

# Optimasi pada Proses Potong Pelat Akrilik 5mm Menggunakan Desktop CNC LASER 6,5 Watt 445nm dengan Metode Taguchi-Grey

Muhammad Arifudin Lukmana<sup>1</sup>, Budhi Martana<sup>2</sup>, Jooned Hendrarsakti<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Program Studi Teknik Mesin Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jakarta  
Email:arifudin@upnvj.ac.id)

## ABSTRACT

Laser cutting process commonly used to cut plate. Desktop CNC LASER Cutter used to fabricate prototype. Laser module used in this research has 6,5 Watt power. Cutting process parameters are cutting speed, laser distance and cooling time. These parameters have three level each. Cutting process optimization is needed in order to minimize surface roughness and cutting precision in dimension of cut object. The material of cut object is black acrylic sheet 5mm thick. Cut specimen shape is rectangle sized 4x1 cm. Experimental design used in this subject is Taguchi-Grey's method with orthogonal matrix  $L_9(3^3)$ . Experimental results are gained from two response which monitored simultaneously. Contributing factors are laser distance cutting speed 42,6%, cooling time 41,67% and cutting speed 2,38%. Laser cutter operational optimization are cutting speed in 60 mm/minute, laser distance in 24 mm and cooling time in 20 seconds.

**Keywords:** optimization, desktop CNC laser, cutting, taguchi-grey

## ABSTRAK

Proses pemotongan dengan LASER banyak digunakan untuk pemotongan pelat. Desktop CNC LASER Cutter digunakan untuk proses fabrikasi purwarupa produk. Modul laser pada penelitian ini berdaya 6,5 Watt. Parameter proses pemotongan yang digunakan adalah kecepatan potong, jarak laser dan lamanya waktu pendinginan. Ketiga parameter tersebut masing-masing memiliki tiga level. Optimasi proses potong diperlukan agar meminimalkan kekasaran permukaan hasil potong dan tingkat presisi dimensi hasil pemotongan. Bahan objek potong yang digunakan adalah lembar akrilik dengan tebal 5 mm berwarna hitam. Spesimen pemotongan berbentuk persegi panjang berukuran 4 x 1 cm. Rancangan percobaan yang digunakan adalah metode Taguchi-Grey dengan matriksortogonal  $L_9(3^3)$ . Hasil percobaan didapatkan dari dua respon yang diamati secara serentak. Faktor-faktor yang berpengaruh adalah jarak laser sebesar 42,6%, pendinginan sebesar 41,67% dan kecepatan potong sebesar 2,38%. Optimasi dalam pengoperasian pemotong laser adalah kecepatan potong pada 60 mm/menit, jarak laser pada 24 mm dan pendinginan pada 20 detik.

**Kata kunci:** optimasi, desktop CNC laser, potong, taguchi-grey

## 1. Pendahuluan

Proses potong pelat merupakan salah satu proses paling penting pada *rapid prototyping*. Pelat adalah benda kerja dengan dimensi tebal berbanding jauh dengan panjang dan lebarnya. Salah satu metode pemotongan yang sering digunakan adalah *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (LASER)*. Jenis laser pada pembahasan ini adalah laser CO<sub>2</sub> berdaya 6,5 Watt dengan panjang gelombang 445 nm. *Computer Numerical Control (CNC)* digunakan untuk mengendalikan gerak laser. Sinar laser yang telah difokuskan akan melelehkan, membakar, menguapkan atau terdorong oleh pancaran gas. Permukaan hasil pemotongan cukup halus. Pemotongan laser tidak terbatas pada pelat atau lembaran, namun juga struktur dan bahan perpipaan.

