

Optimasi Nilai *Surface Roughness* dan Material Removal Rate Pemmesinan *Milling* Hauw Gan ZX 7550Z Menggunakan Metode Taguchi dan *Grey Relational Analysis*

1st Nadila Attin Miftah
Fakultas Rekayasa Industri
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

nadilattin@student.telkomuniversity.ac.id

2nd Denny Sukma Eka Atmaja
Fakultas Rekayasa Industri
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

dennysukma@telkomuniversity.ac.id

3rd Ayudita Oktafiani
Fakultas Rekayasa Industri
Universitas Telkom
Bandung, Indonesia

ayuditaoktafiani@telkomuniversity.ac.id

Abstrak—Pada proses *milling*, produk yang dihasilkan harus memiliki kualitas tinggi dalam waktu yang singkat. Kualitas berhubungan dengan *surface roughness* sedangkan produktivitas berhubungan dengan *material removal rate*. Keduanya saling ketergantungan dan korelasi yang kompleks sehingga sulit untuk dipahami karena banyak faktor yang mempengaruhi seperti parameter pemmesinan. Sebagian besar parameter pemotongan dipilih berdasarkan pengalaman atau mengacu pada *handbook* sehingga tidak menjamin bahwa yang dipilih adalah parameter yang optimum. Apabila yang dipilih salah atau tidak optimal maka menyebabkan kerugian ekonomi. Penelitian ini bertujuan untuk optimasi multi-respon pada proses pemmesinan *milling* material *aluminium alloy 6061 T6* menggunakan metode Taguchi dan *grey relational analysis*. Eksperimen dilakukan dengan menggunakan tiga parameter input yaitu *spindle speed*, *feed rate*, dan *depth of cut* berdasarkan *L9 orthogonal array* yang dirancang menggunakan metode Taguchi. Nilai *surface roughness* ($R_a = 0,395 \mu\text{m}$) dan *material removal rate* ($\text{MRR} = 105 \text{ mm}^3/\text{min}$) optimum dicapai pada kombinasi parameter *spindle speed* 1400 rpm, *feed rate* 15 mm/min, dan *depth of cut* 0,7 mm.

Kata kunci— *surface roughness*, *material removal rate*, Taguchi, *grey relational analysis*

I. PENDAHULUAN

Saat ini, perkembangan industri manufaktur semakin maju seiring dengan perkembangan teknologi dan pengetahuan. Hal ini tercatat oleh Kementerian Perindustrian Republik Indonesia (KEMENPERIN) dimana industri manufaktur di Indonesia memberikan kontribusi sebesar 76,37% pada kuartal I-2022. Tren positif pertumbuhan industri dalam negeri harus terus dipertahankan dan perlu lebih ditingkatkan lagi dari sebelumnya. Oleh karena itu, perlu dilakukan peningkatan produktivitas seiring dengan permintaan di pasar [1].

Produktivitas diartikan sebagai pemanfaatan sumber daya atau input yang efisien untuk menghasilkan output yang diinginkan [2]. Peningkatan produktivitas dipengaruhi oleh *material removal rate* (MRR) karena MRR merupakan salah satu aspek penting dalam meningkatkan performansi pemmesinan. Dengan tingginya MRR, maka waktu pemmesinan lebih efisien dan produktivitas semakin tinggi [3]–[6].

Di sisi lain, ada hal yang sama pentingnya dengan produktivitas yaitu kualitas [7], [8]. Kualitas adalah karakteristik dari suatu produk yang dinilai dari kemampuan, fungsi, dan keandalannya untuk memenuhi kebutuhan yang dinyatakan atau tersirat [9]. Kualitas dapat dinilai dari kekasaran permukaan yang dihasilkan dari proses pemmesinan [4]. Nilai *surface roughness* yang diperoleh rendah berarti kualitas yang didapatkan tinggi sehingga produk yang dihasilkan memiliki kinerja gesekan permukaan yang baik, umur kelelahan yang lebih tinggi serta kecocokan presisi dari permukaan yang kritis [10].

Proses pemmesinan berperan untuk menentukan kualitas dan produktivitas dari suatu produk yang dihasilkan. Salah satu jenis proses pemmesinan yang sering digunakan dalam industri manufaktur adalah proses pemmesinan *milling*. Proses pemmesinan *milling* adalah suatu proses pemmesinan yang dilakukan dengan cara memasukkan sebuah benda kerja kedalam pahat potong yang berputar secara rotasi [11]. Pada dasarnya setiap proses pemmesinan memiliki persyaratan kualitas dan produktivitas yang berbeda yang dilihat dari fungsinya. Dari segi kualitas, semakin halus permukaan maka semakin baik pula kualitasnya [12]. Dari segi produktivitas, semakin cepat proses pemmesinan yang dilakukan maka semakin tinggi produktivitasnya [13].

Kualitas dan produktivitas dianggap sebagai respon yang penting namun sifatnya bertentangan karena diperlukan adanya kesepakatan dengan diantara kedua respon ketika tujuan yang tercapai terletak pada salah satunya [14]. Peningkatan produktivitas dapat mengurangi waktu pemmesinan, tetapi mengakibatkan penurunan kualitas. Di sisi lain, peningkatan kualitas mengakibatkan waktu pemmesinan yang lebih lama sehingga mengurangi produktivitas. Ketergantungan dan korelasi antara kualitas dan produktivitas sangat kompleks dan sulit untuk dipahami. Hal ini karena banyak faktor yang mempengaruhi seperti parameter pemmesinan, tools dan material yang mempengaruhi kualitas dan produktivitas suatu proses pemmesinan [5], [15].

Peran operator sangat penting ketika memilih parameter pemmesinan. Operator harus memiliki pengetahuan dasar, keterampilan dan *standard handbooks* dalam memilih parameter proses pemmesinan untuk menentukan parameter pemmesinan yang tepat untuk mencapai tingkat tertentu dari parameter respons yang berbeda [3], [16]. Parameter

pemesinan yang digunakan seperti *spindle speed*, *feed rate*, dan *depth of cut* yang dilakukan kombinasi secara acak. Setiap kombinasi parameter akan menghasilkan *surface roughness* dan MRR yang berbeda-beda.

