# EVALUASI KUALITAS SAMBUNGAN LAS STORAGE TANK PROSES SMAW PADA BAJA ASTM SA-283 GRADE A

**Fernando Putra Pratama[1,*], Ayende[1], Aldy Hidayah[1]**
[1]Teknik Mesin Kilang, Politeknik Energi dan Mineral Akamigas, Jln Gajah Mada No.38, Cepu, Blora, 58315
**E-mail*: fernandopoetraprtm@gmail.com

## ABSTRAK

Keandalan sambungan las pada *storage tank* berperan penting dalam menjamin keselamatan operasi sehingga setiap *Welding Procedure Specification* (WPS) harus dikualifikasi sebelum diterapkan. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi kualitas sambungan las *storage tank* menggunakan proses *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW) posisi 1G pada baja ASTM SA-283 Gr. A dengan tebal 8 mm sebagai dasar validasi WPS sesuai ASME *Section* IX. Pengelasan dilakukan menggunakan elektroda E7016 pada *root pass* dan *hot pass* serta E7018 pada *capping* dengan parameter yang ditetapkan dalam *Preliminary* WPS (Pre-WPS). Tahap penelitian meliputi penyusunan pre-WPS, persiapan spesimen, pengelasan, serta pengujian *non-destructive test* berupa *Liquid Penetrant Test* (PT) dan *Ultrasonic Flaw Detector Test* (UT), dilanjutkan pengujian *destructive test* berupa uji tarik dan uji tekuk. Hasil PT menunjukkan indikasi porositas dan *undercut* dengan panjang 1,1 mm yang masih berada di bawah batas penerimaan (1.5 mm), sedangkan batas UT (3 mm) tidak didapatkan pada hasil uji di tiga titik (2.3; 2.1; 2.6 mm). Uji tarik dengan 2 spesimen, menghasilkan kekuatan tarik maksimum sebesar 451 MPa dan 452 MPa, lebih tinggi dibanding persyaratan minimum material ASTM SA-283 Gr. A sebesar 415 MPa. Uji tekuk dengan 4 spesimen, juga memenuhi kriteria ASME *Section* IX dengan tidak ada indikasi cacat yang melebihi batas toleransi. Berdasarkan penelitian ini, pre-WPS dinyatakan memenuhi persyaratan kualifikasi dengan kriteria yang tertera pada penelitian ini dan dapat ditetapkan sebagai WPS.

**Kata kunci:** SMAW, *Welding Procedure Specification* (WPS), ASTM SA-283 Gr. A, ASME *Section* IX, *storage tank*

## 1. PENDAHULUAN

Pengelasan memiliki peran yang sangat penting dalam sektor manufaktur dan konstruksi, khususnya dalam pembuatan storage tank. Keandalan sambungan las pada komponen ini menjadi kunci untuk memastikan ketahanan terhadap tekanan internal, mencegah korosi, serta menjamin keselamatan operasional secara menyeluruh. Kegagalan atau kebocoran pada sambungan las dapat menimbulkan dampak serius, termasuk risiko terhadap lingkungan, ancaman bagi keselamatan tenaga kerja, dan potensi kerugian ekonomi yang besar [1]. Salah satu metode yang cukup populer karena kemudahan penggunaan dan fleksibilitasnya adalah *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW). Pada penerapannya di Industri, pengelasan dengan metode SMAW sering digunakan untuk pengelasan *storage tank* karena fleksibilitas proses pengelasan. Meski demikian, agar hasil pengelasan memenuhi persyaratan standar industri, diperlukan penyusunan prosedur yang terstruktur dengan baik serta pelaksanaan pengujian awal untuk memastikan integritas sambungan las yang dihasilkan [2].

