

OPTIMASI PARAMETER KARBURISASI TEMPERATUR RENDAH PADA BAJA TAHAN KARAT AUSTENITIK MENGUNAKAN METODE TAGUCHI

Annissa Fanya

Universiti Teknologi MARA
Fakultas Teknik Mesin
Email: annissafanya@gmail.com

Esa Haruman

Universitas Bakrie
Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer
Email: esa.haruman@bakrie.ac.id

Austenitic stainless steel is a popular material for its corrosion resistant properties, however it has low hardness which limits its application. Low-temperature carburizing can be used to improve the mechanical properties of the austenitic stainless steel by producing expanded austenite layer. In order to get a high-quality layer and an efficient processing operation, the carburizing process must be optimized. In this research, a Taguchi method was utilized to investigate the effect of processing parameters related to the formation of the expanded austenite layer depth in austenitic stainless steel. Four factors were selected to be optimized namely temperature, gas flow rate, time, and gas composition with three levels each. $L_9(3^4)$ orthogonal array was applied with nine experimental tests to get the diffusion depth value of carbon in the expanded austenite layer. S/N ratio was used to determine the optimum factor combination with nominal-the-better quality characteristic and the most significant factor was obtained by applying the Analysis of Variance. Temperature was found to be the most significant factor with 54.91% contribution. The optimum combination was also successfully defined with temperature at 450°C (level 2), gas flow rate at 15 liter per minute (level 2), time at 12 hours (level 3), and gas composition at 15% CH₄ – 5% H₂ – 80% N₂ (level 3). Clearly, in this study the Taguchi method was proven to be appropriately used as one of robust tools in optimizing the thermochemical treatment process parameters.

Keywords: Taguchi Method, Low-Temperature Thermochemical Treatment, Carburizing, Stainless Steel, Austenitic

1. PENDAHULUAN

Desain eksperimental merupakan salah satu metode statistik yang digunakan untuk mengevaluasi faktor-faktor yang mempengaruhi suatu parameter dalam sebuah proses. Tujuan akhir dari diterapkannya metode ini adalah untuk meningkatkan kualitas kinerja proses maupun hasil produk dengan mengoptimalkan parameter proses yang digunakan. Metode Taguchi merupakan salah satu jenis desain eksperimen yang dianggap lebih kokoh dan stabil dibanding metode desain eksperimen lainnya karena metode Taguchi mampu mempertimbangkan beberapa faktor dalam satu proses optimasi dengan jumlah eksperimen yang lebih sedikit [1]. Selain itu, hal ini juga dapat berpengaruh pada berkurangnya biaya dan waktu yang dibutuhkan sehingga proses akan lebih efisien.

Karakteristik kualitas dalam Metode Taguchi direpresentasikan oleh *Signal-to-Noise ratio* atau rasio S/N yang dihitung berdasarkan kategori tujuannya, diantaranya *smaller-the-better*, *nominal-the-better* dan *larger-the-better*. *Smaller-the-better* memiliki target nol sebagai nilai idealnya dimana semakin kecil karakteristik kualitas maka semakin baik, *nominal-the-better* merupakan karakteristik kualitas yang memiliki suatu nilai target tertentu, sedangkan *larger-the-better* memiliki target tak terhingga sebagai nilai idealnya dimana

semakin besar karakteristik kualitas maka semakin baik. Istilah “*signal*” atau “sinyal” dalam rasio S/N mengindikasikan efek yang diinginkan terhadap karakteristik luaran, sedangkan istilah “*noise*” atau “kebisingan” mengindikasikan efek yang tidak diinginkan yaitu faktor pengganggu yang dapat mempengaruhi luaran. Semakin tinggi nilai rasio S/N maka akan semakin tinggi pula karakteristik kualitas yang dihasilkan berdasarkan tujuan yang digunakan [1].

Baja tahan karat austenitik merupakan salah satu material yang paling banyak digunakan dalam berbagai aplikasi karena ketahanannya yang tinggi terhadap lingkungan yang korosif. Akan tetapi, karakteristik mikrostruktur dari baja tersebut menyebabkan rendahnya kekerasan dan ketahanan aus yang dimilikinya dibandingkan dengan jenis baja tahan karat lainnya seperti martensitik, feritik, pengerasan presipitat dan dupleks [2]. Baja tahan karat austenitik jenis AISI 316L merupakan jenis baja tahan karat austenitik yang paling banyak digunakan dimana memiliki nilai kekerasan sekitar 200 HV [3] dan nilai volume aus sebesar 300 mm³ dengan indentasi 1000 Nm [4]. Proses perlakuan panas termokimia dapat diterapkan sebagai alternatif metode untuk meningkatkan karakteristik mekanis dari baja tahan karat austenitik melalui proses difusi senyawa kimia ke permukaan material [5]–[7]. Peningkatan kekerasan diperoleh dari terbentuknya lapisan keras *expanded austenite* pada permukaan material [8] dimana jika dibandingkan dari kekerasan awal, peningkatan kekerasan dapat mencapai lima kali lipat [3]. Untuk menghindari munculnya presipitat pada baja tahan karat austenitik yang dapat mengurangi ketahanan korosinya, proses perlakuan panas termokimia dilakukan pada temperatur rendah dibawah 500°C [9], [10].

