

Optimasi Sifat Fisik dan Mekanik Sambungan Las TIG (Tungsten Inert Gas) pada Baja SS400 dengan Variasi Nilai Arus Listrik

Yustiasih Purwaningrum^{1*}, Isal Alvianto², Reza Arief Sidiq³

^{1,2,3} Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta, Indonesia

**Corresponding Email: yustiasih.purwaningrum@uii.ac.id*

ABSTRAK

Penelitian ini mempunyai fokus untuk mendapatkan optimasi sifat fisik dan mekanik hasil las Tungsten Inert Gas (TIG) pada baja SS 400 yang banyak digunakan untuk aplikasi industri. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh arus listrik dengan variasi 85 A, 90 A dan 95 A pada sifat fisik dan mekanik hasil pengelasan. Material yang digunakan adalah baja SS 400 dengan ketebalan 3 mm. Parameter pengelasan yang digunakan adalah elektroda tungsten AWS A5 12-80 dengan diameter 2,4 mm, logam pengisi ER70S-6 dengan diameter 1,6 mm, gas pelindung argon dengan flow rate 6 liter/menit, tegangan listrik 230 V dan kecepatan pengelasan 1,46 mm/s. Dari hasil pengujian yang dilakukan didapatkan hasil las dengan variasi arus las 95 A mempunyai sifat fisik dan mekanik terbaik. Hasil pengujian tarik menunjukkan kekuatan tariknya adalah 390,3 Mpa. Nilai ini lebih tinggi dibandingkan variasi arus lainnya yaitu 224,1 Mpa untuk arus listrik 85 A dan 235,2 untuk arus listrik 90 A. Hasil pengujian ketangguhan menunjukkan spesimen dengan variasi arus 95 A mempunyai nilai tertinggi yaitu 1,27 J/mm. Pengamatan struktur mikro menunjukkan bahwa hasil las pada semua variasi arus listrik mempunyai struktur mikro berupa grain boundary ferrite, Acicular ferrite dan Widmanstatten Ferrite.

Kata Kunci: Tungsten Inert Gas (TIG), arus pengelasan, kekuatan, mikrostruktur, ketangguhan.

ABSTRACT

The study focused on optimizing the physical and mechanical properties of TIG (Tungsten Inert Gas) welded joints on SS400 steel, which is essential to fulfill quality standards in the industry. The aim of this study is to analyze the influence of welding current with variations in values of 85 Amperes, 90 Amperes and 95 Amperes on the physical and mechanical properties of welded joints. The material used was SS400 steel with a thickness of 3 mm. The welding parameters used are AWS A5 12-80 tungsten electrode with a diameter of 2.4 mm, filler ER70S-6 with a diameter of 1.6 mm, argon shielding gas, flow rate 6 liters/minute, voltage 230 V, and welding speed 1.46 mm/s. From the results of the tests carried out, the welding steel that used a current of 95 Ampere has the best performance. The results of the tensile test showed that the tensile strength of this specimen was 390.3 MPa. This value is higher when compared to other current variations which have a value of 224.1 MPa for 85 Ampere and 235.2 MPa for 90 Ampere. In the toughness test, the specimen with a current of 95 Ampere showed the best impact value that reached 1.27 J/mm. Microstructure observation of the specimen showed a phase change where in the HAZ and raw metal regions there were a pearlite and ferrite, then due to the high heat in the welding area and the addition of fillers, the ferrite changed its phase to grain boundary ferrite, Acicular ferrite and Widmanstatten ferrite

Keywords: Tungsten Inert Gas (TIG), welding current, strength, microstructure, toughness

1. Pendahuluan

Proses pengelasan adalah proses penyambungan dua atau lebih material dengan menggunakan panas dan atau gaya mekanik, dengan atau tanpa material pengisi, untuk mendapatkan kontinuitas mekanis dan metalurgi (Theodore, et.al, 2025). Pengelasan busur tungsten gas / Gas Tungsten Arc Welding (GTAW), yang juga dikenal sebagai pengelasan *Tungsten Inert Gas* (TIG), merupakan salah satu jenis pengelasan busur listrik. Busur listrik pada pengelasan TIG terbentuk antara elektroda tungsten yang tidak terumpan dan benda kerja yang akan dilas dengan menggunakan gas pelindung (Ming, et.al, 2007).

