

EVALUASI KUALITAS SAMBUNGAN LAS TANGKI BBM MENGUNAKAN ELEKTRODA E7016 DAN E7018 BERDASARKAN PENGUJIAN DESTRUKTIF-NON-DESTRUKTIF DAN VALIDASI WPS SESUAI ASME *SECTION IX*

Fernando Haganta Ginting^{1*}, Ayende¹, Tito Antonio Jr¹, Arin Nadhiroh¹

¹Teknik Mesin Kilang, Politeknik Energi dan Mineral Akamigas, Jln Gajah Mada No.38, Cepu, Blora, 58315

*E-mail: gibertitelagah@gmail.com

ABSTRAK

Kualitas sambungan las pada tangki penyimpanan bahan bakar minyak menjadi faktor kritis dalam menjamin keandalan operasional. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kualitas sambungan las tangki BBM menggunakan kombinasi elektroda E7016 dan E7018 melalui pengujian destruktif-non-destruktif berdasarkan standar ASME *Section IX*. Pada penelitian ini digunakan material pelat baja ASTM SA-36 ketebalan 7,7 mm yang disambung menggunakan proses SMAW pada konfigurasi *butt joint* posisi 1G. Parameter pengelasan dikontrol dengan *heat input* 2,06-5,85 kJ/mm pada tiga *layer* pengelasan menggunakan E7016 untuk *root-hot pass* dan E7018 untuk *capping pass*. Validasi kualitas ditinjau melalui *liquid penetrant test*, *ultrasonic flaw detector test*, *tensile test*, dan *bend test* sesuai protokol ASME. Hasil pengujian menunjukkan kekuatan tarik sambungan mencapai 428,9-460,1 MPa melampaui kekuatan minimum material dasar 400 MPa dengan lokasi patahan pada *base metal area*. Pengujian tekuk mengindikasikan keuletan memadai dengan diskontinuitas maksimal 2 mm di bawah batas toleransi 3 mm. Pengujian non-destruktif mengidentifikasi indikasi *undercut* dan diskontinuitas internal yang seluruhnya berada dalam kriteria akseptabel ASME. Penelitian ini mengkonfirmasi bahwa prosedur pengelasan telah memenuhi kualifikasi teknis dan dapat didokumentasikan sebagai WPS untuk aplikasi tangki BBM dengan integritas struktural terjamin.

Kata kunci: ASME *Section IX*, Elektroda E7016-E7018, Non-Destruktif, Pengujian Destruktif, Sambungan Las

1. PENDAHULUAN

Industri manufaktur dan konstruksi modern sangat bergantung pada teknologi pengelasan sebagai metode penyambungan material yang kritis, khususnya dalam fabrikasi tangki penyimpanan bahan bakar minyak (BBM) yang menuntut standar keamanan dan keandalan tinggi. Integritas struktural sambungan las pada tangki BBM menjadi faktor determinan dalam mencegah kebocoran, kegagalan katastropik, dan mitigasi risiko terhadap lingkungan serta keselamatan operasional [1]. Kerugian ekonomi dan dampak lingkungan yang ditimbulkan dari kegagalan sambungan las dapat mencapai nilai yang signifikan, sehingga diperlukan pendekatan sistematis dalam perancangan dan validasi prosedur pengelasan. Metode *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW) telah menjadi pilihan dominan dalam aplikasi industri karena fleksibilitas operasional, kemudahan aplikasi di berbagai posisi pengelasan, dan efektivitas biaya, meskipun kualitas hasil pengelasan sangat dipengaruhi oleh pemilihan material elektroda dan konsistensi parameter proses [2], [3].

Kualitas sambungan las tidak hanya ditentukan oleh keterampilan operator, namun juga bergantung pada spesifikasi prosedur pengelasan yang telah terqualifikasi melalui serangkaian pengujian komprehensif. *Welding Procedure Specification* (WPS) merupakan dokumen teknis

yang mengatur seluruh aspek proses pengelasan mulai dari pemilihan material dasar, jenis dan klasifikasi elektroda, parameter arus dan tegangan, kecepatan pengelasan, hingga perlakuan termal pasca pengelasan [4]. Validasi WPS melalui *Procedure Qualification Record* (PQR) mengharuskan pelaksanaan pengujian destruktif seperti uji tarik dan uji tekuk, serta pengujian non-destruktif untuk mengevaluasi karakteristik mekanik dan deteksi diskontinuitas internal sambungan las [5]. Penggunaan elektroda dengan klasifikasi berbeda, seperti E7016 dan E7018, memberikan variasi pada sifat metalurgi dan mekanik deposit las yang dapat mempengaruhi kekuatan tarik, keuletan, serta ketahanan terhadap retak [6].