Sebagian besar parameter pemotongan dipilih berdasarkan pengalaman atau mengacu pada *handbook*. Tidak dipungkiri juga bahwa operator biasanya menggunakan pendekatan “*trial and error*” yang tentunya metode tersebut tidak efektif dan efisien karena dalam mendapatkan nilai yang diinginkan melalui proses yang berulang-ulang dan sangat memakan waktu [17]. Hal ini tidak menjamin bahwa parameter yang dipilih adalah parameter yang optimal [18]. Dengan begitu operator kesulitan dalam memilih kombinasi yang optimal untuk mencapai *surface roughness* terbaik dan tingkat produktivitas yang tinggi [4]. Apabila kombinasi parameter yang dipilih salah maka menyebabkan pemborosan material, tenaga kerja, energi dan listrik, *cutting fluid*, dan *cutting tools* yang mengarah pada kerugian biaya dari proses produksi [18].

Penelitian ini memberikan kontribusi dalam membantu operator yang memegang peranan penting dalam menentukan parameter pemesinan *milling* yang optimal. Sehingga hasil dari proses pemesinan dapat memenuhi kualitas yang baik secara efisien ditinjau dari sisi waktu pemesinan dengan biaya produksi yang rendah [20]. Dalam upaya pemilihan parameter proses pemesinan dapat menggunakan beberapa metode. Salah satunya yaitu metode Taguchi.

Metode Taguchi merupakan salah satu metode berbasis eksperimen dan analitik yang sering digunakan dalam optimasi parameter pemesinan. Metode taguchi hanya bisa digunakan untuk menyelesaikan masalah optimasi dengan respon tunggal [21]–[23]. Sedangkan terdapat beberapa kasus optimasi dengan multi-respon seperti pada penelitian ini. Oleh karena itu, perlu melakukan kolaborasi antara metode Taguchi dengan *Grey relational analysis* (GRA).

Grey relational analysis merupakan metode optimasi berdasarkan *grey system theory* yang digunakan untuk memecahkan hubungan timbal balik yang kompleks antara beberapa respon. Penggabungan metode Taguchi dan GRA sebagai metode optimasi multi-respon berhasil dilakukan oleh beberapa penelitian dengan proses pemesinan dan lingkungan yang berbeda untuk mendapatkan kombinasi parameter yang optimal. Pada penelitian Lusi et al. (2020) melakukan investigasi pada material ASSAB XW-42 menggunakan metode Taguchi dan GRA untuk optimasi multi-respon. *Spindle speed*, *feed rate* dan *depth of cut* dipilih sebagai parameter input untuk menghasilkan nilai *surface roughness* minimum dan MRR maksimum secara simultan. [25] dengan mengkombinasikan metode Taguchi dan GRA dapat mengoptimalkan *surface roughness*, MRR, dan *specific cutting energy* secara simultan. [26] melakukan optimasi multi-respon proses pemesinan *electrical discharge machining* (EDM) pada parameter MRR dan lima karakteristik *surface roughness* (R_a , R_q , R_{sk} , R_{ku} , dan R_{sm}) dengan menggunakan metode Taguchi dan GRA. [27] menggunakan metode Taguchi dengan GRA untuk menentukan kombinasi optimum dari parameter *cutting speed*, *feed rate*, dan *depth of cut* dalam meningkatkan *surface roughness* dan *microhardness* dari proses pemesinan *milling* material *magnesium alloy*. [28] dalam penelitiannya menggunakan metode Taguchi dan GRA untuk mengoptimalkan parameter *cutting forces*, *surface roughness*, *tool flank wear*, dan MRR pada proses *cryogenic*

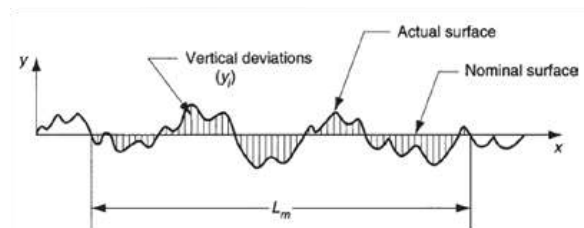
turning. [8] melakukan penelitian optimasi parameter proses *turning* pada X20Cr13 *Stainless Steel* untuk minimasi *surface roughness* dan maksimasi MRR menggunakan metode Taguchi dan GRA. Hasil yang didapatkan adalah penggabungan kedua metode terbukti sebagai optimasi multi-respon.

Berdasarkan penjabaran dari permasalahan diatas, maka penelitian ini perlu dilakukan terkait dengan optimasi kombinasi parameter proses pemesinan *milling* menggunakan material *aluminium alloy* 6061 T6 terhadap *surface roughness* dan MRR dengan menggunakan metode Taguchi dan GRA.

II. KAJIAN TEORI

A. Surface Roughness

Roughness mengacu pada deviasi kecil, jarak halus dari *nominal surface* yang ditentukan oleh karakteristik material dan proses yang membentuk permukaan. Sedangkan *surface roughness* jika dilihat dari Gambar 1 diartikan sebagai rata-rata deviasi vertikal dari *nominal surface* pada panjang permukaan tertentu. Dapat ditarik kesimpulan bahwa *surface roughness* merupakan ketidakrataaan pada permukaan *nominal surface* dengan memiliki jarak yang kecil antara puncak dan lembah. Dalam penerapannya, *surface finish* sering digunakan sebagai sinonim untuk *surface roughness*. Ukuran tekstur permukaan yang paling umum digunakan dalam proses pemesinan adalah *surface roughness* [29].



GAMBAR 1
(Deviasi dari *nominal surface* yang digunakan dalam dua definisi *surface roughness*.)

