

## OPTIMASI PARAMETER PROSES BUBUT MATERIAL ST 60 DENGAN PENDINGINAN RAMAH LINGKUNGAN MENGGUNAKAN METODE TAGUCHI-GREY

*Every production process always needs to produce high quality with high productivity. However, in machining processes, qualities such as surface roughness and productivity such as material removal rates have different characteristics. Surface roughness has the quality characteristics smaller the better, while the material removal rate has larger the better. Therefore, determining the combination of lathe parameters is very important to get optimal results. A study has been carried out to determine the combination of lathe process on ST 60 material with an environmentally friendly cooling method to minimize surface roughness response and maximize material processing rates simultaneously. The coolant (cold soluble oil and air pressure), spindle rotation (550 rpm, 700 rpm and 1200 rpm), feed motion (0.053 mm/rev., 0.103 mm/rev and 0.161 mm/rev) and depth of cut (0.125 mm, 0.25 mm and 0.5 mm) were used as process parameters. The tool used in this study is a CNMG insert tool with a 0.4 mm corner radius. The experimental design was determined using the Taguchi method in the form of orthogonal matrix  $L_{18}$  ( $2^1 \times 3^3$ ). The optimization method used is the grey relational analysis. The results showed that an optimal surface roughness response and material removal rate obtained by setting the coolant process at level 1 of cold soluble oil, spindle rotation was set at level 3 at 1200 rpm, feeding motion was set at level 3 of 0.161 mm/rev. And the depth of cut is set at level 3 of 0.5 mm.*

**Keywords:** Lathe, Material Removal Rate, Optimization, Surface Roughness, Taguchi, Grey Relational Analysis.

### Dian Ridlo Pamuji

Tenaga Pengajar (Dosen)  
Politeknik Negeri Banyuwangi  
Jurusan Teknik Mesin  
ridlodian@poliwangi.ac.id

### Nuraini Lusi

Tenaga Pengajar (Dosen)  
Politeknik Negeri Banyuwangi  
Jurusan Teknik Mesin  
nurainilusi@poliwangi.ac.id

## 1. PENDAHULUAN

Proses pemotongan logam atau proses pemesinan merupakan salah satu proses penting dalam industri manufaktur, bahkan proses pemesinan telah menjadi inti dari industri manufaktur sejak revolusi industri. Penelitian tentang proses pemotongan logam biasanya difokuskan pada penentuan sifat mampu mesin material yang mencakup umur pahat, gaya potong, kekasaran permukaan dan laju pengerjaan material. Selain itu, penelitian juga difokuskan pada penentuan kombinasi variabel proses pemesinan yang berpengaruh terhadap efisiensi proses dan karakteristik kualitas dari produk yang dihasilkan [1].

Salah satu proses pemotongan logam yang sering digunakan untuk menghasilkan komponen berbentuk silindris adalah proses bubut. Pada proses bubut, benda kerja berputar dengan pahat bergerak relatif terhadap benda kerja untuk menghasilkan geram [2]. Untuk melakukan proses pemotongan logam, proses bubut menggunakan pahat bermata potong tunggal.

Parameter-parameter proses bubut seperti kecepatan potong, gerak makan dan kedalaman potong yang digunakan mempengaruhi sifat mampu mesin dari suatu material [3]. Jika suatu produk hasil dari proses bubut memiliki kekasaran permukaan rendah, gaya potong yang digunakan selama proses pemesinan rendah dan tingkat keausan pahat rendah, maka material tersebut dapat dianggap memiliki sifat mampu mesin yang baik.

Selain ketepatan ukuran, kualitas akhir dari proses pemesinan ditentukan oleh nilai kekasaran permukaan [4]. Kekasaran permukaan juga merupakan ukuran penting karena dapat mempengaruhi ketahanan gesek, kekuatan leleh dan persyaratan estetika dari komponen mesin [5]. Kekasaran permukaan

pada proses pemesinan seperti proses bubut dipengaruhi oleh parameter proses bubut seperti gerak makan dan kecepatan potong [5-7].

Selain dipengaruhi oleh parameter proses bubut, kekasaran permukaan juga dipengaruhi oleh cairan pendingin. Penggunaan cairan pendingin pada proses pemesinan seperti proses bubut dapat meningkatkan kualitas permukaan benda kerja [8]. Cairan pendingin pada proses pemesinan sangat penting karena dapat menurunkan koefisien gesek dan menurunkan panas akibat adanya gesekan antara pahat dengan benda kerja. Akan tetapi, penggunaan cairan pendingin yang berlebihan dapat menimbulkan masalah kesehatan seperti iritasi kulit dan lingkungan [9]. Berdasarkan effect negative penggunaan cairan pendingin, maka penelitian proses pemesinan dengan menggunakan cairan pendingin yang ramah lingkungan telah dilakukan [10-12].

