

Optimasi Parameter *Laser Cutting* CO₂ untuk Meminimalkan Kekasaran Permukaan dan Meningkatkan Akurasi Dimensi Material PMMA Menggunakan *Response Surface Methodology*

Muhammad Arif Nur Huda^{1*}, Faradilla Fauziyah Risnawati², Rizkyansyah Alif Hidayatullah³, Nicko Nur Rakhmaddian⁴

^{1,2,3,4}Politeknik Negeri Malang, Malang

*Penulis Korespondensi, email: muhammad.arif@polinema.ac.id

Received: 16/05/2025

Revised: 20/05/2025

Accepted: 22/05/2025

Abstract. Currently, non-conventional cutting technologies, especially energy-based laser cutting, are increasingly used due to their ability to produce smooth, accurate cuts without mechanical cutting forces. One of the most widely applied laser technologies for non-metal cutting is the carbon dioxide (CO₂) laser. CO₂ lasers operate at a wavelength of approximately 10.6 μm , which is effectively absorbed by various polymer and thermoplastic materials, including Polymethyl Methacrylate (PMMA). This study aims to analyze the effect of laser power and cutting speed on surface roughness (Ra) and dimensional accuracy (DA) in CO₂ laser cutting, and to optimize these parameters to minimize surface roughness and improve dimensional accuracy. The method used in this research is Response Surface Methodology (RSM) with a Central Composite Design (CCD) approach. CCD produced 13 experimental combinations consisting of 4 factorial points, 4 axial points, and 5 center point replications. The material used was clear-type Polymethyl Methacrylate (PMMA) or acrylic with a thickness of 3 mm, cut to dimensions of 25 mm $\times$ 25 mm using a 50-watt CO₂ laser cutting CNC machine. The parameter ranges selected were 35%–55% for laser power and 5 mm/s–10 mm/s for cutting speed. The test results showed that both laser power and cutting speed had significant effects on the responses—surface roughness (Ra) and dimensional accuracy (DA)—with cutting speed having the most dominant influence, followed by laser power. Parameter optimization produced the best combination at 45.99% laser power and 6.46 mm/s cutting speed, yielding predicted Ra and DA values of 0.9209 μm and 24.7939 mm, respectively. Validation confirmed that the optimal settings could be used in actual processes, with experimental results of 0.851 μm for Ra and 24.78 mm for DA, showing minimal deviation from the predicted values.

Keywords: CO₂ laser cutting, Surface roughness, Dimensional accuracy, PMMA, Response surface methodology, Laser power, Cutting speed.

Abstrak. Saat ini, teknologi pemotongan non-konvensional, khususnya pemotongan berbasis energi laser, semakin banyak digunakan karena menghasilkan potongan yang halus, akurat dan tanpa ada gaya potong mekanis. Salah satu teknologi laser paling luas diaplikasikan untuk pemotongan non logam adalah laser karbondioksida (CO₂). Laser CO₂ ini bekerja dengan panjang gelombang sekitar 10,6 μm , yang efektif diserap oleh berbagai material polimer dan termoplastik, termasuk Polymethyl Methacrylate (PMMA). Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh daya laser dan kecepatan potong terhadap kekasaran permukaan (Ra) dan akurasi dimensi (DA) pada proses *laser cutting* CO₂, serta mengoptimalkan parameter tersebut untuk meminimalkan kekasaran dan meningkatkan akurasi. Metode yang dipakai dalam penelitian menggunakan *Response Surface Methodology* (RSM) dengan pendekatan *Central Composite Design* (CCD). CCD menghasilkan 13 kombinasi eksperimen yang terdiri dari 4 titik faktorial, 4 titik aksial, dan 5 replikasi di titik pusat. Polymethyl Methacrylate (PMMA) atau akrilik yang digunakan tipe bening dengan ketebalan 3 mm dan dipotong dalam ukuran 25 mm x 25 mm oleh mesin CNC *laser cutting* CO₂ 50 watt. Adapun nilai parameter dipilih 35%-55% untuk daya laser dan 5 mm/s – 10 mm/s untuk kecepatan potong. Hasil pengujian menunjukkan bahwa daya laser dan kecepatan potong berpengaruh signifikan terhadap kedua respon, yaitu kekasaran permukaan (Ra) dan akurasi dimensi (DA), dengan kecepatan potong sebagai faktor yang paling dominan, diikuti oleh daya laser. Optimasi parameter menghasilkan kombinasi terbaik pada daya laser 45,99% dan kecepatan potong 6,46 mm/s, dengan prediksi hasil Ra dan DA adalah 0,9209 μm dan 24,7939 mm. Hasil validasi membuktikan bahwa model dapat digunakan untuk pengaturan proses secara optimal dimana nilai

aktual hasil optimasi didapatkan 0,851 μm untuk nilai Ra dan 24,78 mm untuk nilai DA yang mana nilai tersebut menghasilkan nilai deviasi yang rendah terhadap nilai prediksi.

Kata Kunci: *Laser cutting CO₂*, Kekasaran permukaan, Akurasi dimensi, PMMA, *Respon surface methodology*, Daya laser, Kecepatan potong.

I. PENDAHULUAN

Seiring berkembangnya teknologi dan kompleksitas desain produk, kebutuhan akan metode pemrosesan material yang lebih fleksibel dan akurat pun semakin meningkat. Salah satu tahapan penting dalam proses manufaktur adalah pemotongan material, yang berfungsi untuk membentuk komponen sesuai dengan dimensi dan geometri yang diinginkan. Berbagai teknik pemotongan telah dikembangkan, mulai dari metode konvensional berbasis kontak mekanis hingga metode non-konvensional berbasis energi. Saat ini, teknologi pemotongan non-konvensional, khususnya pemotongan laser, semakin banyak digunakan karena mampu menghasilkan potongan yang halus, akurat, dan tidak ada gaya potong mekanis dikarenakan tidak ada kontak langsung dengan benda kerja [1].

