

INVESTIGASI PARAMETER PENGELASAN SMAW PADA STST. 304 UNTUK KEKUATAN TEKUK OPTIMAL DENGAN TAGUCHI-GRA

^{1,*}Kristian Ismartaya, ¹Dan Daniel Pandapotan, ²Yosua Kusuma Negara, ³Gilang Argya
Dyaksa, ⁴Ronald Sukwadi

¹Fakultas Arsitektur dan Desain / Desain Produk, Universitas Kristen Duta Wacana, Indonesia

²Teknik Mekatronika, Politeknik ATMI Surakarta, Indonesia

³Fakultas Sains dan Teknologi / Teknik Mesin, Universitas Sanata Dharma, Indonesia

⁴Department of Industrial Engineering, Universitas Katolik Indonesia Atma Jaya, Indonesia
kristianismartaya@staff.ukdw.ac.id*, danpandapotan@gmail.com, kusuma.negara@atmi.ac.id,
gilangad@usd.ac.id, ronald.sukwadi@atmajaya.ac.id

ABSTRACT

Mechanical strength in weld joints is important in construction strength. This research takes the issue of SMAW weld joints strength when receiving bending loads on hopper products made from stainless steel 304. Two types of bending loads identified: root bend and face bend load. This research aims to obtain welding process parameters that are able to maximize the bending strength value of SMAW welding joints on stainless steel 304 material. Taguchi's experimental design uses current strength factors and electrode diameter, with an L8 (4121) Orthogonal Array. The novelty of this research is the use of response variables for root bend and face bend strength values which are optimized simultaneously. Multi-response optimization using Grey Relational Analysis method. The results of multi-response optimization are applied in confirmation tests to obtain actual results. The combination of a current strength of 65 A and an electrode diameter of 2.6 mm produces an optimal bending strength value with a desirability of 0.7475. These parameters produce actual face bend strength response of 1071.01 MPa (an increase of 5.38%) and a root bend strength of 1065.86 MPa (an increase of 17.36%).

Keywords: Bending test, GRA, Optimization, SMAW, Taguchi.

ABSTRAK

Kekuatan mekanik pada sambungan pengelasan menjadi hal penting dalam kekuatan konstruksi. Penelitian mengangkat permasalahan kekuatan sambungan pengelasan SMAW saat menerima pembebanan tekuk pada produk *hopper* dengan material *stainless steel 304*. Dua jenis pembebanan tekuk yang teridentifikasi pada saat penggunaan ialah *root bend* dan *face bend*. Penelitian bertujuan untuk memperoleh parameter proses pengelasan yang mampu memaksimalkan nilai kekuatan tekuk sambungan pengelasan SMAW pada material *stainless steel 304*. Desain eksperimen Taguchi menggunakan faktor kuat arus dan diameter elektroda, dengan *orthogonal array* L8 (4121). Kebaruan penelitian ini ialah penggunaan variabel respon nilai kekuatan tekuk *root bend* dan *face bend* yang dioptimalkan secara simultan. Optimasi multi-respon menggunakan *Grey Relational Analysis*. Hasil optimasi multi-respon selanjutnya diterapkan dalam uji konfirmasi untuk mendapatkan hasil aktual. Kombinasi kuat arus 65 A dan diameter elektroda 2,6 mm menghasilkan nilai kekuatan tekuk optimal dengan *desirability* 0,7475. Parameter tersebut menghasilkan nilai kekuatan *face bend* aktual 1071,01 MPa (meningkat 5,38%) dan kekuatan *root bend* aktual 1065,86 MPa (meningkat 17,36%).

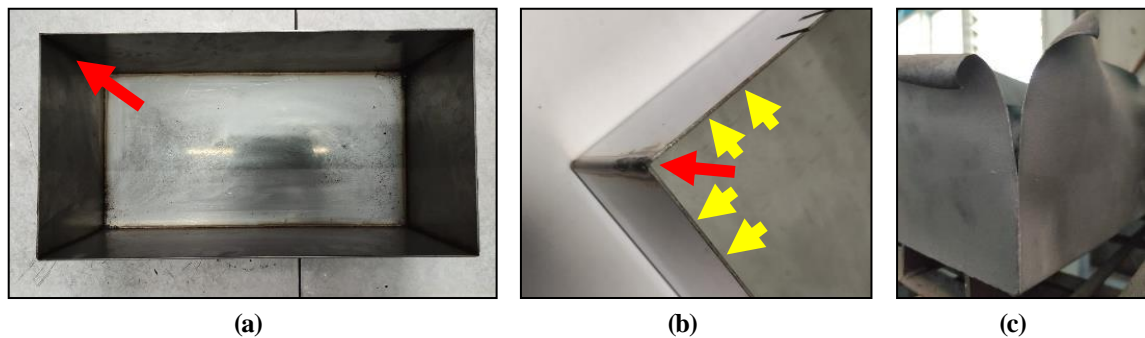
Kata Kunci: GRA, Optimasi, SMAW, Taguchi, Uji tekuk.