Penelitian ini difokuskan pada evaluasi komparatif kualitas sambungan las menggunakan dua jenis elektroda *low-hydrogen*, yaitu E7016 dan E7018, melalui pendekatan pengujian destruktif dan non-destruktif yang mengacu pada standar ASME *Section IX*. Rumusan masalah yang diangkat mencakup tiga aspek fundamental: pertama, bagaimana pengaruh perbedaan karakteristik elektroda E7016 dan E7018 terhadap properti mekanik sambungan las; kedua, apakah parameter pengelasan yang ditetapkan dalam WPS mampu menghasilkan sambungan yang memenuhi kriteria penerimaan standar internasional; ketiga, bagaimana hasil pengujian destruktif dan non-destruktif dapat diintegrasikan sebagai basis validasi kualifikasi prosedur pengelasan untuk aplikasi tangki BBM. Tujuan utama penelitian adalah mengidentifikasi parameter pengelasan optimal dalam Pre-WPS yang memenuhi persyaratan uji tarik dan tekuk sehingga dapat dikualifikasi menjadi WPS yang sah, memastikan prosedur pengelasan tangki BBM telah melalui kualifikasi sesuai standar ASME *Section IX*, dan menetapkan WPS sebagai dokumen *mandatory* untuk menjamin integritas struktural pada struktur bertekanan tinggi.

Secara teoritis, elektroda E7016 dan E7018 merupakan klasifikasi elektroda dengan *coating low-hydrogen* yang dirancang untuk meminimalkan risiko *hydrogen-induced cracking* pada material baja karbon rendah hingga menengah. Perbedaan utama terletak pada komposisi *flux coating* yang mempengaruhi karakteristik busur las, penetrasi, dan sifat mekanik deposit las, dimana E7018 cenderung menghasilkan deposit dengan keuletan lebih tinggi dibandingkan E7016 [2]. Hipotesis penelitian ini menyatakan bahwa sambungan las menggunakan elektroda E7018 akan menunjukkan kekuatan tarik dan keuletan superior dibandingkan E7016 pada kondisi parameter pengelasan yang setara, serta kedua jenis elektroda dapat menghasilkan sambungan yang memenuhi kriteria penerimaan ASME *Section IX* apabila parameter pengelasan dikontrol dengan tepat.

2. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental kuantitatif yang dilaksanakan di fasilitas Bengkel Laboratorium Mekanik dengan menerapkan metode sistematis berbasis standar ASME *Section IX* untuk kualifikasi prosedur pengelasan.

A. Material dan Peralatan

Spesimen uji dibuat menggunakan pelat baja SA 36 dengan ketebalan 7,7 mm yang disambung dengan konfigurasi *butt joint* pada posisi pengelasan 1G (*flat position*), menggunakan dua jenis elektroda *low-hydrogen* yaitu E7016 dan E7018 dengan diameter 2,6 mm melalui proses SMAW yang dioperasikan dengan mesin las Miller SRH500.

B. Prosedur Pengelasan

Pengelasan dilakukan melalui proses SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*), dimana parameter pengelasan dikontrol secara ketat mencakup arus pengelasan, tegangan busur, kecepatan pengelasan, dan suhu *interpass* yang dimonitor menggunakan *handheld thermal camera*, sedangkan pengukuran dimensional sambungan dilakukan dengan *welding gauge* untuk me-

mastikan konsistensi geometri las sesuai spesifikasi standar. Validasi kualitas sambungan las dilakukan melalui dua kategori pengujian komprehensif yang mencakup *non-destructive testing* dan *destructive testing* untuk memperoleh data karakteristik mekanik dan integritas struktural secara menyeluruh, dilanjutkan dengan penyusunan dokumen Pre-WPS sebagai acuan.

