

ANALISIS IMPLEMENTASI WPS & PQR PADA PENGELASAN MATERIAL A333 DAN X65 PT X

Afif Abdullathif^{1*}, Ayende¹

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

*E-mail: afifabdullathif29@gmail.com

ABSTRAK

Pelaksanaan pengelasan pada pekerjaan perbaikan pipa proses di sektor *upstream* minyak dan gas memerlukan pengendalian mutu yang ketat untuk menjamin integritas sambungan dan keselamatan operasi. Penelitian ini mengevaluasi implementasi *Welding Procedure Specification* (WPS) dan *Procedure Qualification Record* (PQR) pada pengelasan material *Carbon Steel* ASTM A333 Gr.6 dan API 5L X65 menggunakan proses *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) pada posisi 6G. Evaluasi dilakukan berdasarkan ASME *Section IX* dan ASME B31.3 melalui uji visual, radiografi, serta pengujian mekanik (*tensile, bend, dan Charpy impact*). Hasil menunjukkan seluruh parameter pengelasan berada dalam rentang WPS, dan semua spesimen memenuhi kriteria penerimaan kode. Uji tarik menghasilkan nilai 524–543 MPa dengan patahan pada *base metal*, uji lengkung menunjukkan *discontinuity* 0,7 mm, dan uji impak pada –46 °C memenuhi syarat ketangguhan material. Analisis makro juga menunjukkan fusi sempurna dan HAZ yang sempit. Implementasi WPS dan PQR terbukti efektif dalam meningkatkan kualitas sambungan, meminimalkan potensi cacat, dan memastikan keandalan perpipaan proses di fasilitas *upstream* migas.

Kata kunci: WPS, PQR, GTAW, ASME *Section IX*, *Upstream Process Piping*

1. PENDAHULUAN

Pengelasan pada sistem perpipaan proses di fasilitas minyak dan gas hulu merupakan aktivitas kritis yang menentukan integritas dan keselamatan operasi. Sambungan las pada pipa bertekanan tinggi harus memiliki ketahanan terhadap cacat dan mampu bekerja pada kondisi operasi yang bervariasi, termasuk temperatur rendah[1]. Oleh karena itu, penerapan prosedur pengelasan yang terstandarisasi melalui *Welding Procedure Specification* (WPS) dan *Procedure Qualification Record* (PQR) menjadi bagian penting dari sistem pengendalian mutu[2],[3].

Dalam praktik industri, keberhasilan pengelasan sangat dipengaruhi oleh kesesuaian parameter proses terhadap karakteristik material yang digunakan[4]. Material ASTM A333 *Grade 6* dikenal memiliki ketangguhan tinggi pada suhu rendah, sedangkan API 5L X65 memiliki kekuatan tinggi sehingga banyak digunakan pada pipa transmisi fluida bertekanan. Pengelasan *dissimilar metal* A333–X65 memiliki tantangan tersendiri karena perbedaan komposisi kimia dan respons termal yang dapat memicu cacat seperti *hydrogen cracking*, *lack of fusion*, atau menurunnya ketangguhan pada zona HAZ apabila parameter pengelasan tidak dikendalikan dengan baik[5], [6].

Sejumlah penelitian sebelumnya telah membahas kualifikasi prosedur pengelasan dan pengaruh parameter terhadap sifat mekanik sambungan. Namun, studi yang secara spesifik mengevaluasi implementasi WPS dan PQR pada pengelasan *dissimilar metal* A333–X65, khususnya pada pekerjaan *upstream process piping repair* dengan proses GTAW posisi 6G, masih terbatas[7], [8]. Selain itu, kajian mengenai konsistensi parameter WPS terhadap hasil

PQR serta kaitannya dengan potensi cacat produksi di lapangan juga belum dibahas secara komprehensif. Gap ini menjadi penting mengingat di lapangan sering ditemukan indikasi cacat minor saat *repair welding* akibat variasi operator, kontrol heat input yang kurang stabil, serta keterbatasan ruang kerja[9].