LATAR BELAKANG

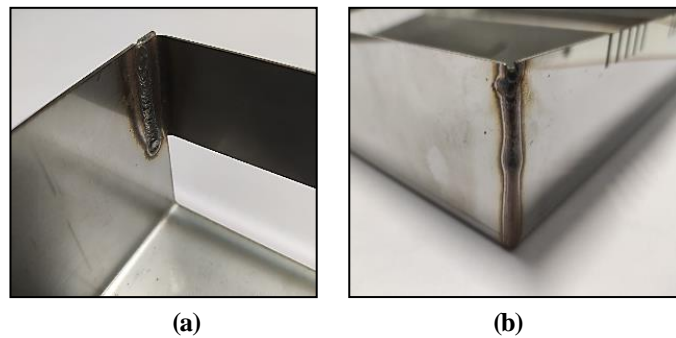
Pengelasan adalah proses manufaktur menyambung dua atau lebih material baja yang berbeda di area tertentu [1]-[3] dengan memanfaatkan panas, tekanan, dan penggunaan bahan pengisi [4]-[9]. Pengelasan tipe *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW) adalah pengelasan dengan pemanasan busur listrik [3], terutama pada baja tipis karena efisien [2], kuat, murah, dan mudah pengaplikasiannya [8]-[11]. Pengelasan SMAW digunakan pada

konstruksi bejana bertekanan [2], *home appliances*, serta industri perakitan [5],[11]-[12]. SMAW juga diaplikasikan untuk perakitan dan penyambungan *stainless steel* di industri [7].

Permasalahan produk yang dikaji dalam penelitian ialah pengelasan SMAW pada bagian sudut prototipe *hopper* (Gambar 1a) berbahan baku *stainless steel* 304. *Hopper* digunakan untuk menampung biji kopi panas yang telah disangrai dalam kapasitas besar. Proses pengelasan dilakukan pada bagian sudut *hopper* (Gambar 1a) untuk menggabungkan setiap sisi samping *hopper*. Produk biji kopi yang ditampung akan memberikan beban tekan ke sisi samping prototipe *hopper* (Gambar 1b panah kuning) sehingga timbul beban tekuk pada sambungan pengelasan pada sudut prototipe *hopper* (Gambar 1a dan 1b panah merah). Sambungan las yang lemah dapat mengakibatkan kerusakan pada sudut *hopper*. Gambar 1c menunjukkan kerusakan yang terjadi di bagian sambungan pengelasan pada *hopper* lama.



Gambar 1. a) Sudut *hopper* yang dilas SMAW; b) arah pembebanan pada sudut *hopper*; dan c) kerusakan sudut *hopper*



Gambar 2. a) pengelasan sisi dalam berpotensi *root bend*; b) pengelasan sisi luar berpotensi *face bend*

Pembebanan tekuk yang diterima sambungan las berbeda sesuai arah pengelasannya. Arah pengelasan dari sisi dalam *hopper* menyebabkan permukaan sambungan las menjadi area yang menerima gaya lebih awal (*root bend*), ditunjukkan Gambar 2a. Sebaliknya, arah pengelasan dari sisi luar *hopper* menyebabkan bagian akar sambungan las menerima gaya lebih awal (*face bend*) ditunjukkan pada Gambar 2b. Perlu dilakukan penelitian proses pengelasan SMAW yang menghasilkan sambungan kuat pada *hopper* untuk mengatasi kegagalan konstruksi (Gambar 1c) akibat pembebanan oleh produk. Kekuatan sambungan pengelasan perlu menjadi perhatian utama karena memiliki peran penting dalam struktur konstruksi dan menentukan umur pakai struktur, serta mencegah kerugian ekonomi [3]. Pada proses pengelasan sudut *hopper*, arah dan posisi pengelasan tidak dapat dipastikan. Hal ini bergantung pada posisi *hopper* dan operator di area pengelasan. Perbedaan arah dan posisi

pengelasan memberikan respon kekuatan tekuk yang berbeda pada sambungan las. Dengan demikian, penelitian perlu dilakukan untuk menemukan parameter pengelasan yang menghasilkan respon kekuatan tekuk *root bend* dan *face bend* paling optimal. Diharapkan kekuatan tekuk optimal dapat memperpanjang umur pakai komponen.

