

PENGEMBANGAN *WELDING PROCEDURE SPECIFICATION* (WPS) UNTUK PENGELASAN TANGKI BAHAN BAKAR DENGAN PROSES SMAW: ANALISIS PARAMETER DAN PENGUJIAN MEKANIK

Tito Antonio Jr^{1*}, Ayende¹, Arin Nadiroh¹, Fernando Haganta Ginting¹

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

**E-mail: titoantoniojr28@gmail.com*

ABSTRAK

Integritas sambungan las pada tangki bahan bakar menjadi aspek krusial dalam menjamin keselamatan operasional dan mencegah dampak lingkungan. Penelitian ini bertujuan mengembangkan dan mengkualifikasi spesifikasi prosedur pengelasan (WPS) menggunakan metode SMAW untuk aplikasi tangki bahan bakar dengan material ASTM SA-36. Metode penelitian menggunakan pendekatan eksperimen dengan pengelasan berlapis menggunakan elektroda E7016 pada lapisan akar dan panas serta elektroda E7018 pada lapisan penutup dalam posisi pengelasan datar. Evaluasi integritas sambungan dilakukan melalui pengujian tanpa merusak (NDT) serta pengujian mekanik destruktif (DT) meliputi uji tarik dan uji tekuk. Hasil pengujian menunjukkan kekuatan tarik sambungan las melampaui persyaratan minimum material induk, dengan patahan terjadi pada logam induk. Pengujian tekuk juga menunjukkan hasil yang memenuhi syarat dengan cacat di bawah batas toleransi standar. Penelitian ini memberikan kontribusi praktis berupa prosedur terqualifikasi yang siap diimplementasikan di industri migas, memastikan integritas struktural dan keselamatan operasional tangki penyimpanan. Prosedur pengelasan yang dikembangkan telah memenuhi kualifikasi sesuai standar ASME *Section IX* dan layak diimplementasikan untuk aplikasi tangki bahan bakar.

Kata kunci: Prosedur Pengelasan, Tangki Bahan Bakar, Pengujian Mekanik, Elektroda Terbungkus, Kualifikasi Pengelasan

1. PENDAHULUAN

Proses penyambungan logam melalui teknik pengelasan memiliki peranan vital dalam sektor industri pembuatan dan pembangunan infrastruktur, khususnya pada konstruksi wadah penyimpanan bahan bakar minyak. Integritas sambungan las pada tangki bahan bakar minyak menjadi faktor penentu dalam memastikan kemampuan menahan beban tekanan dari dalam, ketahanan menghadapi pengikisan material, serta menjamin keselamatan dalam pengoperasian secara menyeluruh [1]. Kegagalan integritas sambungan pada tangki bahan bakar minyak berpotensi menimbulkan dampak serius terhadap kelestarian lingkungan hidup, keselamatan tenaga kerja, serta menimbulkan kerugian dari aspek ekonomi yang signifikan. Mengingat tingginya risiko yang dapat ditimbulkan, diperlukan suatu pendekatan sistematis dalam merancang dan mengimplementasikan prosedur pengelasan yang telah terbukti memenuhi persyaratan teknis dan standar keselamatan yang berlaku [2], [3].

Kualitas hasil penyambungan melalui proses pengelasan dipengaruhi oleh berbagai faktor teknis yang saling berkaitan, meliputi karakteristik dan tingkat kualitas bahan dasar yang digunakan, penetapan teknik pengelasan yang tepat sesuai dengan kondisi aplikasi, serta tingkat kompetensi dan keahlian yang dimiliki oleh tenaga tukang las. Metode pengelasan busur listrik dengan pelindung elektroda terbungkus merupakan salah satu teknik yang kerap diaplikasikan dalam industri karena sifatnya yang mudah disesuaikan dengan berbagai kondisi lapangan dan kemudahan dalam pengoperasiannya [4]. Meskipun demikian, untuk mencapai hasil pengelasan yang dapat diterima dan memenuhi kriteria standar industri, diperlukan perancangan prosedur yang terstruktur dengan baik dan harus melalui tahapan pengujian terlebih dahulu [5]. Dalam konteks ini, dokumen spesifikasi prosedur pengelasan menjadi instrumen teknis yang mengatur secara detail seluruh aspek pelaksanaan pengelasan, dimulai dari pemilihan jenis logam induk, penentuan elektroda yang sesuai, pengaturan parameter proses pengelasan, hingga perlakuan termal apabila diperlukan dalam aplikasi tertentu [6].

Untuk menjamin bahwa sambungan las memenuhi persyaratan kekuatan mekanik dan tingkat keandalan yang diperlukan, pelaksanaan serangkaian pengujian mekanik menjadi suatu keharusan, antara lain meliputi pengujian tarik untuk mengevaluasi kekuatan maksimal sambungan dan pengujian tekuk untuk menilai tingkat keuletan material. Pengujian-pengujian tersebut bertujuan mengidentifikasi karakteristik sambungan seperti kemampuan menahan gaya tarik, daya tahan terhadap pembebanan yang bekerja, serta tingkat kelenturan material. Pelaksanaan pengujian ini merupakan komponen esensial dalam proses kualifikasi spesifikasi prosedur pengelasan yang nantinya akan didokumentasikan dalam catatan kualifikasi prosedur. Perlu dipahami bahwa spesifikasi prosedur pengelasan tidak dapat langsung diterapkan dalam aplikasi aktual tanpa melalui tahapan kualifikasi melalui pengujian, yang kemudian hasilnya dicatat secara komprehensif dalam dokumen catatan kualifikasi prosedur. Selain itu, tenaga tukang las yang akan melaksanakan proses pengelasan juga wajib menjalani proses sertifikasi kompetensi untuk memastikan kemampuan mereka dalam menerapkan spesifikasi prosedur pengelasan secara tepat dan konsisten [2].

