

ANALISIS PENGARUH PARAMETER MESIN CNC LASER CUTTING TERHADAP WAKTU DAN AKURASI DIMENSI

Radhi Maladzi*
Rama Ardiansyah Putra
Bayun Matsaany
Nabila Yudisha

Program Studi Teknologi Rekayasa Manufaktur, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta, Jl. Prof. DR. G. A. Siwabessy, Kampus UI, Depok, 16425.

Abstract

The manufacturing industry plays a vital role in supporting economic growth but often faces operational inefficiencies, particularly in the production process. PT XYZ, a leading steel manufacturing company in Indonesia, utilizes a CNC laser cutting machine model 3015H to produce components made from SS400 material. A high defect rate in cutting 2 mm thick SS400 plates indicates inefficiencies that require further investigation. This study aims to analyze the effects of cutting speed, laser height distance, and gas pressure on cutting time efficiency and dimensional accuracy. The research employs the Taguchi method for experimental design, Grey Relational Analysis (GRA) for multi-response optimization, and MANOVA to determine the simultaneous significance of the process parameters. The results show that the optimal parameter combination for cutting time and dimensional accuracy is achieved at a cutting speed of 1.8 m/min, a laser height of 0.8 mm, and a gas pressure of 0.8 bar. Cutting speed was the most dominant factor affecting cutting time efficiency, with the fastest time recorded at 25.26 seconds and the highest delta value. Gas pressure had the most significant effect on dimensional accuracy, producing the smallest deviation of 0.0567 mm. MANOVA results indicated that all three parameters had a significant multivariate effect ($p < 0.05$), but only cutting time was significantly affected in the univariate test. In conclusion, proper process parameter settings can enhance cutting efficiency without compromising accuracy. These findings are expected to support technical decision-making to improve productivity at PT XYZ.

Keywords:

cnc laser cutting; ss400; taguchi; grey relational analysis; manova

Abstrak

Industri manufaktur merupakan sektor penting yang menopang pertumbuhan ekonomi, namun dalam praktiknya sering menghadapi tantangan berupa ketidakefisienan operasional, khususnya dalam proses produksi. PT XYZ sebagai perusahaan produsen baja terkemuka di Indonesia menggunakan mesin CNC laser cutting tipe 3015H dalam produksi produk berbahan SS400. Tingginya tingkat cacat pada proses pemotongan material SS400 ketebalan 2 mm menunjukkan adanya ketidakefisienan yang perlu diteliti lebih lanjut. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh parameter proses kecepatan potong, jarak ketinggian laser, dan tekanan gas terhadap efisiensi waktu dan akurasi dimensi hasil potongan. Penelitian menggunakan metode Taguchi untuk desain eksperimen, grey relational analysis (GRA) untuk optimasi multi-respon, dan uji MANOVA untuk mengetahui signifikansi pengaruh secara simultan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi parameter optimal untuk waktu pemotongan dan akurasi dimensi, yaitu pada kecepatan potong 1,8 m/min, jarak ketinggian laser 0,8 mm dan tekanan gas 0,8 bar. Kecepatan potong merupakan faktor paling dominan terhadap efisiensi waktu, ditunjukkan oleh waktu tercepat sebesar 25,26 detik dan nilai delta tertinggi. Sedangkan tekanan gas paling berpengaruh terhadap akurasi dimensi, dengan selisih terkecil sebesar 0,0567 mm. Uji MANOVA menunjukkan ketiga parameter berpengaruh signifikan terhadap gabungan variabel dependen secara multivariat ($p < 0,05$), namun hanya signifikan terhadap efisiensi waktu secara univariat. Dapat disimpulkan bahwa pengaturan parameter proses yang tepat dapat meningkatkan efisiensi pemotongan tanpa mengorbankan akurasi. Hasil ini diharapkan dapat menjadi dasar pengambilan keputusan teknis dalam meningkatkan produktivitas PT XYZ.

Kata Kunci:

cnc laser cutting; ss400; taguchi; grey relational analysis; manova

Citation in APA Style: Maladzi, R., Putra, R.A., Matsaany, B., & Yudisha, N. (2025). Analisis pengaruh parameter mesin cnc laser cutting terhadap waktu dan akurasi dimensi. *VOCATECH: Vocational Education and Technology Journal*, 7(2), 259-271.

***Corresponding author:**

Radhi Maladzi, Program Studi Teknologi Rekayasa Manufaktur, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta,
Jl. Prof. DR. G. A. Siwabessy, Kampus UI, Depok, 16425
Email: radhi.maladzi@mesin.pnj.ac.id

1. PENDAHULUAN

Industri manufaktur merupakan sektor yang memegang peranan penting dalam mendorong pertumbuhan ekonomi suatu negara. Namun, seiring dengan meningkatnya dinamika pasar global yang semakin kompleks dan persaingan yang semakin ketat, industri ini sering dihadapkan pada berbagai tantangan yang dapat menghambat efisiensi operasional. Persaingan antar perusahaan manufaktur yang memproduksi produk serupa menjadi fenomena umum dalam dunia bisnis. Untuk memenangkan hati konsumen, perusahaan keras untuk menawarkan nilai tambah dan menciptakan kepuasan pelanggan pada tingkat yang ditargetkan atau bahkan lebih (Sony, 2023). Salah satu tantangan utama yang dihadapi industri manufaktur adalah tingginya tingkat pemborosan dalam proses produksi. Pemborosan ini dapat terjadi pada berbagai tahapan, seperti produksi berlebih, waktu tunggu yang terlalu lama, inventaris yang tidak terkendali, pergerakan atau aktivitas yang tidak diperlukan, pemrosesan yang berlebihan, hingga produk cacat. Masalah-masalah tersebut tidak hanya meningkatkan biaya produksi tetapi juga dapat mengurangi kemampuan perusahaan untuk bersaing secara efektif di pasar global. (Lestari & Susandi, 2019). Penelitian ini penting dilakukan karena kualitas hasil laser cutting sangat dipengaruhi oleh pengaturan parameter proses. Ketidaktepatan parameter dapat menyebabkan kerf width membesar, tepi potong kasar, dan menurunnya akurasi dimensi. Melalui penelitian ini diharapkan diperoleh parameter optimal untuk menghasilkan small kerf width dan kualitas pemotongan yang lebih baik, sehingga dapat meningkatkan efisiensi dan kualitas produk manufaktur. Parameter yang tidak tepat dapat menghasilkan hasil proses produksi yang tidak baik, seperti tidak sesuainya lebar kerf dibandingkan dengan ukuran yang diinginkan.