Guna memastikan bahwa sambungan las memiliki kekuatan dan keandalan yang sesuai standar, dilakukan serangkaian pengujian mekanis seperti uji tarik dan uji tekuk. Tahapan ini menjadi bagian penting dalam proses kualifikasi *Welding Procedure Specification* (WPS) guna menjamin mutu dan keselamatan hasil pengelasan. *Welding Procedure Specification* merupakan dokumen teknis yang merinci secara lengkap prosedur pengelasan, mencakup jenis

logam dasar, tipe elektroda, parameter pengelasan, hingga perlakuan panas apabila diperlukan. Namun, WPS tidak dapat langsung diterapkan tanpa melalui proses kualifikasi terlebih dahulu. Proses ini dilakukan melalui serangkaian pengujian, dan hasilnya dicatat dalam *Procedure Qualification Record* (PQR). Selain itu, operator las yang akan menerapkan WPS juga wajib memiliki sertifikasi untuk memastikan bahwa mereka mampu melaksanakan prosedur tersebut sesuai standar. Hal ini menegaskan bahwa penyusunan dan pengujian WPS merupakan tahapan esensial sebelum digunakan dalam proses pengelasan storage tank [3], [4].

Penelitian ini berorientasi pada evaluasi kualitas hasil sambungan las dengan kombinasi dua jenis elektroda berbeda dan diameter elektroda berbeda, yaitu E7016 (2.6 mm) dan E7018 (3.2 mm), melalui pengujian *non-destructive test* (NDT) dan *destructive test* (DT) dengan mengacu pada standar ASME *Section* IX. Rumusan masalah dalam penelitian ini berfokus pada aspek kriteria hasil uji pengelasan dan mencakup: pertama, pengaruh apa yang terjadi pada hasil sambungan SMAW ketika digunakan kombinasi dua jenis elektroda berbeda; kedua, apakah parameter yang tercantum dalam WPS mampu menghasilkan sambungan las yang memenuhi standar ASME *Section* IX setelah melalui uji tidak merusak dan uji merusak; ketiga, bagaimana hasil pengujian tidak merusak dan uji merusak dapat dijadikan acuan untuk menegaskan prosedur pengelasan (WPS) dengan kombinasi dua jenis elektroda dan dua jenis diameter telah memenuhi persyaratan kualifikasi dan dinyatakan layak diaplikasikan pada konstruksi *storage tank*. Tujuan utama yang mendasari penelitian ini adalah menetapkan parameter pengelasan pada Pre-WPS memenuhi uji tarik dan uji tekuk sehingga dapat ditetapkan menjadi WPS, memastikan seluruh prosedur pengelasan pada *storage tank* telah melalui proses kualifikasi sesuai standar ASME *Section* IX untuk menjamin keandalan sambungan tekanan, dan menetapkan WPS sebagai dokumen wajib untuk menjamin keselamatan, kekuatan, dan keandalan sambungan las.

Secara kajian literatur, penggunaan jenis elektroda E7016 dan E7018 untuk meminimalkan risiko *hydrogen-induced cracking* pada material baja karbon menengah hingga rendah. Elektroda E7016 dan E7018 merupakan jenis elektroda dengan *coating low-hidrogen*, sehingga penggunaanya untuk mengurangi risiko retak karena hidrogen sangat tepat [3]. Hipotesis penelitian ini menegaskan bahwa penggunaan elektroda E7016 menghasilkan deposit keuletan lebih rendah dibanding E7018, sehingga kekuatan tarik lebih diunggulkan pada elektroda E7018 pada penerapan parameter pengelasan yang sesuai (tiap *pass*), serta kombinasi penggunaan kedua elektroda ini dapat menghasilkan kekuatan sambungan yang lebih kuat dibandingkan kekuatan tarik pada material las ASTM SA-283 Gr.A dengan ketentuan ketepatan kontrol parameter las.

## 2. METODE

Metode penelitian yang digunakan adalah pendekatan secara eksperimental kuantitatif dengan berbasis prosedur standar ASME *Section* IX sebagai acuan kualifikasi prosedur pengelasan dan evaluasi hasil uji. Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Bengkel Mekanik.