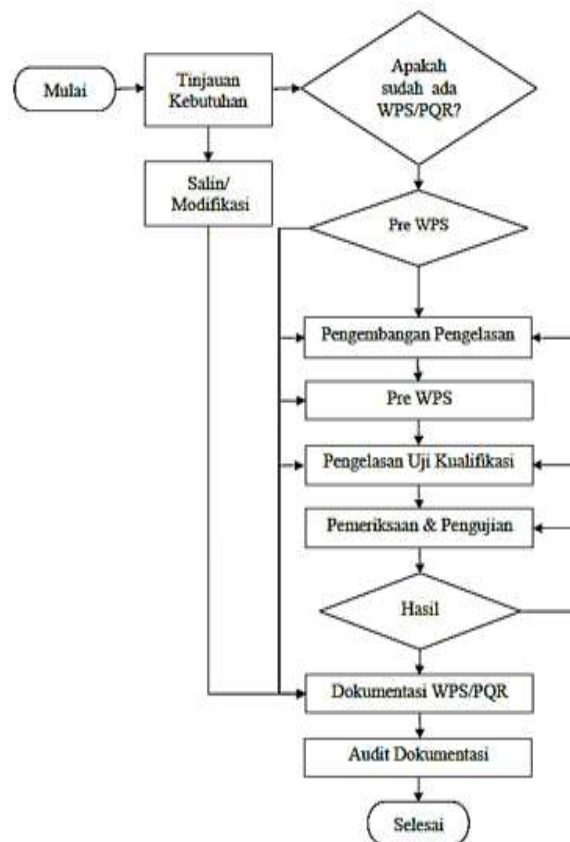
Penelitian ini difokuskan pada pengembangan dan kualifikasi spesifikasi prosedur pengelasan untuk aplikasi pengelasan tangki bahan bakar minyak menggunakan metode pengelasan busur listrik dengan pelindung elektroda terbungkus (SMAW), dengan menggunakan dua jenis elektroda yang berbeda dalam karakteristiknya. Rumusan masalah utama yang dikaji dalam penelitian ini meliputi: Bagaimana pengaruh penggunaan elektroda E7016 dan E7018 terhadap kualitas sambungan las SMAW pada material ASTM SA-36?; evaluasi apakah parameter pengelasan yang ditetapkan dalam spesifikasi prosedur mampu menghasilkan sambungan yang memenuhi standar kualifikasi ASME Section IX yang mengatur kualifikasi prosedur pengelasan setelah dilakukan pengujian tarik, pengujian tekuk, dan pengujian tanpa merusak; serta bagaimana hasil pengujian merusak dan pengujian tanpa merusak dapat dijadikan landasan untuk menyatakan bahwa prosedur pengelasan dengan menggunakan kedua jenis elektroda tersebut telah memenuhi kualifikasi dan layak diimplementasikan dalam aplikasi seperti tangki bahan bakar minyak.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menentukan parameter pengelasan pada tahap pra-spesifikasi yang memenuhi persyaratan pengujian tarik dan tekuk sehingga dapat ditetapkan sebagai spesifikasi prosedur pengelasan dan diterapkan dalam catatan kualifikasi prosedur; memastikan keseluruhan prosedur pengelasan pada tangki bahan bakar minyak telah melalui proses kualifikasi sesuai standar untuk menjamin keandalan sambungan bertekanan; serta menetapkan spesifikasi prosedur pengelasan sebagai dokumen wajib untuk menjamin aspek keselamatan, kekuatan, dan keandalan sambungan las pada struktur yang mengalami tekanan tinggi dan memiliki tingkat risiko yang tinggi. *Novelty* atau kebaruan penelitian ini terletak pada kualifikasi spesifik kombinasi elektroda E7016 (untuk *root* dan *hot pass*) dan E7018 (untuk

capping) pada material ASTM SA-36 untuk aplikasi tangki BBM, yang datanya penting bagi industri fabrikasi lokal. Batasan masalah dalam penelitian ini adalah proses kualifikasi mengacu pada standar ASME Section IX, material yang digunakan adalah ASTM SA-36 tebal 7,7 mm, dan posisi pengelasan terbatas pada posisi datar (1G). Manfaat penelitian ini adalah menyediakan pedoman teknis (WPS) yang teruji dan terqualifikasi bagi industri migas untuk fabrikasi dan perbaikan tangki BBM, sehingga dapat meningkatkan standar keselamatan dan efisiensi pengelasan.

2. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimen yang dilaksanakan di Bengkel Laboratorium Mekanik dengan tujuan mengembangkan dan mengqualifikasi prosedur pengelasan untuk aplikasi tangki bahan bakar menggunakan teknik pengelasan busur listrik dengan pelindung elektroda terbungkus (SMAW). Tahapan penelitian pada Gambar 1 disusun secara sistematis mengikuti alur penyusunan dan verifikasi dokumen Spesifikasi Prosedur Pengelasan dan Catatan Kualifikasi Prosedur sebagaimana diatur dalam standar ASME *Section IX*. Proses dimulai dengan peninjauan kebutuhan pengelasan, dilanjutkan dengan penyusunan dokumen spesifikasi awal sebagai acuan, pengembangan teknik pengelasan, pelaksanaan pengelasan uji kualifikasi, serta pemeriksaan dan pengujian menyeluruh terhadap hasil pengelasan. Apabila hasil peng-ujian memenuhi persyaratan teknis yang ditetapkan, proses dilanjutkan ke tahap dokumentasi dan audit sebagai langkah akhir validasi [7]. Sebaliknya, jika hasil tidak memenuhi kriteria, dilakukan evaluasi ulang dan penyesuaian parameter pada tahap pengembangan hingga diperoleh hasil yang sesuai standar mutu yang berlaku.



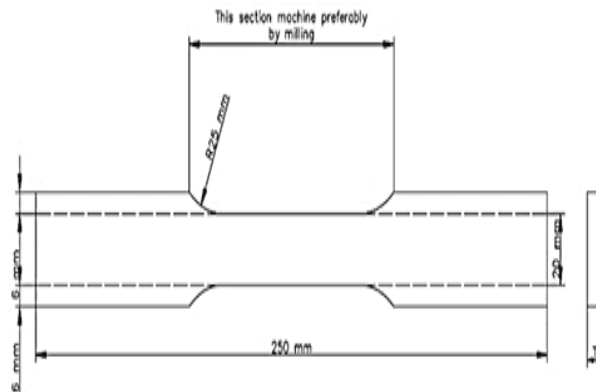
Gambar 1. Flowchart Pengujian Prosedur Pengelasan

Pada Gambar 2, menunjukkan perancangan spesimen uji mengacu pada standar ASME Section IX [Figure QW-463.1(a)] dengan menggunakan jenis sambungan tumpul pada pelat baja SA 36 dengan ketebalan 7,7 milimeter dalam posisi pengelasan datar (1G). Satu kupon uji dilas untuk kualifikasi prosedur ini, yang kemudian dipotong untuk menghasilkan 2 spesimen uji tarik (T1,T2) dan 4 spesimen uji tekuk (RB1,FB1, RB2,FB2) sesuai skema standar).

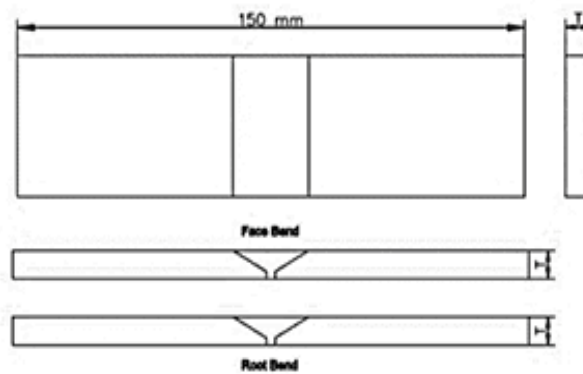


Gambar 2. Bagian Pemotongan Spesimen Uji Tekuk dan Uji Tarik

Spesimen uji dipotong dan dibentuk sesuai standar dengan dimensi tertentu untuk pengujian tarik dan pengujian tekuk. Pada Gambar 3 pengujian tarik menggunakan spesimen dengan penampang uji yang telah ditentukan, sementara pengujian tekuk pada Gambar 4 menggunakan spesimen berbentuk persegi panjang dengan ukuran yang disesuaikan dengan ketebalan material dasar.



Gambar 3. Spesiemen Uji Tarik



Gambar 4. Spesiemen Uji Tarik

Dua jenis elektroda digunakan dalam penelitian ini, yaitu elektroda E7018 dan E7016 dengan diameter 2,6 milimeter yang telah melalui proses pemanasan awal menggunakan oven pengering elektroda untuk memastikan kadar kelembaban yang rendah. Peralatan utama yang digunakan meliputi mesin las Miller SRH500 untuk proses pengelasan, mesin uji tarik dan mesin uji tekuk untuk pengujian mekanik, serta peralatan pengujian tanpa merusak berupa perangkat pengujian cairan tembus pandang dan detektor cacat ultrasonik. Peralatan pendukung lainnya mencakup alat ukur kalibrasi las, kamera termal genggam untuk pemantauan suhu, tang ampere untuk pengukuran arus, serta peralatan kerja pengelasan standar seperti gerinda, sikat kawat, palu las, dan tang las. Kemudian, proses pengelasan dilakukan dengan mengikuti parameter utama yang telah ditentukan. Parameter - parameter pengelasan utama seperti arus, tegangan, kecepatan, dan jenis elektroda yang digunakan tercantum secara lengkap pada Tabel 1 yang menunjukkan rincian parameter utama yang digunakan selama proses pengelasan, yang menjadi acuan dalam menjaga konsistensi dan mutu hasil las.