Dalam proses produksi menggunakan mesin CNC laser, kualitas produksi dan efisiensi waktu adalah dua aspek penting dalam proses manufaktur modern, terutama dalam industri yang menggunakan teknologi CNC laser. Oleh karena itu untuk mengoptimalkan kedua aspek tersebut, PT XYZ memakai *software cypcut* sebagai alat bantu sebelum melakukan produksi. Data jumlah produk cacat (*reject*) yang dihasilkan selama pelaksanaan suatu proyek oleh PT XYZ, yang menggunakan mesin CNC laser cutting tipe 3015H dapat dilihat pada Tabel 1 dibawah.

Tabel 1. Data *Reject* PT XYZ Project Desember 2024

No	Marking	Dimensi			Qty reject
		Panjang	Lebar	Tebal	
1	070I24006xxx	150	520	1	8
2	070I24006xxx	150	520	1,2	97
3	218I111042xxx	163,7	560	2	2
4	360I111003xxx	127	112	2	188

Data dalam tabel 1 diatas menunjukkan tingkat cacat (*reject*) yang terjadi selama proses produksi menggunakan mesin CNC laser *cutting* model 3015H pada proyek yang dijalankan oleh PT XYZ, dimana pada plat ketebalan 2 mm ditemukan jumlah part yang *reject* sebesar 190 buah dari hasil mesin cnc laser *cutting*. Jenis cacat yang ditemukan meliputi dimensi hasil potongan yang tidak sesuai standar, di mana terjadi penyimpangan melebihi batas toleransi yang ditetapkan, yaitu $\pm 0,3$ mm. Kondisi tersebut menunjukkan adanya indikasi ketidakefisienan dalam proses produksi yang mencerminkan perlunya evaluasi terhadap parameter proses pemotongan.

Beberapa penelitian sebelumnya telah dilakukan untuk mengevaluasi parameter pemotongan laser. (Nugraha et al., 2023) menggunakan metode Taguchi-ANOVA untuk mengoptimalkan kekasaran dan kekerasan permukaan material MS SPHC. (Widadi et al., 2023) membahas pengaruh kecepatan dan tekanan gas terhadap potongan SS304, dan (R et al., 2016) meneliti optimasi parameter terhadap kekasaran dan laju pemotongan pada SUS316L. Namun, belum ditemukan studi yang secara khusus mengkaji efisiensi waktu

dan akurasi dimensi secara simultan pada SS400 ketebalan 2 mm menggunakan kombinasi Taguchi, GRA, dan MANOVA.

Dengan demikian, Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh kecepatan potong, jarak ketinggian laser, dan tekanan gas pada mesin CNC laser cutting terhadap efisiensi waktu dan akurasi dimensi hasil potongan material *Stainless Steel* 400 dengan ketebalan 2 mm. Penelitian ini menggunakan pendekatan metode taguchi, *grey relational analysis* (GRA), dan *multivariate analysis of variance* (MANOVA) untuk menentukan kombinasi parameter proses yang optimal guna mengetahui pengaruh signifikan faktor-faktor proses secara simultan terhadap variabel respon.

2. STUDI PUSTAKA

2.1 Mesin CNC Laser Cutting

Mesin CNC laser cutting merupakan teknologi pemotongan presisi tinggi yang bekerja dengan mengarahkan sinar laser berdaya tinggi melalui sistem kendali numerik (CNC) (Mulyana et al., n.d.). Proses laser *cutting* bekerja dengan mengarahkan sinar laser berkekuatan tinggi melalui *nozzle* ke area material tertentu. Sistem CNC bertugas mengontrol pergerakan sinar laser tersebut, sehingga proses ini sering disebut sebagai CNC Laser *cutting* (Hidayat et al., 2021). Dalam penelitian ini digunakan mesin model 3015H untuk memotong material logam sesuai desain digital. Teknologi ini memungkinkan pemotongan yang cepat, akurat, dan bersih, sehingga banyak digunakan dalam industri manufaktur, otomotif, elektronik, dan konstruksi.

2.2 Material SS400

Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah baja SS400, yaitu baja karbon rendah yang umum dipakai dalam industri konstruksi dan fabrikasi. SS400 dipilih karena sifat mekaniknya yang baik, seperti kekuatan tarik 400–510 MPa dan keuletan tinggi, serta kemudahan dalam proses pemotongan. Meskipun tidak tahan terhadap korosi, material ini banyak digunakan karena harganya terjangkau dan mudah didapat. SS400 digunakan dalam penelitian ini untuk mengamati pengaruh parameter pemotongan terhadap kualitas hasil potong (Rajagukguk et al., 2024).