Berdasarkan tinjauan literatur, disimpulkan bahwa kekuatan mekanik hasil pengelasan menjadi tolok ukur kualitas, serta parameter pengelasan (kuat arus dan tegangan, jenis elektroda, dan kondisi material) berpengaruh pada kualitas pengelasan SMAW. Penelitian yang ada merujuk pada 2 faktor yang memberikan pengaruh paling signifikan pada kekuatan pengelasan SMAW, yaitu: diameter elektroda dan kuat arus. Penelitian Kchaou et al., 2014 [13] dan Qazi et al., 2020 [11] sepakat menyatakan bahwa diameter elektroda mempengaruhi kekuatan mekanik. Penelitian Buchely et al., 2015 [12] dan Baghel, 2022 [2] menyatakan bahwa diameter elektroda yang lebih besar dan kuat arus yang tinggi menghasilkan kekuatan yang lebih baik. Penelitian Widodo et al., 2018 [6], Vellaichamy & Paulraj, 2018 [14], Haider et al., 2019 [1], Weerasekralage et al., 2019 [10], Patil & Kadam, 2020 [7]; dan Patil & Kadam, 2021 [9] sepakat bahwa kekuatan pengelasan meningkat dengan arus pengelasan yang lebih tinggi. Hal ini sejalan dengan penelitian Shukla et al., 2018 [5] dimana peningkatan kuat arus menghasilkan penetrasi pengelasan lebih dalam. Namun, penelitian Sumardiyanto & Susilowati, 2019 [8] menunjukkan fakta berbeda bahwa kekuatan mekanik akan menurun seiring tingginya kuat arus. Dapat disimpulkan bahwa penelitian terdahulu menunjukkan hubungan faktor kuat arus pengelasan dan diameter elektroda berpengaruh signifikan pada kekuatan mekanik hasil pengelasan SMAW. Dengan demikian, penting untuk menentukan parameter pengelasan karena mempengaruhi sifat kekuatan mekanik [6]-[8], serta berdampak pada produktivitas [1] dan kualitas pengelasan [12].

Respon pengujian kekuatan mekanik mendominasi tujuan penelitian terkait kualitas pengelasan. Pengujian tarik banyak dilakukan dalam penelitian sebelumnya, seperti dalam penelitian Widodo et al., 2018 [6], Haider et al., 2019 [1], Weerasekralage et al., 2019 [10], dan Baghel, 2022 [2]. Shukla et al., 2018 [5] meneliti untuk respon kedalaman penetrasi pengelasan, sedangkan Patil & Kadam, 2021 [9] mengkombinasikan kekuatan tarik dan pengendapan logam sebagai respon dalam penelitiannya. Munawar et al., 2018 [4], Vellaichamy & Paulraj, 2018 [14], Sumardiyanto & Susilowati, 2019 [8], dan Qazi et al., 2020 [11] melakukan penelitian untuk kombinasi respon kekuatan tarik, nilai kekerasan, dan kekuatan impak. Penelitian Buchely et al., 2015 [12] berfokus pada pembahasan kekuatan *fatigue*, sedangkan penelitian Kchaou et al., 2014 [13] membahas mengenai kekuatan mekanik umum, serta komposisi dan mikro struktur pada sambungan las. Pengujian untuk kekuatan tekuk dan struktur mikro pada sambungan las dilakukan oleh Srivastava et al., 2016 [3], namun terbatas pada satu arah pengujian tekuk. Dengan demikian, pengujian mekanik secara umum digunakan sebagai tolok ukur keberhasilan parameter proses pengelasan.