Proses karburisasi merupakan salah satu jenis proses perlakuan panas termokimia yang banyak digunakan dalam industri manufaktur dimana menggunakan senyawa kimia yang mengandung atom karbon [11], [12]. Proses ini memungkinkan terbentuknya lapisan keras *expanded austenite* yang kaya akan kandungan karbon untuk meningkatkan karakteristik mekanisnya. Walaupun proses nitridasi juga dapat menghasilkan lapisan keras *expanded austenite*, lapisan yang dihasilkan jauh lebih tipis dan rapuh dibanding karburisasi karena atom karbon mampu berdifusi lebih dalam dibanding atom nitrogen mengingat lebih besarnya nilai koefisien difusi yang dimiliki atom karbon [13]. Umumnya, proses perlakuan panas termokimia khususnya karburisasi dengan tungku gas dipengaruhi oleh beberapa parameter utama antara lain temperatur, laju alir gas, waktu dan komposisi gas. Keempat parameter tersebut harus dikontrol selama proses berlangsung untuk menghasilkan lapisan keras *expanded austenite* yang berkualitas sesuai dengan kebutuhan tertentu.

Dalam penerapannya sebagai biomaterial, karakteristik baja tahan karat austenitik yang dibutuhkan yaitu memiliki kekuatan yang sedang (*moderate strength*) khususnya sebagai material perangkat medis non-implan dan implan tubuh jangka pendek [14]. Kekuatan baja tahan karat austenitik hasil perlakuan karburisasi berbanding lurus dengan kedalaman lapisan keras *expanded austenite* yang dihasilkan dimana semakin tinggi nilai kedalaman lapisan keras maka semakin besar kekuatan yang dimiliki oleh baja tahan karat tersebut. Proses karburisasi yang menghasilkan nilai kedalaman lapisan keras yang besar dapat mengurangi tingkat keuletan dari baja tahan karat austenitik sehingga dapat menjadi lebih rapuh. Karakteristik material yang ulet berperan penting dalam proses manufaktur perangkat medis non-implan dimana membutuhkan material yang mudah dibentuk ke dalam berbagai geometri yang rumit [14].

Metode Taguchi telah digunakan dalam berbagai penelitian terkait proses manufaktur pada berbagai material untuk mengoptimalkan pengaturan parameter prosesnya seperti pada proses pembubutan pada baja karbon [15], proses pelapisan listrik pada baja tahan karat [16], proses penggilingan pada baja untuk cetakan [17], dan proses perlakuan panas pada baja ringan, baja karbon, paduan aluminium dan paduan super berbasis nikel [18]–[21]. Dalam bidang perlakuan panas termokimia khususnya proses karburisasi, penerapan metode Taguchi belum banyak diteliti terutama untuk material baja tahan karat tipe austenitik. Hussein et al. (2018) dan Rehman et al. (2018) menggunakan metode Taguchi untuk mengoptimasi parameter proses karburisasi untuk material baja karbon rendah [22], [23]. Kedua penelitian tersebut menggunakan 9 eksperimen dengan beberapa faktor tertentu yang dilibatkan seperti waktu perlakuan, temperatur perlakuan, waktu perendaman spesimen dalam minyak, persentase aktivator, dan lain-lain. Metode Taguchi bersamaan dengan metode permukaan respons juga digunakan dalam optimasi proses karburisasi pada baja karbon rendah-sedang oleh studi lainnya [24]. Seluruh hasil penelitian sebelumnya tersebut menunjukkan bahwa metode Taguchi terbukti dapat digunakan sebagai salah satu metode yang kokoh untuk mengoptimalkan performa berbagai proses dimana dalam hal ini adalah proses manufaktur khususnya proses karburisasi. Akan tetapi, optimasi proses karburisasi pada baja tahan karat austenitik terutama dalam penerapannya sebagai biomaterial masih belum dikembangkan.