2.3 Metode Taguchi

Metode Taguchi pertama kali dipromisikan oleh Dr. Genichi Taghuci adalah metodologi baru pada bidang keteknikan, bertujuan untuk memperbaiki kualitas produk dan proses serta untuk menekan biaya dan resources sekecil mungkin. Metode Taguchi adalah salah satu cara yang efektif untuk menemukan parameter pemrosesan yang lebih baik secara eksperimental, dan itu akan digunakan dalam penelitian ini untuk menemukan pemrosesan terbaik kombinasi parameter (Wang et al., 2020).

Taguchi memperkenalkan pendekatan *signal to noise ratio* (S/N) guna meneliti pengaruh faktor noise terhadap variasi yang timbul. Perhitungan rasio S/N yang dilakukan tergantung karakteristik mutu yang dituju. Rasio S/N tersebut merupakan komponen yang sangat penting dalam perancangan parameter dan digunakan untuk menentukan kondisi optimal dari perancangan parameter.

Beberapa tipe karakteristik kualitas S/N Ratio dari respon adalah sebagai berikut :

1. *Nominal is best*

Karakteristik kualitas dimana nilainya ditetapkan pada suatu nilai nominal tertentu, jika nilainya semakin mendekati nilai nominal tertentu maka kualitasnya semakin baik.

$$SNR = 10 \log_{10} \left[\frac{\mu^2}{\sigma^2} \right]$$

Keterangan: n = Banyaknya ulangan dalam tiap eksperimen

y = Nilai pada setiap run

μ = Rata-rata dari setiap run

σ = Deviasi dari setiap run

2. *Smaller is better*

Karakteristik kualitas dimana semakin rendah nilainya, maka kualitas semakin baik. S/N Ratio untuk karakteristik ini dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut :

$$SNR = -10 \log \left[\sum_{i=1}^n \frac{y_i^2}{n} \right]$$

Keterangan :

n = jumlah pengulangan

y = data percobaan

3. *Larger is Better*

Karakteristik kualitas dimana semakin besar nilainya, maka kualitas semakin baik. S/N Ratio untuk karakteristik ini dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut : (Hayati, 2018)

$$SNR = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right]$$

2.4 *Grey Relational Analysis*

Dalam hal dua atau lebih respon, dengan karakteristik kualitas yang berbeda, optimisasi multi respon menggunakan GRA adalah metode yang paling banyak digunakan. Analisis *grey relational* dapat diadaptasi secara efektif dan menjadi alat yang ampuh untuk masalah pengoptimalan respon ganda yang kompleks dapat disederhanakan menjadi pengoptimalan *grey relational grade* respon tunggal (Purnawarman et al., 2024). Tahapan dalam menggunakan GRG pada penelitian ini, yaitu:

1. Menghitung nilai rasio S/N untuk masing-masing respon.
2. Normalisasi data percobaan

Tahap ini disebut dengan *grey relational generation*. Normalisasi untuk kedua respon pada penelitian ini menggunakan *smaller is better*. Adapun rumus untuk normalisasi dapat dilihat pada persamaan berikut.

$$Z_{ij} = \frac{(\max y_{ij} - y_{ij})}{(\max y_{ij} - \min y_{ij})}$$

Dengan :

$\max y_{ij}$: nilai terbesar dari Z_{ij}

$\min y_{ij}$: Nilai terkecil dari Z_{ij}

3. Perhitungan *deviation sequence*

Perhitungan *deviation sequence* menggunakan rumus pada persamaan dibawah.

$$\Delta_{0,i}(1) = |X_0 - X_1^*(1)|$$

Dengan :

X_0 : Nilai acuan

$X_1^*(1)$: Nilai hasil normalisasi dari eksperimen ke-1 untuk kriteria ke-i

4. Perhitungan *grey relational coefficients*

Perhitungan *grey relational coefficients* menggunakan rumus pada persamaan 12.

$$\gamma(y_0^*(k), (y_i^*(k))) = \frac{\Delta_{\min} + \zeta \Delta_{\max}}{\Delta_{ij}(k) + \zeta \Delta_{\max}}$$

Dimana $y_0^*(k)$ adalah urutan referensi, $y_i^*(k)$ adalah urutan perbandingan tertentu, $\Delta_{on}(k) = y_0^*(k) - (y_i^*(k))$, Δ_{\min} adalah nilai terkecil dari $\Delta_{ij}(k)$, dan $\zeta \Delta_{\max}$ adalah nilai terbesar dari $y_i^*(k)$, ζ disebut *distinguishing coefficient* ; pada umumnya nilai *distinguishing coefficient* yang digunakan yaitu = 0,5

5. Perhitungan *grey relational grade*

Perhitungan *grey relational grade* menggunakan rumus pada

$$\gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \zeta_{ij}$$

Dengan: n = nilai rata-rata dari keseluruhan GRG

γ_i = rata-rata GRG pada level optimal

2.5 *Multivariate Analysis of Variance (MANOVA)*

Alat Uji statistik yang digunakan untuk pengujian hipotesis dalam penelitian ini adalah *Multiple Analysis Of variance* (MANOVA). MANOVA mempunyai pengertian sebagai salah satu teknik statistik yang digunakan untuk menghitung pengujian signifikansi perbedaan rata-rata secara bersamaan antara kelompok untuk dua atau lebih variabel tergantung atau untuk menjelaskan bahwa secara statistik dan signifikansi ada perbedaan rata-rata variabel yang terjadi secara simultan antara 2 tingkat variabel (Himawan, 2020).

