

## OPTIMASI KEKASARAN PERMUKAAN PADA MANUFAKTUR 3D PRINTING DENGAN METODE TAGUCHI PADA MATERIAL CARBON FIBER

Abdi Satryo Mukti<sup>1</sup>, Wahyu Dwi Lestari<sup>1\*</sup>, Adimas Dwi Prayoga<sup>1</sup>, Rolland D.K. Mahameru<sup>1</sup>, Mochammad Wildan Rosyadi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik dan Sains, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jawa Timur

Jl. Raya Rungkut Madya, Gunung Anyar, Kota Surabaya, 6029

\*Email: wahyu.dwi.tm@upnjatim.ac.id

### Abstrak

3D printing menggunakan material carbon fiber menjadi semakin populer dalam industri manufaktur karena karakteristiknya yang ringan dan memiliki kekuatan mekanik tinggi. Namun, kekasaran permukaan yang optimal tetap menjadi tantangan dalam proses 3D printing menggunakan material ini. Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan kekasaran permukaan pada proses manufaktur 3D Printing menggunakan metode Taguchi pada material carbon fiber. Parameter 3D printing yang dioptimasi diantaranya yaitu nozzle temperature, infill density, printing speed, layer thickness, infill patern dan orientasi. Proses 3D printing dilakukan dengan menggunakan mesin FlashForge Guider II. Adapun pengukuran kekasaran permukaan menggunakan alat Handysurf. Hasil penelitian menunjukkan bahwa parameter yang optimal untuk mencapai kekasaran permukaan yang minimal adalah nozzle temperature 240°C, orientasi 0°, printing speed 60 mm/s, layer thickness 0.1 mm, infill pattern line, dan infill density 40%. Hasil ini telah diverifikasi dengan eksperimen konfirmasi dan menunjukkan bahwa kombinasi parameter optimal tersebut menghasilkan kekasaran permukaan yang minimal. Parameter-parameter optimal yang diidentifikasi melalui pendekatan ini dapat digunakan untuk meningkatkan kualitas produk akhir, serta membuka peluang penggunaan lebih luas dari material carbon fiber dalam berbagai aplikasi industri.

**Kata kunci:** 3D Printing, carbon fiber, kekasaran permukaan, metode Taguchi, optimasi

### PETUNJUK UMUM

Manufaktur menggunakan 3D printing telah menjadi bagian integral dari industri modern, dimana memungkinkan untuk produksi komponen dengan kompleksitas tinggi dan desain yang inovatif (Sharma et al., 2014). Salah satu material yang semakin diminati untuk digunakan dalam proses 3D Printing adalah carbon fiber (Sanei & Popescu, 2020). Hal tersebut karena sifatnya yang ringan, tahan korosi dan memiliki kekuatan mekanik yang tinggi. Industri yang banyak memanfaatkan carbon fiber diantaranya adalah industri otomotif, dirgantara, medis, pertahanan, dan olahraga (Sharma et al., 2014).

Namun, terdapat tantangan yang signifikan dalam mencapai kekasaran permukaan yang optimal pada produk 3D printing menggunakan material carbon fiber. Kekasaran permukaan memiliki dampak besar pada performa mekanik dan estetika produk akhir (Patihawa et al., 2019). Oleh karena itu, optimasi kekasaran permukaan menjadi esensial dalam mengembangkan aplikasi 3D printing

dengan material carbon fiber. Metode Taguchi telah terbukti efektif dalam optimasi proses manufaktur, karena dapat mengidentifikasi kombinasi parameter optimal dengan jumlah uji yang minimal (Permana & Yayat, 2019). Dengan menerapkan metode ini pada proses 3D printing menggunakan material carbon fiber, maka dapat memperbaiki kualitas permukaan dan meminimalkan waktu serta biaya produksi.