Proses pengelasan *Tungsten Inert Gas* (TIG) adalah salah satu proses pengelasan yang paling banyak digunakan karena hasil lasnya yang halus, bersih, sifat mekanik baik, peralatan murah, pengoperasian mudah dan tidak menghasilkan banyak asap (Wu, et.al, 2022 dan Xiong, et.al, 2017). Selain itu kelebihan lain dari pengelasan TIG adalah dapat digunakan untuk berbagai jenis material (baja, *stainless steel*, paduan titanium, paduan aluminium dan logam non-ferrous lainnya), dapat digunakan dengan berbagai posisi pengelasan (horizontal, vertikal dan *overhead*), dan dapat dilakukan dengan atau tanpa logam pengisi. (Vidyarthi dan Dwivedi, 2016). Namun, terdapat beberapa masalah yang dapat terjadi pada proses pengelasan TIG yaitu penetrasi kurang yang menyebabkan batas ketebalan material yang dapat dilas dalam satu kali penyambungan nilainya kecil (Jayakrishnan, et.al, 2017), toleransi yang buruk terhadap beberapa komposisi material, dan produktivitas yang rendah. Jika arus pengelasan ditingkatkan dalam upaya untuk meningkatkan penetrasi, daerah las menjadi terlalu lebar dengan sedikit peningkatan dalam penetrasi (Nayeea, et.al, 2014).

Pengelasan TIG banyak digunakan untuk aplikasi struktural otomotif, kelautan dan dirgantara yang membutuhkan sifat mekanik yang tinggi (Gurusamy, et.al 2015 dan Cho,et.al 2016). Untuk aplikasi di bidang kelautan, petrokimia dan dirgantara, diperlukan juga sifat ketahanan korosi yang tinggi karena lingkungannya yang korosif (Wang, et.al, 2020).

Dalam beberapa kasus, sifat mekanik yang lebih buruk terbentuk di daerah las karena *heat input* yang tidak tepat selama proses pengelasan TIG. *Heat Input* pada pengelasan TIG dipengaruhi beberapa faktor yaitu nilai tegangan listrik, arus listrik, dan kecepatan pengelasan. Sehingga diperlukan upaya untuk mendapatkan kombinasi parameter *heat input* yang tepat untuk mendapatkan hasil las TIG yang baik.

Ada beberapa penelitian yang telah dilakukan untuk mengetahui pengaruh *heat input* khususnya arus listrik terhadap hasil las TIG. Pengelasan TIG pada Aluminium 6061 menghasilkan nilai kekuatan tarik dan kekerasan tertinggi pada penggunaan arus listrik 160 A (Syukran, 2021). Sedangkan penelitian Rahmatika (2019) menunjukkan bahwa untuk las TIG Aluminium 1050 dengan variasi arus 125 A, 10 A dan 175 A menghasilkan sifat mekanik optimal pada arus 125 A. Untuk pengelasan TIG dengan material Stainless Steel 304 didapatkan kekuatan tarik tertinggi sebesar 1007,31 Mpa yang dihasilkan dari pengelasan yang menggunakan arus 100 A. Nilai tersebut lebih tinggi dibandingkan dengan penggunaan variasi arus 80 A dan 120 A yang mempunyai kekuatan tarik 901,15 Mpa dan 938,89 Mpa (Driastika, 2021).

Baja merupakan logam yang paling banyak digunakan. Aplikasi baja SS400 sangat luas antara lain : konstruksi bangunan dan struktur, pembuatan kendaraan dan peralatan transportasi, peralatan industri dan mesin, tangki penyimpanan dan peralatan pengolahan kimia, serta pembuatan peralatan listrik dan elektronik.