VOCATECH: Vocational Education and Technology Journal 7, 2 (2025): hal. 259-271

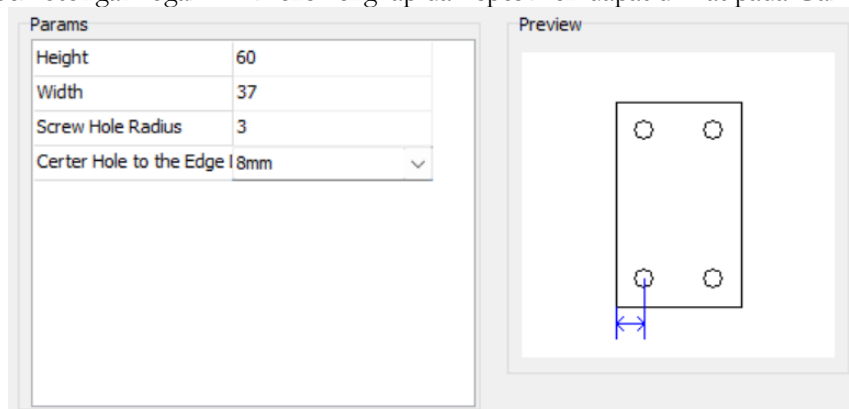
Statistik uji pada MANOVA yang dapat digunakan sebagai pembuat keputusan dalam perbedaan antar-kelompok adalah Wilk's Lambda. Wilk's Lambda, digunakan jika ada lebih dari dua set variabel bebas dan memenuhi asumsi homogenitas matriks varians-kovarians. Semakin rendah statistik Lambda Wilk, semakin besar dampaknya pada model. Nilai Lambda Wilk berada di kisaran 0-1 (Iqbal et al., 2020).

3. METODE PENELITIAN

Jenis penelitian yang dilakukan dalam studi ini adalah penelitian eksperimental dengan pendekatan kuantitatif. Penelitian eksperimental bertujuan untuk mengidentifikasi pengaruh variabel tertentu terhadap variabel lain dalam kondisi yang dikendalikan secara ketat (R et al., 2016). Dalam konteks penelitian ini, variabel bebas yang digunakan, yaitu kecepatan potong, jarak ketinggian laser, dan tekanan gas. Parameter awal yang divariasikan berdasarkan parameter yang biasa digunakan oleh PT XYZ.

3.1 Bahan Penelitian

Spesimen pada penelitian ini dirancang menyerupai bracket bangku yang umum digunakan sebagai penyangga perabot rumah tangga, dengan bentuk sederhana namun membutuhkan akurasi tinggi. Material yang digunakan adalah baja SS400 setebal 2 mm, dengan ukuran total 60 mm × 37 mm dan empat lubang sekrup berdiameter 6 mm di setiap sudut. Desain ini mencerminkan komponen nyata yang relevan dalam aplikasi industri pemotongan logam. Dimensi lengkap dari spesimen dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Bahan Penelitian

3.2 Faktor dan Level Parameter Proses

Penelitian terdapat 3 parameter proses yang dioptimalkan, yaitu kecepatan potong, jarak ketinggian laser, dan tekanan gas. Setiap parameter proses terdiri 3 level untuk memperoleh desain faktorial atau *Orthogonal Array* (OA) agar mendapatkan variasi parameter proses yang optimum dapat dilihat pada Tabel 2 dibawah.

Tabel 2. Faktor dan Parameter Proses

Parameter Proses	Level		
	1	2	3
Kecepatan potong (m/min)	2	1,8	2,2
Jarak ketinggian laser (mm)	1	0,8	1,2
Tekanan gas (Bar)	0,65	0,5	0,8

3.3 Desain Faktorial

Penentuan orthogonal array berfungsi untuk mendapatkan acuan dalam pembuatan dan pengujian spesimen. Penelitian dilakukan dengan menggunakan desain Taguchi L_9 (3^3) *Orthogonal Array* (OA) karena terdapat 3 faktor dan 3 level yang digunakan dalam pengujian. L_9 merupakan kondisi penelitian dengan jumlah pembuatan sampel sebanyak 9 percobaan dan akan diuji di setiap kondisi penelitian tentang optimasi dari proses pemotongan mesin laser *Cutting* dapat dilihat pada Tabel 3 dibawah.

Tabel 3. Desain Faktorial

Eksperimen	Control Parameters		
	Kecepatan Potong (m/min)	Jarak ketinggian Laser (mm)	Tekanan Gas (Bar)
1	2	1	0,65
2	2	0,8	0,5
3	2	1,2	0,8
4	1,8	1	0,5
5	1,8	0,8	0,8
6	1,8	1,2	0,65
7	2,2	1	0,8
8	2,2	0,8	0,65
9	2,2	1,2	0,5

3.4 Analisis S/N Ratio

Metode Taguchi merupakan metode penelitian berbasis pengujian untuk mengoptimasi proses kerja, parameter, dan material agar mendapatkan kombinasi model penelitian yang sesuai sehingga efektivitas dalam proses penelitian dapat tercapai [19]. Metode Taguchi memberikan pendekatan mutu hasil pengujian melalui rumus *Signal to Noise Ratio* (S/N Ratio) untuk memilih faktor yang memiliki kontribusi pada pengurangan kombinasi suatu respon serta menganalisis pengaruh dari faktor pengganggu terhadap hasil kombinasi. Pendekatan ini bertujuan untuk mengetahui nilai level dari faktor yang berpengaruh terhadap penelitian[5]. S/N Ratio terdapat 3 kategori untuk mengakomodasi proses optimasi berdasarkan karakteristik mutu yang ingin dituju oleh peneliti, yaitu *smaller is better*, *nominal is the best*, dan *larger is better*.

