

Studi Pembuatan *Procedure Qualification Record* untuk *Repair through Thickness* pada S355 KT0

Windy Stefani*, Nur Fitria Pujo*, Nurman Pamungkas*, Cahyo Budi Nugroho*

* Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Batam

Jl. Ahmad Yani, Batam Centre, Batam 29461, Indonesia

E-mail: windy@polibatam.ac.id, nurfitriapujo@polibatam.ac.id, nurman@polibatam.ac.id,
cahyo@polibatam.ac.id

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk membuat PQR *Repair Through Thickness* terhadap material S355 KT0 dengan metode pengelasan GMAW pada *root*, SAW pada *filler* dan *capping*. Hasil lasan diperbaiki dengan *gouging* dan *grinding* sebelum di-repair dengan pengelasan SMAW. Penelitian ini menggunakan metode eksperimental dengan pengujian *Non-Destructive* dan *Destructive test* sesuai standar AWS D1.1 dan *Client Specification* MHK-COMP-SPE. Hasil pengujian menunjukkan bahwa hasil lasan bebas dari cacat dan memenuhi standar AWS D1.1 dalam hal sifat mekanis, seperti *tensile strength*, *bending*, *impact*, dan *hardness*. Nilai uji *tensile* mencapai 609 MPa (pada spesimen longitudinal) dan 539 MPa serta 540 MPa pada spesimen *transverse*. Nilai uji *impact* terendah adalah 139J pada daerah fusion line +2 mm *repair to original welds*. Nilai uji *hardness* puncak adalah 240 VHN pada bagian HAZ (*repair to original weld*). Hasil pengujian juga digunakan untuk menyusun PQR yang sesuai dengan kebutuhan spesifik. Penelitian ini diharapkan memberikan panduan dalam melakukan repair welding pada material S355 KT0.

Kata kunci: PQR, *Repair Through Thickness*, S355 KT0, *Non-Destructive Test*, *Destructive*

Abstract

This research aims to develop a Procedure Qualification Record (PQR) for Repair Through Thickness on S355 KT0 material using the GMAW method for the root, SAW for filler and capping. The welds were repaired using gouging and grinding before undergoing repair welding with the SMAW method. The study employed experimental methods with Non-Destructive and Destructive tests following AWS D1.1 and Client Specification MHK-COMP-SPE standards. The test results indicate defect-free welds that meet AWS D1.1 standards in terms of mechanical properties such as tensile strength, bending, impact, and hardness. The tensile strength values reached 609 MPa (longitudinal specimen) and 539 MPa and 540 MPa for transverse specimens. The lowest impact test value was 139J in the fusion line +2 mm repair to original welds area. The peak hardness test value was 240 VHN in the HAZ (repair to original weld) region. The test results were also used to formulate a PQR that aligns with specific requirements. This research is expected to provide guidance for performing repair welding on S355 KT0 material.

Keywords: PQR, *Repair Through Thickness*, S355 KT0, *Non-Destructive Test*, *Destructive*

1. Pendahuluan

Teknologi yang paling umum digunakan dalam pembuatan konstruksi baja adalah pengelasan [1], [2], [3], [4]. Metode pengelasan merupakan hal krusial untuk kesuksesan proyek di tempat penulis melakukan penelitian. Untuk menjaga kualitas, PQR (*Procedure Qualification Record*) *Repair* diterapkan, khususnya dalam proyek yang mengikuti *Client Specification* MHK-COMP-SPE dan code AWS D1.1(2015). Tantangan muncul saat hasil pengelasan sulit direparasi, bahkan ada yang rusak karena *gouging* terlalu dalam. Oleh karena itu, diperlukan

PQR Through Thickness Repair untuk memastikan proses perbaikan sesuai standar. Analisis PQR ini diperlukan untuk memastikan sifat mekanis dan kualitas perbaikan sejalan dengan prosedur yang telah ditetapkan. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan dalam menetapkan rentang parameter pengelasan yang optimal terkait *PQR Through Thickness Repair*, sehingga dapat meminimalkan potensi cacat, meningkatkan kekuatan, dan memastikan keandalan hasil pengelasan.