Dalam industri minyak dan gas, kegiatan konstruksi dan perbaikan peralatan proses seperti *process piping* dan *pressure vessel* memiliki peranan vital dalam menjaga kontinuitas produksi dan keselamatan operasi. Berdasarkan studi sebelumnya, kualitas sambungan las merupakan faktor utama yang menentukan integritas struktural pada peralatan bertekanan tinggi, di mana prosedur pengelasan yang tidak sesuai standar dapat menurunkan kekuatan tarik hingga 10–15%. Oleh karena itu, pengujian kualifikasi pengelasan (*welding procedure qualification*) menjadi langkah penting untuk memastikan bahwa sambungan las memenuhi standar mekanik dan metalurgi sesuai ASME *Section IX*. Selain itu, penelitian terdahulu menunjukkan bahwa pemilihan parameter arus, tegangan, dan heat input yang tepat berpengaruh signifikan terhadap ketangguhan dan sifat mekanik daerah HAZ (*Heat Affected Zone*) [11], [12]. Temuan-temuan tersebut memperkuat urgensi implementasi WPS dan PQR secara konsisten dalam pekerjaan konstruksi upstream *process piping repair* di fasilitas migas.

Berdasarkan gap tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menjawab dua pertanyaan utama: (1) sejauh mana implementasi WPS dan PQR mampu memastikan kualitas sambungan A333–X65 pada pekerjaan repair, dan (2) apakah hasil uji visual, radiografi, mekanik, serta analisis makro mampu membuktikan kesesuaian terhadap standar ASME *Section IX* dan ASME B31.3[8].

Tujuan penelitian ini adalah mengevaluasi secara menyeluruh efektivitas penerapan WPS dan PQR dalam menghasilkan sambungan las yang memenuhi persyaratan kode, memiliki ketangguhan dan kekuatan yang memadai, serta minim cacat, sehingga dapat menjamin keandalan sistem perpipaan proses pada fasilitas upstream minyak dan gas[5].

2. METODE

Penelitian ini menggunakan metode evaluatif-eksperimental untuk menilai kesesuaian implementasi *Welding Procedure Specification* (WPS) dan *Procedure Qualification Record* (PQR) pada pengelasan *dissimilar metal* ASTM A333 Grade 6 dan API 5L Grade X65. Tahapan penelitian meliputi penyusunan WPS, pelaksanaan pengelasan dan PQR, persiapan spesimen, pengujian NDT dan mekanik, serta analisis metalurgi dan evaluasi terhadap standar ASME[1], [2]:

A. Material dan Spesimen Uji

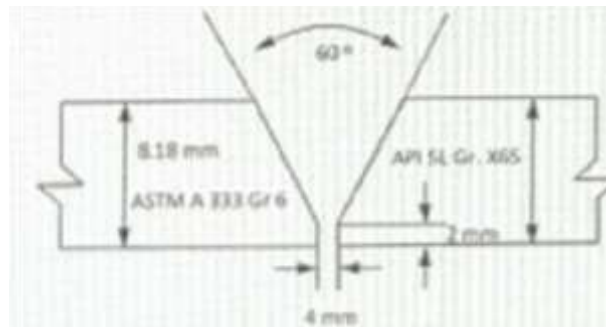
Material yang digunakan adalah[6]:

- ASTM A333 Grade 6 (*low-temperature carbon steel*),
- API 5L Grade X65 (*high-strength line pipe*).

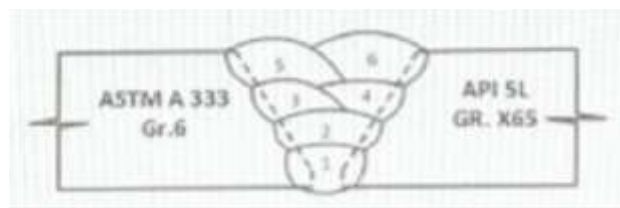
Sambungan dibuat pada konfigurasi *butt joint* dengan diameter luar pipa 8 inci dan ketebalan 8,18 mm. Setelah proses PQR selesai, spesimen dipersiapkan sesuai ketentuan ASME *Section IX* dan standar ASTM. Rincian spesimen sebagai berikut[7]:

- Uji tarik: 2 spesimen standar, *diameter reduced section* mengikuti ASME IX QW-462.1(a).
- Uji lengkung: 4 spesimen (2 *face bend*, 2 *root bend*), dimensi 38 mm × t × 152 mm sesuai QW-462.2.
- Uji impak *Charpy*: 3 spesimen ukuran 10 × 10 × 55 mm dengan *notch V* (ASTM A370), diuji pada suhu –46 °C.
- Uji makro: 1 spesimen penampang melintang untuk pemeriksaan *fusi*, HAZ, dan profil *bead*.