### A. Alat dan Bahan Penelitian

Penelitian ini menggunakan material ASTM SA-283 Gr.A ketebalan $\pm$ 8 mm. Tipe penyambungan yang digunakan adalah *butt joint* dengan posisi pengelasan 1G (*flat position*). Busur elektroda yang digunakan, E7016 dengan diameter 2.6 mm dan E7018 dengan diameter 3.2 mm. Mesin las yang digunakan yaitu las Miller SRH500.

### B. Metode Pengelasan

Pengelasan dilakukan setelah preparasi pelat dilakukan, pada penelitian ini menggunakan jenis kampuh *single* V-*Groove* dengan sudut kampuh 60°, *root face* 2 – 3 mm, dan *root gap* 3.6 mm. Pengelasan dilakukan dengan metode *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW). Parameter las yang digunakan ada pada Pre-WPS yang dirancang untuk penelitian ini. Parameter yang ada pada Pre-WPS mencakup kecepatan pengelasan, temperatur *interpass*, dan arus pengelasan. Kualitas hasil sambungan las dapat divalidasi melalui metode *non-destructive test* dan *destructive test*, untuk selanjutnya didapatkan informasi mengenai kualitas hasil sambungan las.

### C. Metode Pengujian

Metode pengujian hasil pengelasan dilakukan dengan *non-destructive test* (NDT), yaitu *liquid penetrant* untuk indentifikasi cacat pada permukaan las dan *ultrasonic flaw detector test* untuk mendeteksi cacat internal pada las. Preparasi spesimen las wajib dilakukan sebelum memulai *destructive test* (DT). Mengacu pada ASME *Section* IX QW-462.1(a) dan QW-462.3(a) mengenai dimensi spesimen uji tarik dan uji tekuk. Setelah dilakukan NDT, selanjutnya *destructive test* (DT), yaitu *tensile test* untuk mengetahui kekuatan tarik hasil pengelasan dan *bending test* untuk mengetahui ada tidaknya robekan di *root* dan di *face* pada hasil las.

### D. Analisis Data

Data penelitian diperoleh secara terstruktur melalui hasil pengujian pada spesimen uji. Spesifikasi material uji, dimensi spesimen, parameter pengelasan, nilai kekuatan tarik, dan dokumentasi pada patahan yang terdeteksi. Analisis data dilakukan dengan mengacu pada ASME *Section* IX, pengujian *liquid penetrant* memiliki batas toleransi untuk cacat yang teridentifikasi tidak lebih dari 1.5 mm dan pengujian *ultrasonic flaw detector* memiliki batas toleransi cacat yang diterima sebesar 3 mm, hal ini dibahas lebih detail pada ASME *Section* IX QW-195.2 dan QW-191.2. Pengujian DT, dimana sambungan hasil pengelasan harus memiliki nilai kekuatan tarik lebih besar dari kekuatan tarik material uji dan tidak terdapat retak pada hasil *bending test* yang melebihi batas toleransi 3 mm. Untuk selanjutnya data hasil pengujian didokumentasikan dalam dokumen WPS dan proses pengelasan hingga pengujian dicatat dalam *Procedure Qualification Record* (PQR).

## 3. PEMBAHASAN

### A. Spesifikasi Material

Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah pelat baja ASTM SA-283 Gr.A dengan panjang 300 mm, lebar 250 mm, dan ketebalan $\pm$ 8 mm. Karakteristik material ASTM SA-283 Gr.A memiliki kekuatan tarik minimum 415 MPa, sesuai pada ASME *Section* IX [5]. Material ini memiliki maksimal kadar karbon 0.14 %, nilai tersebut tergolong dalam baja karbon rendah hingga menengah. Sifat ASTM SA-283 Gr.A memiliki keuletan dan kekuatan yang baik, sehingga sering digunakan dalam kebutuhan industri untuk fabrikasi *storage tank*. Meski demikian, kandungan karbon yang relative tinggi dapat menimbulkan sifat getas apabila tidak dikontrol.