Salah satu metode pemberian cairan pendingin yang ramah lingkungan sebagai alternative pengganti metode *flooding* adalah dengan menggunakan *Minimum Quantity Cooling Lubrication*. Perveis, dkk [13] melakukan penelitian tentang pengaruh metode pendinginan terhadap kekasaran permukaan, umur pahat dan gaya potong pada proses *end milling* material inconel 718. Metode pendinginan yang digunakan adalah metode kering dan *Minimum Quantity Cooling Lubrication* (MQCL). Pada metode MQCL, cairan pendingin yang diminimalkan dan udara dingin disemprotkan antara pahat dengan benda kerja. Hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan metode MQCL kekasaran permukaan lebih rendah dibandingkan dengan metode kering dan metode *flooding* serta gaya potong lebih kecil dibandingkan dengan metode kering dan *flooding*.

Kekasaran permukaan merupakan indikator untuk kualitas hasil proses pemesinan. Semakin rendah nilai kekasaran permukaan, maka semakin tinggi kualitasnya. Sedangkan material removal rate (MRR) merupakan salah satu indikator untuk produktivitas. Semakin tinggi MRRnya, maka semakin tinggi produktivitasnya. Setiap proses produksi akan selalu dituntut untuk menghasilkan kualitas yang tinggi dengan produktivitas yang tinggi. Akan tetapi, pada proses pemesinan seperti proses bubut, kualitas seperti kekasaran permukaan dan produktivitas seperti MRR memiliki karakteristik yang berbeda. Untuk itu, penentuan kombinasi parameter bubut sangat penting dilakukan untuk mendapatkan hasil yang optimal. Metode optimasi yang sering digunakan pada proses pemesinan untuk single respon yang efektif untuk mengendalikan kualitas produk secara *off-line* adalah Taguchi. Sedangkan untuk multi respon dapat digunakan gabungan metode Taguchi dengan *grey relational analysis* [14].

## 2. METODE DAN BAHAN

### 2.1 Variabel Proses

Variabel proses yang digunakan pada penelitian ini seperti ditunjukkan pada Tabel 1. Variabel respon yang digunakan pada penelitian ini adalah surface roughness (Ra) dan Material Removal Rate (MRR).

**Tabel 1:** Variabel proses penelitian dan levelnya

No.	Variabel Proses	Level		
		1	2	3
1	Cairan Pendingin (CP)	Soluble oil dingin+air presure	Air presure	-
2	Putaran Spindel (N)/rpm	550	700	1200
3	Gerak Makan (F)/mm/rev.	0.053	0.103	0.161
4	Kedalaman Pematangan (A)/mm	0.125	0.25	0.5

### 2.2 Pemilihan Matrix Orthogonal

Pemilihan matrix orthogonal yang digunakan berdasarkan derajat kebebasan dari variabel respon yang digunakan. Hasil perhitungan derajat kebebasan dari variable respon dapat dilihat pada Tabel 2.

**Tabel 2:** Total Derajat Kebebasan Variabel Respon dan Levelnya

No.	Variabel Proses	Jumlah Level (k)	Derajat kebebasan (k-1)
1	Cairan Pendingin (CP)	2	1
2	Putaran Spindel (N)/rpm	3	2
3	Gerak Makan (F)/mm/rev.	3	2
4	Kedalaman Pematangan (A)/mm	3	2
Total Derajat Kebebasan			7

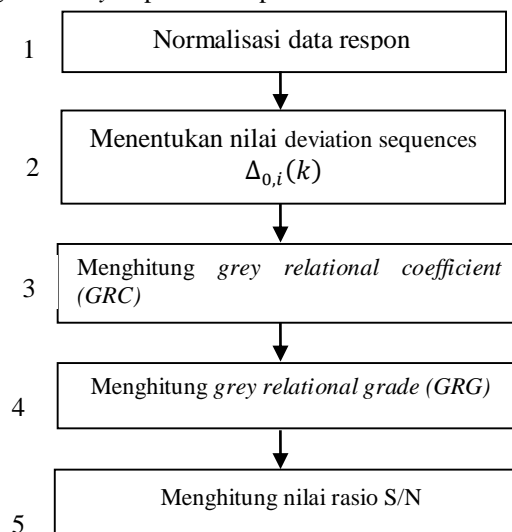
Berdasarkan Tabel 2, total derajat kebebasan variabel respon adalah 7. Matriks ortogonal yang akan digunakan harus memiliki derajat kebebasan yang sama atau lebih besar daripada total derajat kebebasan faktor dan level yang telah ditetapkan. Sehingga, sesuai dengan pilihan yang tersedia, matriks ortogonal  $L_{18}$  memenuhi syarat untuk dijadikan sebagai rancangan percobaan. Rancangan percobaan untuk penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 3. Pengambilan data eksperimen dilakukan secara acak dengan replikasi sebanyak satu kali untuk mengatasi faktor gangguan (*noise*) yang terjadi selama proses pemotongan berlangsung.

