

Optimization of Laser Cutting Parameters toward Formation of Dross Defects on Stainless Steel Material

Imam Qulugqin Azhim^{1*}, Rifelino¹, Syahril¹, Zainal Abadi¹

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Negeri Padang, INDONESIA

*Corresponding author: imamqa01@gmail.com

Received June 3th 2026; Revised July 1st 2026; Accepted July 8th 2026

Abstract

Laser cutting technology is widely used in the manufacturing industry because it is able to produce precise and efficient cutting. However, improper setting of cutting parameters can cause the formation of dross defects that reduce the quality of the cut. This research aims to analyze the formation of dross defects and determine the optimal cutting parameters on stainless steel materials with a thickness of 1 mm and a cutting length of 50 mm. The full factorial experimental design is used with three process parameters, namely cutting speed (S), focus point (F), and gas pressure (P). The height of the cutting results is measured and analyzed using the Analysis of Variance (ANOVA) method to evaluate the effect of each parameter on the observed response. The analysis results show that the focus point factor (F) has a significant effect on the dross height with a p-value of 0.029 (<0.05), while cutting speed, gas pressure, and all interactions between factors do not show a statistically significant effect. Contribution analysis shows that the $F \times P$ interaction gives the greatest contribution to the dross height variation of 29%, followed by the F factor of 27%. Based on the research results, the combination of optimal parameters to minimize the height of the dross was obtained at the focus point -2 mm, cutting speed 30 m/min, and gas pressure 10 bar. This finding shows that focus point setting is the main factor in controlling dross defects in the laser cutting process of stainless steel materials.

Keywords: Laser Cutting; Stainless Steel; Dross; Cutting Parameters; Analysis of Variance

Optimalisasi Parameter *Laser Cutting* terhadap Terbentuknya Cacat *Dross* pada Material *Stainless Steel*

Abstrak

Teknologi *laser cutting* banyak digunakan dalam industri manufaktur karena mampu menghasilkan pemotongan yang presisi dan efisien. Namun, pengaturan parameter pemotongan yang tidak tepat dapat menyebabkan terbentuknya cacat *dross* yang menurunkan kualitas hasil potong. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pembentukan cacat *dross* serta menentukan parameter pemotongan yang optimal pada material *stainless steel* dengan ketebalan 1 mm dan panjang pemotongan 50 mm. Rancangan eksperimen *full factorial* digunakan dengan tiga parameter proses, yaitu *cutting speed* (S), *focus point* (F), dan *gas pressure* (P). Tinggi *dross* hasil pemotongan diukur dan dianalisis menggunakan metode *Analysis of Variance* (ANOVA) untuk mengevaluasi pengaruh masing-masing parameter terhadap respons yang diamati. Hasil analisis menunjukkan bahwa faktor *focus point* (F) berpengaruh signifikan terhadap tinggi *dross* dengan nilai *p-value* sebesar 0,029 ($<0,05$), sedangkan *cutting speed*, *gas pressure*, dan seluruh interaksi antar faktor tidak menunjukkan pengaruh yang signifikan secara statistik. Analisis kontribusi menunjukkan bahwa interaksi F×P memberikan kontribusi terbesar terhadap variasi tinggi *dross* sebesar 29%, diikuti oleh faktor F sebesar 27%. Berdasarkan hasil penelitian, kombinasi parameter optimal untuk meminimalkan tinggi *dross* diperoleh pada *focus point* -2 mm, *cutting speed* 30 m/min, dan *gas pressure* 10 bar. Temuan ini menunjukkan bahwa pengaturan *focus point* merupakan faktor utama dalam pengendalian cacat *dross* pada proses *laser cutting* material *stainless steel*.

Kata kunci: *Laser Cutting; Stainless Steel; Dross; Parameter Pemotongan; Analysis of Variance*