Penelitian pengelasan TIG dengan variasi *heat input* yang telah ada menggunakan material aluminium dan stainless steel. *Heat input* pada pengelasan busur tergantung pada variabel : arus listrik, tegangan listrik dan kecepatan pengelasan. Sedangkan material SS 400 sangat luas aplikasinya. Sehingga penelitian dilakukan untuk mengetahui pengaruh *heat input* pada pengelasan TIG material SS 400. Penelitian ini bertujuan mendapatkan sifat fisik dan mekanik optimal pada hasil las TIG baja SS 400 dengan menggunakan variasi arus listrik 85 A, 90 A dan 95 A. Sifat fisik dan mekanik yang diuji adalah kekuatan tarik, kekuatan *bending*, ketangguhan impak, nilai kekerasan, pengamatan struktur mikro, dan laju korosi

2. Metode Penelitian

2.1. Bahan dan Alat

Material yang digunakan adalah baja SS 400 tebal 3 mm dengan ukuran 300 mm x 100 mm dengan jumlah 6 buah. Komposisi kimia baja SS 400 seperti terlihat pada Tabel 1. Proses pengelasan yang digunakan adalah *Tungsten Inert Gas* (TIG). Parameter pengelasan ada pada Tabel 2.

Tabel 1. Komposisi kimia baja SS 400

Unsur	Kandungan (%)
Fe	98,9431
S	0,0129
Al	0,0229
C	0,1452
Ni	0,0861
Si	0,1278
Cr	0,0648
V	0,0007
Mn	0,3369
Mo	0,0119
P	0,0152
Cu	0,1926
Ti	0,0013
N	0,0095
Pb	0,0008
Sb	0,0015
Ca	0,0016
Zn	0,0009
Co	0,0067

Tabel 2. Parameter pengelasan

Tegangan	230 V
Filler	ER70S-6 ϕ 1,6 mm
Elektroda Tungsten	AWS 5 12-80 ϕ 2,4 mm
Gas Pelindung	Argon flow rate 6 liter/menit
Arus Listrik	85 A, 90 A, 95 A

2.2. Pengujian

Pengujian dilakukan untuk mengetahui sifat fisik dan mekanik hasil sambungan las TIG baja SS400 dengan variasi arus listrik. Pengujian yang dilakukan adalah seperti terlihat pada Tabel 3.

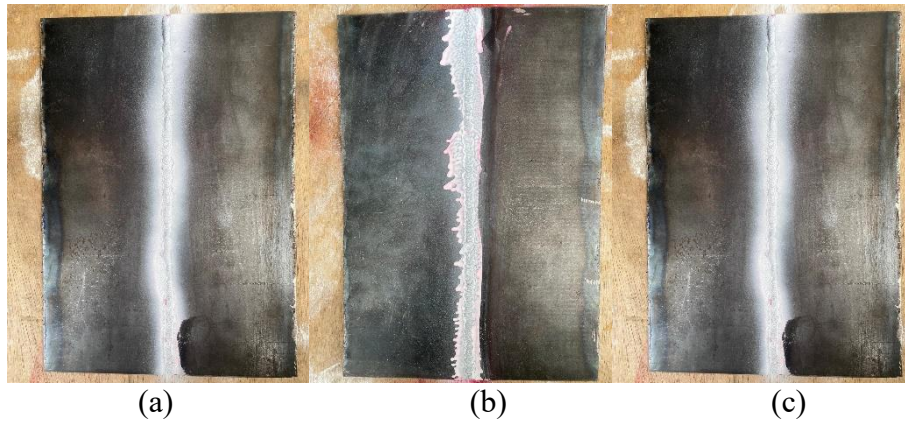
Tabel 3. Parameter pengelasan

Pengujian	Alat/Metode
Pengujian tarik, bending	Universal Testing Machine (UTM)
Pengujian ketangguhan impak	Mesin Uji Charpy
Pengujian kekerasan	Vickers Microhardness
Pengamatan struktur mikro	Mikroskop Optik
Pengujian komposisi kimia	Optical Emission Spectroscopy (OES)
Pengamatan hasil las	Dye Penetrant
Pengujian laju korosi	Weight loss methode (timbangan digital)

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Pengujian *Dye Penetrant*

Pengujian *dye penetrant* dilakukan untuk mengetahui cacat atau retakan yang terletak di permukaan pada hasil pengelasan. Pengujian ini dilakukan dengan menggunakan cairan *penetrant* dan *developer*. Gambar 1 menunjukkan hasil pengujian *dye penetrant* pada hasil las TIG baja SS 400 dengan variasi arus listrik.