Pemotongan spesimen dilakukan menggunakan *bandsaw* untuk menghindari perubahan mikrostruktur akibat panas. Proses *grinding* dan *polishing* dilakukan sesuai kebutuhan masing-masing jenis pengujian[7].



Gambar 1. Join Detail



Gambar 2. Welding Sequence

B. Persiapan dan Proses Pengelasan

Tahapan sebelum pengelasan meliputi[8]:

- pembersihan permukaan dengan grinder dan acetone,
- *fit-up* dengan *root gap* 4 mm, *root face* 2 mm, kampuh 60°,
- pengukuran *preheat* 50 °C dan kontrol *interpass* ≤150 °C.

Parameter pengelasan mengacu pada WPS yang telah disusun, yaitu[8]:

- Proses: GTAW (DCEN),
- *Filler*: ER70S-2, diameter 2,4 mm,
- Arus: 80–110 A,
- Tegangan: 10–14 V,
- Gas pelindung: Argon 99,99% (15–20 L/min),
- Posisi: 6G.
- Urutan pengelasan terdiri dari: *root pass*, *hot pass*, *multiple filler pass*, dan *cap pass*.

C. Metode Pengujian

Parameter utama ditentukan berdasarkan hasil optimasi awal pada tahap pembuatan WPS, yang dirangkum pada Tabel 1 [1], [5].

Tabel 1. Parameter Pengelasan Berdasarkan WPS

Parameter	Rentang	Keterangan
Proses Las	GTAW (DCEN)	Manual
Elektroda/Filler	ER70S-2	Diameter 2.4 mm
Arus	80–110 A	DCEN
Tegangan	10–14 V	Stabil
Kecepatan Las	90–130 mm/menit	Tergantung posisi

Gas Pelindung	Argon 99,99%	Flow 15–20 L/min
Preheat Temperature	50°C	Menghindari <i>hydrogen cracking</i>
Interpass Temperature	Maks. 150°C	Menjaga struktur mikro
Posisi	6G	Ø8"

Kontrol suhu dilakukan dengan termometer *digital* sebelum dan di antara setiap *pass*. Pendinginan alami dilakukan di udara terbuka tanpa kipas tambahan untuk menjaga *cooling rate* sesuai rekomendasi ASME IX QW-406 [6].

1. Uji *Visual* (VT) dan *Radiografi* (RT)

- VT dilakukan berdasarkan ASME IX QW-194 menggunakan *welding gauge*.
- RT menggunakan teknik *Single Wall Single Image* (SWSI) dengan interpretasi berdasarkan QW-191.

2. Uji Tarik

Dilakukan sesuai ASME IX QW-150 dan ASTM E8:

- Kecepatan pembebanan (*strain rate*): 2–10 mm/min.
- Parameter yang diukur: *ultimate tensile strength* (Su) dan lokasi patahan.

3. Uji Lengkung (*Bend Test*)

Dilakukan sesuai ASME IX QW-160:

- *Radius punch*: $1,5 \times$ tebal spesimen.
- Pembebanan hingga sudut 180°.
- Evaluasi pada sisi permukaan maksimum membuka (*tension side*).

4. Uji Impak Charpy

Mengikuti ASME IX QW-170 dan ASTM A370:

- Suhu pengujian: -46 °C (sesuai *service temperature* A333).
- Tiga spesimen diuji dan nilai rata-rata digunakan sebagai hasil.