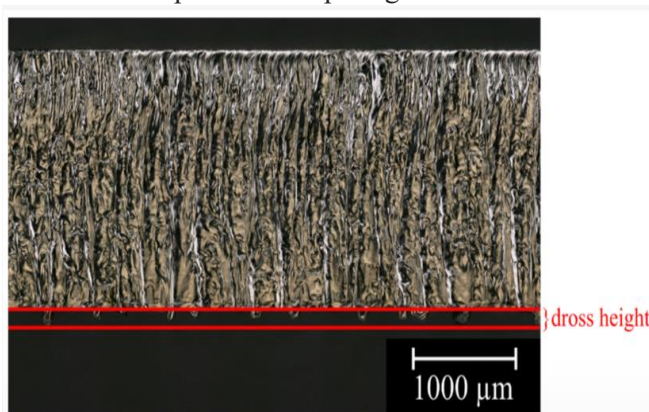
I. PENDAHULUAN

Pemesinan non-konvensional menghilangkan material tanpa menggunakan alat potong, melainkan menggunakan sumber energi yang sesuai dengan prinsip prosesnya (Prasad & Chakraborty, 2014). Salah satu jenis mesin non konvensional yang banyak digunakan pada saat ini adalah *laser cutting* dimana menggunakan energi termal untuk memotong, mengukir, dan membentuk tanpa kontak langsung dengan benda kerja (Alsaadawy, et al., 2024). Teknologi ini bekerja dengan cara memfokuskan sinar laser ke permukaan objek, sehingga menghasilkan panas ekstrim yang mampu melelehkan, menguapkan atau membakar material pada jalur pemotongan yang telah ditentukan (Chrysosouris & Salonitis, 2012). *Laser cutting* banyak diterapkan dalam berbagai industri manufaktur logam, otomotif, elektronik dan periklanan. Keunggulan dari teknologi ini terletak pada mekanisme pemotongan tanpa kontak langsung dengan benda kerja yang memungkinkan pemrosesan berbagai material, seperti *carbon steel*, *stainless steel*, akrilik, kayu, dan aluminium. Metode tersebut mampu mengurangi terjadinya keausan pada alat pemotongan serta mendukung tercapainya produktivitas yang lebih optimal (Samarya, et al., 2013).

Salah satu material yang dapat diproses menggunakan teknologi *laser cutting*, *stainless steel* menjadi merupakan salah satu yang paling umum digunakan karena sifat mekanik yang baik serta ketahanan yang tinggi terhadap korosi. Material ini merupakan paduan logam yang terdiri terutama dari besi (Fe), kromium (Cr), minimal 10,5%, serta tambahan unsur lain seperti nikel (Ni), molibdenum (Mo), dan karbon (C) dalam jumlah kecil (Dundu, 2018). Konsentrasi kromium memengaruhi ketahanan korosi baja tahan karat dengan menciptakan lapisan pelindung di permukaan untuk memperlambat degradasi lingkungan (Ma, et al., 2019). *Stainless steel* banyak digunakan dalam industri makanan, konstruksi,

otomotif, dan peralatan medis karena sifatnya yang kuat, tahan karat, mudah dibersihkan, dan memiliki tampilan estetik (Callister Jr & Rethwisch, 2020)

Dalam proses pemotongan menggunakan *laser cutting* sering ditemukan cacat pemotongan (*cutting defect*) seperti *burn mark* (bekas terbakar), *rough edge* (tepi kasar), *incomplete cutting* (pemotongan tidak tuntas), dan *dross* yang dapat mempengaruhi kualitas hasil pemotongan (Singh, et al., 2021). Penelitian ini berfokus pada cacat *dross*, yaitu sisa material cair yang mengeras dan menempel pada bagian bawah potongan setelah proses pemotongan selesai (Stoyanov, et al., 2023). Pembentukan *dross* dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti suhu permukaan pemotongan yang tinggi, viskositas logam cair, dan dorongan gas bantu yang tidak mencukupi untuk menghilangkan logam dari zona pemotongan (Günay, et al., 2026). Bentuk *dross* dapat dilihat seperti gambar 1.



Gambar 1. Bentuk Cacat *Dross* Hasil dari Pemotongan (Bach, et al., 2023)

Kualitas pemotongan pada proses *laser cutting* merupakan hasil interaksi berbagai parameter proses, seperti energi laser yang diberikan, kecepatan pemotongan, posisi fokus, tekanan dan jenis gas bantu, serta jarak nozzle terhadap permukaan material (Girdu, et al., 2021). Pengaturan parameter yang tidak tepat dapat menyebabkan akumulasi panas yang tidak merata, pelelehan yang berlebihan, serta gas bantu yang tidak mampu mendorong logam cair keluar dari zona potong sehingga meningkatkan terbentuknya *dross* (Jadhav & Kumar, 2019). Salah satu aspek penting dalam meminimalkan terbentuknya *dross* yaitu penggunaan gas bantu yang tepat. Penelitian ini dilakukan menggunakan gas bantu oksigen (O_2) karena memiliki biaya operasional yang lebih rendah dibandingkan Nitrogen (N_2). Meski penggunaan oksigen pada material *stainless steel* dapat menimbulkan lapisan oksida pada tepi potongan, oksigen dipilih karena lebih ekonomis dalam konsumsi gas dan kebutuhan daya laser (Riveiro, et al., 2019). Oleh karena itu, pengaturan parameter sangat penting untuk meminimalisir terbentuknya *dross* selama proses *laser cutting*.