Nilai kekasaran hasil pencetakan 3D printing dapat dipengaruhi oleh sejumlah parameter proses, sebagaimana diselidiki oleh (Hasdiansah & Pratama, 2021) yang memfokuskan pada pengaruh parameter 3D printing terhadap kekasaran permukaan. Variabel yang diteliti meliputi layer thickness, printing speed, nozzle temperature, orientasi, flow rate dan cooling speed. Penelitian ini menunjukkan hasil kekasaran terendah sebesar 3,321µm dengan kombinasi parameter layer thickness sebesar 0,1 mm, printing speed sebesar 40 mm/s, nozzle temperature sebesar 190°C, orientasi sebesar 45°, flow rate sebesar 110%, dan cooling speed sebesar 20%. Di sisi lain,

(Lubis et al., 2023) menginvestigasi pengaruh parameter pencetakan 3D terhadap kekasaran permukaan. Variabel yang diteliti meliputi *printing speed* 60 mm/s, 70mm/s, dan 80 mm/s, *nozzle temperature* 240°C, 250°C dan 260°C, dan *layer thickness* 0,1 mm, 0,2 mm, dan 0,3 mm. Hasil optimal dari penelitian ini menunjukkan bahwa pengaturan *printing speed* 60mm/s, *nozzle temperature* 240 °C, dan *layer thickness* 0.1 mm.

Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan kekasaran permukaan pada proses manufaktur 3D *printing* menggunakan metode Taguchi khususnya pada material *carbon fiber*. Melalui penelitian ini, diharapkan dapat ditemukan parameter-parameter yang optimal untuk mencapai kekasaran permukaan yang diinginkan, sehingga memungkinkan penggunaan lebih luas dari material *carbon fiber* dalam berbagai aplikasi industri. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi yang berharga dalam pengembangan teknologi 3D *printing* dengan material *carbon fiber* yang lebih efisien dan efektif.

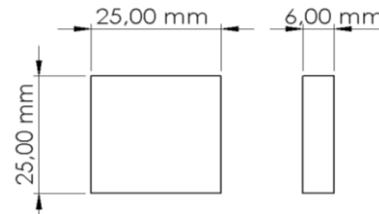
**METODOLOGI**

Spesimen uji didesain dengan menggunakan *software* Solidwork dengan dimensi seperti yang terlihat pada Gambar 1 Desain yang akan digunakan berdasarkan standart uji kekerasan ASTM D785. Selanjutnya file desain diekspor dalam format STL agar file dapat dibuka dan parameter diatur menggunakan *software slicer* Flashprint. Eksperimen ini dilakukan dengan menggabungkan level dari setiap parameter proses yang telah ditentukan. Adapun parameter proses dan level yang digunakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 1 berikut.

**Tabel 1. Parameter Proses dan Level**

Parameter Proses	level		
	1	2	3
Nozzle Temperature	220°C	230°C	240°C
Infill Density	40%	60%	80%
Printing Speed	60 mm/s	80 mm/s	100mm/s
Layer Thickness	0,1 mm	0,2 mm	0,3 mm
Infill Pattern	Line	Triangle	Hexagon
Orientasi	0°	15°	30°

Desain eksperimen dilakukan dengan bantuan *software* Minitab 19. *Orthogonal array* menurut eksperimen ini adalah  $L_{27} (3^6)$ . Selanjutnya, desain percobaan disajikan pada Tabel 2.



**Gambar 1. Desain Spesimen**

Penelitian dilakukan dengan mencetak spesimen bahan *carbon fiber* menggunakan *printer* 3D merk FlashForger II sesuai dengan rancangan percobaan yang telah ditentukan yaitu matriks *orthogonal array* sebanyak 27 kali dan direplikasi sebanyak tiga kali. Selanjutnya dilakukan pengukuran kekasaran hasil cetakan spesimen dengan alat *surface roughness* tester merk Handysurf. Mesin *printer* 3D dan *surface roughness tester* dapat dilihat pada Gambar 2 dan Gambar 3. Pengukuran kekasaran permukaan dilakukan pada sisi atas spesimen untuk mendapatkan data kekasaran permukaan yang konsisten.



**Gambar 2. Mesin 3D Printing Flashforger II**



**Gambar 3. Surface Roughness Tester Handysurf**

### Perhitungan Nilai Rasio S/N

Karakteristik dari kekasaran permukaan adalah *Smaller is better* dimana nilainya didapatkan dari persamaan berikut (Aris Setiawan et al., 2018).  $n$ : Banyaknya data  $y_i$  merupakan Data respon Pengamatan ke- $i$

$$S/N \text{ Rasio} = -10 \log_{10} \left[ \frac{\sum_{i=1}^n y_i^2}{n} \right] \quad (1)$$

### Analisis of Variance (ANOVA)

Analisis Variansi (*Analysis of Variance* atau ANOVA) adalah metode statistik yang digunakan untuk menganalisis perbedaan antara rata-rata kelompok dan menentukan apakah perbedaan tersebut secara statistik signifikan. Metode ini umumnya digunakan dalam penelitian untuk membandingkan rata-rata antara tiga atau lebih kelompok dan untuk menilai pengaruh faktor atau perlakuan yang berbeda terhadap suatu variabel respons.