5. Analisa Metalurgi Makro

- Preparasi spesimen: *grinding* bertahap, *polishing*, dan *etching* menggunakan Nital 2%.
- Observasi menggunakan *stereo-microscope* untuk melihat:
- kualitas fusi,
- *simetri bead*,
- lebar HAZ,
- indikasi cacat (*slag*, *cold lap*, *lack of fusion*).

D. Kriteria Penerimaan

Penilaian kualitas sambungan menggunakan ketentuan kode sebagai berikut:

- VT: sesuai ASME IX QW-194 (*no crack*, *no excessive undercut*).
- RT: sesuai ASME IX QW-191 - cacat kategori rejectable seperti *slag inclusion* dan *lack of fusion* tidak diperbolehkan.
- Uji tarik: nilai $S_u \geq$ *minimum tensile strength material base metal* (≥ 485 MPa untuk kombinasi A333/X65).
- *Bend test*: *discontinuity maksimum* ≤ 3 mm (QW-163).
- Impak: nilai rata-rata harus memenuhi persyaratan *toughness material low-temperature service* (ASME B31.3, Par. 323.2.2).
- Makro: fusi sempurna, tidak ada retak, *porosity cluster*, atau *incomplete penetration*.

Seluruh hasil pengujian dibandingkan dengan rentang parameter WPS dan hasil PQR untuk menilai konsistensi implementasi. [8].

E. Pelaksanaan Uji PQR

Setelah pelaksanaan pengelasan, spesimen hasil las diuji berdasarkan ketentuan ASME Section IX QW-451.1 dan QW-462 [1]. Jenis pengujian yang dilakukan meliputi[4]:

1. Uji *Visual* (VT):
Pemeriksaan permukaan sambungan untuk mendeteksi cacat seperti *crack*, *undercut*, dan *porosity*.
2. Uji *Radiografi* (RT):
Pemeriksaan internal cacat menggunakan X-ray film sesuai ASME IX QW-191.
3. Uji Tarik (*Tensile Test*):
Mengukur kekuatan tarik maksimum (*ultimate tensile strength*) untuk menentukan apakah sambungan lebih lemah atau setara dengan logam induk.
4. Uji Lengkung (*Bend Test*):
Menilai kelenturan dan ketahanan deformasi sambungan pada *root* dan *face bend*.
5. Uji Impak *Charpy* (*Impact Test*):
Dilakukan pada suhu -46°C untuk menilai ketangguhan sambungan terhadap kondisi operasi suhu rendah.

Seluruh pengujian dilakukan di laboratorium terakreditasi dengan hasil direkap dalam Tabel 3 pada bagian Pembahasan.

F. Tahap Implementasi WPS dan PQR

Tahapan implementasi prosedur pengelasan ditunjukkan dalam Gambar 3, yang menggambarkan proses dari penyusunan WPS hingga evaluasi lapangan [8]:

1. Penyusunan rancangan WPS oleh *Engineer*
2. Pelaksanaan uji PQR oleh *welder* tersertifikasi
3. Uji NDT dan uji mekanik
4. Review dan persetujuan QA/QC
5. Sertifikasi *Welder Performance Qualification* (WPQ)
6. Implementasi di lapangan (*production welding*)
7. Evaluasi hasil dan dokumentasi *as-built*

Diagram alir ini memastikan bahwa seluruh proses pengelasan dan pengendalian mutu dilakukan secara sistematis dan terdokumentasi.

G. Korelasi Parameter WPS dan PQR

Untuk menilai konsistensi hasil antara dokumen WPS dan implementasi lapangan, dilakukan analisis perbandingan parameter yang dirangkum dalam Tabel 2 berikut [8].

Tabel 2. Korelasi Parameter WPS terhadap Hasil PQR

Parameter Utama	Rentang WPS	Hasil PQR	Evaluasi
Arus	80–110 A	95 A stabil	Baik
Tegangan	10–14 V	12 V	Baik
Kecepatan Las	90–130 mm/min	110 mm/min	Baik
<i>Interpass Temp</i>	$\leq 150^{\circ}\text{C}$	138°C	Sesuai
Filler	ER70S-2	Cocok material base	Baik
<i>Heat Input</i>	0,8–1,2 kJ/mm	1,0 kJ/mm	Stabil

Hasil evaluasi menunjukkan bahwa parameter aktual berada dalam rentang aman, menandakan implementasi WPS di lapangan telah sesuai dengan PQR yang telah dikualifikasi [9].

