

PENGARUH VARIASI ARUS SMAW DAN LAPISAN ADITIF TITANIUM DIOKSIDA (TiO₂) TERHADAP KEKERASAN SAMBUNGAN LAS BAJA SS400

Muhammad Alfi Dzulfahmi

S1 Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya

Email: muhammadalfi.22086@mhs.unesa.ac.id

Hanna Zakiyya

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya

Email: hannazakiyya@unesa.ac.id

Abstrak

Kualitas sambungan las dipengaruhi oleh parameter pengelasan, khususnya variasi arus yang menentukan besarnya *heat input* selama proses pengelasan. Salah satu upaya untuk meningkatkan sifat mekanik sambungan las adalah dengan menambahkan lapisan titanium dioksida (TiO₂) pada permukaan benda kerja sebelum proses pengelasan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi arus SMAW dan lapisan TiO₂ terhadap kekerasan sambungan las baja SS400. Pengelasan dilakukan menggunakan elektroda E6013 berdiameter 3,2 mm dengan variasi arus 100 A, 110 A, dan 120 A, dengan penambahan lapisan TiO₂. Nilai kekerasan setiap spesimen diukur menggunakan pengujian Vickers pada zona weld metal, heat affected zone (HAZ), dan base metal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan lapisan TiO₂ meningkatkan nilai kekerasan pada daerah *weld metal* di setiap variasi arus. Nilai kekerasan tertinggi diperoleh pada spesimen dengan arus 110 A dan penambahan TiO₂ sebesar 244,86 HVN, sedangkan peningkatan arus hingga 120 A menyebabkan kecenderungan penurunan nilai kekerasan akibat meningkatnya *heat input*. Selain itu, variasi kecil kecepatan pengelasan (*travel speed*) pada proses SMAW manual turut memengaruhi *heat input* sehingga memberikan kontribusi terhadap variasi nilai kekerasan. Berdasarkan hasil penelitian, kombinasi arus 110 A dengan penambahan lapisan TiO₂ menghasilkan karakteristik kekerasan sambungan las paling optimum pada penelitian ini.

Kata Kunci: SMAW, Variasi Arus, Titanium Dioksida (TiO₂), Baja SS400, Kekerasan Vickers.

Abstract

The quality of welded joints is influenced by welding parameters, particularly welding current, which determines the amount of heat input during the welding process. One approach to improving the mechanical properties of welded joints is the application of a titanium dioxide (TiO₂) layer on the workpiece surface prior to welding. This study aimed to investigate the effect of SMAW current variation and TiO₂ layer application on the hardness of SS400 steel welded joints. Welding was performed using a 3.2 mm diameter E6013 electrode with current variations of 100 A, 110 A, and 120 A, with TiO₂ layer application. The hardness value of each specimen was measured using Vickers testing on the weld metal zone, heat affected zone (HAZ), and base metal. The results showed that the application of a TiO₂ layer increased the weld metal hardness at all current variations. The highest hardness value was obtained at 110 A with TiO₂ application, reaching 244.86 HVN, while increasing the welding current to 120 A resulted in a tendency for hardness to decrease due to higher heat input. In addition, slight variations in welding travel speed during the manual SMAW process also affected the heat input, contributing to variations in hardness values. It can be concluded that the combination of a 110 A welding current and TiO₂ layer application produced the most optimal weld joint hardness characteristics of SS400 steel welded joints.

keywords: SMAW, Current Variation, Titanium Dioksida (TiO₂), SS400 Steel, Vickers Hardness

PENDAHULUAN

Proses pengelasan merupakan teknik penyambungan logam yang memiliki peranan penting dalam berbagai sektor industri, seperti manufaktur, konstruksi, perkapalan, dan fabrikasi. Hal tersebut disebabkan karena pengelasan mampu menghasilkan sambungan dengan kekuatan yang baik, proses yang efisien, serta biaya yang relatif ekonomis. Di antara berbagai metode pengelasan yang tersedia, *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW) menjadi salah satu teknik yang paling luas penggunaannya. Metode ini banyak dipilih karena menggunakan peralatan yang sederhana, biaya pelaksanaan yang relatif rendah, serta memiliki fleksibilitas tinggi untuk diaplikasikan pada berbagai jenis

material dan kondisi pengelasan (Wiryosumarto & Okumura, 2000).