PQR Through Thickness Repair adalah prosedur kualifikasi lasan yang digunakan untuk memperbaiki

lasan yang rusak pada material dengan ketebalan yang berbeda. *PQR Through Thickness Repair* memungkinkan pengelasan pada material dengan ketebalan yang berbeda, dan memastikan bahwa lasan yang dihasilkan memenuhi persyaratan kualifikasi yang ditetapkan oleh ASME Section IX 1. Dalam hal ini, *PQR Through Thickness Repair* digunakan untuk memperbaiki hasil lasan yang rusak karena proses *gouging* terlalu dalam hingga tembus[5] [6]. Proses *gouging* adalah suatu teknik penghilangan material dari permukaan logam dengan menggunakan alat yang disebut *gouging torch*[7].

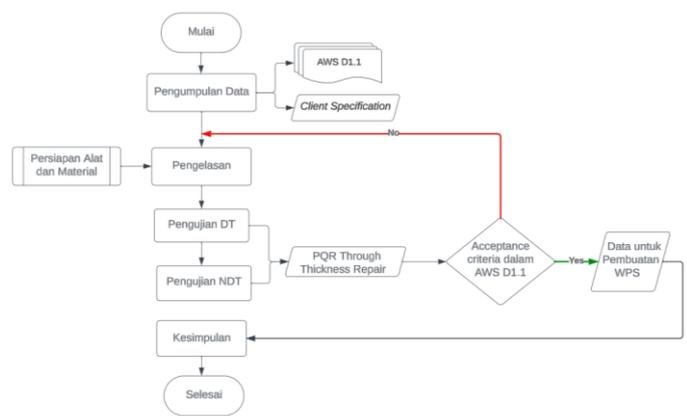
Penelitian sebelumnya, M Zeinoddini dalam papernya melakukan penelitian terhadap S355J2 + N membahas pengaruh pengelasan perbaikan pada *residual stress* pada pipa *offshore* dan potensi dampak negatifnya terhadap dampak jangka panjang struktur yang terpapar tekanan dan suhu tinggi. Hasilnya menunjukkan bahwa pengelasan perbaikan cenderung meningkatkan distribusi *residual stress*, terutama di daerah yang dekat dengan garis tengah las[8]. Sedangkan Piotr Swacha dalam eksperimennya hasil uji *fatigue* baja S355J2+N dalam rentang *High Cycle Fatigue* (HCF) dan *Very High Cycle Fatigue* (VHCF) menggunakan mesin uji ultrasonik pada frekuensi beban 20 kHz. Dengan memberikan rincian hasil mengenai karakteristik retakan *fatigue*, penelitian ini juga berhasil menetapkan batas beban atas untuk uji VHCF dan HCF pada baja S355J2+N[9]. Dalam penelitiannya, Anatoliy Zavidoveev menggunakan material S355J2+N dan S460M untuk meneliti dampak perlakuan panas terhadap mikrostruktur dan sifat baja paduan rendah-tinggi dengan menerapkan berbagai teknologi. Dibandingkan dengan normalisasi, penggunaan proses kontrol termomekanis (*Thermo-Mechanical Control Process/TMCP*) memberikan karakteristik kekuatan yang lebih tinggi, namun dengan sifat yang kurang stabil selama perlakuan panas suhu tinggi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sifat mekanik kedua jenis baja tetap stabil hingga 650 °C. Namun, dengan peningkatan suhu perlakuan, sifat mekanik baja TMCP (S460M) mengalami degradasi yang signifikan, sedangkan baja yang dinormalisasi (kelas S355J2) tetap stabil hingga 950 °C [10]. Sedangkan Lei Cui dalam papernya yang meneliti tentang *Friction Taper Plug Welding (FTPW)* pada material S355 untuk menguji pengelasan material tersebut dalam kondisi basah mencakup uji kekerasan, uji tarik, dan uji *charpy*. Hasilnya, *Friction Taper Plug Welding (FTPW)* berhasil menghasilkan lasan yang berkualitas pada baja HSLA S355 dalam kondisi basah bawah air tanpa cacat atau retakan dingin. Struktur mikro lasan menunjukkan keheterogenan, dengan HAZ dan bagian bawah *Weld* metal didominasi oleh bainit lath dan sedikit ferrit asikular, ferrit poligonal, serta martensit. Namun, di bagian bawah *Weld* metal, struktur mikro didominasi oleh martensit lath. Distribusi kekerasan pada seluruh lasan menunjukkan peningkatan yang signifikan, terutama di bagian

logam las [11].