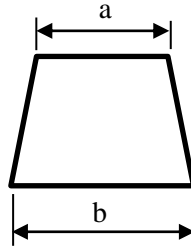
Parameter terpenting dalam permesinan berbasis sinar laser adalah pemantulan dan konduktivitas panas dari permukaan benda kerja, *specific heat* dan panas latent leleh dan penguapan (Kalpakjian, 2009). Semakin rendah nilai-nilai tersebut, maka proses akan semakin efisien. Kedalaman potong dapat dituliskan sebagai berikut

$$t = \frac{CP}{vd} \dots (1)$$

Dimana t adalah kedalaman, C adalah konstanta untuk proses, P adalah *power input*, v adalah kecepatan potong dan d adalah diameter titik sinar laser. Kepadatan energi tertinggi sinar laser bervariasi antara 5 hingga 200 kW/mm<sup>2</sup>. Permukaan permesinan dengan sinar laser biasanya kasar dan memiliki daerah yang dipengaruhi panas / *heat effected zone*. Dimana memiliki pengaruh pada aplikasi kritis. Maka perlu ada proses perlakuan panas lanjutan. Pertimbangan lebar *kerf* juga penting, umum ditemukan pada proses pemotongan, seperti gergaji, *wire EDM*, dan *electron-beam machining*.

Pertimbangan dalam proses permesinan dengan laser:

- Menghindari desain sudut tajam, karena sulit dibuat.
- Pemotongan yang dalam akan menghasilkan permukaan yang miring/ *tapered*.
- Daya pantul permukaan benda kerja merupakan pertimbangan penting, karena jika memantulkan lebih sedikit, permukaan kasar dan tidak dipoles lebih dianjurkan.
- Efek merugikan lainnya terhadap sifat-sifat bahan yang diakibatkan temperatur tinggi lokal dan *heat-affected zone* harus diperiksa.



Gambar1. Pengaturan

Metode Taguchi adalah salah satu metode yang efektif untuk mengendalikan kualitas produk secara *off-line*, yaitu usaha pengendalian atau perbaikan kualitas yang dimulai dari perancangan hingga pemrosesan produk (Soejanto, 2009). Metode Taguchi hanya dapat mengoptimalkan satu respon. Metode lanjutan *grey relation analysis*, *fuzzy logic* dan *respon surface* membuat metode Taguchi dapat digunakan untuk melakukan optimasi terhadap beberapa respon bersamaan.

Variabel tidak bebas atau respon pada penelitian ini adalah kekasaran permukaan dan dimensi *taper*. Variabel bebas atau parameter-parameter proses adalah kecepatan potong, jarak laser dan pendinginan. Rancangan percobaan menggunakan *orthogonal array*  $L_9$ . Metode optimasi multi respon yang akan digunakan adalah Taguchi dengan kombinasi *grey relation analysis*.

## 2. Metode

Padapenelitianini, material yang digunakan adalah *acrylic sheet*/ akrilik denganketebalan 5 mm berwarna hitam solid. *Acrylic sheet* memiliki nama resmi *Poly(methyl methacrylate)* / PMMA adalah sejenis *thermoplastic*. Pola pemotongan berukuran 4x1 cm dengan daerah pengambilan pada panjang 4 cm.

Proses pemotongan dilakukan berulang hingga material terpotongsepenuhnya. Proses pemotongan tidak dapat dilakukan dalam satu kali karena daya laser yang sangat kecil. Kecepatan potong adalah variabel yang diubah, kecepatan potong yang lebih lambat akan memperbesar kedalaman potong sesuai dengan persamaan (1). Titik fokus pada modul laser tidak dapat diubah sehingga variabel jarak laser dibutuhkan. Pemotongan yang dalam dan besarnya *heat affected zone* akibat proses pemotongan berulang, dibutuhkan pendinginan. Pendinginan aktif dengan menggunakan blower kecepatan sedang dan penambahan jeda tiap siklus pemotongan. Parameter proses beserta level yang digunakanselama proses pemotongandengan laser dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel1. Parameter Proses potong laser dengan levelnya

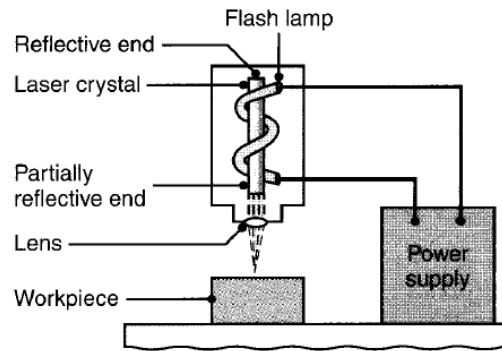
Variabel	Unit	Level		
		1	2	3
Kec. Potong (V)	mm/min	40	60	70
Jarak laser (L)	mm	24	25	26
Pendinginan (C)	detik	0	10	20