Salah satu teknologi laser yang paling luas diaplikasikan untuk pemotongan material non-logam adalah laser karbondioksida (*CO₂ Laser Cutting*). Laser CO₂ ini bekerja dengan panjang gelombang sekitar 10,6 μm , yang sangat efektif diserap oleh berbagai material termoplastik, termasuk *Polymethyl Methacrylate* (PMMA) [2]. PMMA dikenal sebagai polimer dengan kejernihan yang tinggi, ringan, mudah dibentuk serta memiliki kekuatan dan ketahanan yang tinggi, sehingga banyak digunakan dalam industri otomotif, medis, dan optik [3]. Namun, sifat termoplastiknya membuat PMMA sangat sensitif terhadap panas, sehingga rentan mengalami deformasi termal, peningkatan kekasaran permukaan, serta penurunan akurasi dimensi jika parameter pemotongan tidak dikendalikan dengan baik [4].

Kualitas hasil pemotongan laser pada PMMA sangat bergantung pada parameter proses seperti daya laser, kecepatan potong, tekanan gas bantu, dan jarak antara *nozzle* dengan permukaan material (*standoff distance*). Parameter-parameter ini secara

langsung mempengaruhi kekasaran permukaan (*surface roughness*), lebar *kerf* (*kerf width*), zona terpengaruh panas atau *Heat Affected Zone* (HAZ), dan akurasi dimensi [5], [6], [7]. Sejumlah penelitian telah menunjukkan hubungan signifikan antara parameter-parameter tersebut dan hasil potongan yang diperoleh misalnya Ninikas, dkk menemukan bahwa variasi daya dan kecepatan potong dapat meningkatkan atau menurunkan kualitas permukaan dan akurasi dimensi [8]. Studi oleh Varsi dan Shaikh menambahkan bahwa pemilihan parameter yang tidak tepat dapat menimbulkan deviasi dimensi dan variasi bentuk *kerf* yang signifikan [9]. Khamar & Prakash meneliti akurasi dimensi hasil potongan *laser cutting CO₂* dimana semakin kecil dimensi material maka semakin ukuran aktual semakin tidak akurat dan sebaliknya [10].

Dalam praktik di lapangan, operator mesin *laser cutting CO₂* sering kali dihadapkan pada tantangan dalam menentukan parameter pemotongan yang optimal untuk setiap material tidak terkecuali PMMA. Tantangan tersebut dikarenakan tuntutan dari banyaknya kualitas hasil potongan yang harus tercapai dan harus terkompromi satu sama lain, dengan kata lain tidak saling mengorbankan aspek kualitas satu dengan yang lainnya. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan yang sistematis dan terstruktur dalam mengoptimalkan parameter pemotongan laser. Sementara itu, Groover menjelaskan bahwa untuk memproses material polimer secara termal, dibutuhkan pengendalian parameter proses yang sangat presisi guna menghindari degradasi material [11].

Dalam rangka mengoptimalkan kualitas pemotongan, berbagai pendekatan telah diterapkan. Di antaranya adalah metode Taguchi grey relational analysis dan algoritma metaheuristik seperti *Particle Swarm Optimization* (PSO) dan *Genetic Algorithm* (GA) [5], [6], [12], [13]. Namun demikian, pendekatan statistik berbasis *Response*

Surface Methodology (RSM) menjadi pilihan utama dalam optimasi parameter karena kemampuannya dalam mengevaluasi efek interaksi antar parameter serta efisiensinya dalam jumlah eksperimen [14]. Studi oleh Moradi, dkk dan Elsheikh, dkk menunjukkan bahwa RSM dapat secara efektif mengoptimalkan kekasaran permukaan dan *kerf width* dalam pemotongan PMMA [15]. Khoshaim, dkk mengonfirmasi efektivitas RSM dalam mengontrol parameter-parameter seperti *kerf deviation* dan zona termal [4].

Integrasi RSM dengan metode lain seperti jaringan saraf tiruan atau *Artificial Neural Network* (ANN) dan algoritma genetika juga telah dikaji untuk meningkatkan prediksi dan akurasi model [16], [17]. Kombinasi Taguchi-RSM seperti yang diterapkan oleh Oktatian, dkk dan metode Taguchi-PCR topsis yang dilakukan oleh Nugroho, dkk memungkinkan optimasi simultan terhadap berbagai output dan berhasil mendapatkan parameter *laser cutting* CO₂ yang optimal [5], [18]. Lokesh, dkk juga mendukung pendekatan eksperimental-statistik ini pada berbagai jenis material [19].

Meskipun cukup banyak penelitian mengenai optimasi parameter *laser cutting* dan pengaruhnya, studi yang mengkaji secara simultan pengaruh parameter pemotongan terhadap kekasaran permukaan dan akurasi dimensi PMMA dalam proses laser CO₂ masih terbatas. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan dua parameter utama yakni daya laser dan kecepatan pemotoban terhadap respon kualitas, yaitu kekasaran permukaan dan akurasi dimensi pada proses pemotongan PMMA menggunakan laser CO₂. Metode optimasi yang digunakan adalah *Response Surface Methodology* (RSM) dengan desain eksperimen *Central Composite Design* (CCD). Penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan kombinasi parameter yang optimal dan aplikatif di industri manufaktur presisi.

II. METODOLOGI

Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan parameter pemotongan laser CO₂ terhadap dua

karakteristik kualitas pada material PMMA, yaitu kekasaran permukaan dan akurasi dimensi. Metode yang digunakan adalah *Response Surface Methodology* (RSM) dengan pendekatan *Central Composite Design* (CCD). RSM dipilih karena kemampuannya dalam mengevaluasi efek simultan dari beberapa variabel bebas dan interaksinya terhadap satu atau lebih variabel respon. Seluruh proses analisis dilakukan menggunakan perangkat lunak Minitab 18.