**Tabel 3:** Matriks Ortogonal  $L_{18}$

No.	CF	N (rpm)	F (mm/rev.)	A (mm)
1	1	1	1	1
2	1	1	2	2
3	1	1	3	3
4	1	2	1	1
5	1	2	2	2
6	1	2	3	3
7	1	3	1	2
8	1	3	2	3
9	1	3	3	1
10	2	1	1	3
11	2	1	2	1
12	2	1	3	2
13	2	2	1	2
14	2	2	2	3
15	2	2	3	1
16	2	3	1	3
17	2	3	2	1
18	2	3	3	2

### 2.3 Metode Taguchi-Grey

Metode optimasi yang digunakan pada penelitian ini adalah metode Taguchi dikombinasikan dengan Metode Grey. Metode ini digunakan untuk membangun model hubungan dan melakukan analisis hubungan antar respon dan parameter, serta sebagai dasar dalam melakukan prediksi maupun pengambilan keputusan. GRA merupakan salah satu metode yang dibangun berdasarkan teori grey. Pada dasarnya GRA digunakan dalam optimasi untuk mengubah beberapa respon menjadi satu respon. Langkah-langkah untuk proses optimasi dengan metode Taguchi-Grey dapat dilihat pada Gambar 1.



**Gambar 1:** Langkah-langkah optimasi Taguchi-grey

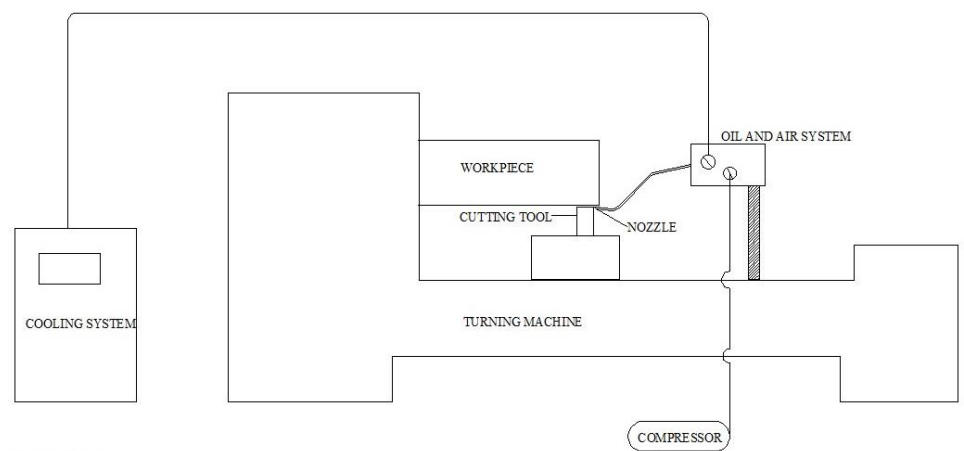
## 2.4 Bahan Penelitian

ST 60 dengan diameter 50 mm dan panjang 100 mm digunakan untuk benda kerja pada penelitian ini. Pahat yang digunakan adalah pahat insert CNMG dengan radius pojok 0.4 mm. Mesin bubut yang digunakan adalah mesin bubut konvensional dengan putaran spindle 2000 rpm. Kekasaran permukaan diukur dengan menggunakan Mahr surftest. Waktu pemotongan diukur dengan *stopwatch* yang kemudian dimasukkan ke persamaan (1) untuk mendapatkan laju pengerjaan bahan (LPB) [15].

$$LPB = \frac{\text{Volume of work piece remove}}{\text{Machining time}} \text{ (mm}^3/\text{min)} \quad (1)$$

## 2.5 Instalasi Sistem Pendingin

Diagram instalasi sistem pendingin yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 2. Sedangkan instalasi peralatan dan bahan penelitian dapat dilihat pada Gambar 3. Cairan pendingin berupa soluble oil didinginkan pada alat pendingin dengan suhu 9<sup>0</sup>-10<sup>0</sup>C kemudian disemprotkan dengan *flow rate* sebesar 200 ml/jam dengan bantuan udara bertekanan sebesar 8 bar yang dihasilkan oleh kompresor. Volume cairan pendingin yang disemprotkan dibuat seminimal mungkin melalui screw pengatur keluarnya cairan pendingin.