### B. Pengelasan

Pengelasan dilakukan dengan metode *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW). Metode ini dipilih karena biasa digunakan dalam pengelasan *storage tank*. Pengelasan pada penelitian ini menggunakan dua jenis busur elektroda *low-hydrogen*, E7016 diameter 2.6 mm dan E7018 diameter 3.2 mm. Perbedaan jenis dan diameter dimaksudkan untuk mengetahui dampak yang

terjadi ketika pengujian pada hasil las. Elektroda E7016 diameter 2.6mm digunakan untuk *root pass* dan *filler/hot pass*, sedangkan elektroda E7018 diameter 3.2 mm digunakan untuk *capping pass*. Penggunaan layer berganda/multilayer dimaksudkan untuk mendapatkan kekuatan sambungan yang optimal [6], [7].

Komposisi dan karakteristik busur elektroda E7016 (LB-52U) dan E7018 (LB-52-18) tersedia pada Tabel 1, Tabel 2, Tabel 3 dan Tabel 4 [8]. Elektroda pengelasan harus dipersiapkan dengan cara dioven terlebih dahulu untuk mempertahankan kadar hidrogen difusi dan meminimalkan *moisture content* yang nantinya dapat menyebabkan cacat porositas [3], [9].

**Tabel 1. *Mechanical Properties of* LB-52U**

| 0.2% YS (MPa) | TS (MPa) | El on 4d (%) | IV -29°C (J) |
|---|---|---|---|
| 480 | 560 | 31 | 80 |

**Tabel 2. *Chemical Properties of* LB-52U**

| C% | Si% | Mn% | P% | S% | Ni% | Cr% | Mo% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.08 | 0.64 | 0.86 | 0.012 | 0.008 | 0.01 | 0.02 | <0.01 |

**Tabel 3. *Mechanical Properties of* LB-52-18**

| 0.2% YS (MPa) | TS (MPa) | El on 4d (%) | IV -29°C (J) |
|---|---|---|---|
| 500 | 560 | 31 | 110 |

**Tabel 4. *Chemical Properties of* LB-52-18**

| C% | Si% | Mn% | P% | S% | Ni% | Cr% | Mo% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.07 | 0.59 | 0.97 | 0.013 | 0.007 | 0.02 | 0.03 | <0.01 |

Parameter las menjadi salah satu faktor utama dalam penentuan hasil las. Pada bagian *root pass* menggunakan arus sebesar 60-70 Ampere dengan kecepatan pengelasan 38.3 mm/min. Pengelasan *Hot pass* menggunakan arus 70-80 Ampere dengan kecepatan pengelasan 34.15 mm/min. Pengelasan *capping pass* menggunakan arus 80-90 Ampere dengan kecepatan pengelasan 30.35 mm/min. Pengelasan pada bagian *root pass* dan *hot pass* menggunakan *current type & polarity* DCEN (*Direct Current Electrode Negative*), sedangkan pada sisi *capping pass* menggunakan *current type & polarity* DCEP (*Direct Current Electrode Positive*). Penentuan *current type & polarity* dan arus pengelasan berdasarkan rekomendasi manufaktur elektroda, yaitu kobelco. Selama pengelasan berlangsung, kontrol temperatur antar layer perlu diperhatikan untuk menjaga pelat pengelasan dari distorsi [10]. *Interpass temperature* ditetapkan maksimum sebesar 250°C dan minimum dengan ketentuan temperatur lingkungan atau *ambient* [3].

## C. Evaluasi *Non-Destructive Test*

Hasil pemeriksaan pada *liquid penetrant test* (PT) menunjukan adanya cacat pada permukaan *welding* area berupa porositas dan *undercut*. Indikasi cacat lain tidak ditemukan seperti retak permukaan. ASME *Section* V menyatakan, dimensi cacat tidak melebihi batas toleransi yaitu 1.5 mm, maka dapat dikategorikan sebagai *no defect* [11]. Hasil PT terdapat pada Gambar 1 dan data hasil penetrant dapat dilihat pada Tabel 5.