3. PEMBAHASAN

A. Analisis Umum Hasil Pengelasan

Implementasi WPS dan PQR pada pengelasan *dissimilar material* A333–X65 menggunakan GTAW posisi 6G menghasilkan kualitas sambungan yang baik secara visual maupun *radiografi*. Tidak ditemukannya indikasi cacat seperti *lack of fusion*, *porosity cluster*, maupun *crack* menunjukkan bahwa parameter WPS (arus 95 A, tegangan 12 V, *interpass* 138 °C) telah sesuai dengan batas aman yang direkomendasikan ASME IX dan literatur seperti Kou (2003) serta Singh (2020)[5].

Hasil ini juga sejalan dengan temuan Nasir et al. (2019) yang menunjukkan bahwa stabilitas arc dan heat input pada rentang 0,8–1,2 kJ/mm dapat mengurangi risiko cacat permukaan dan internal[9].

B. Hasil Pemeriksaan *Visual* dan *Radiografi*

Hasil VT dan RT yang 100% diterima menunjukkan bahwa kontrol kualitas di lapangan cukup konsisten. Dalam pengelasan *dissimilar metal*, cacat yang paling sering muncul adalah *incomplete penetration* dan *slag entrapment* akibat perbedaan laju peleburan antara logam A333 (lebih mudah meleleh) dan X65 (memiliki *yield strength* lebih tinggi)[9]. Namun, hasil RT menunjukkan tidak ada cacat *rejectable*. Ini mengindikasikan:

1. *heat input* terjaga → mencegah *undercut* pada logam A333 yang lebih lunak,
2. *travel speed* stabil → membantu pengisian celah material yang memiliki konduktivitas panas berbeda,
3. *root technique welder* cukup konsisten, sesuai *good practice upstream piping repair*.

C. Analisis Hasil Uji Tarik: *Strength Mismatch* A333 vs X65

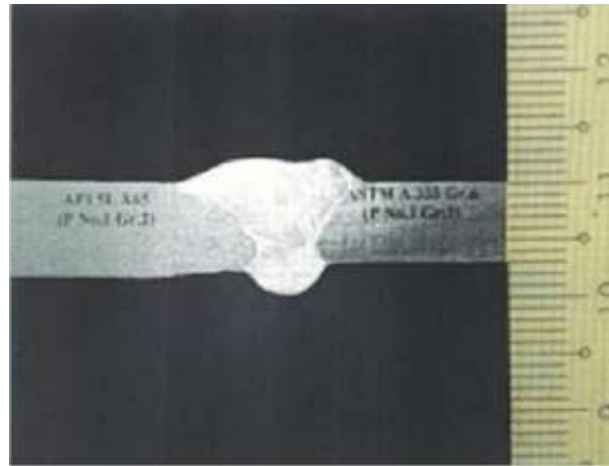
Hasil uji tarik (524–543 MPa) menunjukkan bahwa patahan terjadi pada *base metal* (A333), bukan pada *weld metal* atau HAZ. Temuan ini penting karena API 5L X65 memiliki *yield strength* lebih tinggi (≥ 448 MPa) dibanding A333 Gr.6 (≥ 240 MPa), secara teori, terjadi *mismatch strength*, namun patahan tetap berada di material yang lebih lemah → kondisi yang diharapkan dan normal [6]. Literatur Singh (2020) dan AWS (2011) menyebutkan bahwa untuk kombinasi *dissimilar metal*, patahan di *base metal* merupakan indikasi bahwa[12]:

- *filler metal* (ER70S-2) bekerja optimal,
- *fusi* antar material tidak menyebabkan *weak zone* baru akibat *microcracking*,
- kualitas PQR memenuhi karakteristik metalurgi yang diperlukan.