II. METODE PENELITIAN

1. Jenis Penelitian

Pengaruh parameter proses *laser cutting* terhadap kualitas permukaan hasil pemotongan dianalisis melalui pengujian eksperimen secara kuantitatif dengan variasi parameter proses pemotongan seperti *cutting speed* (s), *gas pressure* (P) dan *focus point* (F) untuk mengetahui pengaruh masing-masing parameter terhadap kualitas hasil pemotongan khususnya tingkat pembentukan *dross* (Sugiyono, 2019). Data hasil pengujian diperoleh melalui pengamatan struktur *dross* hasil pemotongan pada material *stainless steel* menggunakan mikroskop dan selanjutnya, data penelitian dianalisis dengan pendekatan statistik ANOVA guna mengevaluasi apakah variasi parameter pemotongan menghasilkan perbedaan yang signifikan terhadap variabel respons (García-López, et al., 2018)

2. Waktu dan Tempat penelitian

Pelaksanaan kegiatan penelitian dilakukan selama periode Januari hingga Juni 2026 dan bertempat di Laboratorium Terpadu Universitas Negeri Padang.

3. Instrumen penelitian

Penelitian ini menggunakan *stainless steel* 304 sebagai sampel uji untuk menganalisis karakteristik hasil pemotongan yang dilakukan dengan metode *laser cutting*. Material ini digunakan untuk mengamati dan menganalisis hasil pemotongan pada mesin *laser cutting* berdasarkan tinggi profil *dross* pada permukaan hasil pemotongan. Informasi terkait persentase unsur paduan penyusun *stainless steel* 304 dapat diketahui melalui data yang tercantum pada tabel 1.

Tabel 1. Unsur Paduan SS 304

Unsur Paduan	Wt. (%)
Karbon (C)	0.07
Mangan (Mn)	2.0
Silikon (Si)	1.0
Kromium (Cr)	17.8
Nikel (Ni)	8.5
Sulfur (S)	0.008
Fosfor (P)	0.035
Besi (Fe)	Bal

Sumber : (Zhao, et al., 2023)

Studi ini memotong material menggunakan mesin pemotong laser MCM 3015 c dengan pengaturan proses yang telah ditentukan untuk membuat spesimen untuk analisis. Gambar 2 menunjukkan bentuk mesin, sedangkan Tabel 2 mencantumkan spesifikasinya.



Gambar 2. Mesin *Laser Cutting* MCM 3015 c

Tabel 2. Spesifikasi Mesin *Laser Cutting* MCM 3015 c

Keterangan	Spesifikasi
<i>Mechinable range</i>	3050 x 1530 mm
<i>Equipment Number</i>	MCM 3015 c
<i>Laser Power</i>	1500 W Max
<i>Rated Power</i>	380V/50Hz

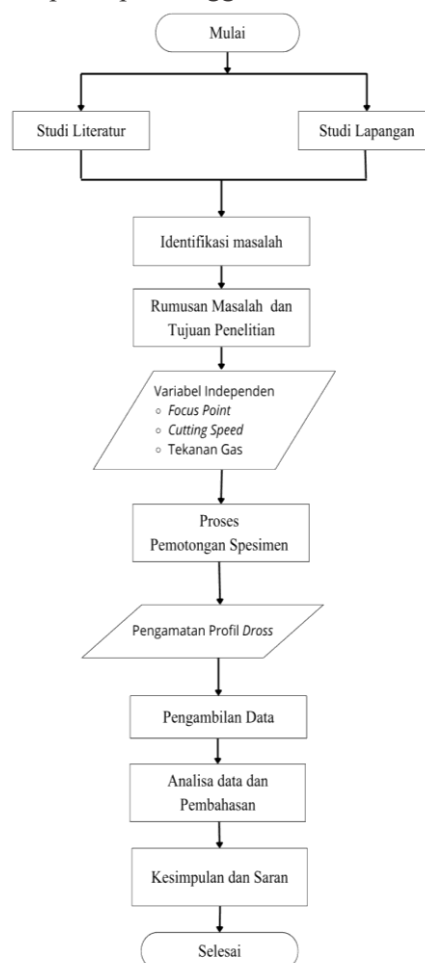
Dalam penelitian ini, mikroskop digunakan untuk mengamati profil *dross* hasil pemotongan. Mikroskop yang digunakan untuk melihat hasil pemotongan yaitu Mikroskop Primotech Zeiss yang dapat dilihat pada gambar 3. Mikroskop ini dipilih karena kemampuannya dalam memberikan informasi visual detail pada level mikroskopis yang sulit diidentifikasi melalui pengamatan visual secara langsung.