Analisa ANOVA digunakan untuk menguji parameter yang direncanakan yang secara bersama-sama signifikan mempengaruhi variabel respon suatu pengujian. ANOVA bertujuan untuk menguji informasi data eksperimen yang sudah dihasilkan ke dalam perhitungan derajat kebebasan (df), jumlah kuadrat (SS), kuadrat tengah (MS) dan Fhitung. Pengujian hipotesis menggunakan Nilai F, dari perbandingan nilai F untuk setiap parameter dengan Ftabel. Jika Fhitung > Ftabel, maka H0 ditolak, dan jika Fhitung < Ftabel, maka H0 diterima (Karuniawan et al., 2022).

### Perhitungan Prediksi Rata-Rata S/N Rasio yang Optimal

Perhitungan prediksi rata-rata S/N rasio yang optimal dihitung menggunakan persamaan berikut (Wijanarta et al., 2014).  $y_m$  merupakan Nilai rata-rata dari keseluruhan S/N Rasio dan  $y_i$  adalah Rata-rata S/N Rasio kondisi level optimal

$$\mu_{\text{prediksi}} = y_m + \sum_{i=1}^n (y_i - y_m) \quad (2)$$

### Perhitungan Interval Kepercayaan

Perhitungan interval kepercayaan digunakan untuk kondisi perlakuan pada saat percobaan. Interval kepercayaan untuk kondisi optimal dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut (Wijanarta et al., 2014).

Untuk eksperimen prediksi  $F_{a:d_{f1}:d_{f2}}$  merupakan Nilai F-rasio dari table,  $\alpha$  adalah Resiko; level kepercayaan = 1 - resiko. Derajat kebebasan faktor  $d_{f1}$  kebebasan error dituliskan  $d_{f2}$  merupakan Derajat, Rata-rata kuadrat error  $MS_E$  dan Banyaknya pengamatan efektif ( $N_{eff}$ ).

$$CI_p = \sqrt{\frac{F_{a:d_{f1}:d_{f2}} \times MS_g}{n_{eff}}} \quad (3)$$

$$n_{eff} = \frac{\text{Jumlah total percobaan}}{1 + \text{jumlah derajat kebebasan}} \quad (4)$$

$$\mu_{\text{prediksi}} - CI_k \leq \mu_{\text{konfirmasi}} \leq \mu_k + CI_p$$

Untuk eksperimen konfirmasi :

$$n_{eff} = \frac{\text{Jumlah total percobaan}}{1 + \text{jumlah derajat kebebasan}} \quad (5)$$

$$\mu_{\text{prediksi}} - CI_k \leq \mu_{\text{konfirmasi}} \leq \mu_k + CI_p$$

### Eksperimen Konfirmasi

Setelah dilakukan perhitungan, variasi optimal dari paramter akan diperoleh. Selanjutnya variasi optimal dari parameter digunakan untuk uji konfirmasi dengan mencetak contoh produk yang diuji dan kemudian melakukan pengukuran pada kekasarannya. Selain itu, kekasaran hasil konfirmasi diperiksa sebagai hasil pengujian yang tepat.

### HASIL DAN PEMBAHASAN

Percobaan pada penelitian ini dilakukan dengan mengkombinasikan parameter proses yang telah ditentukan yaitu *nozzle temperature*, *infill density*, *printing speed*, *layer thickness*, *infill pattern*, orientasi yang dianggap memberikan pengaruh terhadap respon kekasaran permukaan. Parameter proses selain *nozzle temperature*, *infill density*, *printing speed*, *layer thickness*, *infill pattern*, orientasi dibuat konstan. Spesimen yang telah dilakukan pencetakan menggunakan mesin *printer 3D* kemudian dilakukan pengukurannya kekasaran permukaannya di sisi atas. Data hasil pengujian kekasaran diproses dengan *software Minitab 19* untu mengetahui nilai rasio S/N dengan menggunakan karakteristik *smaller is better*. Hasil pengujian kekasaran dan

perhitungan rasio S/N dapat dilihat pada Tabel 3. berikut.