A. Bahan dan alat

Material uji dalam penelitian ini adalah *Polymethyl Methacrylate* (PMMA) atau akrilik tipe bening (*clear*) dengan ketebalan 3 mm. Proses pemotongan dilakukan menggunakan mesin CNC *laser cutting* CO₂ berdaya maksimal 50 Watt, yang memiliki area kerja 60 mm x 40 mm. Mesin *laser cutting* juga dilengkapi dengan gas bantu berupa udara bertekanan dari mini kompressor. Laser CO₂ yang digunakan memiliki panjang gelombang 10,6 μ m.



Gambar 1. CNC laser cutting CO₂ 50 Watt

Alat ukur yang digunakan untuk mengevaluasi hasil potong meliputi: *Surface Roughness Tester* tipe SRT-6210 untuk mengukur kekasaran permukaan (Ra) hasil potong dan jangka sorong digital dengan ketelitian 0,01 mm untuk mengukur dimensi aktual spesimen. Gambar 2 menunjukkan kedua alat ukur yang digunakan dalam penelitian ini.



Gambar 2. (a) *Surface roughness tester*; (b) Jangka sorong digital

B. Variabel dan desain eksperimen

Penelitian ini melibatkan 2 variabel bebas atau 2 parameter dan memiliki rentang nilai parameter yang ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Parameter eksperimen

	PARAMETER	
	<i>Laser Power (A)</i>	<i>Cutting Speed (B)</i>
LOW	35 %	5 mm/s
HIGH	55 %	10 mm/s

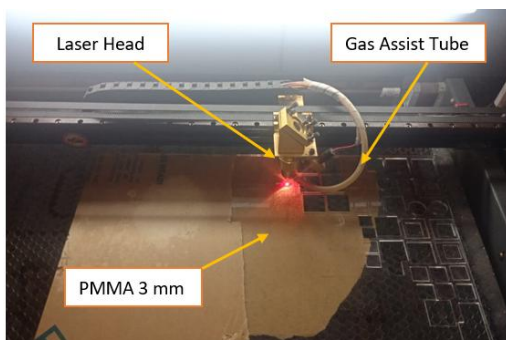
Adapun variabel respon yang akan diamati adalah:

1. Y_1 = Kekasaran permukaan (Ra) [μm],
2. Y_2 = Akurasi Dimensi atau Dimensi Aktual (DA) [mm]

Variabel terkontrol dalam penelitian ini adalah *standoff distance* atau jarak ujung *nozzle* dengan benda kerja dijaga 7 mm.

Desain eksperimen yang digunakan adalah *Central Composite Design* (CCD) dengan 2 faktor dan 2 *level factorial* (*Full Faktorial*). CCD menghasilkan 13 kombinasi eksperimen yang terdiri dari 4 titik faktorial, 4 titik aksial, dan 5 replikasi di titik pusat (*center point*). CCD memungkinkan pemodelan hubungan kuadratik antara parameter proses dan respon. Data hasil eksperimen akan dianalisis menggunakan regresi kuadratik, dilanjutkan dengan analisis varians (ANOVA) untuk mengevaluasi signifikansi model dan masing-masing parameter.

C. Set-up eksperimen

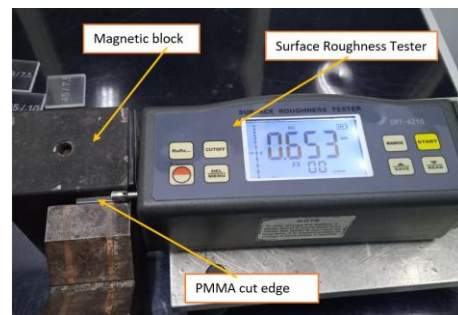


Gambar 3. Konfigurasi pemotongan spesimen dengan mesin laser cutting

Eksperimen dilaksanakan di ruang tertutup dengan ventilasi dan pencahayaan memadai.

Sebelum dilakukan pemotongan, lemparan PMMA dengan ketebalan 3 mm dipotong awal menjadi ukuran 150 mm $\times$ 120 mm. Lemparan tersebut kemudian dipotong lagi menjadi beberapa bagian berukuran 25 mm $\times$ 25 mm menggunakan mesin mesin CNC *laser Cutting* CO₂. Gambar 3 menunjukkan konfigurasi eksperimen dalam penelitian ini.

Pemotongan dilakukan satu per satu berdasarkan kombinasi parameter dari desain eksperimen. Proses dilakukan dalam satu lintasan (*single pass*) untuk menjaga konsistensi energi yang diterima permukaan material. Setelah pemotongan, spesimen dibersihkan kemudian dilakukan pengukuran kekasaran permukaan dan dimensi aktual. Pengukuran dilakukan pada sisi potongan dengan lintasan sepanjang 5 mm, dan hasil Ra diambil dari rata-rata tiga titik ukur berbeda pada setiap spesimen. Pengukuran kekasaran ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Pengukuran kekasaran permukaan hasil potongan

Selanjutnya, dimensi aktual diukur menggunakan jangka sorong digital dengan resolusi 0,01 mm. Pengukuran dimensi dilakukan secara konsisten dari bagian paling atas (*top kerf*) dari setiap spesimen potongan PMMA. Pemilihan area ini didasarkan pada pertimbangan bahwa bagian atas merupakan titik awal interaksi antara sinar laser dan permukaan material, sehingga paling sensitif terhadap variasi parameter proses seperti daya laser dan kecepatan potong.

D. Validasi model

Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil eksperimen aktual pada kombinasi parameter

optimal dengan hasil prediksi dari model regresi. Selisih antara nilai aktual dan prediksi digunakan untuk mengevaluasi keakuratan model. Dimana keakuratan model dinyatakan dalam nilai *error* dan presentase *error*.

E. Tahapan penelitian

Tahapan penelitian dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut.