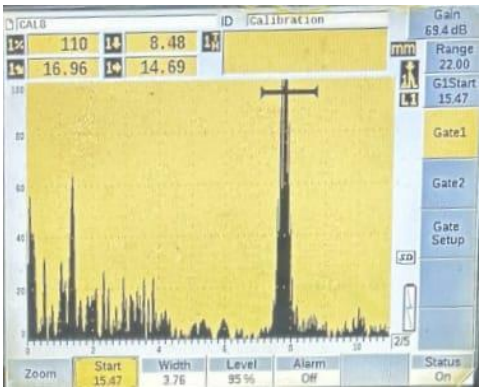
**Gambar 1. Pengujian *Liquid Penetrant Test***

**Tabel 5. Hasil *Penetrant Test***

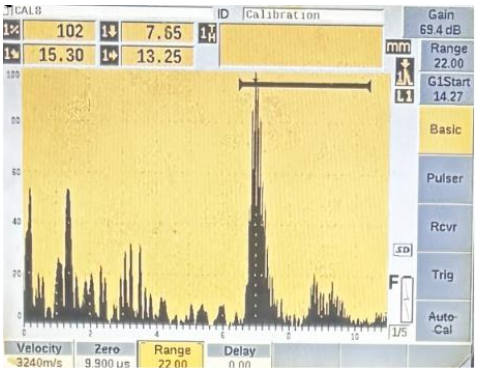
| Area | Jenis Cacat | Jumlah | Panjang (mm) | Remarks |
|---|---|---|---|---|
| Weld Area | Porosity | 1 | 1.1 | *No Defect* |
| Weld Area | Under Cut | 1 | 1.1 | *No Defect* |

Metode PT sangat efektif dalam mendeteksi cacat yang berada di permukaan hasil las, dengan memanfaatkan gaya kapilaritas oleh *liquid penetrant* [12]. Hasil pengujian PT berdasarkan ASME *Section* V, terdapat cacat pada permukaan hasil las dengan panjang 1.1 mm dan dikategorikan *no defect* atau tidak mempengaruhi kualitas sambungan las secara signifikan. Mengidentifikasi cacat permukaan belum cukup dalam memvalidasi bahwa sambungan sudah memenuhi kualifikasi, maka untuk mengetahui kondisi pada internal hasil pengelasan, dilakukan pengujian NDT dengan metode *Ultrasonic Flaw Detector Test* (UT).

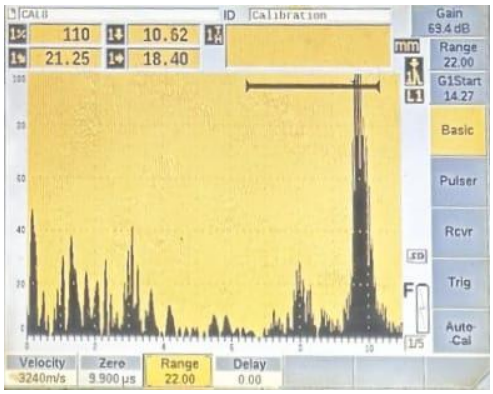
*Ultrasonic Flaw Detector* (UT) memanfaatkan gelombang *ultrasonic* ke dalam material menggunakan probe pada sudut yang dipilih. Pengujian pada penelitian ini menggunakan sudut 60° dan perlu dilakukan kalibrasi alat sebelum memulai pengujian. Pada ASME *Section* V, apabila terdapat indikasi panjang cacat melebihi batas acuan, yaitu < 3 mm, maka cacat tidak dapat diterima, berikut hasil pengujian UT 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 pada Gambar 2 merupakan cacat ke-1 pada kedalaman 7.52 mm serta panjang cacat 2.3 mm, Gambar 3 menunjukan grafik indikasi cacat ke 2 dengan kedalaman 7.65 mm dan panjang 2.1 mm, dan Gambar 4 menunjukan grafik indikasi cacat ke-3 pada kedalaman 5.38 mm dan panjang cacat 2.6 mm. Penggunaan UT memudahkan untuk mengetahui kondisi internal hasil pengelasan. Mengacu pada ASME *Section* V, cacat yang sudah teridentifikasi tidak melebihi batas toleransi dan dapat dinyatakan *acceptable indications* karena tidak mempengaruhi struktural sambungan las secara signifikan. Cacat pada internal hasil las teridentifikasi sebagai *lack of fusion*, hal ini mengindikasikan posisi sudut elektroda yang tidak konsisten, sehingga penetrasi elektroda ke *base plate* menjadi kurang maksimal [4], [13].