Gambar 1. Hasil pengujian *dye penetrant*
(a) 85 A (b) 90 A (c) 95 A

Dari Gambar 1 terlihat bahwa tidak terdapat cacat permukaan pada semua hasil pengelasan yang telah dilakukan. Cacat permukaan diindikasikan dengan adanya bagian-bagian yang berwarna merah muda pada logam las. Tidak adanya cacat menunjukkan proses penyambungan dengan las yang dilakukan berjalan dengan baik.

3.2. Pengujian Komposisi Kimia

Hasil pengujian komposisi kimia logam induk dan hasil pengelasan dapat terlihat pada tabel 1 dan Tabel 4. Data dari tabel 1 dan 4 menunjukkan bahwa baja SS400 merupakan golongan baja karbon rendah yang memiliki kadar karbon sebesar 0,08% - 0,20 %.

Tabel 4. Komposisi kimia hasil pengelasan

Unsur	Kandungan (%)
Fe	98,9180
S	0,0129
Al	0,0075
C	0,1179
Ni	0,0749
Si	0,1619
Cr	0,0545
V	0,0010
Mn	0,3910
Mo	0,0096
P	0,0171
Cu	0,1807
Ti	0,0060
N	0,0165
Pb	0,0010
Sb	0,0016
Ca	0,0013
Zn	0,0006
Co	0,0067

Kemampuan las baja dapat dihitung dari nilai C_{ek} (*Carbon Equivalent*). Berikut adalah perhitungan nilai C_{ek} untuk spesimen baja SS 400 yang ada pada penelitian ini.

$$C_{ek} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu + Ni}{15} + \frac{Cr + Mo + V}{5} \quad (1)$$

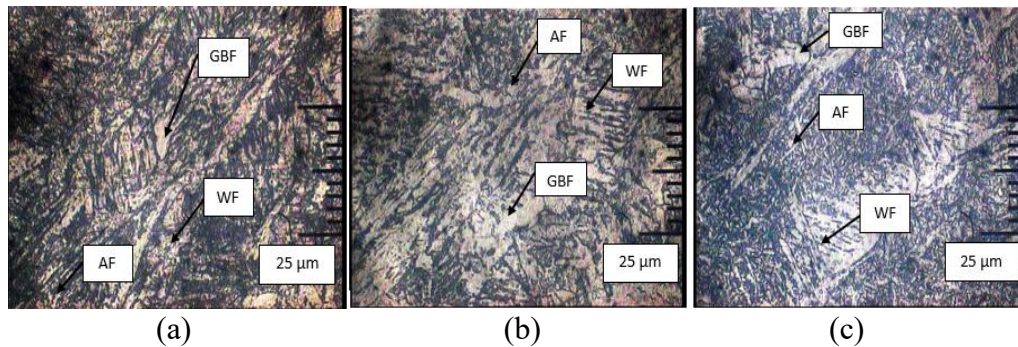
$$C_{ek} = 0,1452 + \frac{0,3369}{6} + \frac{0,1926 + 0,0861}{15} + \frac{0,0648 + 0,0119 + 0,0007}{5}$$

$$C_{ek} = 0,23541$$

Hasil perhitungan diatas menunjukan bahwa nilai $C_{ek} < 0,4$, sehingga spesimen material baja yang digunakan termasuk dalam kategori mampu las baik.