**Gambar 2:** Diagram instalasi peralatan penelitian



**Gambar 3:** Setup mesin bubut

## 3. HASIL DAN DISKUSI

Tabel 4 menunjukkan hasil penelitian yang berupa nilai kekasaran permukaan (Ra) dan Laju Pengerjaan Bahan (LPB).

**Tabel 4:** Hasil penelitian

No	CP	N	F	A	Ra	LPB
		(rpm)	(mm/rev)	(mm)	( $\mu\text{m}$ )	( $\text{mm}^3/\text{min}$ )
1	Soluble oil dingin+air presure	550	0.053	0.125	1.14	577.75
2	Soluble oil dingin+air presure	550	0.103	0.25	0.87	2,284.13
3	Soluble oil dingin+air presure	550	0.161	0.5	0.77	7,129.82
4	Soluble oil dingin+air presure	700	0.053	0.125	0.95	743.52
5	Soluble oil dingin+air presure	700	0.103	0.25	0.83	3,029.90
6	Soluble oil dingin+air presure	700	0.161	0.5	0.52	9,501.51
7	Soluble oil dingin+air presure	1200	0.053	0.25	0.47	2,446.89
8	Soluble oil dingin+air presure	1200	0.103	0.5	0.39	9,289.60
9	Soluble oil dingin+air presure	1200	0.161	0.125	0.37	3,930.39
10	air presure	550	0.053	0.5	1.01	2,350.25
11	air presure	550	0.103	0.125	0.94	1,177.50
12	air presure	550	0.161	0.25	0.88	3,527.36
13	air presure	700	0.053	0.25	0.95	1,470.03
14	air presure	700	0.103	0.5	0.57	6,055.76
15	air presure	700	0.161	0.125	0.82	2,255.20
16	air presure	1200	0.053	0.5	0.39	4,777.58
17	air presure	1200	0.103	0.125	0.51	2,551.42
18	air presure	1200	0.161	0.25	0.32	7,378.30

### 3.1 Normalisasi Data Respon

Normalisasi data untuk masing-masing respon adalah merubah nilai respons menjadi nilai yang besarnya antara 0 dan 1 [16-17]. Normalisasi data respons tergantung dari karakteristik kualitas respon. Karakteristik kualitas Semakin kecil semakin baik untuk kekasaran permukaan dengan menggunakan persamaan 2 dan semakin besar semakin baik untuk laju pengerjaan bahan dengan menggunakan persamaan 3. Hasil perhitungan normalisasi data respon dapat dilihat pada Tabel 5.

Semakin Kecil Semakin Baik:

$$X_i^*(k) = \frac{X_i(k) - \min X_i(k)}{\max X_i(k) - \min X_i(k)} \quad (2)$$

Semakin Besar Semakin Baik:

$$X_i^*(k) = \frac{\max X_i(k) - X_i(k)}{\max X_i(k) - \min X_i(k)} \quad (3)$$

**Tabel 5:** Hasil perhitungan normalisasi data respon

No	CP	N (rpm)	F (mm/rev)	A (mm)	Normalisasi $X_i^*(k)$	
					Ra	LPB
1	Soluble oil dingin+air presure	550	0.053	0.125	0.000	0.000
2	Soluble oil dingin+air presure	550	0.103	0.25	0.338	0.191
3	Soluble oil dingin+air presure	550	0.161	0.5	0.451	0.734
4	Soluble oil dingin+air presure	700	0.053	0.125	0.237	0.019
5	Soluble oil dingin+air presure	700	0.103	0.25	0.385	0.275

**Tabel 5:** Hasil perhitungan normalisasi data respon (lanjutan)

6	Soluble oil dingin+air presure	700	0.161	0.5	0.760	1.000
7	Soluble oil dingin+air presure	1200	0.053	0.25	0.820	0.209
8	Soluble oil dingin+air presure	1200	0.103	0.5	0.914	0.976
9	Soluble oil dingin+air presure	1200	0.161	0.125	0.946	0.376
10	air presure	550	0.053	0.5	0.163	0.199
11	air presure	550	0.103	0.125	0.248	0.067
12	air presure	550	0.161	0.25	0.320	0.331
13	air presure	700	0.053	0.25	0.234	0.100
14	air presure	700	0.103	0.5	0.701	0.614
15	air presure	700	0.161	0.125	0.397	0.188
16	air presure	1200	0.053	0.5	0.918	0.471
17	air presure	1200	0.103	0.125	0.770	0.221
18	air presure	1200	0.161	0.25	1.000	0.762