Gambar 3. Mikroskop Primotech Zeiss

4. Prosedur Penelitian

Pengumpulan dan analisis data dilakukan secara sistematis dalam proses penelitian. Gambar 4 menunjukkan proses penelitian dari persiapan hingga analisis.



Gambar 4. Diagram Alir Penelitian.

5. Parameter Pemotongan

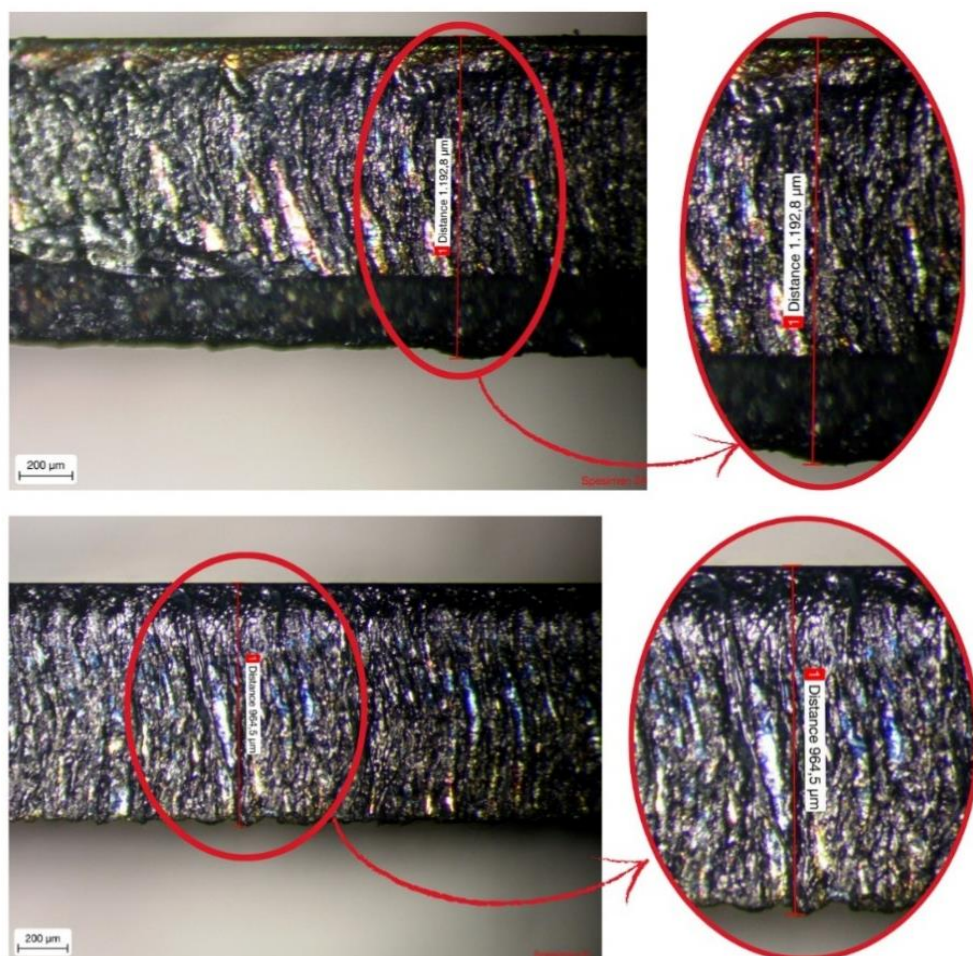
Berdasarkan variabel penelitian dan metode eksperimen yang telah ditentukan, kombinasi pengujian dalam penelitian ini disusun sebagaimana ditampilkan pada Tabel 3. Rancangan ini terdiri dari 3 faktor (*focus point*, *gas pressure*, dan *cutting speed*) dan masing-masing terdiri dari 3 level yang selanjutnya diuji untuk memperoleh data sesuai dengan tujuan penelitian.