Penelitian ini dilakukan untuk menentukan kombinasi optimal dari parameter proses karburisasi pada baja tahan karat austenitik dengan metode Taguchi untuk meningkatkan kualitas hasil lapisan keras *expanded*

austenite dimana nilai target kedalaman lapisan keras sebesar 5 μm berdasarkan penelitian eksperimental sebelumnya [25]. Nilai target ditentukan berdasarkan kebutuhan baja tahan karat austenitik dalam bidang medis sebagai biomaterial dimana memiliki kekuatan yang sedang [14].

2. DESAIN EKSPERIMENTAL DENGAN METODE TAGUCHI

Kedalaman lapisan keras *expanded austenite* merupakan salah satu faktor penting dalam karakteristik kualitas sebuah material baja tahan karat hasil dari proses perlakuan panas termokimia dimana salah satunya yaitu proses karburisasi [7]. Temperatur, laju alir gas, waktu dan komposisi gas merupakan beberapa parameter umum dalam proses karburisasi yang dapat mempengaruhi kedalaman lapisan keras *expanded austenite* yang dihasilkan. **Tabel 1** menunjukkan nilai level dari masing-masing faktor yang ditentukan berdasarkan nilai yang umum digunakan pada penelitian-penelitian sebelumnya terkait proses karburisasi temperatur rendah pada material baja tahan karat dimana dipilih tiga nilai level untuk masing-masing faktor [7], [10], [26]. Penentuan jumlah faktor dan level ini akan mempengaruhi pemilihan matriks ortogonal sebagai dasar pelaksanaan eksperimen.

Tabel 1: Faktor dan level

KODE	FAKTOR	LEVEL 1	LEVEL 2	LEVEL 3	KETERANGAN	
A	Temperatur	400	450	500	celcius	
B	Laju Alir gas	10	15	20	liter/menit	
C	Waktu	4	8	12	Jam	
D	Komposisi Gas	CH ₄	5	10	15	%
		H ₂	5	5	5	%
		N ₂	90	85	80	%

Pemilihan matriks ortogonal dalam sebuah desain eksperimen dilakukan berdasarkan nilai derajat kebebasan total dari parameter faktor dan level yang digunakan. Penghitungan derajat kebebasan total dapat dilakukan menggunakan persamaan berikut ini:

$$\text{DoF}_{\text{total}} = (\text{Jumlah Level} - 1) \times \text{Jumlah Faktor} \quad (1)$$

Penelitian ini menggunakan 4 jenis faktor dimana masing-masing memiliki 3 level sehingga derajat kebebasan total yaitu 8. Nilai derajat kebebasan matriks ortogonal harus lebih besar atau sama dengan derajat kebebasan parameter yang digunakan sehingga matriks ortogonal $L_9(3^4)$ dipilih sebagai desain eksperimen dalam metode Taguchi dimana terdapat kombinasi parameter yang akan dievaluasi untuk mendapatkan kombinasi optimal. **Tabel 2** menunjukkan rancangan eksperimen untuk proses karburisasi temperatur rendah dimana terdiri dari 9 eksperimen dengan berbagai kombinasi faktor dan level. Eksperimen dilakukan untuk mendapatkan nilai kedalaman lapisan keras pada masing-masing kombinasi yang selanjutnya dievaluasi dengan metode Taguchi untuk mendapatkan kombinasi optimal.