## D. Evaluasi *Destructive Test*

Langkah selanjutnya dalam mengesahkan Pre-WPS menjadi WPS adalah dengan melakukan uji merusak pada hasil pengelasan. Uji tarik digunakan untuk mengetahui kekuatan tarik maksimum yang dapat diterima oleh spesimen pengelasan. Uji tekuk digunakan untuk mengidentifikasi tekukan yang terjadi pada hasil las. Sebagaimana disebutkan dalam ASME *Section* IX QW-153, bahwa kekuatan tarik hasil uji yang dapat diterima adalah lebih dari sama dengan kekuatan tarik minimum logam dasar. Sedangkan mengenai uji tekuk berdasarkan ASME *Section* IX QW-163 mengenai syarat penerimaan uji tekuk, lebar cacat yang terlihat tidak lebih dari 3 mm.

*Tensile test* pada spesimen uji tarik pertama menghasilkan nilai kekuatan tarik maksimum sebesar 451 MPa atau setara dengan 65.4 ksi dan spesimen uji tarik kedua menghasilkan kekuatan tarik maksimum dengan nilai 452 MPa atau setara dengan 65.6 ksi. Evaluasi dari perolehan hasil uji tarik yaitu, pengelasan material ASTM SA-283 Gr.A dengan parameter las yang telah ditentukan dinyatakan lulus uji, dikarenakan hasil *tensile test* lebih dari sama dengan kekuatan tarik minimum logam dasar. Hasil evaluasi dalam bentuk tabel dapat dilihat pada Tabel 6.

**Tabel 6. Hasil *Tensile Test***

| Spesimen Uji | Posisi Patahan | Panjang (mm) | | Tensile Strength (MPa) | | Diterima/Tidak |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Awal | Akhir | ASME IX | Uji | |
| Ke-1 | Base metal | 73 | 85 | 415 | 451 | Diterima |
| Ke-2 | Base metal | 73 | 92 | 415 | 452 | Diterima |

Tabel 6 menampilkan hasil uji tarik kedua spesimen uji yang telah dilakukan. Lokasi patahan kedua spesimen berada di *base metal*, mengindikasikan bahwa sambungan las memiliki kekuatan tarik yang lebih besar daripada logam dasar [3]. Berdasarkan nilai kekuatan tarik pada spesimen uji, kedua hasil ini dinyatakan memenuhi kualifikasi uji kekuatan tarik hasil las berdasarkan ASME *Section* IX.

Pengujian *bending* dilakukan dengan 4 spesimen, yaitu *root bend* ke-1, *face bend* ke-1, *root bend* ke-2, dan *face bend* ke-2. Secara berturut-turut, hasil uji tekuk *root bend* ke-1 terdapat cacat pada *root*, cacat ini diindikasikan sebagai *lack of fusion*, karena lasan tidak menembus sempurna pada *root*, tetapi cacat ini memiliki panjang kurang dari 3 mm, sehingga dikategorikan *No-Defect*. Hasil uji *face bend* ke-1, hasil uji ini dinyatakan lulus karena tidak terdapat cacat pada permukaan lasan. Hasil uji dari specimen *root bend* ke-2, tidak terdapat bukaan indikasi cacat pada hasil las. Hasil dari *face bend* ke-2, hasil uji tekuk ini dinyatakan lulus, karena tidak terdapat bukaan pada permukaan lasan. Pengujian dengan metode uji tekuk dimaksudkan untuk mengetahui kemampuan deformasi spesimen hingga sudut minimum 180° tanpa mengalami bukaan indikasi cacat pada hasil las [14].