Kualitas sambungan las sangat dipengaruhi oleh parameter proses pengelasan, terutama variasi arus, karena arus menentukan besarnya *heat input* yang diterima material selama proses pengelasan. Perbedaan *heat input* akan memengaruhi laju pendinginan sehingga berdampak terhadap sifat mekanik sambungan las, termasuk nilai kekerasannya (ASM Handbook, 2019; Kou, 2003).

Baja SS400 merupakan baja karbon rendah yang banyak digunakan pada konstruksi bangunan, rangka mesin, jembatan, dan industri fabrikasi karena memiliki kemampuan las yang baik serta sifat mekanik yang memadai (JIS G 3101, 2015). Meskipun demikian, kualitas sambungan las baja SS400 tetap dipengaruhi oleh

parameter pengelasan yang digunakan. Pada proses SMAW manual, *heat input* selain dipengaruhi oleh arus dan tegangan juga dipengaruhi oleh kecepatan pengelasan (*travel speed*) yang sulit dipertahankan benar-benar konstan selama proses pengelasan. Variasi kecil pada *travel speed* dapat menyebabkan perbedaan *heat input* sehingga turut memberikan pengaruh terhadap distribusi nilai kekerasan (Kou, 2003).

Salah satu pendekatan untuk meningkatkan kualitas sambungan las adalah dengan penambahan lapisan titanium dioksida (TiO_2) pada permukaan benda kerja sebelum proses pengelasan. Titanium dioksida berperan sebagai active flux yang mampu berdampak pada karakteristik busur listrik serta pola distribusi panas selama proses pengelasan sehingga berpotensi meningkatkan kualitas sambungan las. Beberapa penelitian melaporkan bahwa penggunaan TiO_2 dapat meningkatkan sifat mekanik sambungan las melalui pengaturan *heat input* dan pembentukan struktur logam las yang lebih baik (Allthari et al., 2023; Nugroho, 2023; Tathgir et al., 2015).

Penelitian mengenai pengaruh variasi arus maupun penggunaan TiO_2 terhadap hasil pengelasan telah banyak dilakukan. Namun, sebagian besar penelitian masih berfokus pada peningkatan penetrasi maupun karakteristik struktur mikro. Kajian yang secara khusus mengevaluasi pengaruh kombinasi variasi arus SMAW dan lapisan TiO_2 terhadap kekerasan sambungan las baja SS400 masih relatif terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi arus SMAW dan lapisan titanium dioksida (TiO_2) terhadap kekerasan sambungan las baja SS400 menggunakan metode uji kekerasan Vickers sebagai parameter utama evaluasi.

METODE

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode eksperimen, yang bertujuan untuk menganalisis pengaruh perubahan arus pengelasan serta penambahan lapisan aditif terhadap hasil pengelasan. Titanium Dioksida (TiO_2) pada proses pengelasan SMAW terhadap sifat kekerasan pada baja SS400. Sampel baja SS400 dipersiapkan dengan dimensi 100 x 80 x 8 mm dan kondisi permukaan yang seragam sebelum dilakukan pengelasan. Proses pengelasan dilakukan dengan variasi arus yang berbeda (100 A, 110 A, 120 A), menggunakan elektroda E6013 diameter 3,2 mm pada posisi pengelasan 1G. Pengelasan dilakukan oleh *welder* bersertifikasi dengan kecepatan pengelasan yang diusahakan konstan untuk meminimalkan variabel pengganggu. Lapisan aditif TiO_2 dibuat dari campuran 1 gram serbuk TiO_2 dan 4 mL metanol yang diaplikasikan dengan kuas pada permukaan sambungan sebelum proses pengelasan dilakukan untuk mengamati pengaruhnya terhadap hasil pengelasan.