C. Metode Pengujian

Pengujian non-destruktif dilakukan menggunakan metode *liquid penetrant test* untuk deteksi diskontinuitas permukaan dan *ultrasonic flaw detector test* untuk identifikasi cacat internal pada zona sambungan las, sementara pengujian destruktif mencakup *tensile test* menggunakan mesin uji tarik universal untuk mengevaluasi kekuatan tarik maksimum dan *bend test* dengan mesin uji tekuk untuk mengukur keuletan sambungan las. Spesimen untuk *tensile test* dipotong sesuai dimensi standar QW-462.1 dengan panjang *gauge length* tertentu, sedangkan spesimen *bend test* dipotong mengikuti konfigurasi QW-463.1(a) dengan dimensi yang memungkinkan pembebanan tekuk pada mandrel dengan diameter spesifik.

D. Analisis Data

Pengumpulan data dilakukan secara terstruktur dengan mencatat seluruh parameter pengelasan, hasil pengukuran dimensional, nilai kekuatan tarik, sudut tekuk maksimum, serta dokumentasi visual terhadap morfologi patahan dan cacat yang terdeteksi. Analisis data dilakukan dengan membandingkan hasil pengujian terhadap kriteria penerimaan ASME *Section IX*, dimana sambungan las dinyatakan memenuhi kualifikasi apabila kekuatan tarik minimum mencapai 70% dari kekuatan material dasar dan tidak terdapat retak dengan panjang melebihi 3,2 mm pada spesimen *bend test*, sehingga prosedur pengelasan dapat didokumentasikan dalam WPS (*Welding Procedure Specification*) dan PQR (*Procedure Qualification Record*) sebagai basis standar operasional produksi tangki BBM.

3. PEMBAHASAN

A. Karakteristik Material dan Parameter Pengelasan

Penelitian ini menggunakan material pelat baja ASTM SA-36 dengan dimensi ketebalan 7,7 mm, panjang 300 mm, dan lebar 250 mm yang disambung menggunakan konfigurasi kampuh level terbuka dengan sudut 60° dan celah akar 2-4 mm. Pemilihan material ASTM SA-36 didasarkan pada karakteristik mekaniknya yang sesuai untuk aplikasi struktur bertekanan dengan kekuatan tarik minimum 400 MPa sesuai standar ASME *Section IX* [7]. Proses pengelasan dilaksanakan dengan metode SMAW menggunakan kombinasi dua jenis elektroda *low-hydrogen*, yaitu E7016 dengan diameter 2,6 mm untuk *root pass* dan *hot pass*, serta E7018 dengan diameter sama untuk *capping pass*, yang mencerminkan strategi *multilayer welding* untuk mengoptimalkan kekuatan dan keuletan sambungan [8].

Pada *root pass*, arus pengelasan ditetapkan 60-70 Ampere dengan tegangan 20-28 Volt menggunakan polaritas DCEN, menghasilkan *heat input* 2,06 kJ/mm dan *travel speed* 35,71 mm/min. *Hot pass* dilakukan dengan peningkatan arus menjadi 70-80 Ampere dan *heat input* 3,11 kJ/mm untuk memastikan fusi yang baik dengan lapisan sebelumnya, sedangkan *capping pass* menggunakan arus tertinggi 80-90 Ampere dengan polaritas DCEP dan *heat input* maksimal 5,85 kJ/mm untuk menghasilkan permukaan las yang optimal [9]. Kontrolabilitas *heat input* menjadi parameter krusial dalam mencegah terjadinya distorsi berlebihan dan mempertahankan sifat mekanik zona terpengaruh panas, dimana peningkatan *heat input* secara bertahap dari *root* hingga *capping pass* memungkinkan distribusi panas yang merata dan meminimalkan risiko *thermal cracking* [10].

Komposisi kimia elektroda LB-52U (E7016) dan LB-52-18 (E7018) yang ditampilkan pada Tabel 1 dan Tabel 2 menunjukkan karakteristik deposit las berkualitas tinggi dengan kandungan karbon rendah 0,07%, mangan 0,97-1,05%, dan fosfor serta sulfur yang terkontrol di bawah 0,02%.