Tabel 1. Ringkasan Parameter Uji Kualifikasi Pengelasan

Parameter	Lapisan Akar (<i>Root Pass</i>)	Lapisan Panas (<i>Hot Pass</i>)	Lapisan Penutup (<i>Capping</i>)
Proses	SMAW	SMAW	SMAW
Elektroda (AWS)	E7016	E7016	E7018
Diameter (mm)	2,6	2,6	2,6
Polaritas Arus	DCEN	DCEN	DCEP
Arus (A)	60-70	70-80	80-90
Tegangan (V)	20-28	20-28	20-35
<i>Travel Speed</i> (mm/min)	35,71	31,25	25,00
<i>Heat Input</i> (kJ/mm)	2,06	3,11	5,85
Waktu jeda antar lapisan	-	40 menit	40 menit

Pelaksanaan penelitian mengikuti jadwal yang terstruktur selama enam bulan dengan pembagian tahapan kegiatan yang sistematis meliputi telaah kepustakaan, penyusunan laporan, penyiapan peralatan dan bahan, pembuatan dan pengelasan spesimen, pelaksanaan pengujian

mekanik, serta penyusunan dokumen catatan kualifikasi prosedur dan spesifikasi prosedur pengelasan. Metode pengumpulan data dilakukan melalui pengamatan langsung terhadap proses pengelasan dengan pencatatan parameter seperti arus pengelasan yang diukur menggunakan tang ampere, tegangan busur, kecepatan pengelasan yang dipantau menggunakan pencatat waktu, serta distribusi suhu yang dimonitor menggunakan kamera termal genggam. Jenis pengendalian yang diterapkan mencakup pengendalian parameter proses pengelasan yang harus konsisten sesuai dengan dokumen spesifikasi awal, pengendalian kualitas bahan dengan memastikan elektroda disimpan dalam kondisi kering dan material dasar bebas dari kontaminan, serta pengendalian prosedur pengujian dengan mengikuti metode standar untuk menjamin keabsahan hasil. Keseluruhan proses penelitian dilakukan dengan menerapkan protokol keselamatan kerja yang ketat menggunakan perlengkapan pelindung diri lengkap meliputi pelindung kepala las, kaca mata pelindung pengelasan, jaket kulit las, celemek kulit las, sarung tangan kulit las, celana las, dan sepatu pengaman untuk menjamin keselamatan peneliti selama pelaksanaan eksperimen [8].

3. PEMBAHASAN

A. Parameter dan Karakteristik Proses Pengelasan

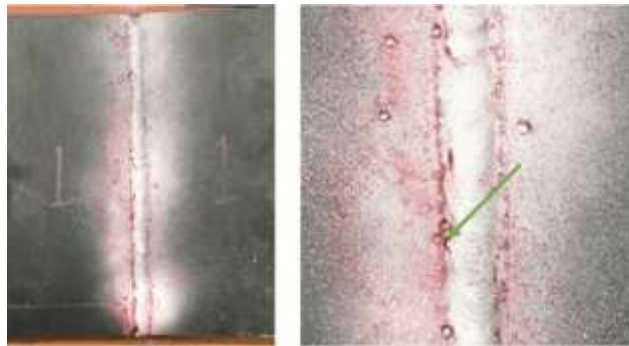
Pelaksanaan proses pengelasan dilakukan dengan menggunakan material pelat baja ASTM SA-36 berketebalan 7,7 milimeter yang disambung menggunakan konfigurasi kampuh berbentuk huruf V dengan sudut 60 derajat dan celah antar pelat berkisar 2 hingga 4 milimeter. Seperti yang terlihat pada Tabel 1, Stratifikasi pengelasan terdiri dari tiga lapisan dengan variasi jenis elektroda, dimana lapisan akar dan lapisan panas menggunakan elektroda E7016 berdiameter 2,6 milimeter, sedangkan lapisan penutup menggunakan elektroda E7018 dengan diameter identik. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa parameter pengelasan pada lapisan akar menggunakan arus listrik 60 hingga 70 ampere dengan tegangan 20 hingga 28 volt dan kecepatan perjalanan 35,71 milimeter per menit menghasilkan masukan panas 2,06 kilojoule per milimeter. Lapisan panas menggunakan arus 70 hingga 80 ampere dengan tegangan 20 hingga 28 volt dan kecepatan 31,25 milimeter per menit menghasilkan masukan panas 3,11 kilojoule per milimeter. Lapisan penutup menggunakan arus 80 hingga 90 ampere dengan tegangan 20 hingga 35 volt dan kecepatan 25 milimeter per menit menghasilkan masukan panas 5,85 kilojoule per milimeter. Pemantauan distribusi temperatur menggunakan kamera termal genggam menunjukkan nilai pada lapisan akar mencapai 410 derajat celsius, lapisan panas mencapai 695 derajat celsius, dan lapisan penutup mencapai 816 derajat celsius dengan waktu jeda antar lapisan ditetapkan 40 menit untuk memastikan pendinginan memadai dan mencegah perubahan struktur mikro yang tidak diinginkan [9].

Pengendalian masukan panas menjadi aspek krusial dalam menentukan kualitas akhir sambungan las karena berpengaruh langsung terhadap struktur mikro zona terpengaruh panas dan sifat mekanik material. Peningkatan nilai masukan panas secara bertahap dari lapisan akar hingga lapisan penutup dirancang untuk mengoptimalkan penetrasi las pada lapisan awal sekaligus memastikan pengisian kampuh yang sempurna pada lapisan akhir. Nilai masukan panas yang terkendali pada kisaran 2,06 hingga 5,85 kilojoule per milimeter memastikan bahwa laju pendinginan berada dalam rentang optimal untuk menghindari pembentukan struktur martensit yang rapuh atau pertumbuhan butir yang berlebihan pada zona terpengaruh panas. Penggunaan elektroda E7016 pada lapisan akar dan panas dipilih karena karakteristik busur yang stabil dan kemampuan penetrasi yang baik, sementara elektroda E7018 pada lapisan penutup memberikan deposit logam las dengan kekuatan tinggi dan ketangguhan yang superior. Waktu jeda antar lapisan selama 40 menit yang diterapkan secara konsisten memungkinkan terjadinya transformasi fase yang terkontrol dan mengurangi akumulasi tegangan sisa yang

dapat memicu distorsi atau retak pada sambungan [9]. Strategi pengelasan berlapis dengan pengendalian parameter yang ketat ini terbukti efektif dalam menghasilkan sambungan berkualitas tinggi yang memenuhi persyaratan aplikasi tangki bahan bakar [10].