Tempat dan Waktu Penelitian

a) Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Uji Bahan, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya. Meliputi persiapan dan pengelasan spesimen. Setelah

itu, uji kekerasan *vickers* dilakukan di Laboratorium Perlakuan dan Pengujian Bahan, Politeknik Negeri Malang.

b) Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan dalam rentang waktu 3 bulan, dimulai pada bulan Februari hingga April 2026.

Variabel Penelitian

a) Variabel Bebas (*Independent*)

Variabel bebas dalam penelitian ini adalah variasi arus pengelasan yang menggunakan arus 100 A, 110 A, 120 A, dan penambahan serbuk TiO_2

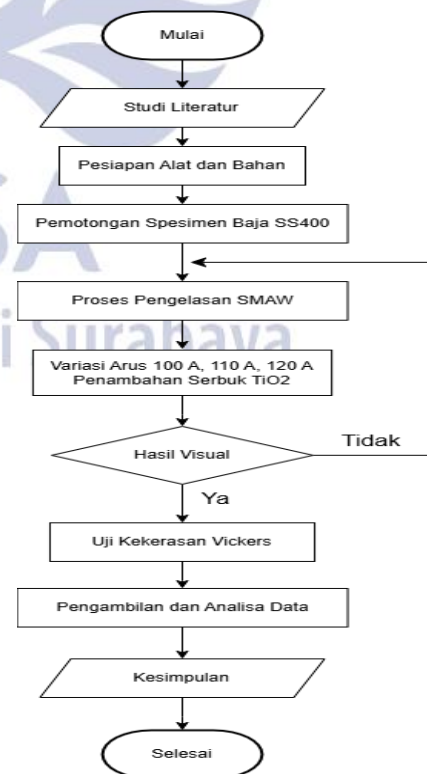
b) Variabel Terikat (*Dependent*)

Pada penelitian ini, variabel terikat yang diamati adalah sifat kekerasan baja SS400 setelah dilakukan pengelasan.

c) Variabel Kontrol

Variabel kontrol pada penelitian ini ditetapkan untuk memastikan seluruh pengujian dilakukan dalam kondisi yang sama, yaitu baja SS400 berukuran 100 × 80 × 8 mm sebagai material uji. Proses pengelasan dilakukan dengan metode *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW) menggunakan elektroda E6013 berdiameter 3,2 mm, campuran yang digunakan terdiri atas 1 gram titanium dioksida (TiO_2) yang dilarutkan ke dalam 4 ml metanol.. Pengelasan dilakukan pada posisi 1G (*flat position*) dengan jenis sambungan *square butt joint* tanpa *groove* dan dikerjakan oleh *welder* bersertifikasi.

Rancangan Penelitian



Gambar 1. Bagan Tahapan Penelitian

Prosedur Penelitian

A. Alat dan Bahan

a) Alat

1. Mesin SMAW



Gambar 2. Mesin SMAW

2. Elektroda E6013



Gambar 3. Elektroda E6013

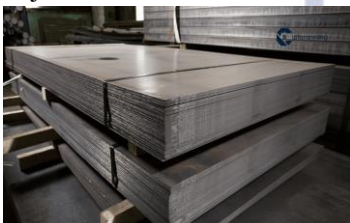
3. Mesin Uji *Vickers*



Gambar 4. Mesin Uji *Vickers*

b) Bahan

1. Baja SS400



Gambar 5. Baja SS400

2. Serbuk Titanium Dioksida (TiO_2)



Gambar 6. Titanium Dioksida

3. Metanol



Gambar 7. Metanol

B. Proses Pengelasan SMAW

- a) Pelat baja SS400 dipotong dengan dimensi 100 x 80 x 8 mm, sesuai yang direncanakan.
- b) Serbuk titanium dioksida seberat 1 gram dicampur dengan 4 ml metanol hingga tercampur.
- c) Larutan diaplikasikan di tengah pelat baja SS400 dengan cara dioleskan menggunakan kuas.
- d) Proses pengelasan dilakukan oleh *welder* bersertifikasi untuk mengontrol agar hasil lasan tiap pelat terjaga dan konsisten.