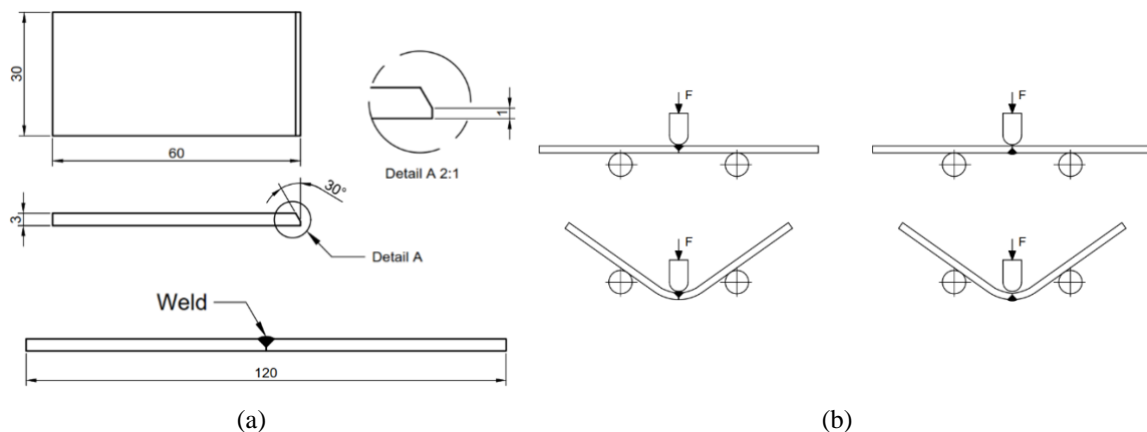
Operator las menginformasikan bahwa parameter pengelasan yang digunakan saat ini ialah kuat arus 80 A dan diameter elektroda 2,6 mm, sesuai rekomendasi dari distributor elektroda kawat las dan spesifikasi pada kemasan elektroda (Gambar 4). Proses pra-penelitian menunjukkan bahwa parameter pengelasan saat ini menghasilkan nilai kekuatan uji tekuk *face bend* rata-rata 1016,30 MPa dan nilai kekuatan uji tekuk *root bend* rata-rata 908,15 MPa. Hasil pra-penelitian menunjukkan nilai kekuatan uji tekuk *face bend* dan *root*

bend yang tinggi, namun kondisi aktual menunjukkan terdapat kegagalan proses pengelasan berupa sobekan pada bagian sambungan las, seperti ditampilkan pada Gambar 1c. Dengan demikian, penelitian perlu dilakukan untuk menemukan parameter yang mengoptimalkan nilai kekuatan tekuk *face bend* dan *root bend* secara simultan atau berimbang.

Penelitian ini memaparkan hasil optimasi proses pengelasan berbasis eksperimen untuk memperoleh nilai kekuatan tekuk yang lebih baik pada bagian sambungan pengelasan SMAW. Penelitian bertujuan untuk menemukan parameter proses pengelasan SMAW pada *stainless steel* 304 yang secara simultan mengoptimalkan nilai kekuatan tekuk dua arah (*root bend* dan *face bend*) pada sambungan las. Kebaruan dalam penelitian ini ialah penggunaan 2 respon penelitian (kombinasi kekuatan tekuk *root bend* dan *face bend*) pada sambungan pengelasan sesuai jenis pembebanan aktual yang diterima produk *hopper*.

METODE PENELITIAN

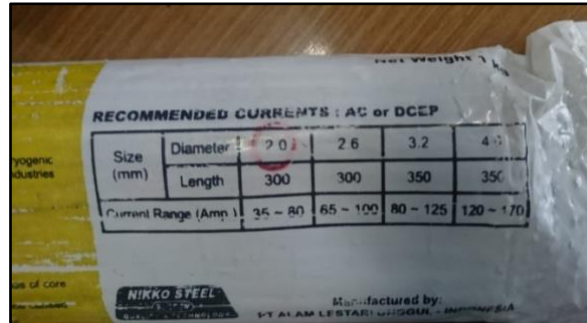
Spesimen penelitian menggunakan material *stainless steel* 304 yang kuat, tangguh [6], dan memiliki sifat mampu las baik [13]. Material spesimen memiliki tebal 3 mm sesuai dengan ketebalan *hopper* aktual dan standar pengujian tekuk. Spesifikasi spesimen dan sambungan las SMAW ditunjukkan Gambar 3a. Uji tekuk adalah pengujian merusak untuk mengetahui kualitas kekuatan sambungan las akibat pembebanan bengkok. Pengujian tekuk menggunakan mesin UTM sesuai Standar EN 910 untuk uji tekuk sambungan pengelasan logam [3]. Respon kekuatan tekuk sambungan las dalam satuan MPa (Mega Pascal). Visualisasi pengujian tekuk *root bend* dan *face bend* ditunjukkan pada Gambar 3b.



Gambar 3. a) Desain spesimen dan posisi pengelasan; b) uji tekuk *root bend* (kiri) & *face bend* (kanan)

Elektroda wajib memiliki komposisi yang serupa dengan bahan dasar yang akan dilas [4]. Pemilihan diameter elektroda harus sesuai tebal material dan jarak celah antara dua bahan dasar [2]. Penelitian menggunakan spesimen *stainless steel* tebal 3 mm dan dimensi elektroda yang disarankan ialah diameter 2 mm dan 2,6 mm, tipe NSN 316L khusus pengelasan *stainless steel*. Data terkait diameter elektroda dan rentang kuat arus yang disarankan diperoleh dari kemasan elektroda dari distributor, seperti ditampilkan pada Gambar 4. Elektroda diameter 2 mm memiliki rentang kuat arus 35-80 A, sedangkan elektroda diameter 2,6 mm memiliki rentang kuat arus 65-100 A. Kedua tipe elektroda memiliki rekomendasi rentang kuat arus yang sama antara nilai 65 A hingga 80 A. Penelitian

ini menerapkan parameter kuat arus dalam rentang tersebut menjadi 65 A, 70 A, 75 A, dan 80 A untuk elektroda berdiameter 2 mm dan 2,6 mm. Faktor dan level perlakuan dalam eksperimen penelitian ini ditampilkan pada Tabel 1.