Tabel 3. Parameter Pemotongan

Faktor	Level 1	Level 2	Level 3
<i>Focus Point</i> (mm)	-2	0	2
<i>Cutting Speed</i> (m/min)	10	20	30
<i>Gas Pressure</i> (bar)	6	8	10

III. HASIL PENELITIAN

Berdasarkan pada metode penelitian yang telah ditetapkan penelitian ini dilakukan sesuai dengan desain eksperimen pada tabel 3. Pengukuran tinggi *dross* dilakukan menggunakan mikroskop dengan 5x pembesaran dapat dilihat bentuk profil *dross* yang diamati seperti gambar 5. Hasil pengukuran tinggi *dross* pada masing-masing kondisi pengujian dirangkum dan disajikan dalam Tabel 4.



Gambar 4. Bentuk Profil *Dross*

Tabel 4. Hasil Penelitian

NO	Focus Point (F) (mm)	Cutting Speed (S) (m/min)	Gas pressure (P) (bar)	Tinggi Dross (μm)
1.	-2	30	10	51.6
2.	-2	30	8	36.9
3.	-2	30	6	59.3
4.	-2	20	10	37.3
5.	-2	20	8	58.9
6.	-2	20	6	36.8
7.	-2	10	10	36.8
8.	-2	10	8	44.2
9.	-2	10	6	36.9
10	0	30	10	81.4
11	0	30	8	81
12	0	30	6	51.6
13	0	20	10	58.9
14	0	20	8	58.9
15	0	20	6	81.1
16	0	10	10	66.3
17	0	10	8	88.4
18	0	10	6	147.3
19	2	30	10	66.3
20	2	30	8	95.7
21	2	30	6	51.5
22	2	20	10	81
23	2	20	8	169.3
24	2	20	6	265.1
25	2	10	10	73.6
26	2	10	8	58.9
27	2	10	6	81.1

IV. PEMBAHASAN

1. ANOVA (*analisis of varians*)

Analisis ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh masing-masing faktor, yaitu *cutting speed*, *focus point*, *gas pressure* dan faktor interaksi, terhadap tinggi *dross* yang diamati. Keputusan didasarkan pada nilai p dalam tabel ANOVA, yang menunjukkan apakah setiap elemen memiliki dampak yang signifikan secara statistik terhadap perkembangan kerak (nilai $p < 0,05$) (Adeniran, et al., 2021). Hasil analisis statistik ANOVA yang diperoleh dari pelaksanaan eksperimen dirangkum dan ditampilkan pada tabel 5.

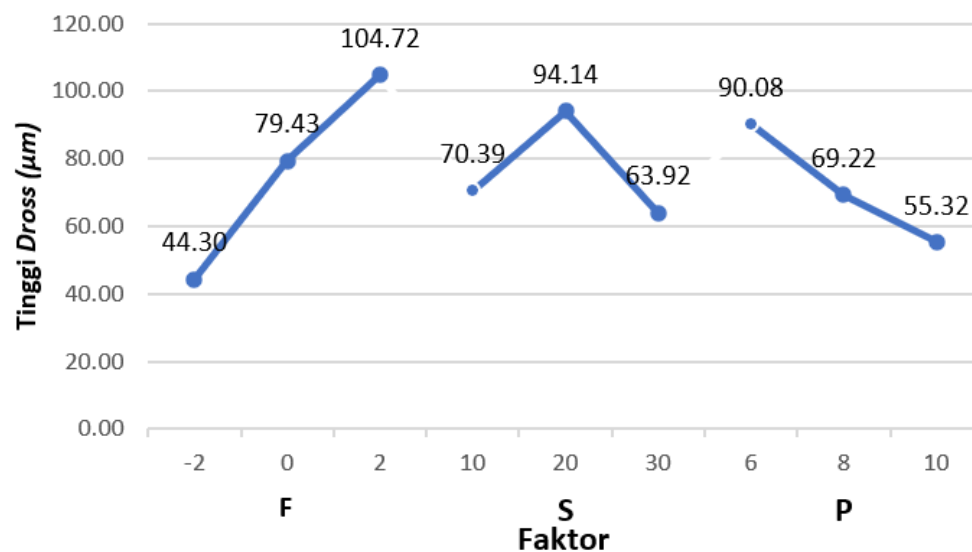
Tabel 5. Hasil perhitungan menggunakan ANOVA