C. Proses Pengujian Kekerasan Vickers

- a) Sebelum pengujian, spesimen diletakkan pada mesin uji *Vickers* dengan posisi stabil dan tegak lurus terhadap identor.
- b) Beban uji ditentukan sesuai ketentuan ASTM E92 dengan beban 50 gf.
- c) Identasi dilakukan menggunakan identor piramida intan bersudut 136° dengan waktu penahanan beban selama 10 detik.
- d) Selanjutnya, jejak identasi yang terbentuk pada spesimen diamati untuk proses pengukuran.
- e) Pengujian dilakukan sebanyak 3 kali pada daerah *weld metal*, HAZ dan *base metal*.
- f) Hasil pengujian kekerasan kemudian dicatat dan dianalisis

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Parameter Pengelasan

Dalam penelitian ini, variasi arus yang digunakan adalah 100 A, 110 A, dan 120 A dengan dan tanpa penambahan lapisan aditif titanium dioksida (TiO_2). Adapun parameter pengelasan yang digunakan sebagai berikut:

Tabel 1. Parameter Pengelasan

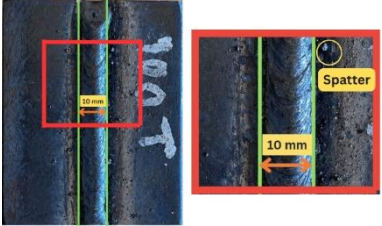
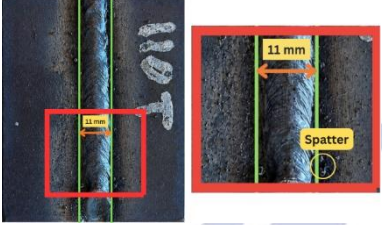
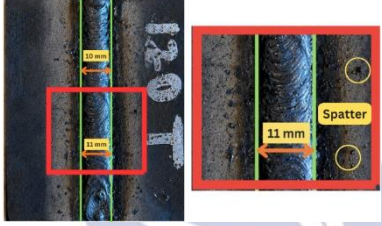
Metode Pengelasan	SMAW
Material	Baja SS400
Elektroda	E6013
Posisi	1G

B. Hasil Pengelasan

Setelah proses pengelasan SMAW pada baja SS400 dengan variasi arus 100 A, 110 A, dan 120 A, baik dengan dan tanpa penambahan lapisan serbuk

TiO₂, diperoleh hasil pengelasan sebagaimana ditunjukkan pada tabel 2.

Tabel 2. Hasil Pengelasan

Arus	Hasil Pengelasan
100 A	
110 A	
120 A	

Berdasarkan hasil pengamatan visual pada Tabel 2, penambahan lapisan aditif TiO₂ menghasilkan karakteristik permukaan las yang berbeda pada setiap variasi arus pengelasan. Hasil visual terbaik diperoleh pada arus 100 A, yang ditandai dengan profil *bead* paling seragam, permukaan yang paling halus, serta jumlah *spatter* yang paling sedikit dibandingkan variasi arus 110 A dan 120 A. Pada arus 110 A, *bead* las masih menunjukkan profil yang baik dan relatif seragam, namun lebar *bead* meningkat hingga sekitar 11 mm disertai munculnya *spatter* dalam jumlah yang lebih banyak dibandingkan arus 100 A. Sementara itu, pada arus 120 A, *bead* las memiliki lebar terbesar dengan geometri yang masih terkontrol, tetapi jumlah *spatter* kembali meningkat sehingga kualitas visualnya lebih rendah dibandingkan dua variasi arus lainnya. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penggunaan arus 100 A dengan penambahan TiO₂ memberikan kualitas visual hasil las yang paling baik, sedangkan peningkatan arus hingga 110 A dan 120 A meningkatkan masukan panas yang menyebabkan *bead* menjadi lebih lebar dan pembentukan *spatter* semakin banyak.