Kemampuan sambungan las dalam uji tarik dan tekuk dipengaruhi beberapa faktor fundamental seperti bentuk *groove*, *root gap*, *root face*, dan kontrol temperatur setiap layer. Karakteristik *metallurgical weld metal* menggunakan elektroda E7016 diameter 2.6 mm dan E7018 diameter 3.2 mm menghasilkan struktur material yang sama (F-No 4 ASME IX), sehingga memberikan kombinasi antara kekuatan dan keuletan yang optimal [3].

### E. Pengaruh Pre-*Welding Procedure Qualification* (Pre-WPS)

Sambungan las yang telah melalui tahap uji tidak merusak dan uji mekanis atau uji merusak selanjutnya dapat ditentukan kelayakannya menjadi dokumen WPS berdasarkan data yang telah diperoleh dari hasil uji. Pre-WPS yang sudah diuji berdasarkan penelitian ini telah memenuhi kualifikasi ASME *Section* IX dengan metode uji *penetrant liquid test* (PT) dan *ultrasonic flaw detector test* (UT) serta pengujian dengan metode uji merusak yaitu *tensile test* dan *bending test*. Dokumentasi data pengelasan tercatat pada *Procedure Qualification Record* (PQR) selama pengelasan dan pengujian sambungan las dilakukan, sehingga pre-WPS dapat diimplementasikan menjadi WPS untuk pengelasan *storage tank*.

## 4. SIMPULAN

Pengelasan dengan material ASTM SA-283 Gr. A memenuhi persyaratan teknis setelah dilakukan uji tidak merusak dan uji merusak pada hasil sambungan las dengan menggunakan kombinasi elektroda E7016 dan E7018 pada pengelasan *storage tank*. Kekuatan tarik maksimum pada uji tarik diperoleh 451 MPa dan 452 MPa, ini merupakan validasi dari uji pengelasan dengan parameter yang dicantumkan dalam pre-WPS. Sebelum melakukan pengelasan pada storage tank perlu dilakukan pengujian terhadap pre-WPS yang akan digunakan, nantinya, apabila pre-WPS memenuhi syarat uji, maka ditetapkan sebagai Welding Procedure Specification (WPS) dan dicatat dalam Procedure Qualification Record (PQR). Berdasarkan pengujian, temuan ini menegaskan WPS yang dirancang siap digunakan baik dalam pekerjaan konstruksi storage tank selama dalam parameter pengelasan yang diverifikasi dan pengelasan posisi 1G dan pelat dengan tebal 8 mm.

Validasi hasil penelitian ini juga didapatkan dari uji tidak merusak atau *non-destructive test*, dimana tampak *surface* sambungan las tidak memiliki indikasi cacat yang melebihi batas toleransi berdasarkan ASME *Section* IX. Begitupun pada hasil *ultrasonic flaw detector test*, menunjukan bahwa kondisi internal sambungan las tidak terdapat cacat yang terindikasi melebihi kualifikasi ketentuan ASME *Section* IX. Penelitian ini menunjukan bahwa kontrol dari parameter pengelasan sangat penting karena dapat mempengaruhi kualitas sambungan las, sehingga dokumen pre-WPS dapat diimplementasikan menjadi WPS dan dicatat pada dokumen PQR untuk penerapan pengelasan dengan kendalan dan keselamatan operasional pada *storage tank*.

## 5. DAFTAR PUSTAKA

[1] A. P. Azis and A. Nugraha, “PENGARUH VARIASI ARUS LISTRIK DAN KECEPATAN PENGELASAN PADA PENGELASAN FCAW TERHADAP KEKUATAN TARIK DAN DISTORSI BAJA A36,” *J. Tugas Akhir Mhs. ROTARY*, vol. 7, no. 2, pp. 145–158, 2025, doi: 10.20527/jtam_rotary.v7i2.15757.

[2] H. M. Munawar, I. N. Gusniar, and R. Hanafi, “PENGARUH JENIS ELEKTRODA LAS SMAW TERHADAP SIFAT MEKANIK DAN STRUKTUR MICRO,” *J. Pendidik. Tek. Mesin Undiksha*, vol. 11, no. 1, pp. 93–110, 2023.