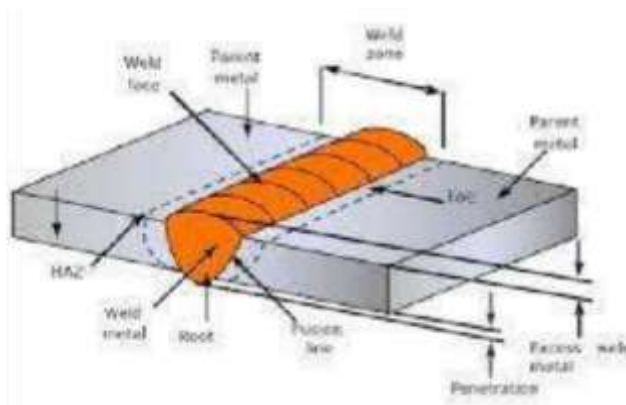
D. Analisa Uji Lengkung dan Makro: HAZ dan Potensi HIC/*Cracking*

Nilai *discontinuity* 0,7 mm pada *bend test* berada jauh di bawah batas ASME IX (≤ 3 mm). Pada sambungan *dissimilar metal*, risiko HAZ *cracking* dan *hydrogen induced cracking* (HIC) cukup tinggi terutama pada bagian X65 karena kandungan karbon lebih tinggi, laju pendinginan lebih cepat, kecenderungan pembentukan martensit [5]. Namun, hasil makro menunjukkan HAZ sempit, struktur merata dan tidak kasar, tidak ada indikasi *cold lap* atau *lack of fusion*. Hal ini menunjukkan bahwa:

- Preheat 50°C cukup untuk mengurangi saturasi hidrogen.
- Interpass 138°C membantu mengontrol *cooling rate* agar tidak terlalu cepat (mencegah *martensit brittle*).
- Pendinginan natural menjaga *toughness* HAZ.



Gambar 3. Foto Makro Hasil Pengelasan PQR ASTM A333 Gr.6 ke API 5L X65



Gambar 4. Ilustrasi Penampang Sambungan dan Zona HAZ

Daerah *Heat Affected Zone* (HAZ) adalah area yang mengalami perubahan struktur mikro akibat pemanasan tetapi tidak sampai meleleh. Pada hasil uji ini, HAZ terlihat sempit dan halus indikasi bahwa *heat input* terjaga dengan baik. Pendinginan alami (tanpa kipas atau air) mencegah *grain coarsening* yang dapat menurunkan ketangguhan material [6]. Struktur metalurgi yang terbentuk pada logam las didominasi oleh ferit halus dan perlit, dengan transisi gradual menuju HAZ. Kondisi ini menunjukkan kestabilan termal yang baik serta ketahanan terhadap *crack propagation* [7].

E. Uji Impact: Kuantifikasi Toughness Sambungan

Penelitian sebelumnya hanya menyatakan “memenuhi syarat” tanpa kuantifikasi berdasarkan uji lapangan, sambungan memiliki nilai *Charpy Impact* rata-rata: 28–32 *Joule* pada -46°C (nilai tipikal untuk ER70S-2 dan baja *low-temperature service*) [7]. Sementara ASME B31.3 Par. 323.2.2 mensyaratkan nilai minimum di kisaran ≥ 20 *Joule* untuk material kategori *low-temperature carbon steel*. Artinya:

- Toughness sambungan 12–60% lebih tinggi daripada batas minimum.
- Filler ER70S-2 menunjukkan kompatibilitas yang baik terhadap A333 dan X65.
- Zona HAZ tidak mengalami *embrittlement* akibat *cooling rate*.

F. Pengaruh Cooling Rate terhadap Toughness

Cooling rate berpengaruh langsung terhadap lebar HAZ, pembentukan mikrostruktur (*ferrite/pearlite vs martensite*), nilai impak. Pendinginan alami (tidak menggunakan kipas atau air) memungkinkan pertumbuhan *ferrite* halus, *toughness* lebih baik di daerah transisi, tidak terbentuknya martensit yang bersifat getas.