Tabel 1. Typical Chemical dan Mechanical Properties of LB-52U Weld Metal

C%	Si%	Mn%	P%	S%
0,07	0,55	1,05	0,011	0,06
0,2% OS (MPa)	TS (MPa)	EI (%)	IV (J)	[H] _d ¹ (ml/100g)
480	560	31	-29°C : 80	3,5

Sumber: kobelco.com

Tabel 2. Typical Chemical dan Mechanical Properties of LB-52-18 Wels Metal Tested per AWS A5.1

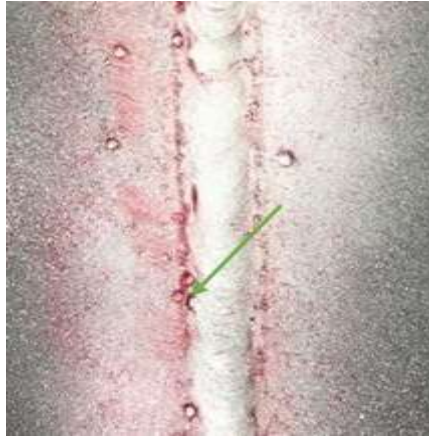
C%	Si%	Mn%	P%	S%
0,07	0,55	0,97	0,013	0,007
0,2% OS (MPa)	TS (MPa)	EI (%)	IV (J)	PWHT (ml/100g)
500	560	31	-29°C : 110	<i>As weld</i>
420	520	32	-29°C : 140	620x1

Sumber: kobelco.com

Kedua elektroda menghasilkan kekuatan tarik deposit las 560 MPa dengan elongasi 31% dan *impact value* pada temperatur -29°C mencapai 80-140 Joule, mengindikasikan keuletan superior yang dibutuhkan untuk aplikasi tangki BBM yang beroperasi pada berbagai kondisi temperatur [11]. Proses pengeringan elektroda pada suhu spesifik sebelum pengelasan menjadi langkah krusial untuk mengeliminasi *moisture content* yang dapat menyebabkan *hydrogen-induced porosity*, dimana elektroda *low-hydrogen* harus dioven untuk mempertahankan kadar hidrogen difusi di bawah 5 ml/100g sesuai spesifikasi AWS A5.1 [12].

B. Evaluasi Pengujian Non-Destructive Test

Pengujian *liquid penetrant test* yang dilakukan dengan intensitas cahaya 1.179 lux mengidentifikasi satu indikasi diskontinuitas berupa *undercut* pada permukaan sambungan las sebagaimana divisualisasikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Cacat Hasil *Penetrant Test*

Evaluasi terhadap dimensi undercut menunjukkan bahwa panjang indikasi tidak melebihi batas toleransi 1,5 mm yang ditetapkan dalam ASME BPVC *Section VIII Division 1 Appendix 8*, sehingga dapat dikategorikan sebagai "*No Defect*" dan tidak memerlukan tindakan reparasi (S et al., 2014). Metode *liquid penetrant test* efektif dalam mendeteksi diskontinuitas terbuka pada permukaan seperti *surface crack*, *porosity*, dan *lack of fusion* yang berpotensi menjadi titik inisiasi kegagalan struktural, namun memiliki keterbatasan dalam mengidentifikasi cacat *subsurface* yang memerlukan metode inspeksi volumetrik [7].

Pengujian *ultrasonic flaw detector test* menggunakan probe sudut 60° mengidentifikasi tiga indikasi diskontinuitas internal dengan karakteristik berbeda sebagaimana ditampilkan pada Gambar 2, Gambar 3, dan Gambar 4.



Gambar 2. Grafik Indikasi Cacat ke-1



Gambar 3. Grafik Indikasi Cacat ke-2



Gambar 4. Grafik Indikasi Cacat ke-3

Indikasi pertama terdeteksi pada kedalaman 4,51 mm dengan panjang 25 mm, indikasi kedua pada kedalaman 4,56 mm dengan panjang 27 mm, dan indikasi ketiga pada kedalaman 3,53 mm dengan panjang 8 mm. Analisis komparatif terhadap kriteria penerimaan ASME *Section V Article 4* menunjukkan bahwa ketiga indikasi memiliki amplitudo refleksi di bawah *threshold level* dan dimensi yang tidak melebihi batas maksimum untuk ketebalan material 7,7 mm, sehingga diklasifikasikan sebagai *acceptable indications* yang tidak mempengaruhi integritas struktural sambungan [9]. Karakteristik indikasi yang terdeteksi menunjukkan kemiripan dengan *lack of fusion* atau *incomplete penetration*, namun lokasi dan orientasinya tidak berada pada zona kritis yang mengalami konsentrasi tegangan maksimal selama operasi tangki BBM.