### 3.2 Menentukan Nilai Deviation Sequence

*Deviation sequence*  $\Delta_{0,i}(k)$  adalah selisih absolut antara nilai maksimum hasil normalisasi yang besarnya satu dengan data yang telah dinormalisasi. Perhitungan nilai *deviation sequence* menggunakan persamaan 4 [18]. Nilai deviation sequence dapat dilihat pada Tabel 6.

$$\Delta_{0,i}(k) = |X_0(k) - X_i^*(k)| \quad (4)$$

**Tabel 6.** Nilai *deviation sequence*

No	CP	N (rpm)	F (mm/rev)	A (mm)	Deviation sequence $\Delta_{0,i}(k)$	
					Ra	LPB
1	Soluble oil dingin+air presure	550	0.053	0.125	1.000	1.000
2	Soluble oil dingin+air presure	550	0.103	0.25	0.662	0.809
3	Soluble oil dingin+air presure	550	0.161	0.5	0.549	0.266
4	Soluble oil dingin+air presure	700	0.053	0.125	0.763	0.981
5	Soluble oil dingin+air presure	700	0.103	0.25	0.615	0.725
6	Soluble oil dingin+air presure	700	0.161	0.5	0.240	0.000
7	Soluble oil dingin+air presure	1200	0.053	0.25	0.180	0.791
8	Soluble oil dingin+air presure	1200	0.103	0.5	0.086	0.024
9	Soluble oil dingin+air presure	1200	0.161	0.125	0.054	0.624
10	air presure	550	0.053	0.5	0.837	0.801
11	air presure	550	0.103	0.125	0.752	0.933
12	air presure	550	0.161	0.25	0.680	0.669
13	air presure	700	0.053	0.25	0.766	0.900
14	air presure	700	0.103	0.5	0.299	0.386
15	air presure	700	0.161	0.125	0.603	0.812
16	air presure	1200	0.053	0.5	0.082	0.529
17	air presure	1200	0.103	0.125	0.230	0.779
18	air presure	1200	0.161	0.25	0.000	0.238

### 3.3 Menghitung Grey Relational Coefficient (GRC)

Grey relational coefficient menunjukkan hubungan antara kondisi yang ideal (terbaik) dengan kondisi aktual dari respon yang dinormalisasi. Grey relational coefficient (GRC) akan bernilai satu apabila respon yang dinormalisasikan tersebut cocok dengan kondisi yang ideal. Perhitungan nilai deviation sequence menggunakan persamaan 5 [18]. Hasil perhitungan Grey Relational Coefficient (GRC) dapat dilihat pada Tabel 7.

$$\xi_i(k) = \frac{\Delta_{min} + \zeta \Delta_{max}}{\Delta_{0,i}(k) + \zeta \Delta_{max}} \tag{5}$$

$\zeta$  adalah distinguish coefficient, nilai yang digunakan pada umumnya adalah 0,5 [19].

**Tabel 7.** Grey Relational Coefficient

No	CP	N	F	A	GRC	
		(rpm)	(mm/rev)	(mm)	Ra	LPB
1	Soluble oil dingin+air presure	550	0.053	0.125	0.333	0.333
2	Soluble oil dingin+air presure	550	0.103	0.25	0.430	0.382
3	Soluble oil dingin+air presure	550	0.161	0.5	0.477	0.653
4	Soluble oil dingin+air presure	700	0.053	0.125	0.396	0.338
5	Soluble oil dingin+air presure	700	0.103	0.25	0.448	0.408
6	Soluble oil dingin+air presure	700	0.161	0.5	0.676	1.000
7	Soluble oil dingin+air presure	1200	0.053	0.25	0.735	0.387
8	Soluble oil dingin+air presure	1200	0.103	0.5	0.853	0.955
9	Soluble oil dingin+air presure	1200	0.161	0.125	0.903	0.445
10	air presure	550	0.053	0.5	0.374	0.384
11	air presure	550	0.103	0.125	0.399	0.349
12	air presure	550	0.161	0.25	0.424	0.428
13	air presure	700	0.053	0.25	0.395	0.357
14	air presure	700	0.103	0.5	0.625	0.564
15	air presure	700	0.161	0.125	0.453	0.381
16	air presure	1200	0.053	0.5	0.860	0.486
17	air presure	1200	0.103	0.125	0.685	0.391
18	air presure	1200	0.161	0.25	1.000	0.678