3.3. Pengamatan Struktur Mikro

Hasil pengelasan dipotong tegak lurus dengan arah las kemudian diampelas dan dietsa. Pengamatan struktur mikro dilakukan dengan menggunakan mikroskop optik dengan pembesaran 200x. Struktur mikro hasil las TIG baja SS 400 dengan variasi arus listrik dapat terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Struktur mikro hasil pengelasan
(a) 85 A (b) 90 A (c) 95 A

Keterangan:

GBF : *Grain Boundary Ferrite*

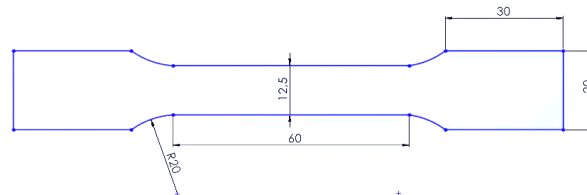
WF : *Widmanstatten Ferrite*

AF : *Acicular Ferrite*

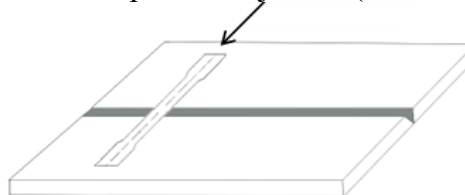
Gambar 2 menunjukkan jenis struktur mikro pada hasil las sama yaitu berupa GBF, WF dan AF. Struktur mikro hasil las dengan variasi arus 95 A didominasi oleh AF. Terbentuknya Struktur mikro AF terutama dipengaruhi oleh komposisi kimia baja, laju pendinginan, inklusi, dan ukuran butir austenit. Salah satu unsur kimia yang berpengaruh terhadap pembentukan inklusi adalah Mn (Loder, et.al, 2017). Dari hasil pengujian komposisi kimia terlihat bahwa terdapat peningkatan jumlah Mn yaitu dari 0,33 % pada logam induk menjadi 0,39 % pada hasil las. Struktur mikro AF akan menghasilkan sifat mekanik berupa kekuatan tarik, kekuatan bending dan ketangguhan tinggi. Hal tersebut disebabkan karena AF mempunyai ukuran kecil dan orientasi arah acak sehingga dapat menghambat pertumbuhan retak.

3.4. Pengujian Tarik

Pengujian tarik dilakukan menggunakan standar JIS Z 2201 tipe 13 B (Gambar 3) dan dengan arah spesimen tarik transversal terhadap arah pengelasan seperti terlihat pada Gambar 4.



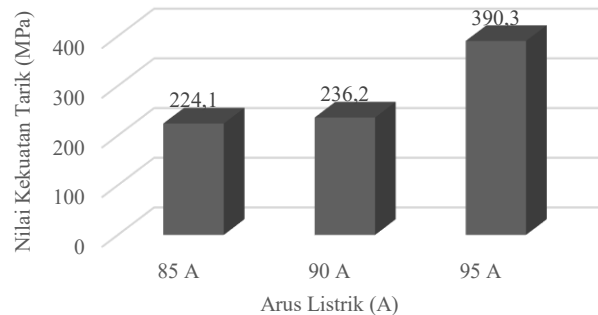
Gambar 3. Bentuk spesimen uji tarik (JIS 2201 tipe 13 B)



Gambar 4. Posisi spesimen tarik pada hasil pengelasan

Hasil pengujian tarik dapat dilihat pada Gambar 5. Hasil pengujian menunjukkan nilai kekuatan tarik tertinggi terdapat pada hasil las dengan menggunakan variasi arus listrik 95 A dengan nilai 390,3 Mpa. Untuk variasi arus 85 A dan 90 A, nilai kekuatan tariknya hampir sama yaitu 224,1 Mpa dan 236,2 Mpa. Nilai tersebut dapat dihubungkan dengan hasil pengamatan mikro yang telah dilakukan. Hasil las dengan variasi arus 85 A dan 90 A mempunyai struktur mikro yang didominasi

oleh WF sedangkan pada arus 95 A struktur mikro yang dominan adalah AF. Perbedaan ini disebabkan karena perbedaan nilai $\Delta t_{\frac{8}{5}}$ yaitu waktu pendinginan yang diperlukan dari temperatur 800°C ke temperatur 500°C. $\Delta t_{\frac{8}{5}}$ sangat berpengaruh dalam pembentukan struktur mikro dan sifat mekanik logam las (WM) serta daerah terpengaruh oleh panas (HAZ) (Sirin, et.al, 2016).