Pada penelitian ini, karakteristik mutu S/N Ratio *smaller is better* dipilih untuk mengetahui nilai level dari faktor yang berpengaruh terhadap penelitian antara respon waktu dan respon akurasi dimensi, karena nilai terkecil dari S/N Ratio disimpulkan bahwa permukaan spesimen hasil pemotongan laser *cutting* memiliki tingkat waktu yang paling minimum dan tingkat akurasi dimenensi yang tidak signifikan. Rumus S/N Ratio *smaller is better* ditunjukkan pada Persamaan dibawah.

$$SNR = -10 \log \left[\sum_{i=1}^n \frac{y_i^2}{n} \right]$$

Keterangan :

n : Banyak pengulangan setiap eksperimen.

y : data percobaan.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Hasil Percobaan

Pengumpulan data hasil pengukuran dilakukan melalui tiga kali replikasi pada setiap percobaan dengan mengamati langsung proses pemotongan pada mesin CNC laser *cutting*. Waktu yang dibutuhkan untuk setiap satu kali pemotongan dicatat secara sistematis. Sementara itu, pengukuran akurasi dimensi dilakukan dengan menggunakan jangka sorong digital untuk memperoleh data panjang, lebar, dan diameter hasil potongan. Data hasil eksperimen terkait waktu pemotongan disajikan pada Tabel 4, sedangkan data hasil pengukuran akurasi dimensi disajikan pada Tabel 5.

Tabel 4. Data Hasil Percobaan Terhadap Waktu

E	Control Parameters			Experimental Value			
	CS (m/min)	CH (mm)	GP (Bar)	1	2	3	Average
1	2	1	0,65	26,91	27,02	26,88	26,93

2	2	0,8	0,5	26,41	26,52	26,44	26,45
3	2	1,2	0,8	26,43	26,5	26,47	26,46
4	1,8	1	0,5	27,35	27,33	27,38	27,35
5	1,8	0,8	0,8	26,41	26,35	26,39	26,38
6	1,8	1,2	0,65	27,14	27,17	27,15	27,15
7	2,2	1	0,8	25,54	25,47	25,48	25,49
8	2,2	0,8	0,65	25,22	25,34	25,24	25,26
9	2,2	1,2	0,5	25,86	25,81	25,82	25,83

Tabel 5. Data Hasil Percobaan Terhadap Akurasi Dimensi

Control Parameters				Experimental Value								
E	<i>Cutting speed</i> (m/min)	<i>Cut height</i> (mm)	<i>Gas pressure</i> (Bar)	Panjang (60)			Lebar (37)			Diameter (6)		
				1	2	3	1	2	3	1	2	3
1	2	1	0,65	59,99	59,97	60,02	36,96	37	36,96	6,26	6,29	6,29
2	2	0,8	0,5	60,15	60,11	60,23	37,00	37,18	37,00	6,25	6,31	6,31
3	2	1,2	0,8	59,96	59,93	60,02	37,50	36,97	37,50	6,31	6,21	6,21
4	1,8	1	0,5	60,10	60,03	60,12	37,11	37,05	37,11	6,19	6,30	6,30
5	1,8	0,8	0,8	60,00	60,00	60,03	36,98	36,98	36,98	6,08	6,16	6,16
6	1,8	1,2	0,65	59,90	59,93	60,00	36,91	36,98	36,91	6,18	6,45	6,45
7	2,2	1	0,8	60,11	60,10	60,06	36,97	37,02	36,97	6,20	6,22	6,22
8	2,2	0,8	0,65	60,01	60,37	60,13	37,16	37,19	37,16	6,17	6,28	6,28
9	2,2	1,2	0,5	60,32	60,35	60,36	37,12	37,25	37,12	6,30	6,33	6,33

Dalam penelitian ini, evaluasi terhadap kualitas hasil potongan dilakukan dengan menghitung deviasi dimensi spesimen terhadap nilai target desain. Karena terdapat lebih dari satu dimensi utama yang diamati, yaitu panjang, lebar, dan diameter, maka diperlukan suatu pendekatan yang dapat menyederhanakan analisis menjadi satu nilai yang representatif. Rata-rata standar deviasi dalam penelitian ini juga digunakan sebagai respon tunggal dalam analisis metode Taguchi dan perhitungan *Signal to Noise Ratio* (S/N Ratio), guna menentukan kombinasi parameter proses terbaik yang menghasilkan akurasi dimensi tertinggi. Metode ini secara prinsip bersumber dari teori statistik *mean absolute deviation* (MAD) (Untari, 2019), yang mengukur rata-rata perbedaan absolut antara nilai observasi dengan pusat data. Rumus perhitungan rata-rata standar deviasi dimensi menggunakan persamaan dibawah.

$$\text{Rata - rata standar deviasi} = \frac{(P - Pi) + (L - Li) + (D - Di)}{3}$$

Dengan:

P, L, dan D = Nilai rata-rata aktual panjang, lebar, dan diameter hasil pengukuran.

Pi, Li, dan Di = Nilai target desain dari masing-masing dimensi.

Hasil Perhitungan rata-rata standar deviasi dapat dilihat pada Tabel 6 dibawah ini.

Tabel 6. Rata-Rata Standar Deviasi

E	\bar{X} Panjang (mm)	\bar{X} Lebar (mm)	\bar{X} Diameter (mm)	Rata rata Standar Deviasi (mm)
1	59,99	36,98	6,31	0,1433
2	60,16	37,07	6,28	0,1700
3	59,97	37,16	6,27	0,1533
4	60,08	37,09	6,27	0,1467
5	60,01	36,99	6,15	0,0567
6	59,94	36,93	6,38	0,1700
7	60,09	37,03	6,24	0,1200
8	60,17	37,14	6,22	0,1767
9	60,34	37,18	6,33	0,1133

Setelah mendapatkan hasil nilai rata-rata dari kedua respon, selanjutnya menghitung nilai S/N Ratio menggunakan karakteristik *smaller is better* untuk kedua respon. Hasil nilai S/N Ratio dapat dilihat pada Tabel 7 dibawah.