Tahap berikutnya yaitu perhitungan ANOVA. Hasil perhitungan ANOVA untuk rasio S/N dari kekasaran permukaan dapat dilihat pada Tabel 4. Dengan melakukan perhitungan dengan bantuan aplikasi Minitab 19. Interval kepercayaan yang digunakan adalah = 0.05. Berdasarkan Tabel 4. dapat dilihat bahwa parameter *nozzle temperature* berpengaruh signifikan, sedangkan *infill density* tidak signifikan berpengaruh terhadap respon kekasaran permukaan. Ftabel untuk rasio S/N masing-masing parameter adalah  $F_{(0,05;2;14)} = 3.7388918$ . Parameter *nozzle temperature* memberikan persentase kontribusi sebesar 20,748%, *infill density* sebesar 2,446%, *printing speed* sebesar 9,019%, *layer thickness* sebesar 8,1%, *infill pattern* sebesar 2,881%, dan orientasi sebesar 12,569%. Selanjutnya variasi optimal dari parameter digunakan untuk uji konfirmasi dengan mencetak contoh produk yang diuji dan kemudian melakukan pengukuran pada kekasarannya. Selain itu, kekasaran hasil konfirmasi diperiksa sebagai hasil pengujian yang tepat.

**Table 4. ANOVA**

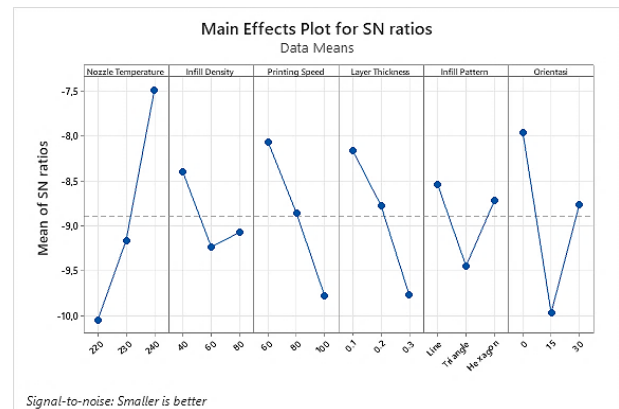
Source	D F	Kontribusi Seq SS	Adj MS	F	P
Nozzle Temperature	2	30,085	15,04	3,2	0,06
Infill Density	2	3,548	1,774	0,3	0,68
Printing Speed	2	13,078	6,539	1,4	0,27
Layer Thickness	2	11,746	5,873	1,2	0,30
Infill Pattern	2	4,178	2,089	0,4	0,64
Orientasi	2	18,225	9,113	1,9	0,17
Residual Error	14	64,142	4,582		
Total	26	145,00			

Tabel 5. menunjukkan bahwa parameter yang optimal untuk rasio S/N terhadap respon kekasaran permukaan adalah *nozzle temperature* pada level 3 yang bernilai 240°C, orientasi pada level 1 yang bernilai 0°, *printing speed* pada level 1 yang bernilai 60mm/s, *layer thickness*

pada level 1 yang bernilai 0,1 mm, *infill pattern* pada level 1 yang berpola *line*, dan yang terakhir *infill density* pada level 1 dengan nilai 40 %. Grafik level faktor untuk rasio S/N kekasaran permukaan yang dihasilkan dari *software* Minitab 19 dapat dilihat pada Gambar 4.

**Tabel 5. Parameter optimal Rasio S/N Kekasaran Permukaan**

Level	Nozzle Temperature	Infill Density	Printing Speed	Layer Thickness	Infill Pattern	Orientasi
1	-10,037	-8,391	-8,066	-8,158	-8,531	-7,964
2	-9,156	-9,229	-8,849	-8,767	-9,441	-9,963
3	-7,491	-9,065	-9,769	-9,759	-8,712	-8,757
Delta	2,546	0,838	1,703	1,600	0,910	1,998
Rank	1	6	3	4	5	2



**Gambar 4. Grafik Level Optimal Respon Kekasaran Permukaan**

Proses setelah membuat grafik adalah membuat perhitungan confidence interval eksperimen prediksi.