Respon yang dapat diamati pada proses adalah kekasaran permukaan hasil potong dan dimensi hasil potong. Pemotongan dengan laser memiliki permukaan yang relatif halus dan efek *tapered*. Terutama laser dengan daya kecil membutuhkan proses potong dilakukan berulang kali agar penetrasi laser mampu memotong benda kerja. Pengukuran dimensi hasil potong adalah bagian atas dan bagian bawah. Dimensi yang kemudian di proses pada perhitungan adalah (b-a), selisih lebar bagian atas dan bagian bawah, seperti pada Gambar 1.

Respon yang diukur pada penelitian ini adalah kekasaran permukaan ( $R_a$  dalam satuan  $\mu m$ ), dan dimensi benda kerja dalam satuan mm. Kekasaran permukaan diukur menggunakan Kosaka Lab Surfcoorder SE300, dimensi benda kerja menggunakan jangka sorong.

Skema peralatan pemotong laser dapat dilihat pada Gambar 2. Rancangan eksperimen adalah matriks ortoghonal  $L_9$  ( $3^3$ ). Replikasi dilakukan sebanyak satu kali untuk masing-masing kombinasi.

Setelah semua data diperoleh, maka proses optimasi dapat dilanjutkan. Berikut adalah langkah-langkah detailnya.



Gambar 2. Pengaturan alat, laser unit, power supply, watt meter dan benda kerja.

### Normalisasi Nilai Rata-rata dari masing-masing Respon

Nilai rata-rata dinormalkan menjadi nilai yang besarnya disesuaikan dengan karakteristik respon yang meliputi semakin besar semakin baik, semakin kecil semakin baik dan tertuju pada nilai tertentu. Persamaan yang digunakan untuk proses normalisasi respon **semakin besar semakin baik** adalah:

$$X_i^*(k) = \frac{X_i(k) - \max_{\forall k} X_i(k)}{\max_{\forall k} X_i(k) - \min_{\forall k} X_i(k)} \dots (2)$$

Persamaan yang digunakan dalam proses normalisasi untuk respon dengan karakteristik **semakin kecil semakin baik** adalah:

$$X_i^*(k) = \frac{\max_{\forall k} X_i(k) - X_i(k)}{\max_{\forall k} X_i(k) - \min_{\forall k} X_i(k)} \dots (3)$$

Persamaan yang digunakan dalam proses normalisasi untuk respon dengan karakteristik **terturu pada nilai tertentu** adalah:

$$X_i^*(k) = 1 - \frac{|X_i(k) - X_{ob}(k)|}{\max_{\forall k} X_i(k) - X_{ob}(k)} \dots (4)$$

Keterangan:

$$\max_{\forall k} X_i(k) = \text{nilai terbesar dari } X_i(k)$$

$$\min_{\forall k} X_i(k) = \text{nilai terkecil dari } X_i(k)$$

$$X_{ob}(k) = \text{nilai terget dari } X_i(k)$$

### Deviation Sequence, Grey Relation Coefficient $\zeta_i(k)$ dan Grey Reasoning Grade (GRG)

Selisih absolut antara nilai maksimum hasil normalisasi yang besarnya 1, dengan data yang telah dinormalisasi adalah *Deviation sequence*  $\Delta_{0,i}(k)$ . Penentuan *deviation sequence* dilakukan dengan persamaan berikut:

$$\Delta_{0,i}(k) = |X_0(k) - X_i^*(k)| \dots (5)$$

*Grey Relational Coefficient (GRC)* menunjukkan hubungan ideal dengan kondisi aktual setelah dinormalisasikan. Persamaan yang digunakan untuk mendapatkan nilai tersebut adalah

$$\zeta_i(k) = \frac{\Delta_{min} + \zeta \Delta_{max}}{\Delta_{0,i}(k) + \zeta \Delta_{max}} \dots (6)$$

dengan:

$$\Delta_{min} = \min_i \min_k \Delta_{0,i}(k)$$

$$\Delta_{max} = \max_i \max_k \Delta_{0,i}(k)$$

$\zeta = \text{distinguishing coefficient}$

Nilai *distinguishing coefficient* yang digunakan umumnya 0,5 [Tosun, 2004]. Nilai *Grey Reasoning Grade (GRG)* yang tinggi menunjukkan bahwa hasil eksperimen memiliki hubungan yang dekat dengan nilai normalisasinya yang terbaik pada respon tersebut. Nilai *GRG* didapatkan dari perhitungan rata-rata dari dua *GRC* yang sudah ada.