B. Material Removal Rate

Material removal rate merupakan jumlah pemindahan material per satuan waktu, yang secara langsung ditujukan pada produktivitas proses [30]. MRR yang tinggi lebih diinginkan di industri manufaktur karena dapat diterapkan pada produksi massal dalam waktu yang lebih singkat tanpa mengorbankan kualitas produk [31]. Menurut [32], berikut merupakan rumus untuk mendapatkan MRR.

$$MRR = \frac{l w d}{t} \quad (1)$$

$$MRR = w d f \quad (2)$$

Dimana,

l = panjang pemotongan pada material dari kontak pertama *cutting tools* menyentuh benda kerja hingga titik akhir pemotongan (mm)

w = *width of the cut* (mm)

d = *depth of cut* (mm)

f = *feed rate* (mm/min)

t = *cutting time* (minute)

C. Taguchi

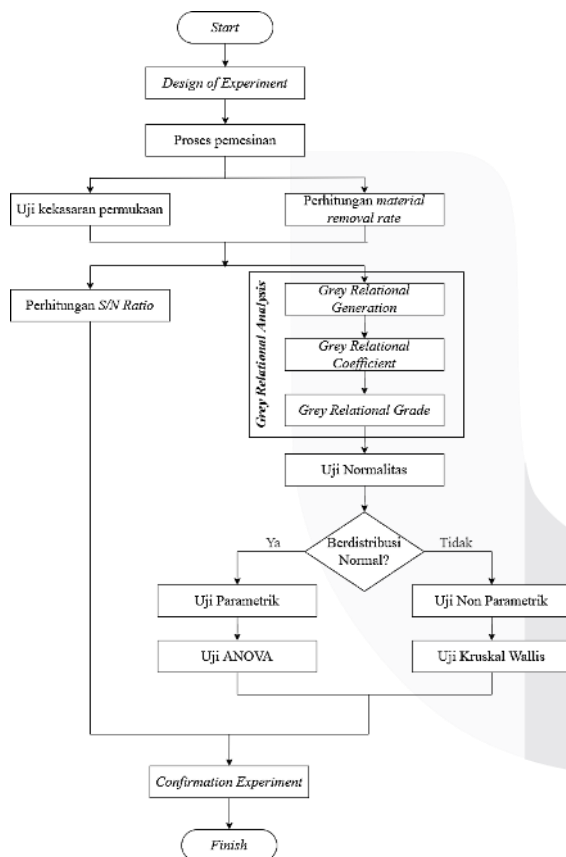
Dr. Genichi Taguchi (1924–2012) merupakan peneliti dari Jepang yang mengusulkan metode kualitas yang dikenal dengan metode Taguchi. Pendekatannya adalah strategi eksperimental baru yang menggunakan *design of experiment* (DOE) yang dimodifikasi dan distandarisasi [33]. Keuntungan utama dari metode ini adalah efisiensinya karena banyak faktor dapat dipertimbangkan sekaligus dan parameter optimal dapat diidentifikasi dengan lebih sedikit sumber daya eksperimental daripada pendekatan DOE tradisional [34].

D. Grey Relational Analysis

Grey relational analysis (GRA) adalah bagian dari *grey system theory*, yang diusulkan oleh Deng pada tahun 1982. Teori ini dinilai cocok untuk memecahkan masalah yang memiliki keterkaitan yang rumit dengan beberapa faktor dan variabel [28], [35]. Metode Taguchi hanya mampu menyelesaikan masalah respon tunggal. Maka dari itu, perlu menggabungkan metode GRA untuk menyelesaikan masalah multi-respon [36].

III. METODE

Metode penelitian ini digambarkan pada Gambar 2.



GAMBAR 2
(Metodologi penelitian)

A. Design of Experiment

Eksperimen didesain menggunakan metode Taguchi yang menggunakan *orthogonal array* untuk mengetahui seluruh parameter dengan jumlah eksperimen terbatas [37]. Pada penelitian ini terdapat tiga parameter pemesinan yang digunakan yaitu *spindle speed*, *feed rate*, dan *depth of cut*. Masing-masing parameter memiliki tiga level yang direpresentasikan pada Tabel 1.

TABEL 1
(Variabel dan level parameter pemesinan)

Variabel	Satuan	Level		
		1	2	3
<i>Spindle Speed</i>	rpm	600	860	1400
<i>Feed Rate</i>	mm/min	15	33	50
<i>Depth of Cut</i>	mm	0,3	0,5	0,7

Matriks *orthogonal array* yang digunakan yaitu L9 yang diartikan bahwa jumlah eksperimen yang digunakan sebanyak sembilan. Tabel 2 merupakan *orthogonal array* pada penelitian.

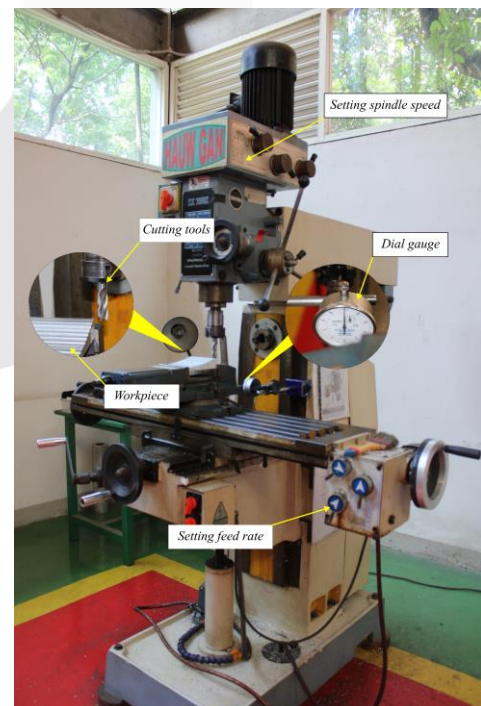
TABEL 2
(*Orthogonal array*)

Eksperimen ke-	<i>Spindle Speed</i> (rpm)	<i>Feed Rate</i> (mm/min)	<i>Depth of Cut</i> (mm)
1	600	15	0,3
2	600	33	0,5
3	600	50	0,7
4	860	15	0,5
5	860	33	0,7
6	860	50	0,3
7	1400	15	0,7
8	1400	33	0,3
9	1400	50	0,5

B. Proses Pemesinan

Sebelum melakukan proses pemesinan, perlu dilakukan persiapan benda kerja dan alat yang digunakan. Benda kerja pada penelitian ini menggunakan material *aluminium alloy* 6061 T6 dengan dimensi 120 mm × 100 mm × 30 mm yang dibuat seperti anak tangga. Peralatan lainnya yaitu *cutting tools* HSS-AL dengan diameter 16 mm dan *dial gauge* untuk membantu dalam menentukan *depth of cut*.