Meskipun sebelumnya telah dilakukan penelitian terkait S355 dalam konteks pengelasan, belum ada penelitian yang khusus memfokuskan pada aspek *repair welding* pada material tersebut. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki potensi S355 KT0 dalam konteks repair welding, melibatkan pengujian Destruktif (DT) dan *Non-Destructive* (NDT) untuk mengidentifikasi optimalisasi dari segi kekuatan dan integritas material. Dengan mengisi kekosongan pengetahuan ini, diharapkan hasil penelitian dapat memberikan pengetahuan terkait kemungkinan dan batasan penggunaan S355 KT0 dalam proses *repair welding*.

2. Metodologi Penelitian

Penelitian ini akan dilakukan dengan beberapa tahapan seperti yang terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1: Diagram Alir Penelitian

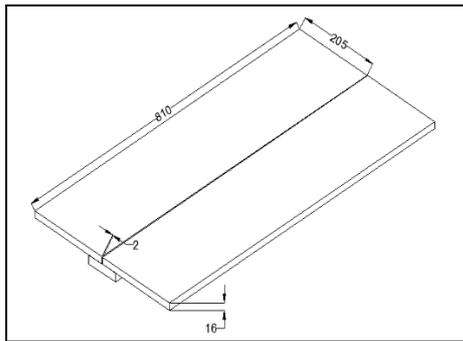
Jenis material yang digunakan adalah baja karbon rendah dengan spesifikasi S355 KT0. Material memiliki ukuran panjang 810 mm, lebar 410 mm, dan ketebalan 16 mm. Komposisi material tercantum dalam Tabel 1. Gambar 2 menampilkan foto material dan ilustrasi dimensi material yang digunakan.

Tabel 1: Komposisi Material S355 KT0

	Chemical Composition					
	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
	%	%	%	%	%	%
0.076	0.300	1.539	0.0073	0.0019	0.021	0.008



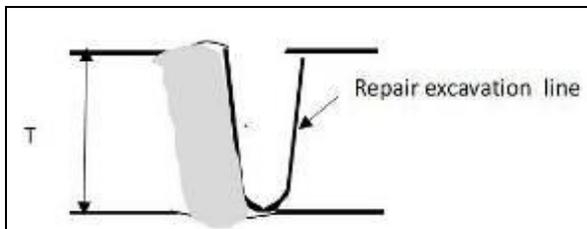
(a)



(b)

Gambar 2: (a) Material yang Digunakan (b) Ilustrasi dimensi material

Pengelasan dilakukan sesuai dengan WPS yang sudah ada (WPS 395). Pengelasan *root* dilakukan dengan pengelasan GMAW dengan electrode Merit S-6 dengan *shielding gas* CO₂ 100%. Sedangkan *filler* dan *Capping* dengan pengelasan SAW dengan elektrode OK 12.22 4 mm. Setelah itu, dilakukan *gouging* dan *grinding* untuk menghilangkan cacat lasan yang teridentifikasi secara visual. *Sketch* untuk *repair* bisa dilihat pada Gambar 3. Setelah proses *gouging* selesai, akan dilakukan proses pengelasan repair yang dilakukan mengikuti pWPS (*Preliminary Welding Procedure Specification*) yang sudah ada dengan pengelasan SMAW 2G menggunakan *electrode* Tenax 565 dan Supercito.