Gambar 4. Data diameter elektroda dan kuat arus yang disarankan pada kemasan elektroda

Tabel 1. Parameter proses pengelasan SMAW untuk eksperimen penelitian

Faktor	Level			
	1	2	3	4
Kuat arus (A)	65	70	75	80
Diameter elektroda (mm)	2	2,6	-	-

Tabel 2. Desain eksperimen Taguchi OA L8 ($4^1 2^1$)

Runs	1	2	3	4	5	6	7	8
A - (coded value)	1	1	2	2	3	3	4	4
B - (coded value)	1	2	1	2	1	2	1	2
A - Kuat arus (A)	65	65	70	70	75	75	80	80
B - Diameter elektroda (mm)	2	2,6	2	2,6	2	2,6	2	2,6

Penelitian Winarni & Handoko, 2016 [15]; Devi et al., 2016 [16]; Vellaichamy & Paulraj, 2018 [14]; Qazi et al., 2020 [11]; Winarni et al., 2021 [17]; dan Ismartaya et al., 2023 [18] menggunakan desain eksperimen Taguchi untuk permasalahan optimasi untuk perbaikan kualitas suatu produk. Kriteria Taguchi dalam penelitian ialah *larger-the-better*, sesuai tujuan penelitian mencapai nilai kekuatan tekuk terbesar. Tabel 2 menampilkan rancangan Taguchi *orthogonal array* L8 ($4^1 2^1$).

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Eksperimen dan Optimasi Multi-respon

Jumlah spesimen disiapkan untuk dilakukan 3 replikasi. Setiap spesimen diberi perlakuan pengelasan sesuai kombinasi eksperimen pada Tabel 2. Selanjutnya dilakukan pengujian tekuk metode *root bend* dan *face bend* pada sambungan pengelasan. Hasil pengelasan dan pengujian tekuk ditampilkan pada sampel Gambar 5. Hasil pengujian berupa nilai kekuatan tekuk ditampilkan pada Tabel 3.

Tabel 3 menampilkan hasil eksperimen uji tekuk untuk *root bend* dan *face bend*, serta nilai *S/N Ratio* setiap respon. Tabel 3 menunjukkan bahwa respon optimal kekuatan tekuk uji *root bend* diperoleh dari parameter pengelasan kuat arus 75 A dan diameter elektroda 2,6

mm (eksperimen ke-6), sedangkan respon optimal untuk kekuatan tekuk uji *face bend* diperoleh dari parameter pengelasan kuat arus 65 A dan diameter elektroda 2,0 mm (eksperimen ke-1). Namun eksperimen ini hanya menghasilkan respon tunggal yang optimal, maka perlu metode lanjut untuk mendapatkan optimasi multi-respon. Penelitian ini hendak mencari parameter pengelasan yang menghasilkan nilai kekuatan tekuk *root bend* dan *face bend* yang optimal secara simultan.



Gambar 5. Hasil pengelasan (kiri), hasil uji tekuk *root bend* (tengah) dan *face bend* (kanan)

Tabel 3. Hasil pengujian tekuk *root bend* dan *face bend*

Runs	Kuat Arus (A)	Diameter elektroda (mm)	Mean Nilai Kekuatan Tekuk (MPa)		S/N Ratio	
			Root bend	Face Bend	Root Bend	Face Bend
1	65	2	792,59	1188,15*	57,9658	61,4874
2	65	2,6	1068,15	1065,19	60,5700	60,5411
3	70	2	810,37	1134,81	58,1641	61,0800
4	70	2,6	1029,63	1004,44	60,2182	60,0276
5	75	2	760,00	931,85	57,6151	59,3820
6	75	2,6	1074,07*	946,67	60,6155	59,5209
7	80	2	817,78	1063,70	58,2391	60,5340
8	80	2,6	908,15	1016,30	59,1347	60,1344