Setelah siap, maka dilakukan *setup* benda kerja dan *cutting tools* pada mesin seperti pada Gambar 3. Mesin yang digunakan yaitu mesin Hauw Gan ZX 7550Z dengan jenis proses pemesinan yang digunakan pada penelitian yaitu proses *milling*.



GAMBAR 3
(*Setup* pemesinan)

C. Pengambilan Data

Spesimen hasil proses pemesinan kemudian akan dilakukan pengambilan data. Respon dari penelitian ini yaitu *surface roughness* dan MRR. Untuk *surface roughness*, pengambilan data dilakukan dengan menggunakan alat *surface tester* sedangkan MRR dilakukan dengan perhitungan manual menggunakan rumus.

D. Pengolahan Data

Pengolahan data untuk menyelesaikan kasus multi-objektif pada penelitian ini menggunakan metode Taguchi dan *Grey Relational Analysis*.

1. Taguchi

Pada penelitian ini, yang menjadi respon tujuan adalah *surface roughness* dan MRR. Pada *surface roughness*, karakteristik *smaller is better* dimana jika nilai semakin kecil nilainya maka semakin baik. Persamaan (3) digunakan untuk mendapatkan S/N Ratio pada *surface roughness*.

$$\frac{S}{N_s} = -10 \times \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) \quad (3)$$

Sedangkan pada MRR yaitu *large is better* dimana jika nilai semakin besar nilainya maka semakin baik. Persamaan (4) digunakan untuk mendapatkan S/N Ratio pada MRR.

$$\frac{S}{N_L} = -10 \times \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (4)$$

Dimana,

- n = jumlah item data eksperimen
- y_i = nilai dari hasil eksperimen
- $\bar{y}$ = rata-rata hasil eksperimen
- S^2 = variansi y

2. Grey Relational Analysis

Terdapat tiga langkah pengolahan data menggunakan *grey relation analysis*.

Langkah 1: Grey Relational Generation

Langkah pertama dalam GRA yaitu melakukan normalisasi data. Pada tahap ini, semua nilai urutan data asli dikonversi pada rentang 0 hingga 1 secara berurutan [28], [38], [39]. Dalam penelitian ini, respon yang menjadi tujuan adalah *surface roughness* dan MRR. Keduanya memiliki karakteristik yang berbeda. *Smaller is better* merupakan karakteristik untuk *surface roughness* yang dapat dicari dengan (5).

$$Z_{ij} = \frac{\max(y_{ij}) - y_{ij}}{\max(y_{ij}) - \min(y_{ij})} \quad (5)$$

Sedangkan *large is better* merupakan karakteristik untuk MRR yang dapat dicari dengan (6).

$$Z_{ij} = \frac{y_{ij} - \min(y_{ij})}{\max(y_{ij}) - \min(y_{ij})} \quad (6)$$

Dimana,

- Z_{ij} = urutan perbandingan (*comparable sequence*)
- y_{ij} = urutan data asli (*original sequence*)
- i = urutan variabel respon
- j = urutan eksperimen ($j = 1, 2, 3, \dots, 9$)

Langkah 2: Grey Relational Coefficient

Tujuan menghitung *grey relational coefficient* ialah untuk mengetahui hubungan antara data eksperimen yang diinginkan dengan data eksperimen sebenarnya [28]. Persamaan (7) merupakan rumus untuk mendapatkan nilai *grey relational coefficient*.

$$\gamma(j) = \frac{\Delta_{\min} + \varepsilon \Delta_{\max}}{\Delta_{0n}(j) + \varepsilon \Delta_{\max}} \quad (7)$$

Dimana,

- i = urutan variabel respon
 - j = urutan eksperimen ($j = 1, 2, 3, \dots, 9$)
 - $\Delta_{0n}(j) = \|y_0^*(j) - y_i^*(j)\|$
 - $\Delta_{\min}$ = nilai terkecil dari $y_i^*(j)$
 - $\Delta_{\max}$ = nilai terbesar dari $y_i^*(j)$
 - ε = koefisien pembeda atau *distinguishing coefficient*
- ε atau *distinguishing coefficients* digunakan untuk mengubah variasi pada *grey relational coefficients* dengan pendefinisian dalam kisaran 0 hingga 1. Pada penelitian ini yang digunakan yaitu 0,5 [8], [25], [28]

Langkah 3: Grey Relational Grade

Grey relational grade berguna untuk mengevaluasi beberapa karakteristik kinerja dengan melihat korelasi antara urutan referensi (*reference sequence*) dengan urutan perbandingan (*comparable sequence*) [28], [40]. *Grey relational grade* dihasilkan dengan menggunakan (8).

$$\bar{\gamma}_j = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^m \gamma_{ij} \quad (8)$$

Dimana,

- $\bar{\gamma}_j$ = nilai *grey relational grade*
- i = urutan variabel respon
- j = urutan eksperimen ($j = 1, 2, 3, \dots, 9$)

E. Confirmation Experiment

Ketika kombinasi parameter pemesinan yang optimum telah diidentifikasi menggunakan GRA, selanjutnya dilakukan fase penutup yaitu memprediksi dan verifikasi peningkatan GRG melalui *confirmation test* [16], [37], [39], [41], [42]. Untuk mendapatkan estimasi GRA menggunakan level parameter pemesinan yang optimal dengan (9).

$$\hat{\gamma} = \gamma_m + \sum_{i=1}^n (\hat{\gamma}_i - \gamma_m) \quad (9)$$

Dimana:

- $\hat{\gamma}$ = GRG prediksi
- γ_m = rata-rata dari total GRG
- $\hat{\gamma}_i$ = rata-rata GRG pada level optimal
- n = jumlah faktor variabel proses pemesinan

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Optimasi Mono-Objektif dengan S/N Ratio