### 3.4 Menghitung Grey Relational Grade (GRG)

Langkah selanjutnya adalah melakukan perhitungan nilai Grey Relational Grade (GRG) menggunakan persamaan 6 [19]. Grey Relational Grade merupakan rata-rata penjumlahan dari Grey Relational Coefficient (GRC). Hasil perhitungan Grey Relational Grade (GRG) dapat dilihat pada Tabel 8.

$$\gamma_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_i(k) \tag{6}$$

**Tabel 8.** Grey Relational Grade

No	CP	N (rpm)	F (mm/rev)	A (mm)	GRG
1	Soluble oil dingin+air presure	550	0.053	0.125	0.333
2	Soluble oil dingin+air presure	550	0.103	0.25	0.406
3	Soluble oil dingin+air presure	550	0.161	0.5	0.565
4	Soluble oil dingin+air presure	700	0.053	0.125	0.367
5	Soluble oil dingin+air presure	700	0.103	0.25	0.428

**Tabel 8.** Grey Relational Grade (lanjutan)

No	CP	N (rpm)	F (mm/rev)	A (mm)	GRG
6	Soluble oil dingin+air presure	700	0.161	0.5	0.838
7	Soluble oil dingin+air presure	1200	0.053	0.25	0.561
8	Soluble oil dingin+air presure	1200	0.103	0.5	0.904
9	Soluble oil dingin+air presure	1200	0.161	0.125	0.674
10	air presure	550	0.053	0.5	0.379
11	air presure	550	0.103	0.125	0.374
12	air presure	550	0.161	0.25	0.426
13	air presure	700	0.053	0.25	0.376
14	air presure	700	0.103	0.5	0.595
15	air presure	700	0.161	0.125	0.417
16	air presure	1200	0.053	0.5	0.673
17	air presure	1200	0.103	0.125	0.538
18	air presure	1200	0.161	0.25	0.839

### 3.5 Menghitung S/N Rasio

Rasio S/N digunakan untuk memilih nilai level faktor terbesar untuk mengoptimalkan karakteristik kualitas dari eksperimen. Perhitungan nilai rasio S/N berdasarkan jenis karakteristik kualitas. Karakteristik kualitas untu GRG adalah semakin besar semakin baik sesuai dengan persamaan 7. Hasil perhitungan S/N rasio untuk nilai GRG dapat dilihat pada Tabel 9.

$$S/N = -10 \log \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (1/y_i^2)}{n} \right] \quad (7)$$

**Tabel 9.** S/N rasio GRG

No	CP	N (rpm)	F (mm/rev)	A (mm)	GRG	S/N GRG
1	Soluble oil dingin+air presure	550	0.053	0.125	0.333	-9.542
2	Soluble oil dingin+air presure	550	0.103	0.25	0.406	-7.824
3	Soluble oil dingin+air presure	550	0.161	0.5	0.565	-4.961
4	Soluble oil dingin+air presure	700	0.053	0.125	0.367	-8.715
5	Soluble oil dingin+air presure	700	0.103	0.25	0.428	-7.367
6	Soluble oil dingin+air presure	700	0.161	0.5	0.838	-1.535
7	Soluble oil dingin+air presure	1200	0.053	0.25	0.561	-5.019
8	Soluble oil dingin+air presure	1200	0.103	0.5	0.904	-0.877
9	Soluble oil dingin+air presure	1200	0.161	0.125	0.674	-3.428
10	air presure	550	0.053	0.5	0.379	-8.426
11	air presure	550	0.103	0.125	0.374	-8.538
12	air presure	550	0.161	0.25	0.426	-7.421
13	air presure	700	0.053	0.25	0.376	-8.495
14	air presure	700	0.103	0.5	0.595	-4.512



**Tabel 9.** S/N rasio GRG (lanjutan)

15	air presure	700	0.161	0.125	0.417	-7.593
16	air presure	1200	0.053	0.5	0.673	-3.444
17	air presure	1200	0.103	0.125	0.538	-5.384
18	air presure	1200	0.161	0.25	0.839	-1.527