### Pemilihan Setting Faktor yang menghasilkan Respon yang Optimal

Semakin besar nilai GRG, semakin baik pula respon dari proses pada kombinasi faktor tersebut. Penentuan kombinasi ditampilkan dalam tabel berikut

Tabel2. Respon Grey Fuzzy Reasoning Grade (GFRG)

	GRG Faktor A	GRG Faktor B	GRG Faktor C
Level 1	$Y_{11}$	$Y_{21}$	$Y_{i1}$
Level 2	-	-	-
Level 3	$Y_{1j}$	$Y_{2j}$	$Y_{ij}$
Max-Min	$Q_A$	$Q_B$	$Q_C$

$Y_{ij}$  adalah rata-rata nilai GRG yang dikelompokkan berdasarkan faktor dan levelnya. Grafik respon dibuat berdasarkan tabel tersebut untuk memudahkan pengamatan besar perubahan.

### ANOVA untuk Melihat Nilai Signifikansi Faktor untuk Menghitung Kontribusi

Analisis ini dilakukan dengan menguraikan seluruh variansi atas bagian-bagian yang diteliti. Pada tahap ini, akan dilakukan pengklasifikasian hasil eksperimen secara statistik sesuai dengan sumber variasi sehingga dapat mengidentifikasi kontribusi faktor. Dengan demikian akurasi perkiraan model dapat ditentukan. Analisis variansi pada matriks ortogonal dilakukan berdasarkan perhitungan jumlah kuadrat untuk masing-masing kolom. Analisis variansi digunakan untuk menganalisis data percobaan yang terdiri dari dua faktor atau lebih dengan dua level atau lebih. Tabel ANOVA terdiri dari perhitungan derajat kebebasan (dof), jumlah kuadrat (*sum of square*, SS), kuadrat tengah (*mean of square*, MS) dan F hitung seperti ditunjukkan pada tabel berikut:

Tabel3. Analisis Variansi dari GRG untuk mendapatkan persentase kontribusi

Sumber variasi	DoF	SS	MS	Fhitung	Persen Kontribusi
Faktor A	$U_A$	$SS_A$	$MS_A$	$F_A$	...%
Faktor B	$U_B$	$SS_B$	$MS_B$	$F_B$	... %
Error	$U_{Error}$	$SS_{Error}$	$MS_{Error}$		... %
Total	$U_T$	$SS_T$			... %

Keterangan:

$U_T$ = derajat bebas total $(N-1) \dots (7)$	$MS_A$ = kuadrat tengah faktor A $= \frac{SS_A}{U_A} \dots (17)$
$U_A$ = derajat bebas faktor A $(K_A-1) \dots (8)$	$MS_B$ = kuadrat tengah faktor B $= \frac{SS_B}{U_B} \dots (18)$
$U_B$ = derajat bebas faktor B $(K_B-1) \dots (9)$	$MS_E$ = kuadrat tengah error $= \frac{SS_E}{U_E} \dots (19)$
$U_{error}$ = derajat bebas error $(U_T - U_A - U_B - U_{AB}) \dots (10)$	$K_A$ = jumlah level faktor A
$T$ = jumlah keseluruhan $(\sum_{i=1}^N Y_i) \dots (11)$	$K_B$ = jumlah level faktor B
$CF$ = faktor koreksi $(T^2/N) \dots (12)$	$N$ = jumlah total percobaan
$SS_T$ = jumlah kuadrat total $\sum_{i=1}^N (Y_i - CF)$ $= \sum_{i=1}^N (Y_i - T)^2 \dots (13)$	$n_{Ai}$ = jumlah total pengamatan faktor A
$SS_A$ = jumlah kuadrat faktor A $\left[ \sum_{i=1}^{k_A} \left( \frac{A_i^2}{n_{Ai}} \right) \right] - CF \dots (14)$	$n_{Bj}$ = jumlah total pengamatan faktor B
$SS_B$ = jumlah kuadrat faktor B $\left[ \sum_{i=1}^{k_B} \left( \frac{B_i^2}{n_{Bi}} \right) \right] - CF \dots (15)$	Fhitung = $MS_i / MS_e \dots (20)$
$SS_{Error}$ = jumlah kuadrat error $= SS_T - SS_A - SS_B - SS_{AB} \dots (16)$	