$$\mu_{prediksi} = y_m + (A_3 - y_m) + (B_1 - y_m) + (C_1 - y_m) + (D_1 - y_m) + (E_1 - y_m) + (F_1 - y_m)$$

$$\begin{aligned} \mu_{prediksi} &= -8,89475 \\ &+ (-7,491 + 8,89475) \\ &+ (-8,391 + 8,89475) \\ &+ (-8,066 + 8,89475) \\ &+ (-8,158 + 8,89475) \\ &+ (-8,531 + 8,89475) \\ &+ (-7,964 + 8,89475) \end{aligned}$$

$$\mu_{prediksi} = -4,12725$$

Interval kepercayaan dari mean S/N ratio prediksi menggunakan CI sebesar 95% dapat dihitung beirkut ini.

$$n_{eff} = \frac{27 \times 3}{1 + (2 \times 6)} = \frac{81}{13}$$

$$CI_p = \sqrt{\frac{3.7388918 \times 4,582}{\frac{81}{13}}} = 1,658$$

Sehingga :

$$-4,12725 - 1,658 \leq \mu_{prediksi} \leq -4,12725 + 1,658$$

$$-5,7853 \leq \mu_{prediksi} \leq -2,4693$$

Hasil perhitungan confidence interval eksperimen prediksi akan dibandingkan dengan hasil perhitungan confidence interval dari eksperimen konfirmasi. Tabel 6 menunjukkan semua data kekasaran permukaan yang diperoleh selama eksperimen konfirmasi. Data yang ditampilkan berupa kekasaran permukaan rata-rata. Diman A adalah *nozzle temperature* (°C), B adalah *infill density* (%), C adalah *printing speed* (mm/s), D adalah *layer thickness* (mm), E adalah *infill pattern*, F adalah orientasi (°).

Tabel 6. Data Hasil Eksperimen Konfirmasi

No	A	B	C	D	E	F	Hasil Pengujian	SN Rasio
1	22 0	4 0	6 0	0, 1	Line	0	3,912	- 11,848
2	22 0	4 0	6 0	0, 1	Line	0	3,876	- 11,767
3	22 0	4 0	6 0	0, 1	Line	0	3,823	- 11,648
Rata – Rata							3,870	-11,75

Berikut ini adalah hasil perhitungan interval kepercayaan untuk nilai rata-rata rasio S/N pada tingkat keyakinan 95% pada eksperimen konfirmasi.

$$n_{eff} = \frac{27 \times 3}{1 + (2 \times 6)} = \frac{81}{13}$$

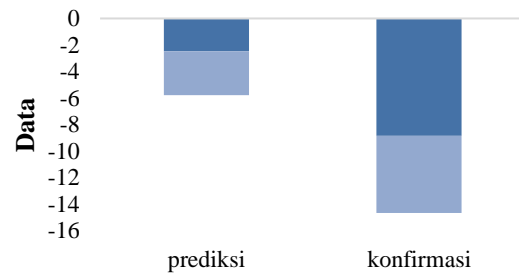
$$CI_k = \sqrt{3.7388918 \times 4,582 \times \left[ \frac{1}{\frac{81}{13}} + \frac{1}{3} \right]} = 2,909$$

Sehingga :

$$-11,7546 - 2,909 \leq \mu_{prediksi} \leq -11,7546 + 2,909$$

$$-14,6636 \leq \mu_{prediksi} \leq -8,8456$$

Hasil perhitungan interval kepercayaan pada tingkat kepercayaan 95% untuk prediksi kemudian dibandingkan dengan interval kepercayaan pada tingkat kepercayaan 95% untuk eksperimen konfirmasi. Interval kepercayaan tersebut dapat dilihat pada Gambar 6. berikut.



Gambar 5. Grafik Perbandingan Interval Kepercayaan Eksperimen Konfirmasi dan Prediksi

Grafik pada Gambar 5. menunjukkan adanya ketidakberisiran interval kepercayaan rata-rata untuk kedua eksperimen konfirmasi dan prediksi menunjukkan bahwa ada perbedaan yang signifikan antara hasil eksperimen konfirmasi dan prediksi. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk menemukan penyebab pasti dari perbedaan tersebut dan untuk melakukan tindakan yang tepat untuk meningkatkan akurasi proses eksperimen atau model prediksi.