Faktor	DF	SS	MS	F Static	p-value
F	2	16574.171	8287.086	5.680	0.029
S	2	4558.581	2279.290	1.562	0.267
P	2	3691.463	1845.731	1.265	0.333
FxS	4	17904.701	4476.175	3.068	0.083
FxP	4	2547.626	636.906	0.436	0.779
PxS	4	5345.364	1336.341	0.916	0.499
error	8	11671.161	1458.895		

Berdasarkan nilai *p-value* hasil analisis ANOVA, faktor F berpengaruh signifikan terhadap tinggi *dross* dengan nilai 0,029 ($< 0,05$), sedangkan faktor S, P, dan seluruh interaksi antar faktor tidak menunjukkan signifikansi statistik terhadap respons yang diamati karena nilai *p-value* yang diperoleh melampaui tingkat signifikansi sebesar 0,05.

2. Main Effect Plot Tinggi Dross

Melalui *main effect plot*, kecenderungan perubahan respons terhadap variasi level pada setiap faktor dapat dianalisis berdasarkan nilai rata-ratanya (Antony, 2014). Faktor-faktor yang digunakan sebagai variabel dalam analisis penelitian ini meliputi *focus point* (F), *cutting speed* (S), dan tekanan gas (P) yang masing-masing memiliki 3 variasi level. Perubahan rata-rata respons tinggi *dross* pada setiap level faktor dapat diamati melalui penyajian grafik *main effect plot*.

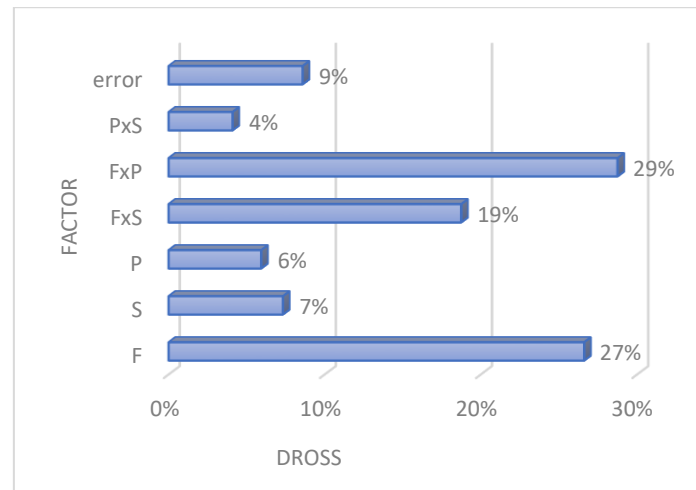


Gambar 5. Grafik Main Effect Plot

Secara keseluruhan, parameter paling berpengaruh terhadap tinggi adalah *focus point* (F), karena menunjukkan perubahan nilai yang paling signifikan. Berdasarkan grafik tersebut, kombinasi parameter yang optimal untuk meminimalkan tinggi *dross* adalah *focus point* -2, *cutting speed* pada level 30, dan tekanan gas pada level 10.

3. *Percentage Contribution terhadap Tinggi Dross*

Faktor-faktor dalam desain eksperimen dihitung berdasarkan presentasi kontribusinya terhadap kuadrat total, sehingga dapat diketahui besarnya pengaruh masing-masing faktor terhadap respon (Yang & El-Haik, 2003). Hasil pengujian *percentage contribution* masing-masing faktor terhadap tinggi *dross* ditunjukkan pada gambar berikut ini:



Gambar 6. *Percentage contribution* faktor terhadap tinggi *dross*.

Faktor $F \times P$ memberikan kontribusi terbesar terhadap terbentuknya *dross*, yaitu sebesar 29%, diikuti oleh faktor F berada di urutan berikutnya dengan 27%. Faktor $F \times S$ memiliki pengaruh 19% pada respons yang diamati, meskipun dalam skala yang lebih kecil dibandingkan faktor-faktor signifikan lainnya. Variabel S , P , dan $P \times S$ memberikan kontribusi yang lebih kecil, masing-masing sebesar 7%, 6%, dan 4%.

V. KESIMPULAN

Dengan mempertimbangkan hasil eksperimen dan interpretasi data yang telah dilakukan, *focus point* dengan level terendah dan *cutting speed* serta *gas pressure* dengan level tertinggi menghasilkan pemotongan dengan tinggi cacat *dross* minimum. Maka settingan parameter yang optimal adalah pada *focus point* sebesar -2 mm, *cutting speed* sebesar 30 m/min dan *gas pressure* sebesar 10 bar.