1. Studi literatur dan identifikasi parameter penting,
2. Penyiapan bahan dan alat,
3. Penentuan rentang dan level variabel,
4. Penyusunan desain eksperimen (CCD),
5. Pemotongan spesimen akrilik dengan mesin CO₂ laser,
6. Pengukuran *Ra* dan deviasi dimensi,
7. Pemodelan dan analisis data (regresi + ANOVA dengan Minitab),
8. Interpretasi hasil
9. Penentuan parameter optimal,
10. Validasi model

Dengan pendekatan ini, diharapkan diperoleh model prediktif yang dapat digunakan untuk menetapkan parameter pemotongan laser CO₂ secara optimal pada material PMMA.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil pengujian design of experiment

Tabel 2. Kombinasi parameter dan nilai respon

	PARAMETER & RESPON				
	<i>Pt Type</i>	<i>Laser power (%)</i>	<i>Cutting Speed (mm/s)</i>	<i>RA (μm)</i>	<i>DA (mm)</i>
1	1	35,0	5,0	0,768	24,77
2	1	55,0	5,0	0,652	24,74
3	1	35,0	10,0	1,295	24,82
4	1	55,0	10,0	1,030	24,79
5	-1	30,9	7,5	1,348	24,82
6	-1	59,1	7,5	0,732	24,77
7	-1	45,0	4,0	0,492	24,74
8	-1	45,0	11,0	1,253	24,83
9	0	45,0	7,5	1,044	24,81
10	0	45,0	7,5	0,987	24,81
11	0	45,0	7,5	1,039	24,81
12	0	45,0	7,5	1,020	24,81
13	0	45,0	7,5	1,181	24,81

Tabel 2 adalah hasil pengujian dari 13 kombinasi parameter berdasarkan rekomendasi dari metode RSM CCD, yang terdiri dari titik pusat, titik aksial, dan titik faktorial. Nilai *Pt Type* menunjukkan jenis titik dalam desain: 1 untuk faktorial, 0 untuk titik pusat, dan ± 1 untuk titik aksial. Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai kekasaran permukaan (*RA*) bervariasi antara 0,492 μm hingga 1,348 μm , sedangkan akurasi dimensi (*DA*) berkisar antara 24,74 mm hingga 24,83 mm. Kombinasi parameter dengan nilai *RA* terendah (0,492 μm) dicapai pada daya laser 45% dan kecepatan potong 4,0 mm/s, sedangkan nilai *DA* tertinggi (24,83 mm) dicapai pada parameter daya 45% dan kecepatan 11,0 mm/s.

Nilai-nilai ini menjadi dasar dalam membangun model regresi dan mengevaluasi pengaruh masing-masing parameter terhadap respon yang diinginkan. Data ini juga digunakan untuk menghasilkan plot permukaan respon dan optimasi parameter menggunakan pendekatan *Response Surface Methodology* (RSM).

B. Pengaruh parameter laser cutting CO₂ terhadap respon *Ra*

Tabel 3. Analisis ANOVA untuk respon nilai kekasaran permukaan (*Ra*)

	PARAMETER STATISTIK				
	<i>D F</i>	<i>Adj SS</i>	<i>Adj MS</i>	<i>F-Value</i>	<i>P-Value</i>
MODEL	5	0,7561	0,1512	18,70	0,001
LINEAR	2	0,6866	0,3433	42,46	0,000
LASER POWER	1	0,196	0,196	24,24	0,002
CUTTING SPEED	1	0,4907	0,4907	60,69	0,000
SQUARE	2	0,064	0,032	3,95	0,071
LASER POWER*LASER POWER	1	0,0010	0,0010	0,13	0,733
CUTTING SPEED*CUTTING SPEED	1	0,0639	0,0639	7,90	0,026
2-WAY INTERACTION	1	0,0056	0,0056	0,69	0,435
LASER POWER*CUTTING SPEED	1	0,0056	0,0056	0,69	0,435

ERROR	7	0,057	0,0080		
LACK-OF-FIT	3	0,0345	0,0115	2,08	0,245
PURE ERROR	4	0,0221	0,0055		
TOTAL	12	0,8127			

Berdasarkan hasil ANOVA pada Tabel 3, parameter daya laser dan kecepatan potong menunjukkan pengaruh signifikan terhadap RA dengan nilai p masing-masing sebesar 0,002 dan 0,000. Efek kuadratik dari *Cutting Speed*² juga signifikan ($p = 0,026$), yang mengindikasikan adanya titik optimum terhadap kecepatan pemotongan. Sementara itu, interaksi antara daya laser dan kecepatan potong tidak signifikan ($p = 0,435$), namun tetap disertakan dalam model untuk menjaga kelengkapan struktur regresi kuadratik.

Tabel 4. Model *summary* untuk respon Ra

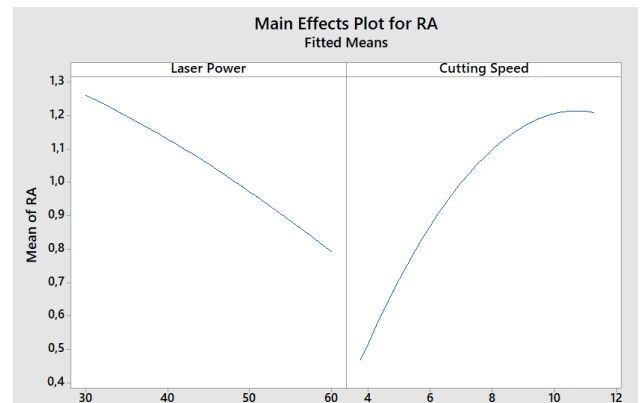
S	R-SQ	R-SQ(ADJ)	R-SQ(PRED)
0,0899	93,04%	88,06%	65,57%

Model regresi kuadratik yang ditunjukkan pada Tabel 4 yang dibentuk untuk respon RA dinyatakan signifikan secara statistik, dengan nilai R^2 sebesar 93,04%, R^2 adj sebesar 88,06%, dan R^2 pred sebesar 65,57%. Hal ini menunjukkan bahwa model memiliki kemampuan cukup baik dalam menjelaskan variasi kekasaran permukaan serta mampu melakukan prediksi dengan tingkat akurasi yang cukup atau sedang. Model regresi untuk RA dalam satuan tidak tersandikan dirumuskan pada Rumus 1 sebagai berikut.