B. Evaluasi Pengujian Tanpa Merusak

Pengujian tanpa merusak dilakukan melalui dua metode yaitu penetrasi cairan dan detektor cacat ultrasonik untuk mengevaluasi integritas permukaan dan internal sambungan las. Pada Gambar 5, terlihat pengujian penetrasi cairan dilaksanakan dengan pencahayaan menggunakan pengukur intensitas cahaya yang menghasilkan nilai 1.179 lux, melampaui persyaratan minimum 1.000 lux untuk memastikan visibilitas indikasi cacat secara optimal [11]. Hasil pemeriksaan menunjukkan adanya satu indikasi cacat berbentuk alur dangkal pada permukaan sambungan, namun berdasarkan evaluasi dimensi sesuai kriteria penerimaan dalam standar ASME kode bejana tekan dan tangki bagian delapan divisi pertama lampiran 8, cacat tersebut tidak melebihi batas toleransi panjang 1,5 milimeter sehingga dikategorikan sebagai kondisi dapat diterima.

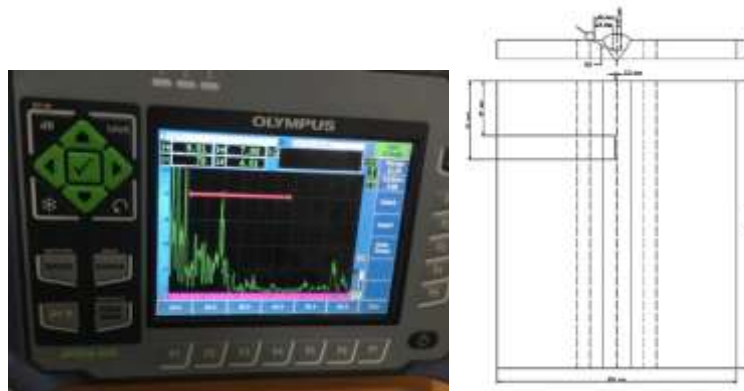


Gambar 5. Visualisasi Cacat *Penetrant Test*

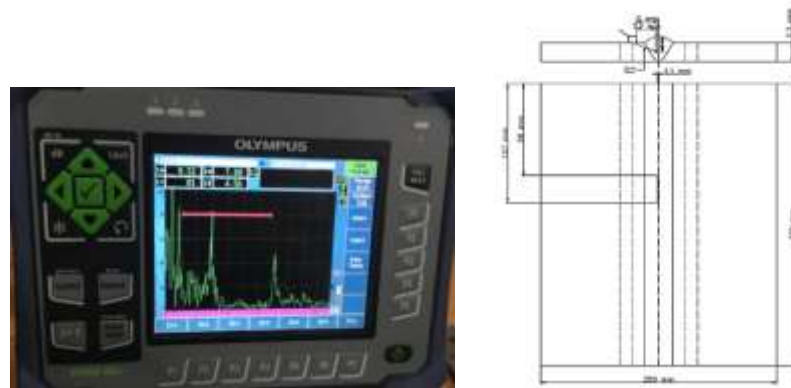
Pengujian lanjutan menggunakan detektor cacat ultrasonik dengan probe bersudut 60 derajat mengidentifikasi tiga indikasi diskontinuitas internal pada kedalaman bervariasi dengan panjang 25 milimeter pada kedalaman 4,51 milimeter terlihat pada Gambar 6, panjang 27 milimeter pada kedalaman 4,56 milimeter pada Gambar 7, dan panjang 8 milimeter pada kedalaman 3,53 milimeter pada Gambar 8 [12]. Evaluasi berdasarkan tinggi amplitudo dan perbandingan dengan level referensi kalibrasi menunjukkan ketiga indikasi tersebut berada di bawah batas maksimum yang ditetapkan dalam standar ASME bagian lima pasal empat, sehingga diklasifikasikan sebagai indikasi yang dapat ditoleransi dan tidak mempengaruhi integritas struktural sambungan secara signifikan sesuai dengan prinsip penerimaan cacat dalam pengelasan struktural [13].