C. Pengujian Kekerasan Vickers

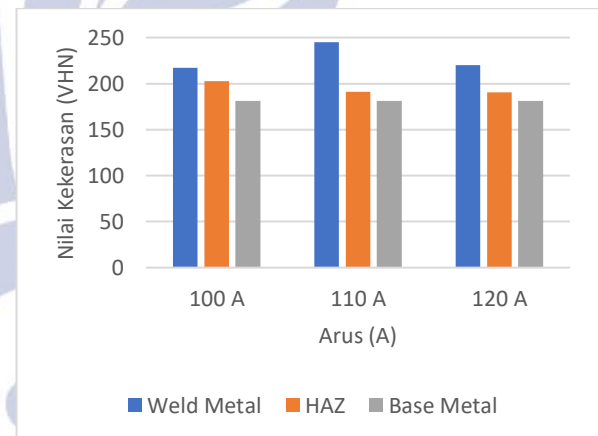
a) Data Uji Kekerasan

Nilai kekerasan berdasarkan pengujian Vickers pada setiap spesimen dapat dilihat pada Tabel 3. dan digunakan untuk menganalisis pengaruh variasi arus pengelasan serta penambahan lapisan TiO₂ terhadap perubahan pada tiga zona pengelasan, yaitu *weld metal*, HAZ, dan *base metal*.

Variasi Arus	Kode Spesimen	Nilai Kekerasan (VHN)		
		Weld Metal	HAZ	Base Metal
100 A	100 T 1	213,9	202,3	180,96
	100 T 2	213,76	203,06	181,16
	100 T 3	223,9	202,75	181,1
	Rata-rata	217,18	202,75	181,07
110 A	110 T 1	244,2	190,63	181,1
	110 T 2	245,03	191,43	180,73
	110 T 3	245,36	190,16	181,1
	Rata-rata	244,86	190,74	180,97
120 A	120 T 1	219,76	192,63	180,6
	120 T 2	221,83	190,93	181,1
	120 T 3	217,83	188,6	181,5
	Rata-rata	219,81	190,72	181,06

b) Analisa dan Pembahasan

Hasil pengujian kekerasan Vickers selanjutnya disajikan dalam bentuk grafik pada Gambar 8. untuk mempermudah analisis pengaruh variasi arus pengelasan dan penambahan lapisan TiO₂ terhadap nilai kekerasan pada setiap daerah pengelasan.



Gambar 8. Grafik Nilai Kekerasan (VHN)

Berdasarkan grafik pada Gambar 8, nilai kekerasan menunjukkan pola yang konsisten pada seluruh variasi arus pengelasan, yaitu *weld metal* memiliki nilai kekerasan tertinggi, diikuti oleh heat affected zone (HAZ), sedangkan *base metal* memiliki nilai kekerasan terendah. Menurut Callister & Rethwisch (2020), perbedaan tersebut disebabkan oleh kondisi termal yang dialami setiap daerah selama proses pengelasan. *Weld metal* mengalami proses pencairan dan pembekuan kembali sehingga menghasilkan perubahan struktur mikro yang lebih signifikan dibandingkan HAZ maupun *base metal*.

Pada daerah *weld metal*, nilai kekerasan meningkat seiring perubahan variasi arus dan mencapai nilai tertinggi sebesar 244,87 VHN pada arus 110 A. Peningkatan kekerasan tersebut mengindikasikan bahwa kombinasi arus 110 A dan penambahan TiO₂

menghasilkan kondisi pengelasan yang paling optimum, sehingga terbentuk struktur mikro yang lebih halus dan seragam pada logam las. Semakin halus struktur mikro suatu material, semakin tinggi kerapatan batas butir yang berperan sebagai penghalang terhadap pergerakan dislokasi, sehingga nilai kekerasan meningkat. Sementara itu, pada arus 120 A nilai kekerasan *weld metal* mengalami sedikit penurunan. Kondisi ini menunjukkan bahwa peningkatan masukan panas menyebabkan laju pendinginan menjadi lebih lambat sehingga kecenderungan pertumbuhan butir meningkat dan struktur mikro menjadi lebih kasar. Akibatnya, nilai kekerasan yang diperoleh tidak setinggi pada arus 110 A.