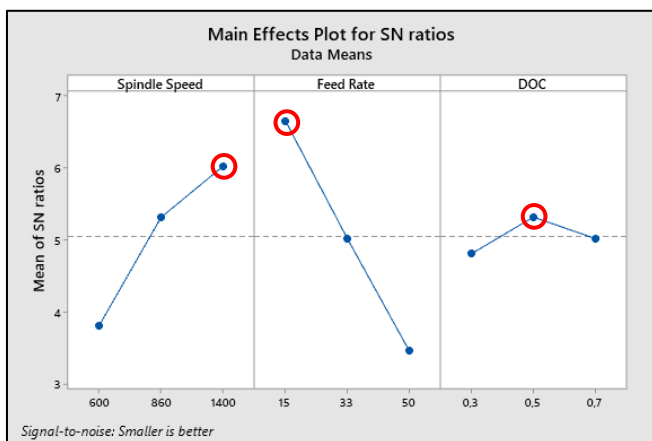
S/N Ratio adalah bagian dari metode Taguchi guna menemukan kombinasi faktor mana yang memberikan respon terbaik dengan pendekatan statistika [43]. S/N Ratio memiliki beberapa karakteristik yang disesuaikan dengan respon yang diinginkan. Dalam penelitian ini, karakteristik yang digunakan untuk *surface roughness* adalah *smaller is better* sedangkan MRR adalah *large is better*. Tabel 3 menunjukkan hasil perhitungan S/N Ratio.

TABEL 3
S/N Ratio

Eksperimen ke-	Ra (μm)	MRR (mm^3/min)	S/N Ratio	
			Ra	MRR
1	0,510	45,00	5,849	33,064
2	0,710	165,00	2,978	44,350
3	0,742	350,00	2,587	50,881
4	0,417	75,00	7,597	37,501
5	0,505	231,00	5,928	47,272
6	0,758	150,00	2,410	43,522
7	0,471	105,00	6,535	40,424
8	0,492	99,00	6,159	39,913
9	0,538	250,00	5,377	47,959

Dari hasil yang dihitung pada Tabel 3, semua parameter pemessinan disorot dalam *main effects plots* untuk masing-masing respon. Gambar 4 merupakan *main effects plots surface roughness* yang menunjukkan titik optimum untuk setiap parameter. Seperti yang dapat dilihat, setiap level parameter memberikan pengaruh terhadap respon dengan cara yang berbeda karena tidak terbentuk garis horizontal sejajar dengan sumbu X.

Kondisi optimal untuk kombinasi parameter *surface roughness* adalah *spindle speed* 1400 rpm, *feed rate* 15 mm/min, dan *depth of cut* 0,5 mm. Dari sini dapat disimpulkan bahwa *surface roughness* yang rendah dapat dicapai jika parameter *spindle speed* tinggi dan *feed rate* rendah.

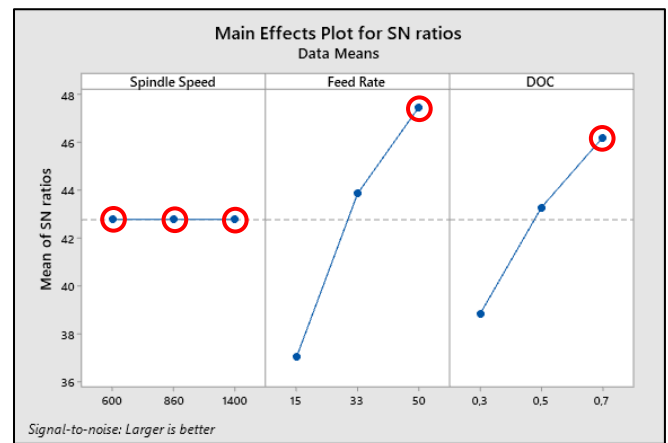


GAMBAR 4

(Main effect plots surface roughness)

Gambar 5 merupakan *main effects plots* dari MRR yang menunjukkan titik optimum untuk setiap parameter. Dari gambar tersebut, dapat dilihat bahwa setiap level dari dua parameter mempengaruhi respon dengan cara yang berbeda. Hal ini karena tidak terbentuk garis horizontal yang sejajar dengan sumbu X. Sedangkan terdapat 1 parameter dengan semua levelnya membentuk garis horizontal dan memberikan pengaruh terhadap respon dengan cara yang sama.

Kondisi optimum untuk kombinasi parameter MRR adalah *feed rate* 50 mm/min, dan *depth of cut* 0,7 mm. Dari sini dapat disimpulkan bahwa jika parameter yang digunakan adalah *feed rate* dan *depth of cut* tinggi, maka MRR yang rendah dapat dicapai.



GAMBAR 5

(Main effect plots material removal rate)

B. Optimasi Multi-Objektif dengan Grey Relational Analysis

Grey relational analysis merupakan suatu metode yang digunakan untuk mengubah masalah optimasi *multi-objective* ke *single objective* [44]. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menentukan kombinasi parameter *milling* yang optimal dengan meminimalkan *surface roughness* sekaligus memaksimalkan *material removal rate*. Di bawah ini adalah langkah-langkah dari metode *grey relational analysis*.

1. Grey relational generation

Langkah pertama dalam metode *grey relational analysis* ialah melakukan normalisasi linier data eksperimen. Saat dilakukan normalisasi, urutan asli di transfer ke urutan yang sebanding tergantung dengan jenis kriterianya. Dalam penelitian ini, kriteria untuk *surface roughness* adalah *smaller is better* dan *material removal rate* adalah *large is better*.

Tabel 4 berisi data eksperimen yang telah dinormalisasi berdasarkan jenis kriteria untuk setiap respon. Hasil normalisasi yang lebih besar berarti kinerja yang lebih baik dan hasil normalisasi terbaik harus sama dengan 1.

TABEL 4
(Grey relational generation)

Eksperimen ke-	Data		GRG	
	Ra	MRR	Ra	MRR
1	0,510	45,00	0,727	0,000
2	0,710	165,00	0,141	0,393
3	0,742	350,00	0,045	1,000
4	0,417	75,00	1,000	0,098
5	0,505	231,00	0,741	0,610
6	0,758	150,00	0,000	0,344
7	0,471	105,00	0,841	0,197
8	0,492	99,00	0,780	0,177
9	0,538	250,00	0,644	0,672

2. Grey relational coefficient

Langkah kedua dari *grey relational analysis* adalah menunjukkan hubungan antara referensi dan hasil normalisasi S/N ratio yang sebenarnya. Tabel 5 merupakan hasil perhitungan *grey relational coefficient*.