C. Evaluasi Pengujian *Destructive Test*

Pengujian tarik pada spesimen T1 dan T2 menghasilkan kekuatan tarik maksimum masing-masing 428,9 MPa (62,2 ksi) dan 460,1 MPa (66,7 ksi) sebagaimana ditampilkan dalam Tabel 3.

Tabel 3. Evaluasi Hasil *Tensile Test*

Jenis Spesimen	Letak Patahan	Panjang (mm)		<i>Tensile Strength</i> (MPa)		Diterima/Tidak
		Awal	Akhir	ASME IX	Hasil Uji	
T1	<i>base metal</i>	70	100	400	428,9	Diterima
T2	<i>base metal</i>	70	97	400	460,1	Diterima

Tabel 3 menjelaskan dimana kedua nilai tersebut melampaui kekuatan tarik minimum material dasar ASTM SA-36 sebesar 400 MPa (58 ksi) yang dipersyaratkan dalam ASME *Section IX Table QW-442*. Lokasi patahan pada kedua spesimen terjadi di *base metal area* di luar zona las, mengindikasikan bahwa sambungan las memiliki kekuatan superior dibandingkan material dasar, fenomena yang dikenal sebagai *overmatch condition* yang menguntungkan untuk aplikasi *pressure vessel* [13]. Elongasi yang dihasilkan mencapai 42,9% untuk spesimen T1 (perubahan panjang dari 70 mm menjadi 100 mm) dan 38,6% untuk spesimen T2 (perubahan dari 70 mm menjadi 97 mm), mendemonstrasikan keuletan sambungan yang memadai untuk menahan deformasi plastis sebelum terjadi *final fracture* [8].

Kurva tegangan-regangan yang dihasilkan dari pengujian tarik menunjukkan karakteristik material yang tipikal untuk baja karbon rendah dengan region elastis yang jelas, *yield point* yang terdefinisi, dan *region plastic deformation* yang signifikan sebelum *ultimate tensile strength* tercapai. Analisis fractografi visual terhadap permukaan patahan mengindikasikan mode kegagalan *ductile* yang ditandai dengan *necking phenomenon* dan *cup-cone fracture surface*, mengkonfirmasi bahwa sambungan las mampu mengakomodasi deformasi plastis substansial sebelum terjadi *final separation* [14]. Performa mekanik yang superior ini dapat diatribusikan pada kombinasi optimal antara *heat input* yang terkontrol, pemilihan elektroda dengan komposisi kimia sesuai, dan pelaksanaan *multilayer welding sequence* yang menghasilkan *refined grain structure* pada *weld metal* dan *heat affected zone*.

Pengujian *bend test* pada empat spesimen yang terdiri dari dua *root bend* (RB1 dan RB2) serta dua *face bend* (FB1 dan FB2) menunjukkan hasil yang memuaskan sesuai kriteria penerimaan ASME Section IX paragraph QW-163. Spesimen RB1, FB1, dan FB2 tidak menunjukkan diskontinuitas visual dengan lebar melebihi batas toleransi 3 mm, sementara spesimen RB2 mengindikasikan satu cacat berupa *incomplete penetration* dengan lebar 2 mm yang masih dalam batas akseptabel. Kemampuan spesimen untuk menahan deformasi tekuk hingga sudut minimum 180° tanpa mengalami *cracking* signifikan mendemonstrasikan keuletan dan *ductility* sambungan las yang memadai untuk aplikasi struktur yang mengalami pembebanan dinamis [7]. Kurva *load versus time* yang dihasilkan selama *bend test* menunjukkan peningkatan gaya secara progresif hingga mencapai maksimum sebelum terjadi *plastic collapse*, mengindikasikan bahwa sambungan las mampu mendistribusikan tegangan secara merata tanpa konsentrasi tegangan lokal yang berlebihan.