Kombinasi kedua metode pengujian tanpa merusak memberikan gambaran menyeluruh mengenai kondisi sambungan las dari aspek permukaan maupun internal yang tidak dapat diamati secara visual langsung. Metode penetrasi cairan dengan prinsip kapilaritas cairan pewarna terbukti efektif dalam mendeteksi diskontinuitas permukaan yang berpotensi menjadi titik inisiasi retak, meskipun metode ini memiliki keterbatasan dalam mendeteksi cacat yang tertutup atau berada di bawah permukaan. Sementara itu, metode ultrasonik dengan menggunakan gelombang suara frekuensi tinggi mampu mengidentifikasi diskontinuitas internal seperti rongga gas, inklusi terak, atau kekurangan penyatuan yang tidak terdeteksi oleh pemeriksaan visual atau penetrasi cairan [11]. Indikasi diskontinuitas yang teridentifikasi pada kedalaman yang bervariasi mengindikasikan adanya ketidaksempurnaan minor dalam proses pengelasan, namun dimensi dan lokasi indikasi tersebut tidak berada pada area kritis yang dapat

mempengaruhi kapasitas beban sambungan. Hasil pengujian tanpa merusak ini memberikan kepercayaan awal bahwa sambungan las memiliki integritas yang memadai sebelum dilanjutkan ke tahap pengujian mekanik destruktif yang akan memberikan konfirmasi kuantitatif mengenai kekuatan dan keuletan sambungan dalam kondisi pembebanan aktual sesuai dengan persyaratan standar kualifikasi prosedur pengelasan [14].



Gambar 6. Grafik dan Sketsa Cacat 1 Pengujian Plat Spesimen



Gambar 7. Grafik dan Sketsa Cacat 2 Pengujian Plat Spesimen



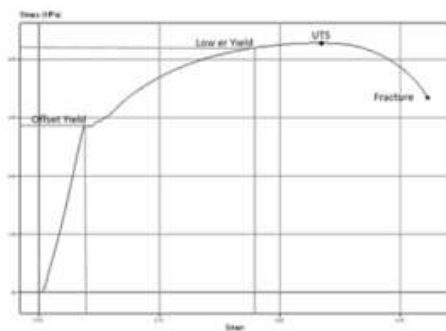
Gambar 8. Grafik dan Sketsa Cacat 3 Pengujian Plat Spesimen

C. Hasil Pengujian Mekanik Destruktif

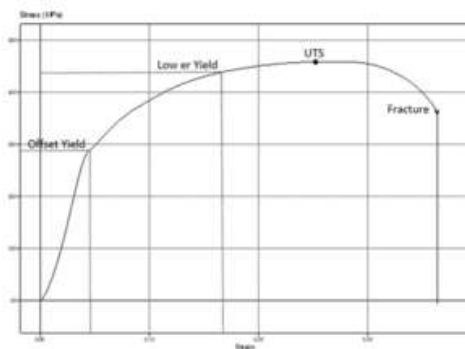
Pengujian mekanik destruktif melalui uji tarik menggunakan dua spesimen dengan penampang tereduksi menunjukkan hasil melampaui persyaratan kekuatan minimum material dasar. Pada Gambar 9, Spesimen pertama menghasilkan kekuatan tarik maksimum 66.056,7 newton atau setara 428,9 megapascal atau 62,2 kilopound per inci persegi. Sedangkan pada Gambar

10, spesimen kedua menghasilkan kekuatan tarik maksimum 70.861,8 newton atau setara 460,1 megapascal atau 66,7 kilopound per inci persegi. Kedua nilai tersebut melebihi kekuatan tarik minimum material ASTM SA-36 yang ditetapkan 400 megapascal atau 58 kilopound per inci persegi berdasarkan tabel pengelompokan nomor P logam dasar dalam standar ASME *Section IX*. Lokasi patahan pada kedua spesimen terjadi di area logam induk bukan pada zona sambungan las, mengindikasikan sambungan las memiliki kekuatan superior dibandingkan material dasar. Keberhasilan sambungan las dalam melampaui kekuatan tarik material dasar dengan lokasi patahan yang terjadi pada logam induk merupakan indikator kualitas optimal dari prosedur pengelasan yang telah dikembangkan.

Fenomena ini mengkonfirmasi bahwa komposisi kimia logam las yang dihasilkan dari elektroda E7016 dan E7018 memiliki keseimbangan unsur paduan yang tepat untuk menghasilkan deposit logam dengan kekuatan tinggi dan ketangguhan yang baik [12]. Perpanjangan dimensi spesimen pada zona patahan yang mencapai 30 milimeter pada spesimen pertama dan 27 milimeter pada spesimen kedua menunjukkan adanya deformasi plastis yang signifikan sebelum terjadi kegagalan, dapat dilihat pada Tabel 2 mengindikasikan bahwa material memiliki daktilitas yang memadai untuk menyerap energi deformasi tanpa mengalami patah getas [15].



Gambar 9. Kurva dan Hasil *Tensile Stress* Pengujian Spesimen T1



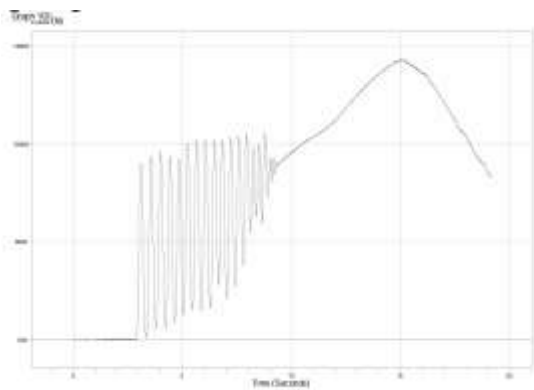
Gambar 10. Kurva dan Hasil *Tensile Stress* Pengujian Spesimen T2