Optimasi multi-respon menghasilkan kombinasi level faktor yang menghasilkan respon optimum dengan mempertimbangkan beberapa karakteristik respon secara simultan [16]. Penelitian Winarni & Handoko, 2016 [15]; Devi et al., 2016 [16]; Vellaichamy & Paulraj, 2018 [14]; dan Qazi et al., 2020 [11] mengkombinasikan metode Taguchi dengan *Grey Relational Analysis* (GRA) untuk mendapatkan parameter proses yang mengoptimalkan multi-respon. Metode Taguchi-GRA diterapkan dengan mempertimbangkan beberapa karakteristik kualitas secara simultan [15], agar diperoleh komposisi perlakuan yang merupakan solusi optimal untuk semua respon [17]-[19]. *Grey Relational Analysis* (GRA) mengolah nilai *S/N Ratio* dari Taguchi untuk mengoptimalkan respon kekuatan tekuk *face bend* dan *root bend* (*multi-responses optimization*) secara bersamaan. Analisis GRA dilakukan berdasarkan nilai *S/N Ratio* hasil eksperimen [14].

Proses perhitungan GRA dan hasil perhitungan ditampilkan pada Tabel 4. Nilai *Grey Relational Grade* (GRG) tertinggi menunjukkan karakteristik multi-respon terbaik yang merupakan level parameter proses yang paling optimal [14]. Nilai GRG tertinggi sebesar 0,7486 diperoleh pada eksperimen atau runs ke-2. Mengacu pada desain eksperimen Taguchi sebelumnya, eksperimen ke-2 menggunakan parameter pengelasan kuat arus 65 A dan diameter elektroda 2,6 mm. Perhitungan nilai *non-weighted* GRG mengidentifikasi faktor yang mempengaruhi seluruh respon dan mengkonfirmasi parameter terbaik berdasarkan nilai GRG setiap level-faktor. Hasil perhitungan *non-weighted* GRG ditampilkan di Tabel 5.

Tabel 4. Perhitungan Normalisasi, Deviation Sequence, GRC, dan GRG

Runs no.	Normalisasi S/N Ratio		Deviation Sequence		Grey Relational Coefficient		Grey Relational Grade	Rank.
	Root bend	Face bend	Root bend	Face bend	Root bend	Face bend		
1	0,12	1,00	0,88	0,00	0,36	1,00	0,6808	2
2	0,98	0,55	0,02	0,45	0,97	0,53	0,7486*	1
3	0,18	0,81	0,82	0,19	0,38	0,72	0,5503	5
4	0,87	0,31	0,13	0,69	0,79	0,42	0,6048	4
5	0,00	0,00	1,00	1,00	0,33	0,33	0,3333	8
6	1,00	0,07	0,00	0,93	1,00	0,35	0,6743	3
7	0,21	0,55	0,79	0,45	0,39	0,52	0,4559	7
8	0,51	0,36	0,49	0,64	0,50	0,44	0,4704	6

Tabel 5. Non-weighted GRG

Level	Faktor	
	Kuat Arus	Diameter Elektroda
1	0,715*	0,505
2	0,578	0,625*
3	0,504	
4	0,463	
Delta	0,252	0,119
Rank	1	2
Optimum	A1B2	

2. Pembahasan dan Uji Konfirmasi

Hasil perhitungan *non-weighted* GRG pada Tabel 5 menunjukkan bahwa parameter A1B2 (kuat arus 65 A dan diameter elektroda 2,6 mm) memiliki nilai GRG tertinggi dan merupakan parameter pengelasan yang paling optimal. *Non-weighted* GRG menunjukkan faktor kuat arus memberikan pengaruh signifikan pada respon kekuatan tekuk (nilai *delta max-min* terbesar). Hasil ini sejalan dengan penelitian Kchaou et al., 2014 [13]; Buchely et al., 2015 [12]; Shukla et al., 2018 [5]; Haider et al., 2019 [1]; Weerasekralage et al., 2019 [10]; Widodo et al., 2018 [6]; Patil & Kadam et al., 2020 [7]; Sumardiyanto & Susilowati, 2019 [8]; Qazi et al., 2020 [11]; Patil & Kadam et al., 2021 [9], dan Baghel, 2022 [2] bahwa kuat arus berperan signifikan pada kekuatan sambungan pengelasan. Kuat arus menentukan *heat input* yang mempengaruhi homogenitas struktur [2] dan kedalaman penetrasi kampuh las [11]. Kedalaman penetrasi kampuh las yang tepat meningkatkan daya ikat antara kampuh dan logam. Namun, pemanasan yang berlebih dapat meningkatkan *Heat Affected Zone* dan menurunkan kekuatan mekanik material [8]. Kuat arus kecil meningkatkan kekuatan sambungan pengelasan terhadap pembebanan tekuk, sejalan dengan penelitian Sumardiyanto & Susilowati, 2019 [8]. Hasil *non-weighted* GRG menunjukkan diameter elektroda yang lebih besar meningkatkan nilai kekuatan tekuk sambungan pengelasan SMAW pada *stainless steel* 304. Ukuran diameter elektroda yang lebih besar akan

menghasilkan kampuh las yang lebih banyak sehingga meningkatkan daya ikat material. Hal ini sesuai penelitian Kchaou et al., 2014 [13], Qazi et al., 2020 [11], dan Baghel, 2022 [2] yang menyatakan diameter elektroda lebih besar memberikan dampak kekuatan mekanik lebih baik, termasuk kekuatan tekuk pada sambungan las.