Pada daerah HAZ, nilai kekerasan tertinggi diperoleh pada arus 100 A, yaitu sebesar 202,76 VHN, kemudian cenderung menurun pada arus 110 A dan 120 A. Tren tersebut menunjukkan bahwa peningkatan arus pengelasan menyebabkan bertambahnya masukan panas (*heat input*) pada daerah HAZ, sehingga nilai kekerasannya mengalami penurunan. Sementara itu, nilai kekerasan pada *base metal* relatif stabil pada kisaran 180–182 VHN pada seluruh variasi arus. Hal ini menunjukkan bahwa pengaruh panas pengelasan tidak berpengaruh secara signifikan hingga ke daerah base metal sehingga sifat mekaniknya tetap relatif konstan (Azis & Saputro, 2019)

Besarnya masukan panas (*heat input*) selama pengelasan menjadi salah satu faktor utama yang memengaruhi perbedaan nilai kekerasan pada material. Pada arus 100 A, *heat input* yang relatif rendah menyebabkan proses peleburan logam belum berlangsung secara optimal sehingga nilai kekerasan yang dihasilkan belum mencapai kondisi maksimum. Peningkatan arus menjadi 110 A menghasilkan *heat input* yang lebih seimbang, sehingga proses solidifikasi logam berlangsung lebih terkendali, membentuk struktur mikro yang lebih halus dan berkontribusi terhadap peningkatan nilai kekerasan. Sebaliknya, pada arus 120 A, *heat input* yang lebih tinggi memperlambat laju pendinginan, sehingga mendorong pertumbuhan butir dan menyebabkan penurunan nilai kekerasan dibandingkan arus 110 A. Di samping itu, penambahan lapisan TiO₂ turut berkontribusi terhadap peningkatan kekerasan dengan membantu menstabilkan proses pengelasan dan menghasilkan struktur logam las yang lebih seragam. Kondisi tersebut berdampak pada distribusi nilai kekerasan yang lebih baik serta peningkatan sifat mekanik sambungan las.

Simpulan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi arus pada proses pengelasan SMAW yang dikombinasikan dengan penambahan lapisan aditif TiO₂ terbukti memengaruhi nilai kekerasan sambungan las pada baja SS400. Seluruh spesimen memperlihatkan kecenderungan nilai kekerasan yang serupa, yaitu daerah *weld metal* memiliki kekerasan paling tinggi, diikuti oleh *heat affected zone* (HAZ), sedangkan base metal menunjukkan

nilai kekerasan paling rendah. Pada zona *weld metal*, nilai kekerasan tertinggi diperoleh pada variasi arus 110 A sebesar 244,86 VHN, yang menunjukkan bahwa kondisi tersebut memberikan *heat input* yang paling optimum untuk menghasilkan sifat mekanik yang baik. Sementara itu, nilai kekerasan HAZ tertinggi diperoleh pada arus 100 A sebesar 202,75 VHN, sedangkan nilai kekerasan *base metal* relatif stabil pada kisaran 180–182 VHN untuk seluruh variasi arus. Secara keseluruhan, kombinasi arus 110 A dengan penambahan lapisan TiO₂ menghasilkan karakteristik kekerasan sambungan las yang paling optimal pada penelitian ini, sehingga berpotensi menjadi parameter pengelasan yang sesuai untuk meningkatkan kualitas sambungan las baja SS400.