TABEL 5
(Grey relational coefficient)

Eksperimen ke-	GRC	
	Ra	MRR
1	0,647	0,333
2	0,368	0,452
3	0,344	1,000
4	1,000	0,357
5	0,659	0,562
6	0,333	0,433
7	0,759	0,384
8	0,694	0,378
9	0,584	0,604

3. Grey relational grade

Langkah terakhir yaitu menjumlahkan bobot kedua respon dari *grey relational coefficient* sehingga didapatkan peringkat atau *grade* dari setiap eksperimen. Hal ini bertujuan untuk mengubah multi-respon menjadi satu output respon. Langkah ini disebut dengan *grey relational grade*. Tabel 6 menampilkan peringkat setiap kombinasi eksperimen.

TABEL 6
(Grey relational grade)

Eksperimen ke-	GRG	
	Nilai	Grade
1	0,490	7
2	0,410	8
3	0,672	2
4	0,678	1
5	0,610	3
6	0,383	9
7	0,571	5
8	0,536	6
9	0,594	4

Dari Tabel 6, dapat dilihat bahwa eksperimen 4 memiliki peringkat paling tinggi. Kombinasi parameter dalam pada eksperimen 4 optimal terhadap minimasi *surface roughness* sekaligus maksimasi *material removal rate* diantara eksperimen lainnya. Kombinasi parameter pemesinan pada eksperimen 4 yaitu *spindle speed* 860 rpm, *feed rate* 15 mm/min, dan *depth of cut* 0,5 mm. Kombinasi tersebut dihasilkan dari *feed rate* terendah serta *depth of cut* dan *spindle speed* level kedua dari tiga level yang ada. Kondisi tersebut menunjukkan perubahan nilai *feed rate* akan berpengaruh pada perubahan nilai optimum dari *surface roughness* dan MRR.

F. Uji ANOVA

Tujuan utama dari uji ANOVA adalah penerapan metode statistik untuk mengidentifikasi pengaruh masing-masing faktor terhadap respon. Hasil dari uji ANOVA dapat menentukan dampak dari masing-masing faktor terhadap respon. Uji ANOVA dilakukan terhadap hasil GRA untuk setiap parameter pemesinan seperti *spindle speed*, *feed rate*, dan *depth of cut*. Hasil uji ANOVA dapat dilihat pada Tabel 7.

TABEL 7
(Hasil uji ANOVA)

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Kontribusi
Spindle Speed	2	0,003	0,003	0,002	0,07	0,938	3,451%
Feed Rate	2	0,006	0,006	0,003	0,12	0,892	6,343%

DOC	2	0,033	0,033	0,017	0,72	0,582	37,722%
Residual Error	2	0,047	0,047	0,023			
Total	8	0,089					

Dari Tabel 7 terlihat bahwa tidak ada parameter pemesinan yang signifikan karena nilai *P-value* lebih dari 0,05. Kontribusi setiap parameter berbeda-beda yaitu *spindle speed* 3,451%, *feed rate* 6,343%, dan *depth of cut* 37,722%. *Depth of cut* merupakan parameter paling berpengaruh terhadap GRA, yang kemudian diikuti dengan *feed rate*.

G. Confirmation Experiment

Setelah mendapatkan kombinasi parameter optimum melalui *grey relational analysis*, langkah terakhir yaitu melakukan prediksi serta verifikasi melalui *confirmation experiment*. Nilai prediksi *grey relational grade* dapat diperoleh dengan menggunakan (9).

TABEL 8
(Perbandingan dari respon pada eksperimen terbaik dan optimasi parameter pemesinan)

		Pengaturan Parameter Awal	Parameter Pemesinan Optimal Menggunakan Taguchi – Grey Relational Analysis	
		Dari GRG	Prediksi	Eksperimen
Parameter Pemesinan	Spindle Speed	860	1400	1400
	Feed Rate	15	15	15
	Depth of Cut	0,5	0,7	0,7
Respon	Surface Roughness	0,417		0,395
	MRR	75,00		105,00
	GRG	0,678	0,666	0,692

*Peningkatan hasil GRG = 0.014

Tabel 8 menunjukkan hasil dari *confirmation experiment* menggunakan kombinasi parameter pemesinan optimal yaitu *spindle speed* 1400 rpm, *feed rate* 15 mm/min, dan *depth of cut* 0,7 mm. Pada *surface roughness* terjadi penurunan hasil dari 0,417 μm menjadi 0,395 μm . Sedangkan MRR terjadi peningkatan dari 75mm³/min jadi 105 mm³/min. Selanjutnya, ditunjukkan bahwa nilai GRG eksperimen konfirmasi meningkat sebesar 0,014 dari nilai GRG pengaturan parameter awal.

Dari penjelasan diatas, dapat dikatakan bahwa terjadi peningkatan signifikan pada metode Taguchi kolaborasi GRA untuk optimasi permasalahan multi-respon. Terbukti bahwa kedua metode tersebut sangat berguna dalam optimasi multi-respon pada proses pemesinan *milling material aluminium alloy 6061 T6*.

V. KESIMPULAN

Pada penelitian ini, pengaruh parameter *spindle speed*, *feed rate*, dan *depth of cut* pada *surface roughness* dan *material removal rate* pada proses pemesinan *milling* dapat diteliti menggunakan metode Taguchi dan GRA. Ditemukan bahwa kombinasi optimal untuk minimasi *surface roughness* dan maksimasi *material removal rate* adalah pada kombinasi *spindle speed* 1400 rpm, *feed rate* 15 mm/min, dan *depth of cut* 0,7 mm dengan nilai *surface roughness* ($R_a = 0,395 \mu\text{m}$) dan *material removal rate* ($MRR = 105 \text{ mm}^3/\text{min}$).