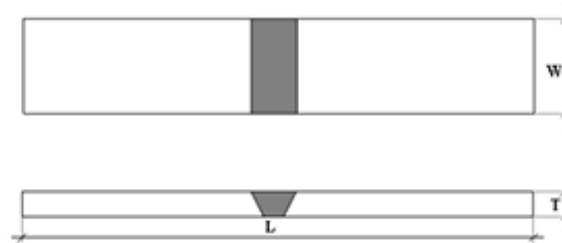


Gambar 5. Nilai kekuatan tarik hasil las

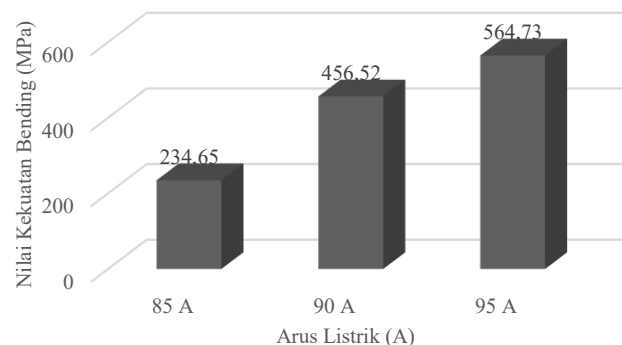
Spesimen uji tarik pada hasil las dengan variasi arus listrik 85 A dan 90 A patah pada bagian logam las sedangkan pada variasi arus listrik 95 A, patahan terjadi pada logam induk. Hal tersebut menunjukkan bahwa sambungan las pada variasi arus 95 A mempunyai kualitas yang baik karena kekuatannya lebih baik dibandingkan dengan logam induk.

3.5. Pengujian Bending

Pengujian *Bending* dilakukan dengan metode *3 Point Bending* dengan bentuk spesimen menggunakan standar AJIS Z 2204. Metode pembebanan pengujian *bending* dilakukan dengan metode *transversal root bend* (Gambar 6). Hasil pengujian *bending* menunjukkan tren yang sama dengan pengujian tarik. Nilai kekuatan bending tertinggi terdapat pada hasil las dengan variasi arus listrik 95 A, diikuti dengan 90 A, dan nilai terendah terdapat pada hasil las dengan arus listrik 85 A (Gambar 7).



Gambar 6. Metode pembebanan *transversal root bend*

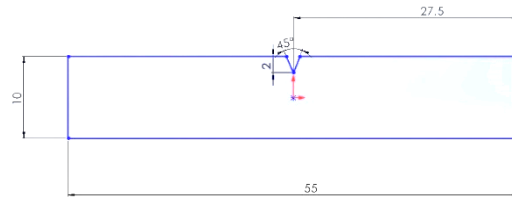


Gambar 7. Nilai kekuatan bending hasil las

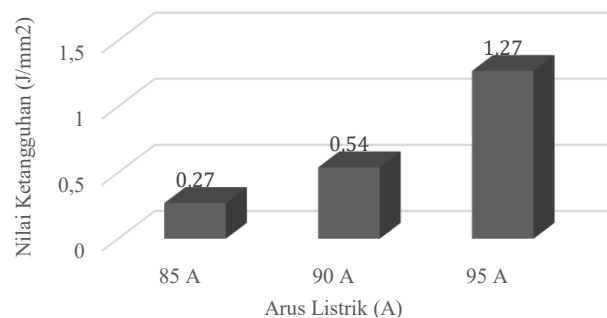
Nilai kekuatan bending lebih tinggi dibandingkan dengan nilai kekuatan tarik untuk semua variasi arus listrik yang digunakan. Hal itu menunjukkan bahwa hasil las bersifat homogen.

3.6. Pengujian Ketangguhan Impak

Pengujian ketangguhan impact dilakukan dengan menggunakan metode Charpy. Spesimen uji impact dibuat dengan menggunakan standar JIS Z 2202 seperti terlihat pada Gambar 8 dengan subsize tebal 2,5 mm. Untuk setiap variasi arus listrik dilakukan pengujian sebanyak tiga kali. Nilai pengujian ketangguhan impact merupakan nilai rata-rata dari tiga kali percobaan. Hasil pengujian ketangguhan impact dapat terlihat pada Gambar 9. Nilai ketangguhan impact hasil las tertinggi terdapat pada hasil las dengan variasi arus listrik 95 A dengan nilai $1,27 \text{ J/mm}^2$. Jenis struktur mikro berpengaruh terhadap nilai ketangguhan suatu material. Struktur mikro AF mempunyai nilai ketangguhan tinggi karena bentuknya kecil dan orientasi arahnya acak, sehingga laju retakan akan terhambat. Hal ini menyebabkan nilai ketangguhan tinggi dan spesimen tidak patah setelah pengujian.



