahrubudin, T. C. Lee, and R. Ramlan, "ScienceDirect ScienceDirect ScienceDirect An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Technology: Applications Technological, Materials, An Overview on 3D Printing and Applications," *Procedia Manuf.*, vol. 35, pp. 1286–1296, 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2019.06.089.
- [3] A. N. Frone *et al.*, "Morpho-structural, thermal and mechanical properties of PLA/PHB/Cellulose biodegradable nanocomposites obtained by compression molding, extrusion, and 3d printing," *Nanomaterials*, vol. 10, no. 1, 2020, doi: 10.3390/nano10010051.
- [4] A. K. Mohanty, "Improving the Impact Strength and Heat Resistance of 3D Printed Models: Structure, Property, and Processing Correlations during Fused Deposition Modeling (FDM) of Poly(Lactic Acid)," 2018, doi: 10.1021/acsomega.8b00129.
- [5] C. Tang, J. Liu, Y. Yang, Y. Liu, S. Jiang, and W. Hao, "Effect of process parameters on mechanical properties of 3D printed PLA lattice structures," *Compos. Part C Open Access*, vol. 3, no. September, 2020, doi: 10.1016/j.jcomc.2020.100076.
- [6] C. Abeykoon, P. Sri-Amphorn, and A. Fernando, "Optimization of fused deposition modeling parameters for improved PLA and ABS 3D printed structures," *Int. J. Light. Mater. Manuf.*, vol. 3, no. 3, pp. 284–297, 2020, doi: 10.1016/j.ijlmm.2020.03.003.
- [7] A. R. Kafshgar, S. Rostami, M. R. M. Aliha, and F. Berto, "Optimization of Properties for 3D Printed PLA Material Using Taguchi, ANOVA and Multi-Objective Methodologies," *Procedia Struct. Integr.*, vol. 34, pp. 71–77, 2021, doi: 10.1016/j.prostr.2021.12.011.
- [8] G. Kiswanto and A. Kholil, "Effect of Infill Pattern on Impact Toughness, Microstructure, and Surface Roughness of Inconel 625 Built via Filament-Based Material Extrusion Additive Manufacturing," 2023.
- [9] L. Marşavina *et al.*, "Effect of the manufacturing parameters on the tensile and fracture properties of FDM 3D-printed PLA specimens," *Eng. Fract. Mech.*, vol. 274, no. August, 2022, doi: 10.1016/j.engfracmech.2022.108766.





- [10] M. Hikmat, S. Rostam, and Y. M. Ahmed, "Investigation of tensile property-based Taguchi method of PLA parts fabricated by FDM 3D printing technology," *Results Eng.*, vol. 11, p. 100264, 2021, doi: 10.1016/j.rineng.2021.100264.
- [11] M. F. Afrose, S. H. Masood, P. Iovenitti, M. Nikzad, and I. Sbarski, "Effects of part build orientations on fatigue behaviour of FDM-processed PLA material," *Prog. Addit. Manuf.*, vol. 1, no. 1–2, pp. 21–28, 2016, doi: 10.1007/s40964-015-0002-3.
- [12] A. A. Ansari and M. Kamil, "Effect of print speed and extrusion temperature on properties of 3D printed PLA using fused deposition modeling process," *Mater. Today Proc.*, vol. 45, no. xxxx, pp. 5462–5468, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.02.137.
- [13] filament-pm.com, "Technical Data Sheet for Product : PETG Filament," *Petg Filam.*, p. 1, 2021, [Online]. Available: <http://www.filament-pm.com>
- [14] S. Thumsorn, W. Prasong, A. Ishigami, and T. Kurose, "Pengaruh Suhu Lingkungan dan Struktur Kristal terhadap Ketangguhan Fraktur dan Produksi Termoplastik dengan Enclosure FDM 3D Printer," pp. 1–23, 2023.
- [15] C. F. Popa, M. P. Marghitas, S. V. Galatanu, and L. Marsavina, "Influence of thickness on the IZOD impact strength of FDM printed specimens from PLA and PETG," *Procedia Struct. Integr.*, vol. 41, no. C, pp. 557–563, 2022, doi: 10.1016/j.prostr.2022.05.064.
- [16] C. Tang, J. Liu, Y. Yang, Y. Liu, S. Jiang, and W. Hao, "Effect of process parameters on mechanical properties of 3D printed PLA lattice structures," *Compos. Part C Open Access*, vol. 3, no. November, 2020, doi: 10.1016/j.jcomc.2020.100076.
- [17] M. M. Garmabi, P. Shahi, J. Tjong, and M. Sain, "3D printing of polyphenylene sulfide for functional lightweight automotive component manufacturing through enhancing interlayer bonding," *Addit. Manuf.*, vol. 56, no. January, p. 102780, 2022, doi: 10.1016/j.addma.2022.102780.
- [18] R. T. Mushtaq, A. Iqbal, Y. Wang, Q. Cheok, and S. Abbas, "Parametric Effects of Fused Filament Fabrication Approach on Surface Roughness of Acrylonitrile Butadiene Styrene and Nylon-6 Polymer," *Materials (Basel)*, vol. 15, no. 15, 2022, doi: 10.3390/ma15155206.
- [19] M. Özenç, T. Tezel, and V. Kovan, "Investigation into impact properties of adhesively bonded 3D printed polymers," *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 118, no. May, 2022, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2022.103222.