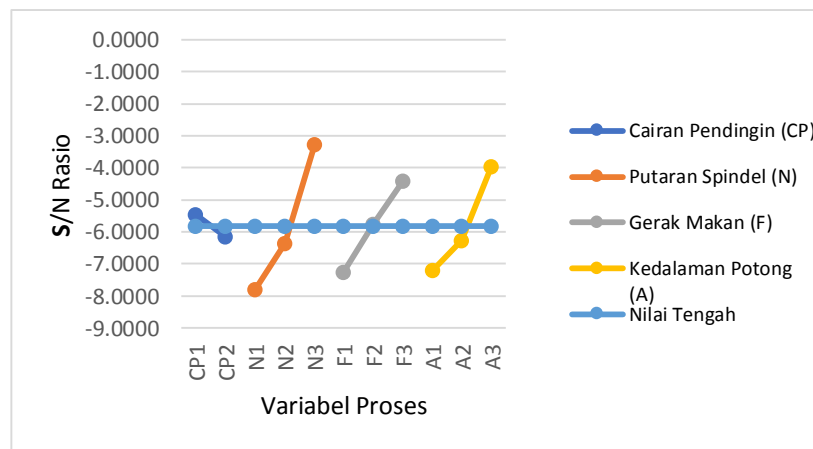
**3.6 Pemilihan Level Optimal Parameter Proses**

Berdasarkan Tabel 9 dapat dihitung rata-rata nilai S/N rasio GRG pada masing-masing level variabel proses seperti ditunjukkan pada Tabel 10.

**Tabel 10.** S/N rasio GRG

	Level 1	Level 2	Level 3	Selisih
<b>CP</b>	-5.4744	-6.1489	-	-0.6745
<b>N</b>	-7.7855	-6.3695	-3.2799	4.5056
<b>F</b>	-7.2736	-5.7503	-4.4110	-2.8627
<b>A</b>	-7.2002	-6.2755	-3.9592	3.2410
Rata-rata	-5.8117			

Berdasarkan Tabel 10, dilakukan plotting untuk nilai rata-rata S/N rasio GRG pada masing-masing level dari variabel proses cairan pendingin (CP), putaran spindle (N), gerak makan (F) dan kedalaman potong (A) seperti ditunjukkan pada Gambar 3.



**Gambar 4.** Plot nilai rata-rata S/N rasio

Berdasarkan Gambar 4, kombinasi level-level variabel proses bubut yang menghasilkan respon kekasaran permukaan dan laju pengerjaan bahan optimum secara serentak dapat ditentukan seperti ditunjukkan pada Tabel 11.

**Tabel 11.** Kombinasi variabel proses respon Optimum

Variabel proses	Level	Nilai
CP	1	Soluble oil dingin+air presure
N	3	1200 rpm
F	3	0.161 mm/rev.
A	3	0.5 mm

#### 4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil percobaan proses optimasi yang telah dilakukan, maka dapat diambil kesimpulan bahwa pengaturan kombinasi variabel-variabel proses bubut pada material ST 60 dengan pendinginan ramah lingkungan yang secara signifikan dapat meminimalkan kekasaran permukaan dan memaksimalkan laju pengerjaan bahan secara serentak adalah sebagai berikut:

- Cairan pendingin: *Soluble oil* dingin+*air pressure*
- Putaran spindel: 1200 rpm.
- Gerak makan sebesar 0.161 mm/rev.
- Kedalaman potong sebesar 0.5 mm.

#### 5. PERNYATAAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada direktorat riset dan pengabdian masyarakat direktorat jenderal penguatan riset dan pengembangan (DRPM) kementerian riset, teknologi, dan pendidikan tinggi yang telah memberi dukungan financial terhadap penelitian ini.