$$RA = -0,595 + 0,0064 \times \text{Laser Power} + 0,396 \times \text{Cutting Speed} - 0,000121 \times \text{Laser Power}^2 - 0,01534 \times \text{Cutting Speed}^2 - 0,00149 \times \text{Laser Power} \times \text{Cutting Speed} \quad (1)$$

Gambar 5 menunjukkan *main effects plot* untuk kekasaran permukaan (Ra), yang menggambarkan pengaruh masing-masing parameter secara individual dalam rentang daya laser 30,9% hingga

59,1% dan kecepatan potong 4 mm/s hingga 11 mm/s. Terlihat bahwa peningkatan daya laser secara konsisten menurunkan nilai Ra. Hal ini menunjukkan bahwa semakin tinggi daya laser yang digunakan, semakin halus permukaan potongan yang dihasilkan. Penurunan kekasaran ini disebabkan oleh meningkatnya densitas energi yang diterima material, yang mempercepat proses pelelehan dan penguapan. Akibatnya, material dapat terpotong dengan lebih bersih dan menghasilkan tekstur permukaan yang lebih halus.



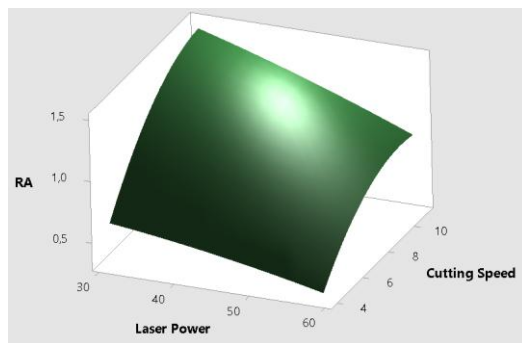
Gambar 5. Pengaruh utama parameter terhadap nilai Ra

Sebaliknya, peningkatan kecepatan potong menunjukkan tren kenaikan terhadap kekasaran permukaan. Pada kecepatan yang lebih tinggi, waktu interaksi antara sinar laser dan permukaan material menjadi lebih singkat, sehingga proses pelelehan tidak berlangsung optimal. Hal ini menyebabkan material tidak sepenuhnya meleleh atau menguap, melainkan terpotong dalam kondisi setengah cair, menghasilkan permukaan dengan tekstur lebih kasar.

Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian oleh Ninikas, dkk, yang melaporkan bahwa kecepatan potong memiliki pengaruh yang signifikan terhadap nilai Ra, dan bahwa kombinasi kecepatan tinggi dan daya rendah menghasilkan kekasaran tertinggi pada potongan PMMA tipis [8]. Studi oleh Khoshaim, dkk juga menunjukkan bahwa peningkatan daya laser secara terkontrol mampu memperhalus permukaan potongan, karena peningkatan energi termal membantu mencairkan material dengan lebih

merata dan mengurangi terjadinya striasi pada permukaan [4].

Namun, temuan ini bertentangan dengan hasil studi Haddadi et al., yang dalam pemotongan laser CO₂ pada material polistirena (PS) melaporkan bahwa peningkatan kecepatan potong justru menghasilkan permukaan potong yang lebih bersih dan nilai kekasaran yang lebih rendah [7]. Mereka menjelaskan bahwa peningkatan kecepatan memperpendek waktu interaksi antara sinar laser dan permukaan material, sehingga zona terpengaruh panas (HAZ) menjadi lebih sempit dan permukaan potongan lebih halus. Perbedaan ini kemungkinan besar disebabkan oleh perbedaan karakteristik termal material, ketebalan spesimen, serta sistem optik dan parameter proses yang digunakan.



Gambar 6. *Surface plot* hubungan parameter terhadap respon Ra

Gambar 6 menampilkan *surface plot* yang merepresentasikan kombinasi antara daya laser dan kecepatan potong terhadap nilai kekasaran permukaan (Ra). Tampak bahwa permukaan plot membentuk kontur cembung yang mengarah pada titik minimum di area daya laser tinggi dan kecepatan potong rendah. Nilai Ra terendah, mendekati 0,49 μm , tercapai pada kombinasi parameter di sekitar 59% daya laser dan kecepatan potong 4–5 mm/s. Area ini terlihat sebagai zona gelap dengan gradasi permukaan yang landai, mengindikasikan kestabilan kekasaran rendah pada kisaran tersebut. Nilai kekasaran minimum (Ra) dapat didapatkan melalui nilai kombinasi parameter dengan nilai *laser power* terbesar dan *cutting speed* terendah yakni 59,41% dan 3,94 mm/s.

Hasil ini sejalan dengan studi Oktatian, dkk dan Satyawardhana, dkk, yang masing-masing menerapkan metode Taguchi dan Taguchi-Grey untuk mengoptimalkan parameter pemotongan akrilik, dan melaporkan bahwa daya tinggi dan kecepatan sedang atau rendah menghasilkan nilai kekasaran minimum [5]. Hal ini mendukung observasi dalam penelitian ini, di mana nilai Ra terendah (sekitar 0,49 μm) diperoleh pada kombinasi daya laser tinggi dan kecepatan potong rendah.

C. Pengaruh parameter laser cutting CO₂ terhadap respon DA

Berdasarkan hasil ANOVA terhadap respon DA, baik *laser power* maupun *cutting speed* memberikan pengaruh yang signifikan secara statistik dengan nilai $p = 0,000$ untuk keduanya. Selain itu, efek kuadrat dari *laser power*² dan *cutting speed*² juga signifikan, masing-masing dengan nilai $p = 0,005$ dan $0,001$.