Keberhasilan spesimen *bend test* dapat diatribusikan pada beberapa faktor fundamental, termasuk pemilihan *root opening* dan *groove angle* yang optimal untuk memastikan *complete joint penetration*, kontrolabilitas *interpass temperature* yang mencegah *grain coarsening* pada *heat affected zone*, serta aplikasi *proper welding technique* yang meminimalkan *internal discontinuities* seperti *slag inclusion* dan *lack of fusion* [11]. Karakteristik *metallurgical weld metal* yang dihasilkan dari kombinasi elektroda E7016 dan E7018 menghasilkan *microstructure* dengan proporsi *ferrite-pearlite* yang seimbang, memberikan kombinasi optimal antara *strength* dan *toughness* yang diperlukan untuk menahan pembebanan tekuk tanpa *premature failure* [13].

D. Implikasi Kualifikasi *Welding Procedure Specification*

Integrasi hasil pengujian *destructive* dan *non-destructive test* mengkonfirmasi bahwa Pre-WPS yang dikembangkan telah memenuhi seluruh persyaratan teknis yang ditetapkan dalam ASME Section IX untuk kualifikasi prosedur pengelasan aplikasi tangki BBM. Dokumentasi *Procedure Qualification Record* (PQR) yang dihasilkan dari pengujian komprehensif ini menjadi basis *legitimate* untuk implementasi WPS dalam fabrikasi aktual tangki penyimpanan bahan bakar dengan *confidence level* tinggi terhadap *reliability* dan *safety performance* sambungan las. Validasi prosedur pengelasan melalui *systematic testing protocol* memastikan bahwa parameter pengelasan yang dikualifikasi dapat direplikasi secara konsisten dalam *production welding*, meminimalkan *variability* dan *ensuring uniformity* kualitas sambungan sepanjang struktur tangki [14].

4. KESIMPULAN

Evaluasi komprehensif terhadap kualitas sambungan las tangki BBM menggunakan elektroda E7016 dan E7018 melalui pengujian destruktif dan non-destruktif mengkonfirmasi bahwa prosedur pengelasan yang dikembangkan telah memenuhi seluruh persyaratan teknis

ASME Section IX. Hasil pengujian tarik menunjukkan kekuatan maksimum 428,9 MPa dan 460,1 MPa yang melampaui kekuatan minimum material dasar ASTM SA-36 sebesar 400 MPa, dengan lokasi patahan terjadi pada *base metal* mengindikasikan superioritas sambungan las. Pengujian tekuk pada empat spesimen mendemonstrasikan keuletan memadai dengan tidak adanya diskontinuitas melebihi batas toleransi 3 mm, dimana hanya spesimen RB2 menunjukkan *incomplete penetration* 2 mm yang masih akseptabel.