Persen kontribusi digunakan untuk mengindikasikan kekuatan relatif sebuah faktor untuk mengurangi variasi yang terjadi. Persen kontribusi suatu faktor dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\rho = \frac{SS'_A}{SS_T} \times 100\% \dots (21)$$

$$SS'_A = SS_A - v_A \cdot MS_E \dots (22)$$

### Prediksi dari Kondisi Optimum

Nilai optimum didapatkan dari perhitungan prediksi GRG, menggunakan persamaan:

$$\hat{\mu} = \gamma_m + \sum_{i=1}^O (\hat{\gamma}_i - \gamma_m) \dots (23)$$

Keterangan:

$\gamma_m$  = nilai rata-rata dari keseluruhan GRG

$\hat{\gamma}_i$  = rata-rata GRG pada level optimal

O = jumlah faktor yang mempengaruhi respon secara signifikan

Interval keyakinan (1- $\alpha$ ) 100% untuk kondisi optimum

$$CI_2 = \sqrt{\frac{F_{\alpha;1;v_e} \cdot MS_E}{n_{eff}}} \dots (24)$$

$$\hat{\mu}_{prediksi} - CI_1 \leq \hat{\mu}_{prediksi} \leq \hat{\mu}_{prediksi} + CI_1 \dots (25)$$

Keterangan:

$\hat{\mu}_{prediksi}$  = dugaan rata-rata GFRG

$n_{eff}$  = banyaknya pengamatan efektif

= jumlah total eksperimen / (1 + jumlah derajat kebebasan faktor-faktor untuk menduga rata-rata)  
....(26)

### Percobaan Konfirmasi

Tujuan dari percobaan konfirmasi adalah untuk memvalidasi saat mencocokkan hasil prediksi dengan aktual (Ross, 2008). Perhitungan menggunakan faktor-faktor yang memiliki nilai GRG tertinggi. Jumlah sampel eksperimen konfirmasi harus lebih besar dari jumlah sampel eksperimen awal. Eksperimen konfirmasi dinyatakan berhasil apabila rata-rata hasil eksperimen konfirmasi mendekati rata-rata hasil prediksi dan interval keyakinan bernilai (1- $\alpha$ ) 100% dari rata-rata respon optimum. Interval keyakinan eksperimen konfirmasi dihitung menggunakan persamaan (24) dan (25) berikut:

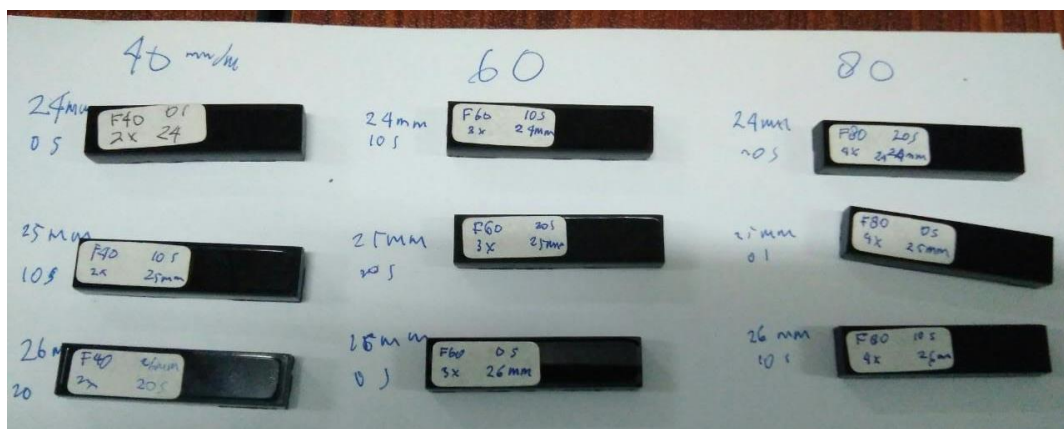
$$CI_2 = \sqrt{F_{\alpha;1;v_e} \cdot MS \left[ \frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{r} \right]} \dots (27)$$

$$\hat{\mu}_{konfirmasi} - CI_2 \leq \hat{\mu}_{konfirmasi} \leq \hat{\mu}_{konfirmasi} + CI_2 \dots (28)$$