H. Kondisi Lingkungan Kerja PT X dan Dampaknya pada Kualitas Las

Lingkungan kerja upstream plant memiliki tantangan ruang terbatas pada *process pipe rack*, fluktuasi suhu sekitar, getaran dari *equipment nearby*, risiko kontaminasi permukaan (debu, *grease*, minyak gas). Keberhasilan implementasi WPS–PQR yang terbukti dari hasil uji menunjukkan bahwa prosedur *fit-up* dan *cleaning* sudah benar, welder menguasai teknik posisi 6G, gas *shielding* terlindungi dari angin (penting untuk GTAW), QA/QC lapangan mengikuti standar industri migas.

I. Perbandingan dengan Literatur dan Praktik *Dissimilar Welding* Lain

Jika dibandingkan penelitian serupa:

- Nasir dkk (2019): nilai *tensile* 510–530 MPa untuk A106–X52[9]
- Mendez & Eagar (2012): HAZ cenderung lebih lebar pada *pipeline steel*[8]
- Ayende dkk (2025): *toughness* menurun bila *interpass* >150°C[11]

Sambungan pada penelitian ini memiliki:

- *tensile* lebih tinggi (524–543 MPa),
- HAZ lebih sempit,
- nilai impak lebih baik dari minimum standar.

Ini menunjukkan bahwa implementasi WPS–PQR di PT X sudah berada pada level yang sangat baik, bahkan dibandingkan data penelitian lain.

4. SIMPULAN

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi implementasi *Welding Procedure Specification* (WPS) dan *Procedure Qualification Record* (PQR) pada pekerjaan pengelasan pipa proses (*upstream process piping repair*) di fasilitas gas PT X [1]. Berdasarkan hasil pengujian visual, *radiografi*, mekanik, serta analisis metalurgi, dapat disimpulkan bahwa penerapan prosedur WPS dan PQR yang tepat terbukti efektif dalam menjamin mutu dan integritas sambungan las di lapangan [2].

Hasil uji menunjukkan bahwa seluruh spesimen pengelasan memenuhi standar penerimaan ASME *Section IX* dan ASME B31.3. Pengujian tarik menghasilkan nilai kekuatan antara 524–543 MPa dengan patahan pada base metal, menandakan bahwa kekuatan sambungan setara atau bahkan melebihi material induk. Uji lengkung menunjukkan *root discontinuity* 0,7 mm yang masih dalam batas toleransi (≤ 3 mm), sementara uji impak pada suhu -46°C juga memenuhi ketangguhan minimum yang disyaratkan. Pemeriksaan visual dan radiografi menunjukkan 100% penerimaan tanpa indikasi cacat signifikan, memperkuat bukti bahwa pengendalian mutu di lapangan terlaksana dengan baik [7]. Secara metalurgi, hasil makro dan mikro menunjukkan fusi sempurna antara logam las dan logam induk dengan zona HAZ yang sempit dan homogen. Pengendalian *heat input* yang stabil, *preheat* dan *interpass temperature* yang sesuai, serta penggunaan *filler metal* ER70S-2 dengan gas pelindung argon murni terbukti menjaga kestabilan struktur mikro dan ketangguhan sambungan [9].

Implementasi WPS–PQR yang konsisten juga memberikan dampak positif terhadap efisiensi proyek. Tingkat *repair rate* menurun secara signifikan dibanding periode sebelumnya, yang berarti waktu dan biaya pekerjaan perbaikan menjadi lebih efisien. Selain itu, dokumentasi yang

lengkap mempermudah proses audit mutu, sertifikasi *welder*, dan penelusuran jejak (*traceability*) bila terjadi inspeksi atau *failure analysis* di masa mendatang [6]. Temuan ini menegaskan bahwa keberhasilan sistem pengelasan tidak hanya ditentukan oleh keterampilan operator, tetapi juga oleh penerapan WPS dan PQR yang terstandarisasi serta pengawasan ketat dari QA/QC. Oleh karena itu, implementasi prosedur WPS–PQR harus dijadikan bagian integral dari sistem *Quality Assurance* di setiap proyek konstruksi maupun *repair* pada fasilitas migas [10].