REFERENSI

- [1] Kemenperin, "Laju Sektor Manufaktur Lampauai Pertumbuhan Ekonomi," May 09, 2022. Accessed: Sep. 03, 2022. [Online]. Available: <https://www.google.com/search?q=Laju+Sektor+Manufaktur+Lampauai+Pertumbuhan+Ekonomi&oq=Laju+Sektor+Manufaktur+Lampauai+Pertumbuhan+Ekonomi&aqs=chrome..69i57j69i60.1142j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8>
- [2] A. Shahin, "The Relationship Between Quality And Productivity: A New Perspective," *Int. J. Productivity and Quality Management*, vol. 3, no. 2, pp. 206–222, 2008.
- [3] O. G. & Ehibor and B. N. G. Aliemeke, "Optimization of Process Parameters of Surface Roughness and Material Removal Rate in Orthogonal Turning of AISI 1045 Carbon Steel Using Taguchi Technique," *Industrial Engineering Letters*, vol. 10, no. 4, pp. 16–25, 2021, doi: 10.7176/IEL/10-4-03.
- [4] S. K. Shihab and E. M. M. Mubarak, "Evaluation of Surface Roughness and Material Removal Rate in End Milling of Complex Shape," *Universal Journal of Mechanical Engineering*, vol. 4, no. 3, pp. 69–73, Jun. 2016, doi: 10.13189/ujme.2016.040303.
- [5] S. Moshat, S. Datta, A. Bandyopadhyay, and P. K. Pal, "Optimization of CNC end milling process parameters using PCA-based Taguchi method," *International Journal of Engineering, Science and Technology*, vol. 2, no. 1, pp. 92–102, 2010, [Online]. Available: www.ijest-ng.com
- [6] Sredanović B, Čiča Đ, Tešić S, and Kramar D, "Optimization Of Cutting Parameters For Minimizing Specific Cutting Energy And Maximizing Productivity In Turning Of AISI 1045 Steel," *International Scientific Journal - Machines, Technologies, Materials*, vol. 13, no. 11, pp. 491–494, 2019.
- [7] S. Agrawal, M. kumar Gaur, D. kumar Kasdekar, and S. Agrawal, "Optimization Of Machining Parameters Of Hard Porcelain On A CNC Machine by Taguchi- and RSM Method," *International Journal of Engineering, Science and Technology*, vol. 10, no. 1, pp. 13–22, Feb. 2018, doi: 10.4314/ijest.v10i1.2.
- [8] L. Bouzid, S. Boutabba, M. A. Yallese, S. Belhadi, and F. Girardin, "Simultaneous Optimization of Surface Roughness and Material Removal Rate for Turning of X20Cr13 Stainless Steel," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 74, no. 5–8, pp. 879–891, Sep. 2014, doi: 10.1007/s00170-014-6043-9.
- [9] P. Kotler and K. L. Keller, *Marketing Management*. United States of America: Perason, 2012.
- [10] X. Zhang, X. Li, H. Wang, and T. Zhang, "Multi-Objective Optimization of Machining Parameters During Milling of Carbon-Fiber-Reinforced Polyetheretherketone Composites Using Grey Relational Analysis," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 12, no. 10, 2020, doi: 10.1177/1687814020966232.
- [11] J. T. Black and R. A. Kohser, *Materials and Processes in Manufacturing*, 10th ed. United States of America: Wiley, 2008.
- [12] H. Yanuar, A. Syarief, and A. Kusairi, "Pengaruh Variasi Kecepatan Potong dan Kedalaman Pemakanan Terhadap Kekasaran Permukaan Dengan Berbagai Media Pendingin Pada Proses Frais Konvensional," *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin Unlam*, vol. 03, no. 1, pp. 27–33, 2014.
- [13] Rusnaldy and B. Setiyana, "Pengaruh Pemakanan (Feed) Terhadap Geometri dan Kekerasan Geram Pada High Speed Machining Process," *ROTASI*, vol. 8, no. 1, pp. 15–20, 2006.
- [14] T. C. Phokane, K. Gupta, and C. Anghel, "Optimization of Gear Manufacturing for Quality and Productivity," *Jurnal Optimasi Sistem Industri*, vol. 21, no. 1, pp. 20–27, May 2022, doi: 10.25077/josi.v21.n1.p20-27.2022.
- [15] N. N. Tetelepta, "Penggunaan Pahat Ball End Mill Terhadap Kekasaran Permukaan Pada Material Baja ST 37," *J Teknol*, vol. 9, no. 1, pp. 1018–1028, 2012.
- [16] M. Solanki and A. Jain, "Optimization Of Material Removal Rate And Surface Roughness Using Taguchi Based Multi-Criteria Decision Making (MCDM) Technique For Turning AL-6082," *Proceedings on Engineering Sciences*, vol. 3, no. 3, pp. 303–318, 2021, doi: 10.24874/PES03.03.007.
- [17] J. Z. Zhang and J. C. Chen, "Surface roughness optimization in a drilling operation using the taguchi design method," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 24, no. 4, pp. 459–467, Apr. 2009, doi: 10.1080/10426910802714399.
- [18] D. Thakur, B. Ramamoorthy, and L. Vijayaraghavan, "Optimization of High Speed Turning Parameters of Super Alloy Inconel 718 Material Using Taguchi Technique," *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, vol. 16, pp. 44–50, 2009.
- [19] A. T. Wibowo, G. D. Haryadi, and Y. Umardani, "Pengaruh Heat Treatment T6 Pada Aluminium Alloy 6061-O Dan Pengelasan Transversal Tungsten Inert Gas Terhadap Sifat Mekanik Dan Struktur Mikro," *Jurnal Teknik Mesin*, vol. 2, no. 4, pp. 374–381, 2014.
- [20] N. Ahmad and T. v. Janahiraman, "A comparison on optimization of surface roughness in machining AISI 1045 steel using Taguchi method, genetic algorithm and particle swarm optimization," *Proceedings - 2015 IEEE Conference on System, Process and Control, ICSPC 2015*, pp. 129–133, May 2016, doi: 10.1109/SPC.2015.7473572.
- [21] H. C. Liao, "Using PCR-TOPSIS To Optimize Taguchi's Multi-Response Problem," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 22, no. 9–10, pp. 649–655, 2003, doi: 10.1007/s00170-002-1485-x.
- [22] C. Lin, "Use of the Taguchi Method and Grey Relational Analysis to Optimize Turning Operations with Multiple Performance Characteristics," *Materials And Manufacturing Processes*, vol. 19, no. 2, pp. 209–220, 2004, doi: 10.1081/AMP-120029852.