Tahap akhir penelitian adalah uji konfirmasi. Uji konfirmasi dilakukan untuk memastikan bahwa parameter terpilih dapat diaplikasikan dan menghasilkan respon nilai kekuatan optimal secara keseluruhan. Uji konfirmasi menggunakan parameter optimal terpilih kuat arus 65 A dan diameter elektroda 2,6 mm. Hasil uji konfirmasi ditampilkan pada Tabel 6 berikut.

Tabel 6. Hasil uji konfirmasi dengan parameter terbaik

Tipe tes	Kuat Arus (A)	Dia. elektroda (mm)	Trial 1 (MPa)	Trial 2 (MPa)	Rata-rata (MPa)
<i>Root bend</i>	65	2,6	1061,29	1070,43	1065,86
<i>Face bend</i>	65	2,6	1078,04	1063,98	1071,01

Uji konfirmasi menunjukkan bahwa parameter proses pengelasan yang terpilih menghasilkan kekuatan tekuk *face bend* 1071,01 Mpa, meningkat 5,38% dari kekuatan pada parameter sebelumnya sebesar 1016,30 MPa. Sedangkan kekuatan *root bend* yang dihasilkan parameter terpilih adalah 1065,86 Mpa, meningkat 17,36% dari kekuatan pada parameter sebelumnya, yaitu 908,15 MPa. Dengan demikian, parameter proses pengelasan terpilih mampu mengoptimalkan multi-respon nilai kekuatan tekuk *face bend* dan *root bend* secara simultan. Selisih kekuatan antara kedua pengujian tidak terlalu besar, yaitu 5,15 Mpa bila dibandingkan dengan parameter sebelumnya, yaitu 108,15 Mpa. Hal ini menunjukkan bahwa parameter ini mampu menghasilkan multi-respon *face bend* dan *root bend* secara seimbang. Keseimbangan kekuatan *face bend* dan *root bend* membebaskan operator memilih arah pengelasan *hopper* sesuai dengan posisi kerja operator saat melakukan pengelasan.

KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian dengan metode Taguchi-GRA sukses menghasilkan parameter proses pengelasan SMAW material *stainless steel* 304 yang mengoptimalkan kekuatan uji tekuk *root bend* dan *face bend*. Faktor kuat arus berkontribusi signifikan terhadap respon kekuatan tekuk sambungan pengelasan SMAW. Penelitian menghasilkan parameter pengelasan optimal dengan kuat arus 65 A dan diameter elektroda 2,6 mm, yang menghasilkan nilai kekuatan tekuk rata-rata aktual *face bend* 1071,01 Mpa dan *root bend* 1065,86 Mpa, serta nilai desirability 0,7486. Parameter pengelasan baru meningkatkan kekuatan tekuk *face bend* 5,38% dan *root bend* 17,36% dibandingkan dengan parameter lama yang digunakan sebelumnya.

Penelitian lanjutan dapat dilakukan dengan pengelasan tipe *double V-butt join*, serta melibatkan variasi ketebalan plat untuk mengetahui pengaruhnya pada kekuatan tekuk pengelasan.

REFERENSI

- [1] Haider, S. F., Quazi, M. M., Bhatti, J., Bashir, M. N., & Ali, I. (2019). "[Effect of shielded metal arc welding \(SMAW\) parameters on mechanical properties of low-carbon, mild and stainless-steel welded](#)