Tabel 5. Analisis ANOVA untuk respon nilai akurasi dimensi (DA)

	PARAMETER STATISTIK				
	D F	Adj SS	Adj MS	F- Value	P- Value
MODEL	5	0,0106	0,0021	48,35	0,00
LINEAR	2	0,0086	0,0043	97,85	0,00
LASER POWER	1	0,0021	0,0021	48,64	0,00
CUTTING SPEED	1	0,0065	0,0065	147,06	0,00
SQUARE	2	0,0020	0,0010	23,04	0,001
LASER POWER*LASER POWER	1	0,0007	0,0007	15,84	0,005
CUTTING SPEED*CUTTING SPEED	1	0,0016	0,0016	35,65	0,001
2-WAY INTERACTION	1	0,0000	0,0000	0,00	1,000
LASER POWER*CUTTING SPEED	1	0,0000	0,0000	0,00	1,000
ERROR	7	0,0003	0,0000		
LACK-OF-FIT	3	0,0003	0,0001	*	*
PURE ERROR	4	0,0000	0,0000		
TOTAL	12	0,0109			

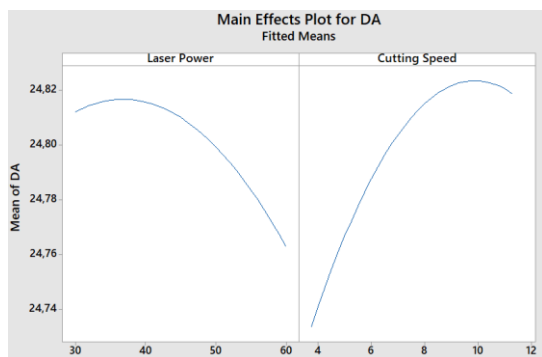
Dari Tabel 5 dapat diketahui juga bahwa interaksi dua arah antara *laser power* dan *cutting speed* (*laser power*cutting speed*) tidak menunjukkan pengaruh yang signifikan terhadap kekasaran permukaan (DA), ditunjukkan oleh nilai F sebesar 0,00 dan *P-value* sebesar 1,000. Hal ini mengindikasikan bahwa perubahan nilai DA lebih dominan dipengaruhi oleh efek masing-masing parameter secara individu (*main effect*), bukan dari kombinasi atau interaksi keduanya secara simultan.

Tabel 6. Model summary untuk respon DA

S	R-SQ	R-SQ(ADJ)	R-SQ(PRED)
0,00663	97,19%	95,18%	79,99%

Model regresi kuadratik untuk respon DA pada Tabel 6 juga menunjukkan performa yang tinggi, dengan nilai R^2 sebesar 97,19%, R^2 adj sebesar 95,18%, dan R^2 pred sebesar 79,99%. Model ini cukup baik dalam memprediksi variasi dan tren akurasi dimensi terhadap perubahan parameter pemotongan. Model regresi untuk DA dalam satuan tidak tersandikan adalah:

$$DA = 24,4608 + 0,00737 \times \text{Laser Power} + 0,04736 \times \text{Cutting Speed} - 0,000100 \times \text{Laser Power}^2 - 0,002400 \times \text{Cutting Speed}^2 \quad (2)$$



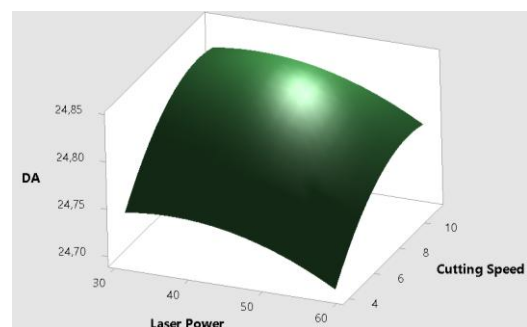
Gambar 7. Pengaruh utama parameter terhadap respon DA

Gambar 7 menyajikan grafik efek utama (*main effects plot*) dari dua parameter proses, yaitu *laser power* dan *cutting speed*, terhadap respon *Dimensional Accuracy* (DA). Kurva menunjukkan

bahwa pengaruh kedua parameter bersifat non-linear. Akurasi dimensi cenderung meningkat dengan kenaikan *laser power* hingga mencapai titik maksimum pada kisaran 35–40 W, sebelum kemudian menurun seiring bertambahnya daya. Penurunan ini kemungkinan besar disebabkan oleh akumulasi energi termal yang berlebihan, yang memperluas zona terpengaruh panas (*heat affected zone*) dan memperbesar *kerf*, sehingga mengurangi ketepatan dimensi.

Sementara itu, peningkatan *cutting speed* menunjukkan tren peningkatan akurasi dimensi hingga mendekati 10 mm/s. Kecepatan potong yang lebih tinggi cenderung memperpendek waktu interaksi antara sinar laser dan material, sehingga mengurangi distorsi termal yang memengaruhi hasil potong. Namun, pada kecepatan ekstrem, akurasi dapat kembali menurun karena energi yang dihantarkan menjadi tidak cukup untuk menyempurnakan pemotongan.

Temuan ini sejalan dengan penelitian oleh Khamar dan Prakash, yang melaporkan bahwa peningkatan daya laser dapat menurunkan akurasi dimensi PMMA karena perluasan kerf akibat pelelehan termal [10]. Penelitian mereka menunjukkan bahwa pada daya tinggi, nilai deviasi dimensi cenderung meningkat, terutama pada material dengan ketebalan menengah hingga besar. Hasil serupa juga diperoleh oleh Varsi dan Shaikh, yang menemukan bahwa parameter proses berpengaruh terhadap *kerf taper angle*, dan bahwa pengaturan daya yang tidak tepat menyebabkan penyebaran panas yang mengganggu kestabilan bentuk potongan [9].