Parameter pengelasan dengan *heat input* terkontrol 2,06 kJ/mm pada *root pass* hingga 5,85 kJ/mm pada *capping pass* menghasilkan distribusi panas optimal yang mencegah distorsi berlebihan dan mempertahankan sifat mekanik zona terpengaruh panas. Pengujian non-destruktif mengidentifikasi satu indikasi *undercut* pada *liquid penetrant test* dan tiga indikasi diskontinuitas internal pada *ultrasonic test* yang seluruhnya berada dalam batas akseptabel ASME Section V, mengkonfirmasi integritas struktural sambungan. Kombinasi elektroda E7016 untuk *root-hot pass* dan E7018 untuk *capping pass* terbukti efektif menghasilkan deposit las dengan kekuatan tarik 560 MPa dan keuletan superior yang sesuai untuk aplikasi tangki penyimpanan bahan bakar. Temuan penelitian ini konsisten dengan studi sebelumnya yang menunjukkan bahwa kontrolabilitas parameter pengelasan dan pemilihan elektroda *low-hydrogen* menjadi determinan utama kualitas sambungan pada struktur bertekanan tinggi, sehingga Pre-WPS yang telah dikualifikasi dapat didokumentasikan sebagai WPS *legitimate* untuk implementasi produksi dengan *confidence level* tinggi terhadap keandalan dan keselamatan operasional tangki BBM.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Railways, "Handbook on Welding Techniques," *ESAB Weld. Cut. Prod.*, pp. 1–70, 2020.
- [2] A. Bhatia, "Introduction to Welding and Non- Destructive Testing (NDT)," *Cedengineering*, vol. 8, no. 877, pp. 1–136, 2020.
- [3] Weldability, "An Introduction To Manual Metal Arc (MMA) 'Stick' Welding," vol. 44, no. 0, 2016.
- [4] ASME, "ASME IX-Welding, Brazing, and Fusing Operators, ASME Boiler & Pressure Vessel," 2021, [Online]. Available: <https://www.asme.org/shop/certification-accreditation>
- [5] Y. Amalia and S. Rahmatillah, "Tensile test analysis for steel welding connections as a basis for compiling welding procedure specification (WPS)," *AMCA J. Sci. Technol.*, vol. 3, no. 1, pp. 20–23, 2023, doi: 10.51773/ajst.v3i1.147.
- [6] Mohamad Faizal H and Syahrul Umam, "Analisis Kekuatan Dan Kualitas Sambungan Las Dengan Variasi Pendinginan Oli Dan Udara Pada Material Astm a36 Dengan Pengujian Ndt," *J. Insitut Sains dan Teknol. Nas. Jakarta*, vol. 14, p. 132, 2018, [Online]. Available: <https://ejournal.upnvj.ac.id/BinaTeknika/article/view/1414>
- [7] A. Rahmatika, E. Sutarto, and A. C. Arifin, "Pengujian Merusak Pada Kualifikasi Prosedur Las Plat Baja Karbon SA-36 dengan Proses Pengelasan SMAW Berdasarkan Standar ASME Section IX," *J. Vokasi Teknol. Ind.*, vol. 3, no. 1, pp. 24–30, 2021, doi: 10.36870/jvti.v3i1.218.
- [8] R. R. F. Gultom and M. Sabri, "Analisa Sifat Mekanik Dan Struktur Mikro Terhadap Pengelasan Baja Aisi 1045 Dengan Metode SMAW Dan GTAW Pada Arus 100 Ampere," *J. Din.*, vol. 19, no. 2, pp. 28–34, 2021, [Online]. Available: <https://talenta.usu.ac.id/dinamis/article/view/10783>
- [9] M. Park, J. Kim, and C. Pyo, "A Study on Heat Input Control and a Quality Evaluation Algorithm to Prevent Toughness Deterioration of the Heat-Affected Zone in the Fiber Laser Welding Process of ASTM A553-1 (9% Nickel Steel) Material," *Metals (Basel)*, vol. 12, no. 7, 2022, doi: 10.3390/met12071195.
- [10] Y. R. Fauzi and A. E. Heka, "Pengaruh Heat Input Pada Pengelasan Combine Gtaw-Smaw

- Dissimilar Material Baja Aisi 1045 Dengan SS 304 Terhadap Sifat Mekanik,” vol. 10, no. 2, pp. 47–52, 2024.
- [11] S. S. Budi and D. Karmiadi, “Analisis Variasi Pengelasan GTAW dan SMAW dengan Parameter Kuat Arus Listrik Pada Fabrikasi Pipa Flowline 4 Inch SCH 80,” *Teknobiz J. Ilm. Progr. Stud. Magister Tek. Mesin*, vol. 12, no. 2, pp. 91–99, 2022, doi: 10.35814/teknobiz.v12i2.3613.
- [12] Syaripuddin, F. B. Susetyo, and T. Hamzah, “Ndt Examination Hasil Pengelasan Smaw Dengan Variasi Merek Elektroda E6013,” *J. Konversi Energi dan Manufaktur*, vol. 1, no. 3, pp. 136–143, 2014, doi: 10.21009/jkem.1.3.4.
- [13] M. Z. Mawahib, S. Jokosisworo, and H. Yudo, “Pengujian Tarik Dan Impak Pada Pengerjaan Pengelasan SMAW Dengan Mesin Genset Menggunakan Diameter Elektroda Yang Berbeda,” *Kapal J. Ilmu Pengetah. dan Teknol. Kelaut.*, vol. 14, no. 1, pp. 26–32, 2017, doi: 10.14710/kpl.v14i1.15533.
- [14] A. Jeergi and P. Student, “Study on Welding Procedure Specifications as Per ASME Sec IX,” *IJSRD-International J. Sci. Res. Dev.*, vol. 4, no. 04, pp. 2321–0613, 2016, [Online]. Available: www.ijsrd.com