Gambar 3: Sketch Benda Kerja untuk Repair

Setelah proses pengelasan dan repair, dilakukan pengujian *Non-Destructive Testing* (NDT), yang meliputi *Visual inspection*, *Magnetic Particle Inspection* (MPI), dan *Ultrasonic Testing* (UT). Setelah NDT, dilakukan pengujian *Destructive Testing* (DT) yang meliputi *Tensile test*, *Bending test*,

Impact test, *Hardness test*, dan *Macro test* untuk menguji sifat mekanik material.

Untuk *tensile test*, terdapat 3 buah spesimen yang akan diuji, yaitu 2 *tensile test (transverse)* dan 1 *tensile test longitudinal (all weld metal)*. Spesimen memiliki ketebalan 15.43 mm dan lebar 20.09 mm. Spesimen yang akan dilakukan *tensile test* dapat dilihat pada Gambar 4 dan Gambar 5.



Gambar 4: Spesimen Tensile test (Transverse)



Gambar 5 : Spesimen Tensile test Longitudinal

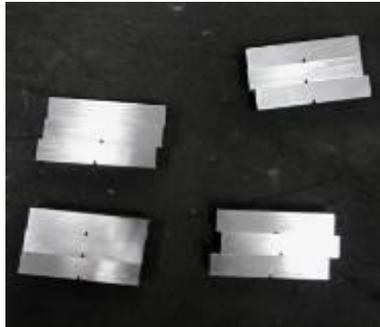
Spesimen yang akan digunakan untuk pengujian bending dapat dilihat pada gambar 6. Untuk melakukan pengujian bending, dibutuhkan 4 spesimen dengan ukuran masing-masing yaitu lebar 16 mm, *thickness* 10 mm, dan *former diameter* 50.8 mm. Spesimen pengujian bending akan dibengkokkan hingga 180° dan akan diperiksa apakah ada indikasi yang terbuka pada bagian hasil pengelasan.



Gambar 6: Spesimen Bending test

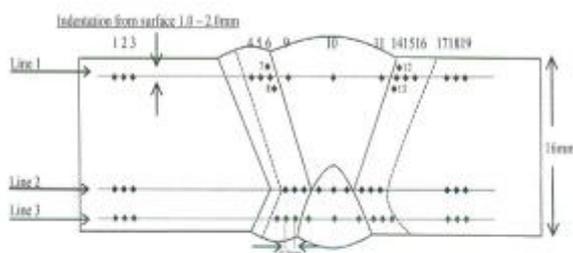
Spesimen yang akan digunakan untuk pengujian *impact* dapat dilihat pada gambar 7. Metode pengujian *impact* yang digunakan adalah *Charpy impact test*. Pengujian *impact* akan dilakukan pada 5 bagian, yaitu *weld centre line repair*, *fusion line repair*

to base metal, fusion line repair to base metal +2 mm, fusion line repair to original welds, dan fusion line repair to original welds +2 mm. Setiap bagian akan diuji sebanyak 3 spesimen. Ukuran masing-masing spesimen yang akan diuji adalah panjang 55 mm, lebar 10 mm, dan tebal 10 mm. Spesimen akan diuji pada suhu 0°C.



Gambar 7: Spesimen Impact Test

Titik pengujian untuk melakukan *hardness test* dapat dilihat pada gambar 8. Metode pengujian *hardness* yang digunakan adalah *hardness test* Vickers. Indentor yang digunakan adalah intan dan *test load* yang digunakan adalah Hv 5 kgf. Titik pengujian *hardness Vickers* akan dilakukan pada daerah *base metal*, *heat affected zone repair to original weld*, *repair weld metal*, *heat affected zone repair to base metal*, dan *base metal*.



Gambar 8: Sketch Hardness Vickers Test



Gambar 9: Spesimen Macro Test

Selanjutnya, pada pengujian makro, spesimen yang digunakan untuk *macro test* dapat dilihat pada gambar 9. Untuk memperjelas bagian-bagian spesimen, harus dilakukan proses *etching*. Cairan *etching* mempermudah untuk menunjukkan bagian *base metal*, HAZ, fusion line, dan *weld metal*. Komposisi yang digunakan adalah *nitric acid* 65% dan *methanol* 1:4. Uji makro adalah metode pengujian kualitas las yang menggunakan asam atau zat korosif lainnya untuk mengukir permukaan spesimen yang telah dipersiapkan. Melalui uji makro, dapat diamati berbagai karakteristik seperti ukuran butir, dendrit, struktur kolomar, segregasi, coring, banding, retak, porositas, *burst*, *pipe*, *flake*, dan diskontinuitas lainnya yang terdapat pada permukaan spesimen yang diuji [12].