Keterangan: r = jumlah pengulangan dalam eksperimen konfirmasi

### 3. Hasil dan Pembahasan

Spesimen yang telah dipotong tampak pada Gambar 3. Hasil pengukuran kekasaran permukaan dan dimensi benda kerja disajikan dalam Tabel 4 di bawah ini.



Gambar 3. Spesimen yang telah dipotong

Tabel4. Hasil pengambilan data kekasaran permukaan dan dimensi spesimen

Perc. Ke	Vc	L	C	Kekasaran (Ra, $\mu\text{m}$ )				Rata-rata	Dimensi atas (mm)		Delta dimensi	Dimensi bawah (mm)		Delta dimensi	Rata-rata delta
1	1	1	1	3,296	2,333	3,353	2,554	<b>2,884</b>	9,8	9,7	0,2	10	10	0,3	<b>0,25</b>
2	1	2	2	2,883	1,224	2,5	3,88	<b>2,622</b>	9,4	9,65	0,6	10	9,75	0,1	<b>0,35</b>
3	1	3	3	3,568	2,834	1,851	2,181	<b>2,608</b>	9,3	9,45	0,65	9,95	10,05	0,6	<b>0,625</b>
4	2	1	2	3,71	2,801	1,769	3,056	<b>2,834</b>	9,65	9,6	0,15	9,8	9,9	0,3	<b>0,225</b>
5	2	2	3	1,689	4,533	2,315	1,965	<b>2,625</b>	9,75	9,8	0,2	9,95	10	0,2	<b>0,2</b>
6	2	3	1	3,037	2,52	2,908	2,677	<b>2,785</b>	9,4	9,5	0,7	10,1	10	0,5	<b>0,6</b>
7	3	1	3	3,645	1,939	2,2	3,128	<b>2,728</b>	9,9	9,8	0,1	10	9,8	0	<b>0,05</b>
8	3	2	1	2,435	4,287	2,864	1,9	<b>2,891</b>	9,8	9,55	0,3	10,1	10	0,45	<b>0,375</b>
9	3	3	2	4,87	2,585	2,628	6,507	<b>4,147</b>	9,6	9,65	0,3	9,9	10,05	0,4	<b>0,35</b>

Proses Normalisasi, *Grey Relational Coefficient (GRC)* dan *Grey Reasoning Grade (GRG)* mengikuti karakteristik semakin kecil semakin baik. Perhitungan mengacu pada persamaan (3), (5) dan (6). Pada nilai *GRG* nilai optimal yang bisa dihitung adalah pada *GRG* tertinggi. Tabel 5 menunjukkan langkah-langkah mendapatkan *GRG* dari data pengukuran kekasaran permukaan dan pengukuran dimensi

Tabel 5. Perhitungan Normalisasi, *Grey Relational Coefficient* dan *Grey Reasoning Grade*