- [joints: a review](#)". *Journal of Advances in Technology and Engineering Research*, 5(5):191-198. DOI: 10.20474/jater-5.5.1.
- [2] Baghel, P.K. (2022). "[Effect of SMAW process parameters on similar and dissimilar metal welds: an overview](#)". *Heliyon*, 8(12). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e12161>.
- [3] Srivastava, A., Shekhar, S., Rai, P., Nema, A., Pandey, A., Jha, R., & Ayub, A. (2016). "[Analysis of Welding Joints and Processes](#)". *International Journal of Computer Applications*, 975-8887.
- [4] Munawar, Abbas, H., & Aminy, A. Y. (2018). "[The effects of shielded metal arc welding \(SMAW\) welding on the mechanical characteristics with heating treatment in S45C steel](#)". *IOP Publishing, Journal of Physics: Conference Series*, 962(1). DOI: 10.1088/1742-6596/962/1/012063.
- [5] Shukla, A. A., Joshi, V. S., A. chel, & Shukla, B. A. (2018). "[Analysis of shielded metal arc welding parameter on depth of penetration on AISI 1020 plates using response surface methodology](#)". *Procedia manufacturing*, 20:239-246. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.035>.
- [6] Widodo, E., Iswanto, I., Nugraha, M., & Karyanik, K. (2018). "[Electric current effect on mechanical properties of SMAW-3G on the stainless steel AISI 304](#)". *MATEC Web of Conferences*, 197:12003. DOI: 10.1051/mateconf/201819712003.
- [7] Patil, U. S. & Kadam, M. S. (2020). "[Multiobjective optimization of MMAW process parameters for joining stainless steel 304 with mild steel by using response surface methodology](#)". *Materials Today: Proceedings*, 26(2):305-310. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.11.277.
- [8] Sumardiyanto, S. & Susilowati, S. E. (2019). "[Effect of welding parameters on mechanical properties of low carbon steel API 5L shielded metal arc welds](#)". *American Journal of Materials Science*, 9(1):15-21. doi:10.5923/j.materials.20190901.03.
- [9] Patil, U. S. & Kadam, M. S. (2021). "[Microstructural analysis of SMAW process for joining stainless steel 304 with mild steel 1018 and parametric optimization by using response surface methodology](#)". *Materials Today: Proceedings*, 44:1811-1815. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.12.008.
- [10] Weerasekralage, L. S. S. K., Karunaratne, M., & Pathirana, S. D. (2019). "[Optimization of shielded metal arc welding \(SMAW\) process for mild steel](#)".
- [11] Qazi, M. I., Akhtar, R., Abas, M., Khalid, Q. S., Babar, A. R., & Pruncu, C. I. (2020). "[An integrated approach of GRA coupled with principal component analysis for multi-optimization of shielded metal arc welding \(SMAW\) process](#)". *Materials*, 13:3457. <https://doi.org/10.3390/ma13163457>.
- [12] Buchely, M. F., Colorado, H. A., & Jaramillo, H. E. (2015). "[Effect of SMAW manufacturing process in high-cycle fatigue of AISI 304 base metal using AISI 308L filler metal](#)". *Journal of Manufacturing Processes*, 20(1):181-189. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2015.08.005>.
- [13] Kchaou, Y., Haddar, N., Hénaff, G., Pelosin, V., & Elleuch, K. (2014). "[Microstructural compositional and mechanical investigation of shielded metal arc welding \(SMAW\) welded superaustenitic UNS N08028 \(Alloy 28\) stainless steel](#)". *Materials and Design*, 63:278-285. DOI: 10.1016/j.matdes.2014.06.014.
- [14] Vellaichamy, L., & Paulraj, S. (2018). "[Multi-response optimization of process parameters for GTAW process in dissimilar welding of Incoloy 800HT and P91 steel by using grey relational analysis](#)". *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 314(1). DOI: 10.1088/1757-899X/314/1/012023
- [15] Winarni, S., & Handoko, B. (2016). "[Optimasi karakteristik kualitas lead-slag perisai radiasi beton menggunakan metode grey-taguchi desirability function](#)". *Spektra: Jurnal Fisika dan Aplikasinya*, 1(2):171-178. DOI: 10.21009/SPEKTRA.
- [16] Devi, Winarni, S., & Handoko, B. (2016). "[Penerapan metode grey relational analysis dan PCA pada optimasi multirespon desain taguchi](#)". *Seminar Pendidikan Matematika SPs UPI*.
- [17] Winarni, S., Sunengsih, N., & Ginanjar, I. (2021). "[Multi responses taguchi optimization using overlaid contour plot and desirability function](#)". *Journal of Physics: Conference Series*, 1776:012061. DOI: 10.1088/1742-6596/1776/1/012061.
- [18] Ismartaya, K., Bawono, B., & Anggoro, P. W. (2023). "[Hardness and toughness investigation of ASSAB 705 steel by various tempering temperatures](#)". *Key Engineering Materials*, 951(6):11-20. <https://doi.org/10.4028/p-qlfK6>
- [19] Nayakappa, P. A., Gaurish, W. A., & Mahesh, G. (2019). "[Grey relation analysis methodology and its application](#)". *Research Review International Journal of Multidisciplinary*, 4(2):409-411. DOI: 10.5281/zenodo.2578088.