Tabel 2: Matriks ortogonal $L_9(3^4)$

EKSPERIMEN	A	B	C	D
	TEMPERATUR	LAJU ALIR GAS	WAKTU	KOMPOSISI GAS
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2

8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

3. UJI EKSPERIMEN

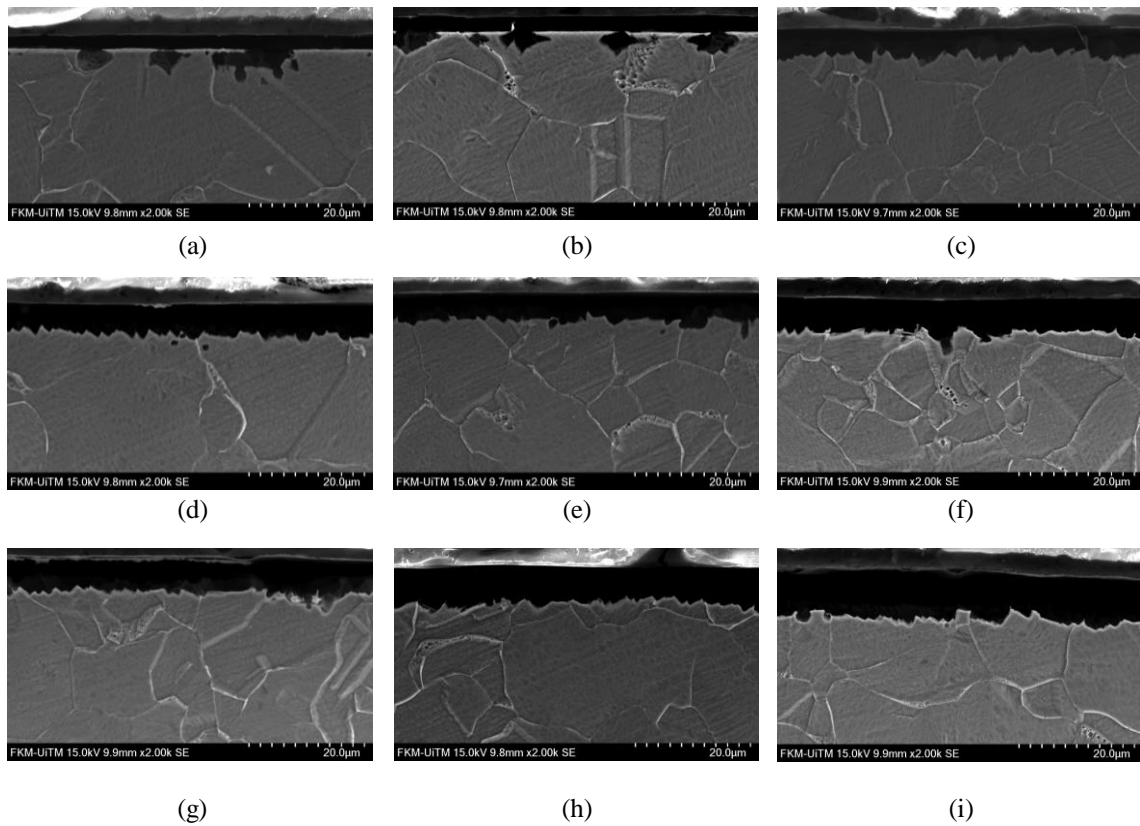
Baja tahan karat tipe austenitik 316L dipilih sebagai spesimen dalam penelitian ini. Eksperimen diawali dengan perendaman spesimen dalam larutan HCl 0.5 M untuk mengangkat lapisan kromium oksida yang dapat menghambat laju difusi karbon. Karburisasi dilakukan pada tungku gas tipe tabung. Sebelum proses karburisasi dimulai, tungku dialirkan oleh gas nitrogen selama 30 menit untuk menghilangkan kandungan oksigen di dalam tabung yang dapat menyebabkan terjadinya oksidasi selama proses karburisasi. Proses karburisasi dilakukan sebanyak 9 jenis kombinasi faktor yang dilakukan dengan pengaturan temperatur, laju alir gas, waktu dan komposisi gas berdasarkan matriks ortogonal pada **Tabel 2**. Spesimen yang sudah melalui proses karburisasi selanjutnya dikarakterisasi menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) dengan tegangan percepatan sebesar 15 kV menggunakan mode elektron sekunder untuk mengidentifikasi kedalaman lapisan keras dan struktur morfologinya. Pengambilan nilai kedalaman lapisan keras dilakukan pada tiga titik yang berbeda. Replikasi dilakukan dengan tujuan untuk meningkatkan ketelitian data hasil eksperimen

4. HASIL DAN DISKUSI

Tabel 3 menunjukkan matriks ortogonal dan nilai kedalaman lapisan keras pada masing-masing kombinasi. Nilai kedalaman lapisan keras diukur pada 3 titik yang berbeda untuk meningkatkan keakuratan data sehingga dapat diambil nilai rata-ratanya. Rata-rata nilai kedalaman lapisan keras dari keseluruhan kombinasi yaitu 5.39 μm . Kombinasi dengan nilai kedalaman lapisan keras terendah terdapat pada eksperimen nomor 1 dengan rata-rata 2.41 μm dan kombinasi dengan nilai kedalaman lapisan keras tertinggi terdapat pada eksperimen nomor 8 dengan rata-rata 8.67 μm . **Gambar 1** menunjukkan hasil *Scanning Electron Microscope* (SEM) dari kesembilan eksperimen tersebut.