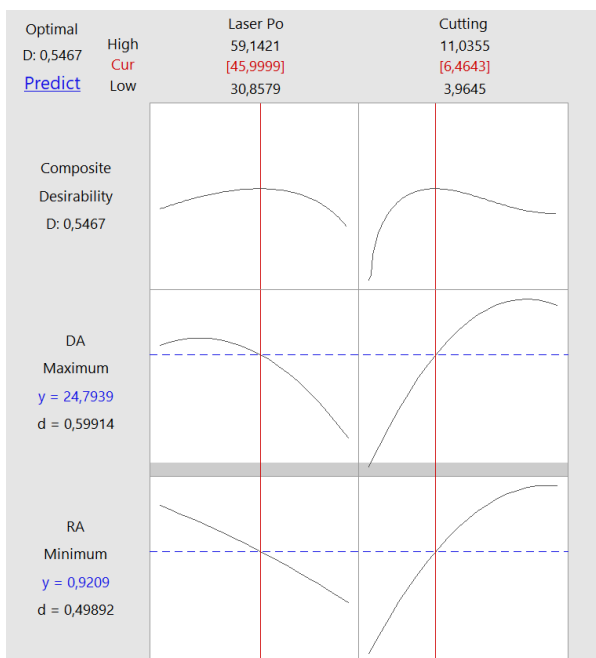


Gambar 8. Surface plot hubungan parameter terhadap respon DA

Pada Gambar 8 juga disajikan permukaan respon (*response surface plot*) 3 dimensi untuk mengetahui hubungan simultan antara *laser power* dan *cutting speed* terhadap akurasi dimensi. Permukaan yang terbentuk menunjukkan adanya pengaruh kuadratik dari kedua parameter terhadap nilai DA. Titik puncak pada permukaan mengindikasikan bahwa kombinasi *laser power* yang relatif rendah dengan *cutting speed* tinggi memberikan nilai akurasi dimensi tertinggi. Nilai akurasi dimensi paling optimal atau maksimum didapatkan melalui kombinasi dengan pengaturan *laser power* sebesar 36,86 % dan *cutting speed* sekitar 9,9 mm/s.

Karakteristik permukaan yang cembung menunjukkan bahwa hubungan antara parameter dan respon tidak bersifat linier, serta adanya interaksi parameter yang membentuk zona optimasi. Pola ini sejalan dengan model regresi kuadratik yang diperoleh, yang menunjukkan kontribusi signifikan dari komponen linier maupun kuadratik terhadap variabilitas respon. Dengan demikian, pemilihan parameter proses secara hati-hati sangat penting untuk memaksimalkan kualitas pemotongan dari segi presisi dimensi.

D. Optimasi multirespon dan validasi



Gambar 9. Plot optimasi multirespon

Optimasi multi-respon dilakukan untuk mengakomodasi respon terbaik dari kedua variabel respon yakni dengan tujuan memaksimalkan akurasi dimensi (DA) dan meminimalkan kekasaran permukaan (Ra). Berdasarkan hasil perhitungan *desirability function*, yang ditunjukkan pada Gambar 9 diperoleh kombinasi parameter optimal pada *laser power* sebesar 45,99% dan *cutting speed* sebesar 6,46 mm/s. Kombinasi ini menghasilkan nilai prediksi respon DA (maksimum)= 24,794 mm; RA (minimum)= 0,9203 μ m; *composite desirability* = 0,5467. Nilai *desirability* total yang mendekati 1 menunjukkan bahwa kompromi antara kedua tujuan respon telah tercapai secara efektif.

Sebagai bagian dari validasi model, dilakukan eksperimen tambahan menggunakan parameter optimal tersebut. Hasil aktual dari eksperimen validasi menunjukkan: DA aktual= 24,78 mm dan RA aktual= 0,851 μ m. Jika dibandingkan dengan nilai prediksi model, nilai aktual baik DA dan RA cenderung dibawah nilai prediksi optimasi serta deviasi hasil validasi terhadap model termasuk kecil dimana Deviasi RA= 0,0693 μ m dan Deviasi DA = 0,014 mm. Nilai ini membuktikan bahwa model regresi yang dibentuk melalui RSM memiliki kemampuan prediktif yang cukup baik serta mampu memberikan estimasi yang akurat terhadap nilai respon pada kondisi optimal.

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil analisis ANOVA, dapat disimpulkan bahwa parameter daya laser dan kecepatan potong memberikan pengaruh signifikan terhadap kedua respon kualitas yang diamati, yaitu kekasaran permukaan (Ra) dan akurasi dimensi (DA). Pada respon Ra, kecepatan potong memiliki pengaruh paling dominan (*p-value* = 0,000), diikuti oleh daya laser (*p-value* = 0,002), sedangkan interaksi keduanya tidak signifikan yang artinya pengaruh dominan hanya dari masing-masing parameter. Peningkatan daya laser secara umum menurunkan kekasaran permukaan, sedangkan peningkatan kecepatan potong justru meningkatkan nilai kekasaran. Sebaliknya, pada respon DA, baik daya laser maupun kecepatan potong menunjukkan

pengaruh sangat signifikan terhadap akurasi dimensi ($p < 0,005$), dengan tren bahwa daya rendah dan kecepatan tinggi menghasilkan ketelitian dimensi terbaik.

Hasil optimasi terbaik diperoleh pada kombinasi daya laser sebesar 45,99% dan kecepatan potong 6,46 mm/s, dengan nilai aktual hasil eksperimen sebesar 0,851 untuk Ra dan 24,78 untuk DA. Hasil validasi menunjukkan bahwa model mampu merepresentasikan kondisi nyata dengan tingkat kesalahan yang sangat kecil, sehingga dapat digunakan sebagai referensi optimasi dalam aplikasi industri pemotongan presisi berbasis CO₂ laser.

Sebagai saran untuk penelitian selanjutnya, disarankan untuk menambahkan variabel proses lainnya seperti tekanan gas bantu, posisi fokus, atau jenis lensa untuk memperoleh gambaran yang lebih komprehensif. Selain itu, integrasi metode optimasi lanjutan seperti algoritma metaheuristik (misalnya *genetic algorithm*, *particle swarm optimization*) atau pendekatan berbasis *Artificial Neural Network* (ANN) dapat digunakan untuk meningkatkan kapabilitas prediktif dan optimasi model, terutama dalam permasalahan multi-respon dan parameter non-linier kompleks.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Malang atas dukungannya dalam memfasilitasi penelitian ini sehingga penelitian ini dapat terselesaikan dengan baik.