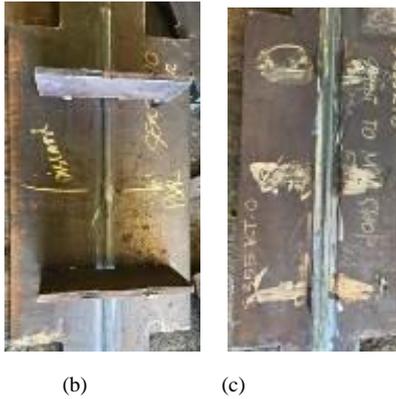
Tahapan Pembuatan WPS (*Welding Procedure Specification*) dilakukan setelah semua prosedur pembuatan PQR selesai dilakukan. Pembuatan WPS dilakukan untuk *PQR repair through thickness* berdasarkan data yang didapat dari hasil prosedur yang sudah dilakukan. Setelah pembuatan WPS, WPS akan direview dan diapproval oleh client sehingga WPS siap digunakan untuk produksi.

3. Hasil dan Pembahasan

Dalam penelitian ini, istilah "pengelasan *main*" merujuk pada pengelasan baja yang telah selesai dilakukan dan kemudian mengalami proses tambahan seperti *gouging*, dan *grinding* untuk menghilangkan *defect* las.

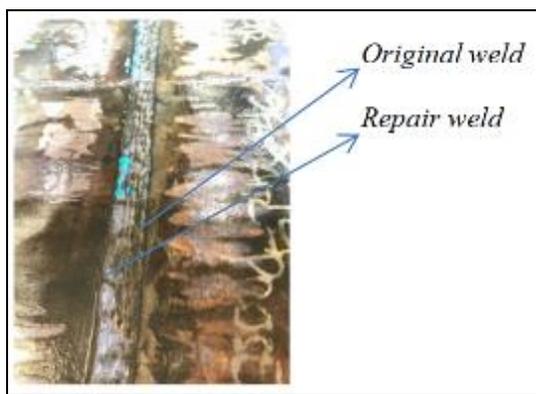


(a)

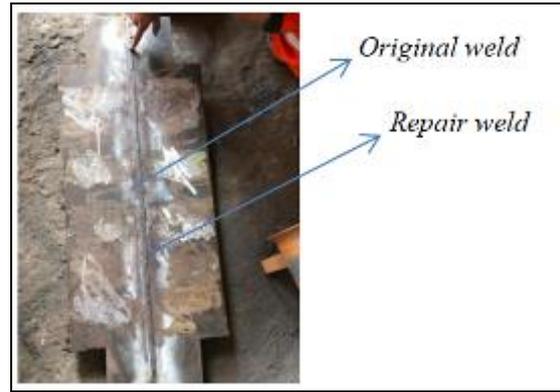


Gambar 10: (a) Pengelasan *Main Seal Weld*, (b) Pengelasan *main inside*, (c) Pengelasan *Main Outside*

Setelah baja S355 KT0 dilas, proses *gouging* dilakukan untuk memperbaiki bagian las yang mengalami kerusakan atau cacat pada material yang telah disatukan. *Gouging* sering digunakan untuk menghilangkan lasan yang rusak atau untuk mempersiapkan permukaan logam sebelum dilakukan pengelasan ulang. Dalam konteks perbaikan lasan, ketika hasil lasan mengalami kerusakan atau cacat, proses *gouging* dapat digunakan untuk menghapus lasan yang rusak sehingga permukaan yang baru dapat disiapkan untuk pengelasan ulang [7]. Setelah proses *gouging*, benda kerja kemudian dilakukan pengelasan ulang, yang dalam hal ini disebut sebagai perbaikan lasan. Pada gambar 11, capping yang telah diperbaiki terlihat sesuai dengan kontur permukaan hasil lasan, termasuk kemiringan, lengkungan, dan ketebalan yang seragam. Tinggi dan kontur pengelasan yang konsisten dan seragam juga terlihat pada hasil lasan *root* pada benda kerja setelah diperbaiki.