Tabel 3: Hasil eksperimen untuk nilai kedalaman lapisan keras

EKSPERIMEN	A	B	C	D	KEDALAMAN LAPISAN KERAS (μm)			RATA-RATA (μm)
					TITIK 1	TITIK 2	TITIK 3	
1	1	1	1	1	2.3	2.43	2.49	2.41
2	1	2	2	2	3.38	2.95	3.04	3.12
3	1	3	3	3	4.86	5.66	6.15	5.56
4	2	1	2	3	5.16	5.86	6.12	5.71
5	2	2	3	1	4.56	4.27	5.23	4.69
6	2	3	1	2	6.45	5.56	5.41	5.81
7	3	1	3	2	5.66	4.76	7.07	5.83
8	3	2	1	3	7.44	6.35	6.46	6.75
9	3	3	2	1	7.84	8.93	9.23	8.67



Gambar 1: Kedalaman lapisan keras (a) Eksperimen 1, (b) Eksperimen 2, (c) Eksperimen 3, (d) Eksperimen 4, (e) Eksperimen 5, (f) Eksperimen 6, (g) Eksperimen 7, (h) Eksperimen 8, dan (i) Eksperimen 9.

Dalam penelitian ini, nilai kedalaman lapisan keras dianggap memiliki kualitas yang tinggi ketika mendekati nilai target sebesar 5 µm sehingga *nominal-the-better* dipilih sebagai objektif dari karakteristik kualitas yang diinginkan. Nilai rasio S/N untuk *nominal-the-better* dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$S/N \text{ Ratio} = -10 \log[\sigma^2 + (\bar{y} - m)^2] \tag{2}$$

dimana σ adalah standar deviasi, \bar{y} adalah rata-rata, m adalah nilai target kedalaman lapisan keras yang diinginkan yaitu dalam penelitian ini sebesar 5 µm. Nilai rasio S/N untuk sembilan kombinasi eksperimen yang telah dilakukan terdapat pada **Tabel 4** yang dihitung dengan menggunakan **Persamaan 2**.

Tabel 4: Nilai rasio S/N

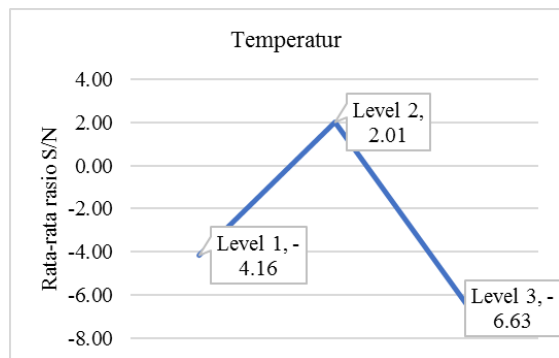
Eksperimen	Rasio S/N (dB)
1	-8.28
2	-5.53
3	1.34
4	1.22
5	4.68
6	0.15
7	-3.11
8	-5.34
9	-11.45

Tabel 5 menunjukkan hasil evaluasi pengaruh dari tiap faktor pada tiga level yang berbeda. Nilai rata-rata dari rasio S/N untuk faktor temperatur pada level 1, 2 dan 3 dapat dihitung dengan menghitung nilai rata-rata rasio S/N dari eksperimen 1-3, 4-6 dan 7-9 berturut-turut, begitu pun untuk nilai respon lainnya pada faktor dan level tertentu. **Gambar 2** menunjukkan grafik respon nilai rasio S/N pada setiap faktor. Seperti yang telah dibahas sebelumnya dimana semakin tinggi nilai rasio S/N maka nilai varians pada karakteristik kualitas tertentu akan semakin kecil sehingga kualitas meningkat. Berdasarkan **Tabel 5** dan **Gambar 2**, kombinasi optimal untuk mendapatkan nilai target kedalaman lapisan keras sebesar 5 μm dapat diperoleh pada kombinasi temperatur 450°C (level 2), laju alir gas 15 liter per menit (level 2), waktu 12 jam (level 3), dan komposisi gas 15% CH₄ – 5% H₂ – 80% N₂ (level 3).

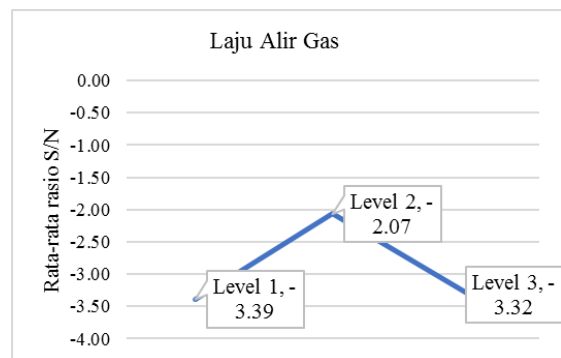
Tabel 5: Tabel respon S/N

KODE	FAKTOR	RATA-RATA RASIO S/N (DB)		
		LEVEL 1	LEVEL 2	LEVEL 3
A	Temperatur	-4.16	2.01*	-6.63
B	Laju Alir Gas	-3.39	-2.07*	-3.32
C	Waktu	-4.49	-5.26	0.97*
D	Komposisi Gas	-5.02	-2.83	-0.93*