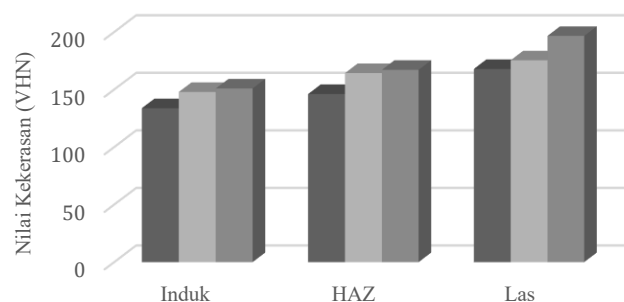
Gambar 8. Bentuk spesimen uji impact (JIS Z 2202)



Gambar 9. Nilai ketangguhan impact

3.7. Pengujian Kekerasan

Vickers Microhardness digunakan untuk menguji kekerasan pada penelitian ini. Pengujian dilakukan dengan menggunakan beban 200 grf. Pengujian dilakukan untuk logam induk, HAZ (*heat affected zone*), dan daerah las. Nilai kekerasan hasil pengelasan dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 10. Nilai kekerasan

Logam las memiliki nilai kekerasan tertinggi dibandingkan daerah HAZ dan logam induk untuk semua variasi arus pengelasan yang digunakan. Hal ini karena panas menyebabkan pertumbuhan ukuran butir austenit dan terjadinya perubahan struktur mikro saat proses pendinginan. Nilai kekerasan daerah las tertinggi terdapat pada variasi arus listrik pengelasan 95 A dengan nilai 196,6 HVN. Sedangkan untuk variasi arus listrik pengelasan 85 A dan 90 A menghasilkan nilai kekerasan rata-rata 167,9 HVN dan 175,4 HVN.

3.8. Pengujian Laju Korosi

Pengujian korosi dilakukan pada logam induk dan hasil pengelasan TIG dengan semua variasi arus listrik yang digunakan. Tabel 5 menunjukkan nilai laju korosi hasil las. Laju korosi terbesar terdapat pada hasil las dengan variasi arus listrik 85 A dengan nilai 0,188 mmpy. Secara keseluruhan hasil las dengan semua variasi mempunyai ketahanan korosi kategori baik.

Tabel 5. Laju korosi

Kriteria	Standar (mm/year)	Laju Korosi (mm/year)				Keterangan
		Logam induk	85A	90A	95A	
Outstanding	<0,02					
Excellent	0,02-0,1					
Good	0,1-0,5	0,13	0,18	0,12	0,11	Good
Fair	0,5-1					
Poor	1-5					
Unacceptable	>5					

4. Kesimpulan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sifat fisik dan mekanik optimal pada hasil las TIG baja SS 400 dengan menggunakan variasi arus 85 A, 90 A dan 95 A terdapat pada hasil las dengan arus 95 A. Hasil pengujian menunjukkan bahwa :

- Sambungan las terbentuk dengan baik karena tidak ada cacat pada hasil pengujian *dye penetrant*.
- Struktur mikro hasil las dengan variasi arus adalah sama yaitu berupa Grain Boundary Ferrite (GBF), *Widmanstatten Ferrite* (WF) dan *Acicular Ferrite* (AF), tetapi berbeda pada komposisinya. Untuk hasil las dengan variasi arus 95 A, struktur mikro didominasi oleh AF sedangkan untuk variasi arus lainnya, struktur mikronya didominasi oleh WF.
- Nilai kekuatan tarik dan kekuatan bending tertinggi terdapat pada hasil las dengan variasi arus listrik 95 A dengan nilai 390,3 Mpa dan 564,73 Mpa.
- Hasil las dengan variasi arus listrik 95 A mempunyai nilai tertinggi dibandingkan dengan variasi arus lainnya. Nilai ketangguhan impak untuk variasi arus 85 A, 90 A dan 95 A adalah 0,27 J/mm², 0,54 J/mm² dan 1,27 J/mm².
- Nilai kekerasan daerah las lebih tinggi dibandingkan logam induk dan daerah HAZ (*Heat affected zone*).
- Nilai ketahanan korosi logam hasil pengelasan untuk semua variasi arus listrik mempunyai kriteria yang sama dengan logam induknya yaitu baik.