- [23] K. Jangra, S. Grover, and A. Aggarwal, "Simultaneous optimization of material removal rate and surface roughness for WEDM of WCCo composite using grey relational analysis along with Taguchi method," *International Journal of Industrial Engineering Computations*, vol. 2, no. 3, pp. 479–490, 2011, doi: 10.5267/j.ijiec.2011.04.005.
- [24] N. Lusi, D. Ridlo Pamuji, A. Fiveriati, A. Afandi, and G. Sandy Prayogo, "Application of Taguchi and Grey Relational Analysis for Parametric Optimization of End Milling Process of ASSAB-XW 42," *Advance in Engineering Research*, vol. 198, pp. 514–517, 2020.
- [25] S. S. Warsi, M. H. Agha, R. Ahmad, S. H. I. Jaffery, and M. Khan, "Sustainable turning using multi-objective optimization: a study of Al 6061 T6 at high cutting speeds," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 100, no. 1–4, pp. 843–855, Jan. 2019, doi: 10.1007/s00170-018-2759-2.
- [26] M. K. Das, K. Kumar, T. K. Barman, P. Sahoo, M. K. Das, and K. Kumar, "Optimisation of EDM process parameters using grey-Taguchi technique," *Int. J. Machining and Machinability of Materials*, vol. 15, pp. 28–30, 2014.
- [27] K. Shi, D. Zhang, and J. Ren, "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*, vol. 81, no. 1–4, pp. 645–651, Oct. 2015, doi: 10.1007/s00170-015-7218-8.
- [28] P. Sivaiah and D. Chakradhar, "Multi-objective optimisation of cryogenic turning process using Taguchi-based grey relational analysis," 2017.
- [29] M. P. Groover, *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems*, 5th ed. United States of America: Wiley, 2013.
- [30] J. Paulo. Davim, *Modern Machining Technology: A Practical Guide*. New Delhi: Woodhead Publishing, 2011.
- [31] A. Mufarrih, H. Istiqlaliyah, and M. M. Ilha, "Optimization of Roundness, MRR and Surface Roughness on Turning Process using Taguchi-GRA," in *Journal of Physics: Conference Series*, Aug. 2019, vol. 1179, no. 1. doi: 10.1088/1742-6596/1179/1/012099.
- [32] S. Kalpakjian and S. R. Schmid, *Manufacturing Engineering And Technology*, 6th ed. New York: Pearson, 2009.
- [33] R. K. Roy, *Design of Experiments Using The Taguchi Approach 16 Steps to Product and Process Improvement*. United States of America: John Wiley & Sons Inc, 2001.
- [34] D. C. S. Summers, *Quality*, 6th ed. United States of America: Pearson, 2018.
- [35] H. Dave, S. Vallabhbbhai, S. Kumar, and K. P. Desai, "Study on Micro Hole Accuracy And Electrode Depletion during Micro EDM Process Through Grey Based Taguchi Approach," *International Conference on Production and Industrial Engineering*, pp. 999–1004, 2013, [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/236014396>
- [36] K. Soorya Prakash, P. M. Gopal, and S. Karthik, "Multi-objective optimization using Taguchi based grey relational analysis in turning of Rock dust reinforced Aluminum MMC," *Measurement (Lond)*, vol. 157, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.measurement.2020.107664.
- [37] R. S. Pawade and S. S. Joshi, "Multi-objective optimization of surface roughness and cutting forces in high-speed turning of Inconel 718 using Taguchi grey relational analysis (TGRA)," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 56, no. 1–4, pp. 47–62, Sep. 2011, doi: 10.1007/s00170-011-3183-z.
- [38] S. Winarni and S. W. Indratno, "Application of multi response optimization with grey relational analysis and fuzzy logic method," *J Phys Conf Ser*, vol. 948, no. 1, 2018, doi: 10.1088/1742-6596/948/1/012075.
- [39] A. N. Haq, P. Marimuthu, and R. Jeyapaul, "Multi Response Optimization of Machining Parameters of Drilling Al/SiC Metal Matrix Composite Using Grey Relational Analysis in The Taguchi Method," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 37, no. 3–4, pp. 250–255, May 2008, doi: 10.1007/s00170-007-0981-4.
- [40] M. Gupta and S. Kumar, "Multi-objective optimization of cutting parameters in turning using grey relational analysis," *International Journal of Industrial Engineering Computations*, vol. 4, no. 4, pp. 547–558, 2013, doi: 10.5267/j.ijiec.2013.06.001.
- [41] J. Kundu and H. Singh, "Friction Stir Welding of AA5083 Aluminium Alloy: Multi-Response Optimization Using Taguchi-Based Grey Relational Analysis," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 8, no. 11, pp. 1–10, Nov. 2016, doi: 10.1177/1687814016679277.
- [42] L. M. Maiyar, R. Ramanujam, K. Venkatesan, and J. Jerald, "Optimization of Machining Parameters For End Milling of Inconel 718 Super Alloy Using Taguchi Based Grey Relational Analysis," *Procedia Eng*, vol. 64, pp. 1276–1282, 2013, doi: 10.1016/j.proeng.2013.09.208.
- [43] D. S. E. Atmaja and M. K. Herliansyah, "Optimasi Parameter Pengukuran Dimensi dan Defect Ubin Keramik dengan Metode Taguchi," *Jurnal Sistem Cerdas*, vol. 4, no. 3, pp. 171–179, 2021.
- [44] E. Kuram and B. Ozcelik, "Multi-objective optimization using Taguchi based grey relational analysis for micro-milling of Al 7075 material with ball nose end mill," *Measurement*, vol. 46, no. 6, pp. 1849–1864, Jul. 2013, doi: 10.1016/J.MEASUREMENT.2013.02.002.