Tabel 7. S/N Ratio Kedua Respon

E	Control Parameters			S/N Ratio Waktu	S/N Ratio Akurasi Dimensi
	CS (m/min)	CH (mm)	GP (bar)		
1	2	1	0,65	-28,6069	16,8824
2	2	0,8	0,5	-28,4507	14,2754
3	2	1,2	0,8	-28,4540	19,4367
4	1,8	1	0,5	-28,7402	16,0986

5	1,8	0,8	0,8	-28,4398	23,5175
6	1,8	1,2	0,65	-28,6765	15,3910
7	2,2	1	0,8	-28,1297	16,8751
8	2,2	0,8	0,65	-28,0510	20,2915
9	2,2	1,2	0,5	-28,2425	10,6538

4.2 Perhitungan Grey Relational Analysis

Perhitungan *Grey Relational Analysis* (GRA) dimulai dari konversi data ke dalam nilai *Signal to Noise Ratio* (S/N Ratio), dilanjutkan dengan normalisasi data untuk menyetarakan skala antar respon. Selanjutnya dihitung *Grey Relational Coefficient* (GRC) berdasarkan *Deviation Sequence*, dan hasil akhirnya dirata-ratakan menjadi *Grey Relational Grade* (GRG) sebagai indikator performa kombinasi parameter proses. Kombinasi dengan nilai GRG tertinggi dianggap paling optimal terhadap kriteria multi-respon, yaitu efisiensi waktu dan akurasi dimensi.

Tabel 8. Normalisasi dan *Deviation Sequence*

Eksperimen	S/N Ratio		Normalisasi dan <i>Deviation Sequence</i>			
	Waktu	Akurasi Dimensi	Waktu	Δ_{Waktu}	Akurasi Dimensi	$\Delta_{Akurasi Dimensi}$
1	-28,6069	16,8824	0,8066	0,1934	0,5158	0,4842
2	-28,4507	14,2754	0,5799	0,4201	0,7185	0,2815
3	-28,4540	19,4367	0,5847	0,4153	0,3172	0,6828
4	-28,7402	16,0986	1,0000	0,0000	0,5767	0,4233
5	-28,4398	23,5175	0,5641	0,4359	0,0000	1,0000
6	-28,6765	15,3910	0,9076	0,0924	0,6317	0,3683
7	-28,1297	16,8751	0,1142	0,8858	0,5164	0,4836
8	-28,0510	20,2915	0,0000	1,0000	0,2508	0,7492
9	-28,2425	10,6538	0,2779	0,7221	1,0000	0,0000

Tabel 9. Grey Relational Coefficient dan Grey Relational Grade

Eksperimen	<i>Grey Relational Coefficient</i>		<i>Grey Relational Grade</i>
	Waktu	Akurasi Dimensi	
1	0,7211	0,5080	0,6145
2	0,5434	0,6398	0,5916
3	0,5463	0,4227	0,4845
4	1,0000	0,5416	0,7708
5	0,5343	0,3333	0,4338
6	0,8440	0,5759	0,7099
7	0,3608	0,5083	0,4346
8	0,3333	0,4003	0,3668
9	0,4091	1,0000	0,7046

Hasil dari nilai *Grey Relational Grade* (GRG) selanjutnya digunakan untuk menghitung rata-rata nilai pada setiap level faktor. Nilai-nilai ini kemudian dianalisis untuk menentukan pengaruh relatif masing-

masing parameter proses terhadap akurasi dimensi dan efisiensi waktu pemotongan. Adapun hasil perhitungan nilai rata-rata dapat dilihat pada Tabel 10 dibawah.

Tabel 10. Rata-Rata Nilai *Grey Relational Grade*

Level	<i>Cutting Speed</i>	<i>Cut Height</i>	<i>Gas Pressure</i>
1	0,5630	0,5949	0,4769
2	0,5855	0,5972	0,4342
3	0,5038	0,4641	0,6908
Delta	0,0817	0,1331	0,2566
Rank	3	2	1

Berdasarkan Tabel di atas, terlihat nilai pada setiap tingkat level faktor. Kombinasi $A_2B_2C_3$ menunjukkan nilai maksimum di masing-masing tingkatan faktor, sehingga dipilih sebagai parameter terbaik untuk memperoleh respon sesuai yang diharapkan. Melalui perhitungan *Grey Relational Analysis* di atas, diperoleh kombinasi parameter optimal guna meminimalkan waktu proses serta meningkatkan akurasi dimensi yang dapat dilihat pada Tabel 11 dibawah.

Tabel 11. Kombinasi Parameter Optimal

Faktor	Level	Nilai Level
<i>Cutting Speed</i> (m/min)	2	1,8
<i>Cut Height</i> (mm)	2	0,8
<i>Gas Pressure</i> (Bar)	3	0,8

4.3 Uji Asumsi MANOVA

Uji Asumsi merupakan prasyarat penting untuk memastikan validitas hasil analisis statistik. Jika data tidak memenuhi salah satu atau lebih dari asumsi-asumsi ini, maka hasil analisis statistik yang dihasilkan mungkin menjadi tidak dapat diandalkan (Asfihan, 2021).

1. Uji Normalitas Varians (Univariat)

Uji normalitas dilakukan menggunakan Shapiro-Wilk test untuk masing-masing variabel dependen pada setiap level faktor, karena jumlah sampel per grup kecil dan desain faktorial tidak memungkinkan pengujian secara keseluruhan langsung. Uji normalitas dilakukan menggunakan Shapiro-Wilk test untuk masing-masing variabel dependen pada setiap level faktor, karena jumlah sampel per grup kecil dan desain faktorial tidak memungkinkan pengujian secara keseluruhan langsung.