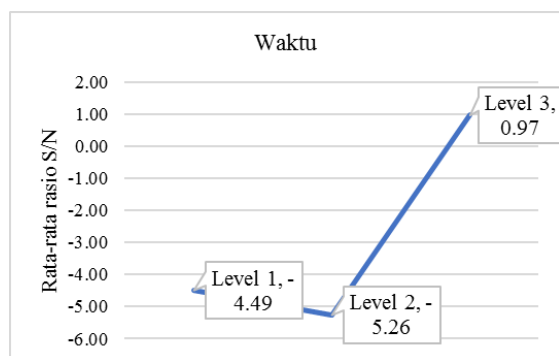
*nilai optimum



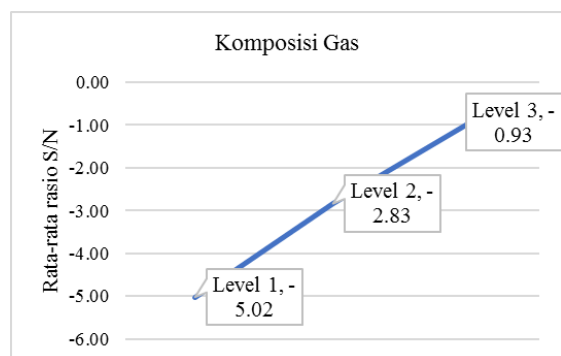
(a)



(b)



(c)



(d)

Gambar 2: Grafik respon rasio S/N terhadap faktor (a) temperatur, (b) laju alir gas, (c) waktu, dan (d) komposisi gas

Setelah mendapatkan kombinasi optimal, perlu dilakukan analisis lebih lanjut terkait varians pada parameter yang digunakan. Analisis varians atau ANOVA digunakan untuk menentukan parameter yang

secara signifikan mempengaruhi karakteristik kualitas. Nilai yang digunakan dalam perhitungan ANOVA juga mengacu pada nilai rasio S/N sebagai representasi dari karakteristik kualitas.

Jumlah kuadrat total (SS_T) terdiri dari jumlah kuadrat dari tiap faktor (SS) dan jumlah kuadrat error (SS_E). Jumlah kuadrat total (SS_T) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$SS_T = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (3)$$

dimana n adalah jumlah eksperimen, y_i adalah nilai rasio S/N pada eksperimen i , \bar{y} adalah nilai rata-rata rasio S/N dari seluruh eksperimen. Persentase kontribusi merupakan perbandingan antara jumlah kuadrat faktor (SS) terhadap jumlah kuadrat total (SS_T).

Simpangan kuadrat rata-rata (SS_M) merupakan jumlah kuadrat faktor (SS) dibagi dengan derajat kebebasan faktor tersebut. Nilai SS_M dibutuhkan untuk menghitung nilai rasio F. Perhitungan rasio F merupakan suatu alat statistik untuk mengidentifikasi parameter yang memiliki efek paling signifikan terhadap karakteristik kualitas. Dengan kata lain, rasio F menghitung tingkat signifikansi suatu faktor pada proses tertentu. Rasio F dapat dihitung dengan membagi simpangan kuadrat rata-rata dari tiap faktor (SS_M) dengan rata-rata kuadrat error ($SS_{M(E)}$).

Tabel 6 menunjukkan hasil ANOVA gabungan (*pooled*) dari kedalaman lapisan keras terhadap parameter yang digunakan dalam metode Taguchi. Derajat kepercayaan yang digunakan adalah 95% untuk rasio F. Berdasarkan **Tabel 6**, temperatur merupakan faktor yang paling berpengaruh secara signifikan terhadap kedalaman lapisan keras *expanded austenite* dengan kontribusi sebesar 54.91%, diikuti oleh faktor waktu sebesar 31.94% dan komposisi gas sebesar 11.61%. Faktor laju alir gas diabaikan karena nilai jumlah kuadrat yang dihasilkan sangat kecil dibanding faktor lainnya sehingga analisis varians gabungan dipakai dalam penelitian ini yang juga dilakukan oleh beberapa penelitian sebelumnya [27], [28]. Berdasarkan nilai rasio S/N dan analisis varians gabungan, kombinasi parameter optimal untuk mendapatkan nilai target kedalaman lapisan keras sebesar 5 μm adalah temperatur pada level 2, laju alir gas pada level 2, waktu pada level 3 dan komposisi gas pada level 3.