#### 6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] MADHAVI, K.S., SREERAMULU, D. dan VENKATESH, M., "Evaluation of Optimum Turning Process of Process Parameters Using DOE and PCA Taguchi Method", *Materials Today: Proceedings*, v. 4, pp. 1937-1946, 2017.
- [2] KALPAKJIAN, S. dan STEVEN, R. S. "Manufacturing Processes for Engineering Materials", Prentice Hall, New Jersey, 2009.
- [3] SHI, K., ZHANG, D., REN, J., YAO, C. and HUANG, X., "Effect of Cutting Parameters on Machinability Characteristics in Milling of Magnesium Alloy with Carbide Tool", *Advances in Mechanical Engineering* Vol. 8, pp. 1–9, 2016.
- [4] TOMADI, S.H., GHANI, J. A., HARON, C.H.C., AYU, H.M. and DAUD, R., "Effect of Cutting Parameters on Surface Roughness in End Milling of AlSi/AlN Metal Matrix Composite", *Procedia Eng.*, v. 184, pp. 58–69, 2017.
- [5] QEHAJA, N., JAKUPI, K., BUNJAKU, A., BRUCI, M. dan OSMANI, H., "Effect of Machining Parameters and Machining Time on Surface Roughness in Dry Turning Process", *Procedia Engineering*, v. 100, pp. 135-140, 2015.
- [6] AREFI, A.G., DAS, R., SAHOO, A.K., ROUTARA, B.C. dan NANDA, B.K., "A Study on the Effect of Machining Parameter in Turning of Lead Alloy", *Material Today: Proceedings*, V. 4, pp. 7562-7572, 2017.
- [7] GUNJAL, S.U. dan PATIL, G.N., "Experiment Investigations Into Turning of Hardened AISI 4340 Steel Using Vegetable Based Cutting Fluids Under Minimum Quantity Lubrication", *Procedia Manufacturing*, v. 20, pp. 18-23, 2018.
- [8] JAGADISH dan RAY, A., "Cutting Fluid Selection for Sustainable Design for Manufacturing: an Integrated Theory," *Procedia Materials Science*, v. 6, pp. 450 – 459, 2014.
- [9] DAHLIN, J. dan ISAKSSON, M., "Occupational Contact Dermatitis Caused By N-Butyl- 1,2- Benzisothiazolin-3-One In A Cutting Fluid ", *Contact Dermatitis*, v.73, pp. 49–67, 2015.
- [10] GAJRANI, K. K., RAM, D. and SANKAR, R.M., "Biodegradation And Hard Machining Performance Comparison Of Eco-Friendly Cutting Fluid And Mineral Oil Using Flood Cooling And Minimum Quantity Cutting Fluid Techniques," *J. Clean. Prod.*, v. 165, pp. 1420–1435, 2017.
- [11] ZHANG, S., LI, F.J. dan WANG, E., Y., "Tool Life And Cutting Forces In End Milling Inconel 718 Under Dry And Minimum Quantity Cooling Lubrication Cutting Conditions", *Journal of Cleaner Production*, v. 32, pp. 81-87, 2012.
- [12] MARUDA, R.W., KROLICZYK, G.M., FELDSHTEIN, E., PUSAVEC, F., SZYDLOWSKI, M. dan LEGUTKO, S., "A Study on Droplets Sizes, Their Distribution and Heat Exchange for Minimum Quantity Cooling Lubrication (MQCL)," *International Journal Machine Tools and Manufacture*, v. 100, pp. 81–92, 2016.
- [13] PERVAIZ, S., RASHID, A., DEIAB, I. dan NICOLESCU, M.C., "An Experimental Investigation on Effect of Minimum Quantity Cooling Lubrication (MQCL) in Machining Titanium Alloy (Ti6Al4V)," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 87, pp. 1371–1386, 2016.
- [14] MAIYAR, M.L., RAMANUJAM, R., VENKATESAN, K. dan J.JERALD, J., "Optimization of Machining Parameters for End Milling of Inconel 718 Super Alloy Using Taguchi Based Grey Relational Analysis," *International Conference on Design and Manufacturing*, v. 64, Pp. 1276-1282, 2013.
- [15] MOSHAT, S., "Parametric Optimization of CNC End Milling using Entropy Measurement Technique Combined with Grey-Taguchi Methode," *International Journal of Engineering, Science and Technology*, v. 2, no. 2, pp.1-12, 2010.
- [16] MIA, M., AL BASHIR, M., KHAN, A.MD. dan DHAR, R.N., "Optimization Of MQL Flow Rate for Minimum Cutting Force and Surface Roughness in End Milling Of Hardened Steel (Hrc 40)," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, V.89, pp. 675–690, 2017.
- [17] SAHU, K.P. dan PAL, S., "Multi-Response Optimization of Process Parameters in Friction Stir Welded

- [18] AM20 Magnesium Alloy by Taguchi Grey Relational Analysis,” *Journal of Magnesium and Alloys*, v.3, pp. 36-46, 2015.
- [19] GOHIL, V. dan PURI, Y.M., “Optimization of Electrical Discharge Turning Process using Taguchi-Grey Relational Approach,” *Procedia CIRP*, v.68, pp. 70-75, 2018.
- [20] SHI, K., ZHANG, D. dan REN, J., “Optimization of Process Parameters for Surface Roughness and Microhardness in Dry Milling of Magnesium Alloy Using Taguchi With Grey Relational Analysis,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 81, pp. 645–651, 2015.
- [21] PANDA, A., SAHOO, A.K. dan. ROUT, A. K., “Investigations on Surface Quality Characteristics with Multi-Response Parametric Optimization and Correlations,” *Alexandria Eng. J.*, vol. 55, no. 2, pp. 1625–1633, 2016.