VI. REFERENSI

- Adeniran, A., Olilima, J., & Akano, R. (2021). Analysis of Variance: The Fundamental Concepts and Application with R. *International Journal of Mathematics and Computer Research*, 9(10), 2408-2422.
- Alsaadawy, M., Dewidar, M., Said, A., Maher, I., & Shehabeldeen, T. A. (2024). A comprehensive review of studying the influence of laser cutting parameters on surface and kerf quality of metals. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 130(3), 1039-1074.
- Antony, J. (2014). A Systematic Methodology for Design of Experiments. *Design of experiments for engineers and scientists*, 2, 33-50.
- Bach, J., Zeuner, A., Wanski, T., Fischer, S., Herwig, P., & Zimmermann, M. (2023). Influence of the Dross Formation of the Laser-Cut Edge on the Fatigue Strength of AISI 304. *Metals*, 13(3), 624.
- Callister Jr, W., & Rethwisch, D. (2020). *Materials Science and Engineering: An Introduction* (10th ed.). John Wiley & Sons.
- Chryssolouris, G., & Salonitis, K. (2012). Fundamentals of laser machining of composites. *Machining Technology for Composite Materials*, 266-287.

- Dundu, M. (2018). Evolution of stress–strain models of stainless steel in structural engineering applications. *Construction and Building Materials*, 165, 413-423.
- García-López, E., Medrano-Tellez, A., Ibarra-Medina, J., Siller, H., & Rodriguez, C. (2018). Experimental study of back wall dross and surface roughness in fiber laser microcutting of 316L miniature tubes. *Micromachines*, 9(1), 4.
- Girdu, C. C., Gheorghe, C., Redulescu, C., & Cirtina, D. (2021). Influence of process parameters on cutting width in co2 laser processing of hardox 400 steel. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(13), 5998.
- Günay, M., Yurtkuran, H., & Korkmaz, M. (2026). Multi-response optimization of fiber laser cutting parameters for improved cut quality and energy efficiency in ferritic stainless steel. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 79, 102420.
- Jadhav, A., & Kumar, S. (2019). An experimental study on influence of process parameters on dross properties in laser machining of AISI 304 material. *Journal of Manufacturing Engineering*, 14(3), 111-116.
- Ma, L., Wiame, F., Maurice, V., & Marcus, P. (2019). Origin of nanoscale heterogeneity in the surface oxide film protecting stainless steel against corrosion. *npj Materials Degradation*, 3(1), 29.
- Prasad, K., & Chakraborty, S. (2014). A decision-making model for non-traditional machining processes selection. *Decision Science Letters*, 3(4), 467-478.
- Riveiro, A., Quintero, F., Boutinguiza, M., del Val, J., Comesaña, R., Lusquiños, F., & Pou, J. (2019). Laser cutting: A review on the influence of assist gas. *Materials*, 12(1), 157.
- Samarya, Y. T., Sulianti, M. M., Perangin-Angin, B., & Situmorang, M. (2013). Aplikasi laser CO2 untuk pemotongan (cutting) material menggunakan mesin cnc (control numeric computer). *Saintia Fisika*, 5(1), 1-5.
- Singh, A., Bal, K., Pal, A., Dey, D., & Roy Choudhury, A. (2021). A novel method to reduce dross in laser beam cutting of Ti-6Al-4 V alloy sheet. *Journal of Manufacturing Processes*, 64, 95-112.
- Stoyanov, S., Petring, D., Piedboeuf, F., Lopes, M., & Schneider, F. (2023). Numerical and experimental investigation of the melt removal mechanism and burr formation during laser cutting of metals. *Journal of Laser Applications*, 35(4).
- Sugiyono, A. (2019). *METODE PENELITIAN KUANTITATIF, KUALITATIF DAN R&D*.
- Yang, K., & El-Haik, B. (2003). *Design for Six Sigma : a roadmap for product development*. McGraw-Hill.
- Zhao, X., Li, Z., Yang, B., Sun, X., Sun, G., Wang, S., & Chen, C. (2023). Microstructure and mechanical properties of 304 stainless steel produced by interpass milling hybrid direct energy deposition-arc. *Journal of Materials Research and Technology*, 27, 3744-3756.