Daftar Pustaka

- Cho, S., Jang, J. (2016). Strength analysis of die-cast aluminum-alloy brake pedals for use in lightweight cars, *Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers* 25(2) 138–142.
- Drastiawati, N. S. (2021). Pengaruh variasi arus listrik pengelasan tungsten inert gas (Tig) terhadap kekuatan tarik sambungan las pada stainless steel SS 304, *Teknologi Terapan*, Volume 3, Nomor 2.
- Gurusamy, P., Prabu, S.B., Paskaramoorthy R. (2015). Influence of processing temperatures on mechanical properties and microstructure of squeeze cast aluminum alloy composites, *Mater. Manuf. Process.* 30 367–373.
- Jayakrishnan, S., Chakravarthy, P. (2017) Flux bounded tungsten inert gas welding for enhanced weld performance—A review, *Journal of Manufacturing Processes* Volume 28, Part 1, August, Pages 116-130
- Loder, D., Michelic, SK., Bernhard, C. (2017). Acicular ferrite formation and its influencing factors - A Review, *Journal of Materials Science Research*, Vol. 6, No. 1
- Ming, L.Q., Hing, W.X., Da, Z.Z., Jun, W. (2007). Effect of activating flux on arc shape and arc voltage in tungsten inert gas welding. *Transactions of Nonferrous Metal Society of China*, 486–90.

- Nayeea, SG., Badheka, V.J. (2014) Effect of oxide-based fluxes on mechanical and metallurgical properties of Dissimilar Activating Flux Assisted-Tungsten Inert Gas Welds *Journal of Manufacturing Processes* Volume 16, Issue 1, Pages 137-143
- Rahmatika, A., Ibrahim, S., Hersaputri, M., & Aprilia, E. (2019). Studi pengaruh variasi kuat arus terhadap sifat mekanik hasil pengelasan GTAW aluminium 1050 dengan filler ER 4043. *Jurnal Polimesin*, 17.
- Sirin, K., Sirin, S.Y., Kaluc E. (2016) Influence of the interpass temperature on $t_8/5$ and the mechanical properties of submerged arc welded pipe, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol 238: pp 152-159
- Syukran, A. (2021). Effect of variation of TIG welding current on tensile strength and hardness of Aluminium A-6061, *Journal Of Welding Technology*, Volume 3, No. 1.
- Theodore, J., Bertrand, E., Girault, B., Paillard, P., et.al (2025) Investigation of the residual stresses and strains, microstructure and mechanical properties of stainless steel multipass welds produced using dual wire-tungsten inert gas process, *Materialia*, MTLA 40 102403
- Vidhyarthi R.S., Dwivedi, D.K. (2016). Activating flux tungsten inert gas welding for enhanced weld penetration, *Journal of Manufacturing Processes*, Volume 22, Pages 211-228
- Xiong, J.H., Li S.K., Gao F.Y., Zhang J.X. 2015). Microstructure and mechanical properties of Ti6321 alloy welded joint by GTAW. *Mater Sci Eng A*, Vol 640, pp. 419-423
- Wang, S., Luo, B., Bai Z. et.al. (2020). Revealing the aging time on the precipitation process and stress corrosion properties of 7N01 aluminium alloy, *Vacuum* 176 109311.
- Wu, M., Luo, Z., Li, Y., Liu, L., Ao, S., (2022). Effect of heat source parameters on weld formation and defects of oscillating laser-TIG hybrid welding in horizontal position. *J. Manuf. Proc.* 83, 512–521.