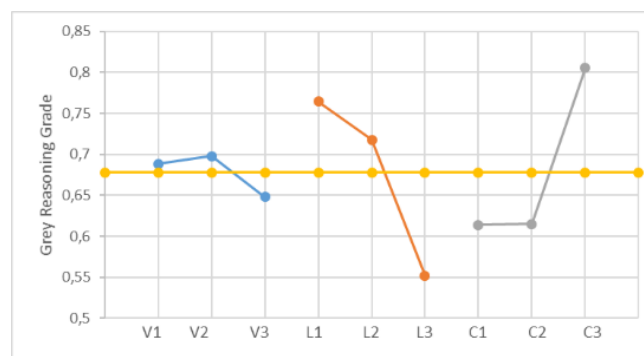
Perc. ke	Ra	dimensi	$x_i$ _Ra	$x_i$ _dimensi	$\Delta$ _Ra	$\Delta$ _dimensi	<i>GRC</i> _Ra	<i>GRC</i> _dimensi	<i>GRG</i>
1	2,8837	0,25	0,821	0,6522	0,179	0,3478	0,736	0,5897	0,6630
2	2,6217	0,35	0,9912	0,4782	0,0088	0,5217	0,9827	0,4893	0,7360
3	2,6082	0,625	1,000	0	0	1,000	1,000	0,3333	0,6667
4	2,8337	0,225	0,8534	0,6956	0,1465	0,3043	0,7734	0,6216	0,6975
5	2,6255	0,2	0,9887	0,7391	0,0112	0,2609	0,978	0,6571	0,8176
6	2,7853	0,6	0,8849	0,0435	0,1151	0,9565	0,8129	0,3432	0,5781
7	2,7279	0,05	0,92227	1,000	0,0777	0	0,8654	1,000	0,9327
8	2,891	0,375	0,8163	0,4347	0,1837	0,5652	0,7313	0,4694	0,6003
9	4,1473	0,35	0	0,4782	1,000	0,5217	0,3333	0,4893	0,4113

### Penentuan Faktor yang Menghasilkan Respon Optimal

Menentukan faktor-faktor untuk respon optimal menggunakan *Grey Fuzzy Reasoning Grade*. Penyajian Respon pada Tabel 6 dan Grafik Respon pada Gambar 4.

Tabel 6. Perhitungan *Grey Reasoning Grade* sesuai dengan Level Variabel.

Level	V	L	C
1	0,6885	0,7644	0,6138
2	0,6977	0,7180	0,61497
3	0,6481	0,5520	0,8057
rank	3	1	2



Gambar 4. Diagram pengaruh variabel terhadap respon secara keseluruhan

Variabel yang memiliki pengaruh terbesar secara berturut-turut adalah Jarak Laser, Pendinginan, dan yang terakhir kecepatan potong. Hasil optimal ditunjukkan dengan nilai persen kontribusi pada Tabel 7 di bawah.

Teori *heat affected zone* dapat diatasi dengan melakukan pendinginan lebih lama. Pada proses pemotongan kedua atau ketiga material lebih tahan terhadap paparan laser sehingga bahan tidak termakan lebih banyak.

Tabel 7. Analisis Variansi dari *Grey Rational Grade*

Sumber variasi	DoF	SS	MS	Fhitung	Persen kontribusi
V (kec. potong)	2	0,00418	0,00209	0,17833	2,380 %
L (jarak laser)	2	0,07481	0,03741	3,19232	42,605 %
C (cooling)	2	0,07317	0,03658	3,12213	41,668 %
Error	2	0,0234	0,01172		13,346 %
Total	8	0,1756			100,000 %

#### 4. Simpulan

Dari hasil eksperimen, proses optimasi dan analisis maka dapat disimpulkan bahwa kontribusi faktor-faktor yang mempengaruhi kualitas hasil potong adalah gerak potong sebesar 2,38 % jarak laser 42,605 % dan pendinginan 41,668 %. Untuk mendapatkan produk optimal, pengaturan pemotong laser dan benda kerja pada kecepatan potong 60 mm/menit, jarak laser 24 mm dan pendinginan selama 20 detik.

#### Daftar Rujukan

- Kalpakjian, S. And Schmid, S.R., *Manufacturing Engineering and Technology, Sixth Edition*, Pearson, New York, 2009.
- Soejanto, I., *Desain Eksperimen dengan Metode Taguchi*, Graha Ilmu, Yogyakarta, 2009.
- Tosun, N., Cogun, C., and Tosun, G., *A Study on Kerf and Material Removal Rate in Wire Electrical Discharge Machining based on Taguchi Method*, Journal of Materials Processing Technology, 152, 2004, pp. 316-322.
- Tanoto, Y.Y., Soepangkat, B.O., Wahjudi, A. *Optimasi Multi Respon pada Proses Gurdi dengan Menggunakan Metode Taguchi-Grey*. Jurnal Teknik Mesin, Vol. 15 No.1 Hal. 8-14, 2014
- Ross, P.J., *Taguchi Techniques for Quality Engineering*, McGraw Hill Companies, Inc. Taiwan, 2008.