REFERENSI

- [1] I. A. Choudhury and S. Shirley, "Laser cutting of polymeric materials: An experimental investigation," *Opt. Laser Technol.*, vol. 42, no. 3, pp. 503–508, 2010, doi: 10.1016/j.optlastec.2009.09.006.
- [2] I. Bilican and M. Tahsin Guler, "Assessment of PMMA and polystyrene based microfluidic chips fabricated using CO₂ laser machining," *Appl. Surf. Sci.*, vol. 534, no. July, p. 147642, 2020, doi: 10.1016/j.apsusc.2020.147642.
- [3] S. Babo *et al.*, "Correction to: Characterization and long-term stability of historical pmma: Impact of additives and acrylic sheet industrial production processes (Polymers 2020, 12, 2198)," *Polymers (Basel)*, vol. 13, no. 23, 2021, doi: 10.3390/polym13234105.
- [4] A. B. Khoshaim, A. H. Elsheikh, E. B. Moustafa, M. Basha, and E. A. Showaib, "Experimental investigation on laser cutting of PMMA sheets: Effects of process factors on kerf characteristics," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 11, pp. 235–246, 2021, doi: 10.1016/j.jmrt.2021.01.012.
- [5] E. Oktatian, C. N. Rosyidi, E. Pujiyanto, and E. M. Oktatian, "Optimization of CNC CO₂ Laser Cutting Process Parameters on Acrylic Cutting Using Taguchi Grey Relational Analysis and Response Surface Methodology," 2021, [Online]. Available: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1048691/v1>
- [6] N. Satyawardhana, M. S. Y. Lubis, and Rosehan, "Optimasi Parameter Proses Laser Cutting Terhadap Kekasaran Permukaan Material Acrylic type Clear Dengan Menggunakan Metode Taguchi," *J. Univ. Islam Sumatera Utara*, vol. 1, no. 2, pp. 5–10, 2022, [Online]. Available: <https://jurnal.uisu.ac.id/index.php/semnastek/article/view/5623>
- [7] E. Haddadi, M. Moradi, A. Karimzad Ghavidel, A. Karimzad Ghavidel, and S. Meiabadi, "Experimental and parametric evaluation of cut quality characteristics in CO₂ laser cutting of polystyrene," *Optik (Stuttg.)*, vol. 184, no. March, pp. 103–114, 2019, doi: 10.1016/j.ijleo.2019.03.040.
- [8] K. Ninikas, J. Kechagias, and K. Salonitis, "The impact of process parameters on surface roughness and dimensional accuracy during CO₂ laser cutting of PMMA thin sheets," *J. Manuf. Mater. Process.*, vol. 5, no. 3, 2021, doi: 10.3390/jmmp5030074.
- [9] A. M. Varsi and A. H. Shaikh, "Experimental and statistical study on kerf taper angle during CO₂ laser cutting of thermoplastic material," *J. Laser Appl.*, vol. 31, no. 3, 2019, doi: 10.2351/1.5087846.
- [10] P. Khamar and S. Prakash, "Investigation of dimensional accuracy in CO₂ laser cutting of PMMA," *Mater. Today Proc.*, vol. 28, no.

xxxx, pp. 2381–2386, 2020, doi:
10.1016/j.matpr.2020.04.711.

(*Jurnal Mater. dan Proses Manufaktur*), vol. 2,
no. 2, pp. 75–82, 2018, doi:
10.18196/jmpm.2223.

- [11] M. P. Groover, *FUNDAMENTALS OF MODERN MANUFACTURING: Materials, Processes, and Systems 5th Edition*, Fifth Edit. Hoboken: Wiley, 2013.
- [12] Y. Ngadiyono, D. A. Saputra, B. R. Setiadi, and P. Pardjono, “Taguchi’s Method for Optimum Cutting of Acrylic Materials on a 40-Watt CNC Laser Cutting Machine,” *TEM J.*, vol. 14, no. 1, pp. 933–939, 2025, doi: 10.18421/TEM141-82.
- [13] S. Ürgün, H. Yiğit, S. Fidan, and T. Sınmazçelik, “Optimization of Laser Cutting Parameters for PMMA Using Metaheuristic Algorithms,” *Arab. J. Sci. Eng.*, vol. 49, no. 9, pp. 12333–12355, 2024, doi: 10.1007/s13369-023-08627-6.
- [14] H. K. Hasan, “Analysis of the effecting parameters on laser cutting process by using response surface methodology (RSM) method,” *J. Achiev. Mater. Manuf. Eng.*, vol. 110, no. 2, pp. 59–66, 2022, doi: 10.5604/01.3001.0015.7044.
- [15] M. Moradi *et al.*, “Capability Enhancing of CO₂ Laser Cutting for PMMA Sheet Using Statistical Modeling and Optimization,” *Appl. Sci.*, vol. 13, no. 23, 2023, doi: 10.3390/app132312601.
- [16] J. D. Kechagias, K. Ninikas, P. Stavropoulos, and K. Salonitis, “A Generalised Approach on Kerf Geometry Prediction during CO₂ Laser cut of PMMA Thin Plates using Neural Networks,” *Lasers Manuf. Mater. Process.*, vol. 8, no. 3, pp. 372–393, 2021, doi: 10.1007/s40516-021-00152-4.
- [17] J. D. Kechagias, N. A. Fountas, K. Ninikas, and N. M. Vaxevanidis, “Kerf Geometry and Surface Roughness Optimization in CO₂ Laser Processing of FFF Plates Utilizing Neural Networks and Genetic Algorithms Approaches,” *J. Manuf. Mater. Process.*, vol. 7, no. 2, 2023, doi: 10.3390/jmmp7020077.
- [18] A. Nugroho, A. Setya Utama, and C. Budiyanoro, “Optimasi Keakuratan Dimensi dan Kekasaran Permukaan Potong Material Akrilik dengan Proses Laser Menggunakan Metode Taguchi dan PCR-TOPSIS,” *JMPM*
- [19] S. Lokesh, J. Nireesh, S. Neelakrishnan, and S. P. Deepak Rahul, “Optimisation of Cutting Parameters of Composite Material Laser Cutting Process by Taguchi Method,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 324, no. 1, 2018, doi: 10.1088/1757-899X/324/1/012054.