Tabel 6: Analisis Varians (ANOVA) Gabungan

	FAKTOR	DOF	JUMLAH KUADRAT (SS)	SIMPANGAN KUADRAT RATA-RATA (SS_M)	RASIO F (F)	PERSENTASE KONTRIBUSI (%)
A	Temperatur	2	119.03	59.51	35.67	54.91
B	Laju Alir Gas	[2]	[3.34]	<i>Pooled</i>		-
C	Waktu	2	69.23	34.61	20.75	31.94
D	Komposisi Gas	2	25.17	12.59	7.54	11.61
	Error (SS_E)	2	3.34	1.67	-	1.54
	Jumlah Kuadrat Total (SS_T)	8	216.76			100.00

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian terkait penerapan metode Taguchi untuk mengoptimalkan proses karburisasi pada baja tahan karat austenitik, dapat disimpulkan bahwa kombinasi parameter proses yang optimal untuk mendapatkan nilai target kedalaman lapisan keras sebesar 5 μm dapat diperoleh dengan temperatur perlakuan 450°C (level 2), laju alir gas 15 liter per menit (level 2), waktu 12 jam (level 3), dan komposisi gas 15% CH_4 – 5% H_2 – 80% N_2 (level 3). Analisis varians gabungan menunjukkan bahwa faktor temperatur memberikan kontribusi yang paling signifikan terhadap kedalaman lapisan keras yaitu sebesar 54.91% diikuti oleh faktor waktu sebesar 31.94% dan faktor komposisi gas sebesar 11.61%. Faktor laju alir gas diabaikan dan digabung dengan faktor pengganggu dikarenakan nilainya yang sangat kecil dibanding faktor-faktor lainnya.