Tabel 2. Evaluasi Hasil *Tensile Test*

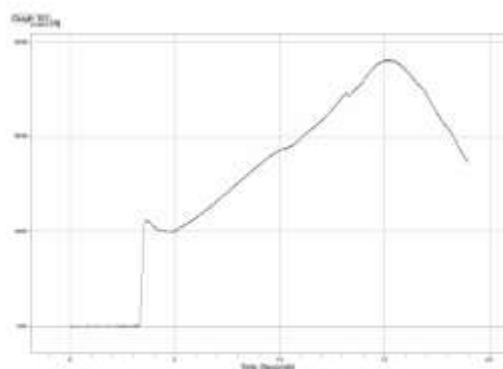
Jenis Spesimen	Letak Patahan	Panjang (mm)		<i>Tensile Strength</i> (MPa)		Diterima/ Tidak
		Awal	Akhir	ASME IX	Hasil Uji	

T1	<i>base metal</i>	70	100	≥ 400	428,9	Diterima
T2	<i>base metal</i>	70	97	≥ 400	460,1	Diterima

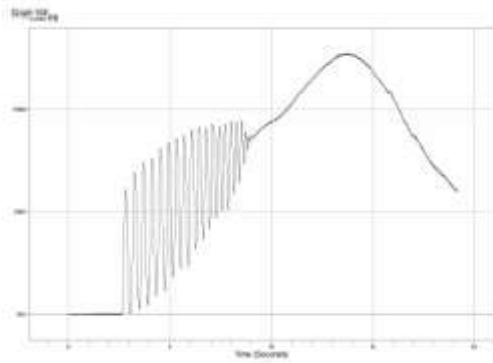
Pengujian tekuk dilakukan pada empat spesimen meliputi dua spesimen *Root Bend* dan dua spesimen *Face Bend* [2]. Spesimen *Root Bend* pertama pada Gambar 11 dan spesimen *Face Bend* pertama pada Gambar 12 tidak menunjukkan cacat visual, spesimen *Root Bend* kedua pada Gambar 13 menunjukkan indikasi penembusan tidak sempurna dengan lebar 2 milimeter masih di bawah batas maksimum 3 milimeter sesuai kriteria penerimaan standar ASME Section IX pasal QW-163, sedangkan spesimen *Face Bend* kedua pada Gambar 14 tidak menunjukkan cacat [9]. Keseluruhan hasil memvalidasi bahwa prosedur pengelasan mampu menghasilkan sambungan dengan karakteristik kekuatan tarik superior dan keuletan memadai untuk aplikasi tangki bahan bakar.



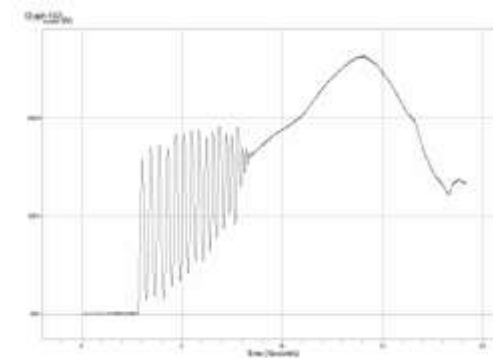
Gambar 12. Kurva dan Hasil Spesimen *Root Bend* 1



Gambar 13. Kurva dan Hasil Spesimen *Face Bend* 1



Gambar 14. Kurva dan Hasil Spesimen *Root Bend* 11



Gambar 15. Kurva dan Hasil Spesimen *Face Bend* 11

Tabel 3. Evaluasi Hasil *Bending Test*

Jenis	Jenis Spesimen	Hasil Uji	Ukuran Cacat (mm)	Batas Maks. (ASME IX)	Diterima/ Tidak
RB1	<i>Root Bend</i>	Tidak ada cacat	0	$\geq 3\text{mm}$	Diterima
FB1	<i>Face Bend</i>	Tidak ada cacat	0	$\geq 3\text{mm}$	Diterima
RB2	<i>Root Bend</i>	Ada cacat <i>incomplete penetration</i>	2	$\geq 3\text{mm}$	Diterima
FB2	<i>Face Bend</i>	Tidak ada cacat	0	$\geq 3\text{mm}$	Diterima

Berdasarkan Tabel 3, Hasil pengujian tekuk yang menunjukkan ketiadaan retak atau cacat permukaan yang melebihi batas toleransi pada seluruh spesimen membuktikan bahwa zona terpengaruh panas dan logam las memiliki keuletan yang cukup untuk menahan deformasi lentur ekstrem tanpa mengalami kegagalan [15]. Indikasi penembusan tidak sempurna dengan lebar 2 milimeter yang terdeteksi pada spesimen tekuk akar kedua merupakan diskontinuitas minor yang umum terjadi pada pengelasan manual dan masih dalam batas penerimaan standar karena tidak mempengaruhi kapasitas beban sambungan secara keseluruhan serta tidak berpotensi menjadi konsentrasi tegangan yang membahayakan integritas struktural.

D. Analisis Perbandingan

Hasil pengujian tarik dalam penelitian ini (UTS 428,9 MPa dan 460,1 MPa) menunjukkan konsistensi dan sejalan dengan temuan literatur sebelumnya. Studi komparatif internasional [17] juga mengkonfirmasi bahwa kualifikasi WPS yang menggunakan kombinasi elektroda *low-hydrogen* seperti E7016 untuk akar dan E7018 untuk pengisian adalah praktik yang umum

untuk mencapai sifat mekanik yang optimal pada baja struktural karbon rendah.