**PENUTUP**  
**Kesimpulan**

Pada penelitian ini, dilakukan optimasi kekasaran permukaan pada proses manufaktur 3D *printing* menggunakan metode Taguchi pada material *carbon fiber*. Berdasarkan hasil eksperimen dan analisis yang dilakukan, beberapa kesimpulan dapat diambil:

1. Parameter proses 3D *printing* yang paling mempengaruhi variable respon kekasaran permukaan produk material filamen *carbon fiber* adalah *nozzle temperature* disusul oleh orientasi, *printing speed*, *layer thickness*, *infill pattern* dan yang terakhir *infill density*.
2. Kombinasi parameter proses yang optimal untuk menghasilkan produk dengan kekasaran permukaan terendah adalah 240°C untuk *nozzle temperature*, 0° untuk orientasi, 60 mm/s untuk *printing speed*, 0,1 mm untuk *layer thickness*, pola *line* untuk *infill pattern*, dan 40% untuk *infill density*.

Dengan demikian, penelitian ini memberikan kontribusi penting dalam pengembangan teknologi pencetakan 3D dengan material *carbon fiber* yang memiliki kekasaran permukaan yang optimal. Hasil-hasil dari penelitian ini dapat digunakan sebagai dasar untuk pengembangan lebih lanjut dalam aplikasi material *carbon fiber* pada industri manufaktur, terutama yang membutuhkan komponen dengan kekuatan mekanik tinggi dan permukaan yang presisi.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Aris Setiawan, A., Wirowo Karuniawan, B., & Arumsari, N. (2018). Optimasi Parameter 3D Printing Terhadap Keakuratan Dimensi dan Kekasaran Permukaan Produk Menggunakan Metode Taguchi Grey Relational Analysis. *Proceedings Conference on Design Manufacture Engineering and Its Application*, 2654, 165–168.
- Hasdiansah, & Pratama. (2021). Pengaruh Parameter Proses Slicing Software Terhadap Kekasaran Permukaan Printing Part Filamen ST-PLA. *Jurnal Teknologi Manufaktur*, 13(01), 1–8.
- Karuniawan, B. W., Rachman, F., & Yoningtias, M. T. (2022). Metode Taguchi Untuk Optimasi Parameter Mesin Printer 3D Terhadap Kualitas Produk Material Abs. *Austenit*, 14(2), 61–68. <http://doi.org/10.5281/zenodo.7265857>
- Lubis, S. Y., Riza, A., Wijaya, A. H., & Ariyanti, S. (2023). Optimasi Parameter 3D Printing Terhadap Kualitas Produk Bahan Acrylonitrile Butadiene Styrene. *Jurnal PASTI (Penelitian Dan Aplikasi Sistem Dan Teknik Industri)*, 17(1), 58. <https://doi.org/10.22441/pasti.2023.v17i1.006>
- Patihawa, A., Ibrahim, G. A., Hamni, A., Supriyadi, E. A., & Saputra, E. (2019). Analisa statistik nilai kekasaran permukaan dan profil permukaan Ti6AL-4V ELI pada pemesinan micro-milling. *Sinta*, 93–99.
- Permana, D. I., & Yayat, Y. (2019). Optimasi Parameter Permesinan Terhadap Tingkat Kekasaran Permukaan Aluminium Proses Pembubutan Dengan Metode Taguchi. *METAL: Jurnal Sistem Mekanik Dan Termal*, 3(1), 10. <https://doi.org/10.25077/metal.3.1.10-16.2019>
- Sanei, S. H. R., & Popescu, D. (2020). 3d-printed carbon fiber reinforced polymer composites: A systematic review. *Journal of Composites Science*, 4(3). <https://doi.org/10.3390/jcs4030098>
- Sharma, M., Gao, S., Mäder, E., Sharma, H., Wei, L. Y., & Bijwe, J. (2014). Carbon fiber surfaces and composite interphases. *Composites Science and Technology*, 102, 35–50. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2014.07.005>
- Wijanarta, A., Salam, N., & Anggraini, D. (2014). Metode Taguchi Untuk Peningkatan Kualitas Mutu Produk. *Jurnal Matematika Murni Dan Terapan Epsilon Juni*, 8(1), 29–38.