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] TAGUCHI, G., *Taguchi on Robust Technology Development: Bringing Quality Engineering Upstream*. New York, 1993.
- [2] FORUM, I. S. S., “Stainless Steel: Tables of Technical Properties,” *Stainless Steel: Tables of Technical Properties*, https://www.worldstainless.org/Files/issf/non-image-files/PDF/Euro_Inox/Tables_TechnicalProperties_EN.pdf. Diakses: Mar. 2022.
- [3] PINEDO, C. E. AND TSCHIPTSCHIN, A. P., “Low temperature nitriding, nitrocarburising and carburising of AISI 316L austenitic stainless steel,” *International Heat Treatment and Surface Engineering*, v. 5, n. 2, pp. 73–77, 2011.
- [4] CESCHINI, L., CHIAVARI, C., LANZONI, E., AND MARTINI, C., “Low-temperature carburised AISI 316L austenitic stainless steel: Wear and corrosion behaviour,” *Materials and Design*, v. 38, pp. 154–160, 2012.
- [5] JIANG, L., LUO, H., AND ZHAO, C., “Nitrocarburising of AISI 316 stainless steel at low temperature,” *Surface Engineering*, v. 34, n. 3, pp. 205–210, 2018.
- [6] HAIDER, F. I., SURYANTO, AND MAHMOOD, M. H., “Carbon diffusion in 304L austenitic stainless steel at 650 steel at 650 -750°C in carburizing environment,” *International Journal of Recent Technology and Engineering*, v. 7, n. 6, pp. 76–78, 2019..
- [7] BORGIOLI, F., “From austenitic stainless steel to expanded austenite-s phase: Formation, characteristics and properties of an elusive metastable phase,” *Metals*, v. 10, n. 2, 2020.
- [8] SOMERS, M. A. J., CHRISTIANSEN, T. L., AND WINTHER, G., “Expanded austenite; from fundamental understanding to predicting composition-and stress-depth profiles,” in *European Conference on Heat Treatment*, 2018, n. May, pp. 92–101.
- [9] BORGIOLI, F., GALVANETTO, E., AND BACCI, T., “Low temperature nitriding of AISI 300 and 200 series austenitic stainless steels,” *Vacuum*, v. 127, pp. 51–60, 2016.
- [10] PENG, Y., LIU, Z., CHEN, C., GONG, J., AND SOMERS, M. A. J., “Effect of low-temperature surface hardening by carburization on the fatigue behavior of AISI 316L austenitic stainless steel,” *Materials Science and Engineering A*, v. 769, n. 30, p. 138524, 2020.
- [11] COLLINS, S., WILLIAMS, P., MARX, S. V., HEUER, A. H., ERNST, F., AND KAHN, H., “Low-Temperature Carburization of Austenitic Stainless Steels,” *Heat Treating of Irons and Steels*, v. 4, pp. 451–460, 2014.
- [12] JIANG, Y., WU, Q., LI, Y., PENG, Y., AND GONG, J., “Mechanical properties of low-temperature gaseous carburized layer in 316L stainless steel based on nano-indentation and four-point bending tests,” *Surface and Coatings Technology*, v. 387, p. 125501, 2020.
- [13] SUN, Y. AND HARUMAN, E., “Low temperature plasma surface alloying of austenitic stainless steels,” *Solid State Phenomena*, v. 118, pp. 85–90, 2006.
- [14] CHEN, Q. AND THOUAS, G. A., “Metallic implant biomaterials,” *Materials Science and Engineering R: Reports*, v. 87, pp. 1–57, 2015.
- [15] PAMUJI, D. R. AND LUSI, N., “Optimasi Parameter Proses Bubut Material ST 60 dengan Pendinginan Ramah Lingkungan Menggunakan Metode Taguchi-Grey,” *Jurnal Rekayasa Mesin*, v. 10, n. 3, pp. 245–255, 2019.
- [16] PUTRI, S. A., PUJIYANTO, E., AND TRIYONO, J., “Optimization of Electroplating Thickness Quality at Hip Joint Implant Using the Taguchi Method,” *Jurnal Teknik Industri*, v. 20, n. 1, p. 45, 2019.
- [17] RIBEIRO, J. E., CÉSAR, M. B., AND LOPES, H., “Optimization of machining parameters to improve the surface quality,” *Procedia Structural Integrity*, v. 5, pp. 355–362, 2017.
- [18] AGBOOLA, O. O., “Optimization of heat treatment parameters of medium carbon steel quenched in different media using Taguchi method and grey relational analysis,” *Heliyon*, v. 6, n. 7, 2020.
- [19] RAHMADIANTO, F., PURNOWIDODO, A., AND SOENOKO, R., “Upaya Peningkatan Sifat Mekanik Baja Mild Steel Melalui Perbaikan Kualitas dengan Heat Treatment Annealing dan Holding Time pada Heat Treatment dengan Taguchi Method,” *Jurnal Rekayasa Mesin*, v. 5, n. 1, pp. 9–16, 2014..
- [20] KATSARI, C. M., WESSMAN, A., AND YUE, S., “Taguchi Design for Heat Treatment of Rene 65 Components,” *Journal of Materials Engineering and Performance*, v. 29, n. 6, pp. 3603–3611, 2020.
- [21] CHANG, C., YANG, J., CHI, L., AND CHOU, C., “Optimization of heat treatment parameters with the Taguchi method for the A7050 aluminum alloy,” *Advanced Materials Research*, v. 139–141, pp. 157–162, 2010.
- [22] HUSSEIN, A. K., “Multiple Performance Optimization of Carburized Steel Using Taguchi Based Moora Approach,” *Engineering and Technology Journal*, v. 36, n. 7A, pp. 770–776, 2018.
- [23] REHMAN, M. A. U., MUNAWAR, M. A., NAWAZ, Q., AND ANWAR, M. Y., “Design of Experiment Approach in the Industrial Gas Carburizing Process,” *Statistical Approaches With*

Emphasis on Design of Experiments Applied to Chemical Processes, 2018.

- [24] FATOBA, O. S., AKANJI, O. L., AND AASA, A. S., “Optimization of Carburized UNS G10170 Steel Process Parameters Using Taguchi Approach and Response Surface Model (RSM),” *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, v. 02, n. 06, pp. 566–578, 2014.
- [25] BUHAGIAR, J., BELL, T., SAMMONS, R., AND DONG, H., “Evaluation of the biocompatibility of S-phase layers on medical grade austenitic stainless steels,” *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, v. 22, n. 5, pp. 1269–1278, 2011.
- [26] PENG, Y., GONG, J., JIANG, Y., FU, M., AND RONG, D., “Influence of Plastic Pre-Strain on Low-Temperature Gas Carburization of 316L Austenitic Stainless Steel,” *Applied Mechanics and Materials*, v. 853, pp. 178–183, 2016.
- [27] HALIMAH, P. AND EKAWATI, Y., “Penerapan Metode Taguchi untuk Meningkatkan Kualitas Bata Ringan pada UD. XY Malang,” *Jiems (Journal of Industrial Engineering and Management Systems)*, v. 13, n. 1, pp. 13–26, 2020.
- [28] SHIVA KUMAR, K. AND CHENNAKESAVA REDDY, A., “Investigation on mechanical properties and wear performance of Nylon-6/Boron Nitride polymer composites by using Taguchi Technique,” *Results in Materials*, v. 5, n. December 2019, p. 100070, 2020.