Saran

Temuan dari penelitian ini diharapkan dapat dijadikan sebagai acuan dalam pengembangan penelitian pada masa mendatang. Sebagai upaya untuk meningkatkan kualitas hasil penelitian pada masa mendatang, beberapa saran yang dapat dipertimbangkan adalah sebagai berikut:

1. Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan pengelasan yang mampu mengontrol *travel speed* secara lebih konstan sehingga variasi *heat input* dapat diminimalkan dan hasil pengujian menjadi lebih konsisten.
2. Penelitian berikutnya dapat menggunakan variasi komposisi maupun ketebalan lapisan TiO₂ untuk mengetahui kondisi optimum dalam meningkatkan sifat mekanik sambungan las baja SS400.
3. Pengujian dapat diperluas dengan menambahkan pengujian tarik, dampak, maupun ketahanan korosi sehingga pengaruh penambahan TiO₂ terhadap karakteristik sambungan las dapat dievaluasi secara lebih komprehensif.

Ucapan Terima Kasih

Penulis memanjatkan puji dan syukur ke hadirat Allah SWT atas segala limpahan rahmat, hidayah, dan karunia-Nya sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan lancar. Penulis juga menyampaikan apresiasi dan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada kedua orang tua beserta seluruh keluarga atas doa, kasih sayang, dukungan, serta semangat yang senantiasa diberikan selama proses penyusunan dan pelaksanaan penelitian ini. Penulis menyampaikan penghargaan dan ucapan terima kasih yang setulus-tulusnya kepada dosen pembimbing atas segala arahan, saran, serta bimbingan yang diberikan selama proses penyusunan penelitian ini sehingga dapat terselesaikan dengan baik. Selain itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada Laboratorium Uji Bahan Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya dan Laboratorium Perlakuan dan Pengujian Bahan Politeknik Negeri Malang yang telah memfasilitasi pelaksanaan penelitian. Tidak lupa, penulis juga menyampaikan apresiasi kepada seluruh pihak yang telah memberikan bantuan, baik secara langsung maupun tidak langsung, sehingga penelitian ini dapat terselesaikan dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Allthari, A. S., Thahab, S. M., & Al-Obbaidi, A. F. (2023). Effect of adding TiO₂ nanoparticles on the impact toughness for welding joints of mild steel. *Australian Journal of Mechanical Engineering*, 21(1), 13–26. <https://doi.org/10.1080/14484846.2020.1816734>
- Azis, R. A., & Saputro, H. (2019). *Pengaruh Variasi Diameter Elektroda E7018 Terhadap Kekuatan Tarik, Kekerasan, dan Struktur Mikro Pengelasan pada Baja Karbon Rendah Jenis SS400 dengan Metode SMAW*. 17(2), 94–105. <https://doi.org/https://doi.org/10.37031/jt.v17i2.53>
- Handbook, A. (2019). ASM Handbook. In *ASM International* (Vol. 43, Issue 20).
- JIS G 3101. (2015). Roll Steel for General Structure. In *Jis G 3101*.
- Kou, S. (2003). *Welding Metallurgy: Second Edition*. Wiley-Blackwell.
- Nugroho, W. Y. (2023). Studi Pengaruh TiO₂-SiO₂ Sebagai Active Flux Terhadap Penetrasi Pengelasan A-TIG Pada Material Aluminium Seri 5083-H116. *Jurnal Inovasi Teknologi Manufaktur, Energi Dan Otomotif*, 1(2), 84–94.
- Tathgir, S., Bhattacharya, A., & Bera, T. K. (2015). Influence of current and shielding gas in TiO₂ flux activated tig welding on different graded steels. *Materials and Manufacturing Processes*, 30(9), 1115–1123. <https://doi.org/10.1080/10426914.2014.973591>
- William D. Callister, J., & Rethwisch, D. G. (2020). Materials Science and Engineering: An Introduction. *Introduction to Engineering Materials*, 109–126. <https://doi.org/10.1201/9781439887493-6>
- Wiryo Sumarto, H., & Okumura, T. (2000). Teknologi Pengelasan Logam. In *Teknologi Pengelasan Logam* (Vol. 8).