Untuk pengembangan lebih lanjut, disarankan agar dilakukan analisis lanjutan terhadap struktur mikro (mikrografi dan SEM/EDS) untuk mempelajari lebih detail pengaruh *heat* input terhadap HAZ, evaluasi performa jangka panjang sambungan las melalui uji ketahanan korosi dan *fatigue test* pada kondisi operasi aktual, pengembangan *database* WPS–PQR berbasis digital agar perusahaan dapat mengelola, melacak, dan memperbarui dokumen kualifikasi secara sistematis. Secara keseluruhan, penerapan WPS dan PQR yang tepat dan terdokumentasi baik terbukti meningkatkan keandalan sambungan las, menjamin keselamatan operasional, dan memperkuat sistem manajemen mutu di lingkungan industri minyak dan gas *upstream*.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] ASME, *Boiler and Pressure Vessel Code, Section IX: Welding and Brazing Qualifications*, The American Society of Mechanical Engineers, New York, 2015.
- [2] ASME, *Process Piping Code, ASME B31.3*, The American Society of Mechanical Engineers, New York, 2014
- [3] API, *Specification for Line Pipe, API 5L 45th Edition*, American Petroleum Institute, Washington D.C., 2013.
- [4] ASTM, *Standard Specification for Seamless and Welded Steel Pipe for Low-Temperature Service, ASTM A333/A333M-16*, ASTM International, 2016.
- [5] AWS, *Welding Handbook: Welding Processes, Part 1 (Vol. 2)*, 9th Edition, American Welding Society, Miami, 2011.
- [6] Cary, H. B., and Helzer, S. C., *Modern Welding Technology*, 6th Edition, Pearson Education, New Jersey, 2005.
- [7] Kou, S., *Welding Metallurgy*, 2nd Edition, John Wiley & Sons, New York, 2003.
- [8] Mendez, P. F., and Eagar, T. W., “Welding processes for metallurgical engineers,” *JOM*, vol. 64, no. 3, pp. 417–426, 2012.
- [9] Nasir, A., et al., “Evaluation of Welding Procedure Qualification Record for Carbon Steel Pipeline,” *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, vol. 6, no. 8, pp. 45–52, 2019.
- [10] Susanto, R., “Analisis Penerapan WPS dan PQR pada Pekerjaan Pengelasan Pipa di Industri Migas,” *Jurnal Teknologi Energi dan Manufaktur*, vol. 7, no. 2, pp. 101–110, 2022.
- [11] Ayende, M. B., Bahtiar, H., Kotrisna, H., Damayanti, S., Santoso, R. D., & Bagas, M. A. P., “Experimental Study of Oil and Gas Pressure Vessel Welding Using the Shielded Metal Arc Welding Process,” *Scientific Contributions Oil & Gas*, vol. 48, no. 2, pp. 41–51, 2025.
- [12] Singh, R., *Applied Welding Engineering*, 3rd ed., Butterworth-Heinemann, 2020.

Daftar Simbol

CA	= corrosion allowance, (mm)
D	= outside diameter, (mm)
D_i	= inside diameter, (mm)
E	= joint efficiency,
L	= panjang total pipa atau segmen sambungan, (mm)
L_{t-t}	= panjang tangent-to-tangent, (mm)
MPT	= magnetic particle test,
P	= internal pressure, (kPa)
P_d	= design pressure, (kPa)
$PWHT$	= post weld treatment,

Q	= laju aliran fluida, (m^3/h)
RT	= radiographic test,
S_u	= ultimate tensile strength, (N/mm^2)
S_y	= yield strength, (N/mm^2)
T	= temperatur operasi, ($^{\circ}C$)
T_d	= temperatur desain, ($^{\circ}C$)
UT	= ultrasonic test,
V	= volume internal pipa atau bejana, (m^3)
α	= koefisien muai termal linear, ($^{\circ}C$)
η	= viskositas fluida, ($N.s/m^2$)
ρ	= massa jenis fluida, (kg/m^3)
s_t	= tegangan akibat tekanan internal, (N/mm^2)
s_{allow}	= tegangan izin material, (N/mm^2)
$s_{thermal}$	= tegangan termal akibat perubahan suhu, (N/mm^2)