[3] F. H. Ginting, Ayende, T. Antonio Jr, and A. Nadhiroh, “EVALUASI KUALITAS SAMBUNGAN LAS TANGKI BBM MENGGUNAKAN ELEKTRODA E7016 DAN E7018 BERDASARKAN PENGUJIAN DESTRUKTIF-NON-DESTRUKTIF DAN VALIDASI WPS SESUAI ASME SECTION IX,” *SNTEM*, vol. 5, pp. 740–748, 2025, doi: https://doi.org/10.53026/prosidingsntem.v5i1.648.

[4] Ayende, M. B. Bahtiar, H. Kotrisna, S. Damayanti, R. D. Santoso, and M. B. A. P, “Experimental Study of Oil and Gas Pressure Vessel Welding Using The Shielded Metal Arc Welding Process,”

*lemigas*, vol. 48, no. 2, pp. 41–51, 2025, doi: org/10.29017/scog.v48i2.1775.

[5] The American Society of Mechanical Engineers, *ASME BPVC Section IX - Qualification Standard for Welding, Brazing, and Fusing Procedures; Welders; Brazers; and Welding, Brazing, and Fusing Operators.*, 2021st ed., vol. SECTION IX, no. 1, July 2021. New York, 2021. [Online]. Available: https://www.asme.org/shop/certification-accreditation.

[6] F. A. Mashuda, Kosjoko, and N. A. Mufarida, "Pengaruh Variasi Jumlah Layer Las Smaw Material Aisi 1045 Terhadap Kekuatan Tarik dan Structur Micro," *J. Smart Teknol.*, vol. 6, no. 1, pp. 108–120, 2024.

[7] AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE, *API STANDARD 650 - Welded Tanks for Oil Storage*, no. March. 2020.

[8] "Welding Materials | KOBE STEEL, LTD." Accessed: Jun. 10, 2026. [Online]. Available: https://www.kobelco.co.jp/english/products/welding/materials.html

[9] A. Hikbal, M. B. Nugroho, and A. M. Bachtiar, "Review Pengujian Pengelasan Metode Destructive Test," *J. Mema (Jurnal Mesin dan Manufaktur)*, vol. 2, no. 1, pp. 11–20, 2025, [Online]. Available: https://memajournal.indiepress.id/index.php/mema/index

[10] E. B. Lopo, M. Chamim, N. T. Atmoko, and H. L. Wijayanto, "ANALISIS PENGARUH ARUS PADA PENGELASAN BERTINGKAT ( MULTILAYER WELDING ) TERHADAP STRUKTUR MIKRO , KEKERASAN DAN KUAT TARIK," *J. rekayasa mesin*, vol. 14, no. 1, pp. 205–212, 2023, doi: 10.21776/jrm.v14i1.1210.

[11] The American Society of Mechanical Engineers, *ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section V - Nondestructive Examination*. New York, 2023.

[12] E. Yuliarto, C. Pramono, and E. Mawarsih, "Pengaruh Variasi Gerakan Elektroda dan Posisi Pengelasan terhadap Kekuatan Tarik dan Struktur Mikro Hasil Pengelasan Shield Metal Arc Welding ( SMAW ) pada Baja Karbon Rendah ST37," *J. Mech. Eng.*, vol. 7, no. 1, pp. 1–9, 2023.

[13] Hafni and Rifqi, "PENGARUH SUDUT ELEKTRODA 750, 850, 900 PADA LONGITUDINAL ARAH MUNDUR TERHADAP PRESENTASE PENETRASI," *J. Teknol. dan Vokasi*, vol. 1, no. 1, pp. 68–74, 2023, doi: https://doi.org/10.21063/jtv.2023.1.1.10.

[14] F. Putri, "Analisa pengaruh variasi kuat arus dan jarak pengelasan terhadap kekuatan tarik, sambungan las baja karbon rendah dengan elektroda 6013," *J. AUSTENIT*, vol. 2, no. 2, pp. 13–25, 2010.