Berdasarkan hasil uji normalitas menggunakan Shapiro-Wilk, diketahui bahwa secara umum variabel dependen Y1 (waktu pemotongan) dan Y2 (akurasi dimensi) memiliki distribusi data yang normal pada sebagian besar level dari ketiga faktor bebas, yaitu kecepatan potong, jarak ketinggian laser, dan tekanan gas. Namun, terdapat satu pengecualian pada variabel Y1 di level kecepatan Potong = 2.0, yang menunjukkan nilai signifikansi di bawah 0,05 ($p = 0,035$), sehingga tidak memenuhi asumsi normalitas pada level tersebut. Meskipun demikian, pelanggaran ini tergolong ringan dan masih dapat ditoleransi mengingat jumlah data per kelompok kecil ($n = 3$), serta analisis MANOVA pada umumnya cukup tahan terhadap pelanggaran normalitas yang sedang, maka untuk sementara analisis akan tetap dilanjutkan (Centre, n.d.), khususnya jika asumsi lain seperti homogenitas varians dan kovarians terpenuhi. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa asumsi normalitas secara umum terpenuhi dan analisis dapat dilanjutkan.

2. Uji Homogenitas Varians

Data hasil pengukuran efisiensi waktu dan akurasi dimensi dari perlakuan berbagai kombinasi parameter pada mesin CNC laser cutting dilakukan uji homogenitas varians untuk memastikan bahwa

varians antar kelompok perlakuan adalah seragam (homogen). Dengan dasar pengambilan keputusannya ialah apabila nilai signifikansi $< 0,05$, maka varian dari dua atau lebih kelompok populasi data adalah tidak sama (tidak homogen) dan jika signifikansi $> 0,05$, maka varian dari dua atau lebih kelompok populasi data adalah sama (homogen).

Tabel 12. Uji Homogenitas Varians

Variabel X	Y1 Levene Statistic	df1	df2	Sig.	Y2 Levene Statistic	df1	df2	Sig.
A	1.447	2	6	0,307	1.702	2	6	0,260
B	0.610	2	6	0,574	5.171	2	6	0,049
C	1.604	2	6	0,402	0.627	2	6	0,566

Berdasarkan Tabel 12, diketahui bahwa nilai signifikansi (Sig.) untuk hampir seluruh kombinasi faktor dan variabel dependen berada di atas 0,05. Hal ini menunjukkan bahwa varians antar kelompok data dapat dianggap homogen, sehingga asumsi homogenitas terpenuhi. Namun, terdapat satu pengecualian pada variabel Y2 terhadap faktor B, di mana nilai signifikansinya sebesar 0,049, sedikit di bawah batas 0,05. Hal ini mengindikasikan bahwa pada kombinasi tersebut, varians antar kelompok tidak homogen. Meskipun demikian, karena ukuran sampel tergolong kecil dan pelanggaran ini hanya terjadi pada satu kombinasi, maka kondisi ini masih dapat ditoleransi. MANOVA pada umumnya cukup tahan terhadap pelanggaran normalitas yang sedang, maka untuk sementara analisis akan tetap dilanjutkan (Centre, n.d.).

4.4 Analisis Hasil Uji MANOVA

Analisis *Multivariate Analysis of Variance* (MANOVA) dilakukan untuk mengetahui pengaruh simultan dari faktor A, B, dan C terhadap kombinasi variabel dependen. Hasil pengujian multivariat dapat dilihat pada Tabel 13 berikut.

Tabel 13. Hasil Uji MANOVA

Effect	Uji	Value	F	Hypothesis df	Error df	Sig.	Partial Eta Squared
Intercept		0,000	89076208.344 ^b	2,000	1,000	0,000	1,000
A	Wilks'	0,000	159.528 ^b	4,000	2,000	0,006	0,997
B	Lambda	0,000	62.769 ^b	4,000	2,000	0,016	0,992
C		0,000	49.452 ^b	4,000	2,000	0,020	0,990

Berdasarkan Tabel 13 diatas hasil pengujian multivariat menggunakan statistik Wilks' Lambda, hipotesis untuk pengujian tersebut adalah :

- H_0 : Tidak terdapat pengaruh yang signifikan dari faktor kecepatan potong, jarak ketinggian laser, dan tekanan gas terhadap efisiensi waktu dan akurasi dimensi hasil pemotongan pada mesin CNC laser *cutting*.
- H_1 : Terdapat pengaruh yang signifikan dari setidaknya salah satu faktor, yaitu kecepatan potong, jarak ketinggian laser, atau tekanan gas terhadap efisiensi waktu dan/atau akurasi dimensi hasil pemotongan pada mesin CNC laser *cutting*.

Berdasarkan Tabel 13 diatas hasil pengujian multivariat menggunakan statistik Wilks' Lambda, diperoleh nilai signifikansi untuk ketiga faktor berada di bawah taraf signifikansi 0,05, yaitu Faktor A (kecepatan potong) dengan nilai signifikansi sebesar 0,006, faktor B (jarak ketinggian laser) dengan nilai signifikansi sebesar 0,016, faktor C (tekanan gas) dengan nilai signifikansi sebesar 0,020. Dikarenakan semua nilai Sig. $< 0,05$ maka H_0 ditolak yang artinya terdapat pengaruh yang signifikan dari setidaknya salah satu faktor, yaitu

kecepatan potong, jarak ketinggian laser, atau tekanan gas terhadap efisiensi waktu dan/atau akurasi dimensi hasil pemotongan pada mesin CNC laser *cutting*. Hal ini diperkuat oleh nilai F yang tinggi dan nilai Partial Eta Squared yang mendekati 1, yaitu 0,997 untuk faktor A, 0,992 untuk faktor B, dan 0,990 untuk faktor C, yang berarti masing-masing faktor memberikan kontribusi pengaruh yang besar terhadap variabel dependen secara simultan.

5. SIMPULAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kombinasi parameter proses paling optimal untuk meminimalkan waktu pemotongan sekaligus menjaga akurasi dimensi pada proses pemotongan laser CNC terhadap material SS400 dengan ketebalan 2 mm diperoleh pada pengaturan kecepatan potong sebesar 1,8 m/min, jarak ketinggian laser sebesar 0,8 mm, dan tekanan gas sebesar 0,8 bar. Kombinasi ini dipilih berdasarkan hasil analisis *Grey Relational Grade* (GRG) yang menghasilkan nilai tertinggi, menunjukkan performa terbaik dalam hal efisiensi waktu dan ketepatan dimensi.

Selain itu, berdasarkan hasil uji MANOVA multivariat, ketiga parameter proses kecepatan potong, jarak ketinggian laser, dan tekanan gas terbukti secara simultan memberikan pengaruh signifikan terhadap kombinasi variabel dependen, yaitu efisiensi waktu dan akurasi dimensi, dengan nilai signifikansi masing-masing 0,006; 0,016; dan 0,020 ($p < 0,05$). Nilai Partial Eta Squared yang mendekati 1 menunjukkan bahwa kontribusi pengaruh masing-masing parameter sangat besar. Namun, hasil uji MANOVA univariat menunjukkan bahwa pengaruh signifikan hanya ditemukan terhadap efisiensi waktu, sedangkan terhadap akurasi dimensi tidak terdapat pengaruh yang signifikan. Hal ini mengindikasikan bahwa variasi parameter proses lebih berdampak pada peningkatan efisiensi waktu pemotongan dibandingkan pada peningkatan akurasi dimensi hasil potong. Penelitian lanjutan dapat diarahkan pada optimasi parameter untuk meningkatkan akurasi dimensi secara spesifik atau pada optimasi multi-respon yang melibatkan efisiensi waktu, akurasi dimensi, dan kualitas permukaan. Kedua pendekatan ini diharapkan mampu memberikan kontribusi ilmiah yang lebih komprehensif dan relevan terhadap kebutuhan industri laser cutting.

DAFTAR PUSTAKA

- Asfihan, A. (2021). Uji asumsi klasik: jenis-jenis uji asumsi klasik. *Fe Unisma, July*, 1–11.
- Centre, L. (n.d.). *Learning centre*.
- Hayati, N. (2018). optimasi kondisi pirolisis dan pengeringan pada proksimat arang tempurung kelapa dengan metode taguchi. *Simetris*, 12(1), 6–12.
- Hidayat, M. A., Farid, A., & Suwandono, P. (2021). Analisa parameter pada pemotongan plate menggunakan cnc fiber laser cutting terhadap kekasaran permukaan. *Turbo : Jurnal Program Studi Teknik Mesin*, 10(2), 239–247.
- Himawan, D. (2020). Artikel ilmiah. *STIE Perbanas Surabaya*, 101, 0–16.
- Iqbal, M., Salsabila, I., Syahbani, D. A., Douw, J., Marzuki, & Rusyana, A. (2020). Analisis manova satu arah untuk melihat perbedaan status gizi balita berdasarkan wilayah pembangunan utama di indonesia tahun 2017. *Journal of Data Analysis*, 3(1), 50–61.
- Lestari, K., & Susandi, D. (2019). Penerapan lean manufacturing untuk mengidentifikasi waste pada proses produksi kain knitting di lantai produksi pt. xyz. *Prosiding Industrial Research Workshop and National Seminar*, 10(1), 567–575.
- Mulyana, F., Maladzi, R., Matsaany, B., Rizkia, V., & Risfi, M. P. (n.d.). Pengembangan strategi toolpath untuk proses machining plat bipolar pemfc pada mesin cnc 3axis abstrak. 4(1), 858–865.
- Nugraha, A., Pradana, I. W., Nugroho, Y., & Nugroho, A. (2023). Analisis proses laser cutting dengan variasi cutting speed, jarak focusline, dan gas pressure terhadap kekerasan dan kekasaran material ms sphc. *JMPM (Jurnal Material Dan Proses Manufaktur)*, 7(2), 160–169.
- Purnawarman, O., Sambas, A., Rukmana, B., Manufaktur, J. T., & Bandung, P. M. (2024). Optimasi parameter pembubutan pada material aisi 4340. 10(Vc), 10–18.
- R, R., BW, K., & Juniani, A. I. (2016). Optimasi parameter mesin laser cutting terhadap kekasaran dan laju pemotongan pada sus 316l menggunakan taguchi grey relational analysis method. *J@ti Undip : Jurnal Teknik Industri*, 11(2), 97.
- Rajagukguk, K., Aldyansyah, D., Pujiyulianto, E., Muhyi, A., & Paundra, F. (2024). Effect of preheating temperature variation on microstructure and hardness of weld overlay cladding of ss400 carbon steel by smaw method. 24(2), 6–15.
- Sony, S. (2023). Penerapan lean six sigma pada manufaktur industri. *Prosiding Saintek*, 2(1), 406.
- Untari, D. T. (2019). Buku ajar statistik 1.

- Wang, M. W., Arifin, F., Kuo, J. W., & Dzwo, T. H. (2020). Optimal design of plasticizing screw using artificial intelligent approach. *Journal of Physics: Conference Series*, 1500(1).
- Widadi, N., Bahri, M. H., Fathoni, A., & Pn, S. (2023). Pengaruh parameter mesin cnc laser cutting. 9(2), 71–79.