Sebagai perbandingan, penelitian oleh Rahmatika, dkk. yang juga mengkualifikasi prosedur las SMAW pada baja SA-36 mencatat kekuatan tarik rata-rata 439,75 MPa [9]. Penelitian oleh Mawahib, dkk juga menemukan bahwa parameter las, khususnya diameter elektroda yang terkait dengan masukan panas, berpengaruh signifikan terhadap kekuatan tarik dan dampak sambungan [15].

Ketiga penelitian tersebut [9], [15], [17], bersama dengan temuan penelitian ini, mengkonfirmasi bahwa kombinasi elektroda E7016 (untuk penetrasi) dan E7018 (untuk kekuatan) mampu menghasilkan sambungan las yang kekuatannya melampaui material induk ASTM SA-36. Berbeda dengan penelitian Faizal & Umam (2018) [6] yang berfokus pada dampak *metode pendinginan* terhadap kekuatan (mencapai 373,06 MPa), Hal ini didukung oleh temuan Fridayan, dkk. (2017) [16], yang juga meneliti baja A36 dan menemukan bahwa variasi *heat input* (mulai dari 25 kJ/mm hingga 57 kJ/mm) memiliki pengaruh langsung dan signifikan terhadap nilai kekuatan tarik dan kekerasan akhir sambungan. Ini menegaskan bahwa pengendalian *heat input*, seperti yang dilakukan dalam penelitian ini (2,06 kJ/mm hingga 5,85 kJ/mm), adalah faktor penentu untuk menjamin kualitas mekanik las. Hasil ini menegaskan bahwa parameter yang dikembangkan dalam WPS ini sudah optimal dan dapat diandalkan.

4. SIMPULAN

Prosedur pengelasan yang dikembangkan menggunakan proses SMAW dengan kombinasi elektroda E7016 (*root/hot pass*) dan E7018 (*capping*) pada material ASTM SA-36 (7,7mm) posisi 1G telah berhasil memenuhi kualifikasi standar ASME *Section IX*. Hasil pengujian mekanik destruktif menunjukkan kualifikasi yang valid, uji tarik menghasilkan nilai UTS sebesar 428,9 megapascal dan 460,1 megapascal melampaui syarat minimum material yaitu 400 megapascal, dengan lokasi patahan terjadi di *base metal*.

Seluruh spesimen Uji dinyatakan lulus, dengan temuan cacat terbesar pada RB2 sebesar 2 mm masih berada di bawah batas toleransi maksimum yang diizinkan standar (3 mm). Parameter pengelasan yang ditetapkan, seperti *Heat Input* dari 2,06 – 5,85 kJ/mm, polaritas DCEN/DCEP, dan Waktu jeda antar lapisan selama 40 menit terbukti efektif menghasilkan sambungan las yang kuat dan ulet sehingga prosedur tersebut memenuhi syarat untuk didokumentasikan sebagai spesifikasi prosedur pengelasan yang sah dalam catatan kualifikasi prosedur dan dapat diimplementasikan untuk pekerjaan pembangunan maupun pemeliharaan tangki bahan bakar selama masih dalam lingkup parameter yang telah diuji.

Keseluruhan prosedur pengelasan telah melalui proses kualifikasi sesuai standar ASME *Section IX* yang memberikan jaminan terhadap keandalan sambungan bertekanan, di mana pengujian dan dokumentasi yang dilaksanakan membuktikan bahwa prosedur yang digunakan mampu memperkecil risiko kegagalan struktural yang berpotensi membahayakan keselamatan operasional. Spesifikasi prosedur pengelasan yang telah terkualifikasi ini bersifat wajib digunakan dalam proyek pengelasan tangki bahan bakar mengingat pentingnya aspek keselamatan, kekuatan, dan keandalan sambungan pada struktur yang menyimpan bahan berbahaya, namun perlu dicatat bahwa hasil pengujian terbatas pada posisi pengelasan datar dan material ASTM SA-36 sehingga untuk penerapan pada posisi pengelasan berbeda atau material lain diperlukan studi lanjutan dan proses kualifikasi tambahan guna memastikan kesesuaian dengan standar dan kondisi aktual di lapangan.

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] J. W. Creswell and C. N. Poth, *Qualitative Inquiry and Research Design: Choosing Among Five Approaches*. SAGE Publications, 2017. [Online]. Available: <https://books.google.co.id/books?id=gX1ZDwAAQBAJ>
- [8] J. W. Creswell and C. N. Poth, *Qualitative inquiry and research design: Choosing among five approaches*. Sage publications, 2022.
- [9] 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.
- [10] 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>
- [11] S. S. Budi and D. Karmiadji, "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] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Fridayan, R. N., Pratikno, H., & Ikhwan, H. (2017). "Analisis Pengaruh Variasi Heat Input dan Bentuk Kampuh pada Pengelasan SMAW Weld Joint Pelat Baja A 36 Terhadap Sifat Mekanik." *JURNAL TEKNIK ITS*, 6(2), G219-G222
- [17] Syukran, A., Azwinur & Muhklis. (2022). "Hardness Analysis of Weld Metal Electrode Low Hydrogen Potassium E7016 and E7018." *Journal of Welding Technology*, 4(2), 70-75. doi: 10.30811/jowt.v4i2.3492
- [18] Samir, A. A., Ahmed, H. K., Ismail, I. M., Diana A. A. N. K. & Hasan S. M. (2024). "Investigation of Welding Heat Input Influences on the Characteristics of Welded Joint of Storage Tank Wall Using Multiple Passes." *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, 57(4), 729-736. doi: 10.18280/jesa.570404