(a)



(b)

Gambar 11: (a) Hasil Capping Repair Through Thickness, (b) Hasil Root Repair Through Thickness

Saat melakukan pengujian *Repair Weld* dengan menggunakan *Non-Destructive Testing* (NDT) berbasis *Ultrasonic Testing* (UT), proses pengujian dilakukan dengan empat jenis probe, yaitu probe 0°, 45°, 60°, dan 70° dengan metode *contact testing* dan *sizing 6dB Drop*. Pengujian menggunakan perangkat UT *Flaw Detection* dari merek Sonates D10+. Seluruh proses pengujian merujuk pada *Acceptance code* AWS D1.1. Hasil pengujian menunjukkan bahwa tidak ada indikasi cacat yang dapat terdeteksi pada hasil las-lasan. Selain itu, hasil pengujian mematuhi ketentuan dalam code AWS D1.1.



Gambar 12: Proses Pengujian Ultrasonic

Pengujian *Non-Destructive Testing* (NDT) menggunakan *Magnetic Particle Inspection* (MPI), proses pengujian menggunakan AC YOKE, dengan *consumable* NABAKEM MP 35 dan SM 15 pada hasil pengelasan SMAW. Metode pengujian yang diterapkan adalah *surface* dengan *acceptance criteria* sesuai dengan spesifikasi klien MHK-COMP-SPE. Pada saat proses pengujian berlangsung, tidak ditemukan indikasi apapun pada bagian permukaan hasil las-lasan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa tidak ada cacat yang terdeteksi, sehingga hasil pengelasan ini sesuai dengan *acceptance criteria* yang telah ditetapkan.



Gambar 13 : Proses Pengujian *Magnetic*

Pada pengujian *tensile*, digunakan Mesin Uji Tarik Tipe WAW-1000E Rubicon dengan kapasitas 1000kN. Hasil uji *tensile* menunjukkan jenis patahan yang terjadi adalah *ductile*, yang disebabkan oleh beban statis pada material. Patahan *ductile* ini dapat berhenti menyebar jika beban dihilangkan. Patahan *ductile* ditandai oleh penyerapan energi dan deformasi plastis yang signifikan di sekitar daerah patahan. Jenis patahan ini, yang dikenal sebagai Patah Sepanjang Material (*Ductile Fracture*), terjadi pada material dengan sifat plastis, mengalami deformasi yang signifikan sebelum akhirnya patah. Patahan ini dapat muncul baik pada spesimen *tensile test transverse* maupun *longitudinal*.



Gambar 14: Tipe Patahan *Ductile* saat *Tensile Test*

Uji *tensile* dilakukan berdasarkan standar *acceptance criteria* AWS D1.1. Hasil pengujian *Ultimate Tensile Stress* pada *spesimen transverse weld* adalah 540 MPa, sedangkan pada *spesimen tensile longitudinal weld* mengikuti standar pengujian ASTM E8/E8M dengan *ultimate tensile stress* sebesar 609 Mpa. Kedua spesimen, baik yang *transverse* maupun *longitudinal*, memiliki nilai *ultimate stress* di atas yang tercantum

dalam sertifikat material. Hal ini menunjukkan kesesuaian dengan kriteria penerimaan AWS D1.1, dimana kekuatan tarik tidak boleh kurang dari minimum rentang tarik yang ditentukan dari *base metal* yang digunakan[13]

Tabel 2: Hasil *Tensile test* Spesimen

Specimen	Longitudinal ASTM E8/E8M	Transverse AWS D1.1 (T1)	Transverse AWS D1.1 (T2)
Measured Diameter (mm)	6.02		
Measured Thickness (mm)	-	15.43	15.48
Measured Width (mm)	-	20.09	20.09
Effective Area (mm ²)	28.46	309.99	310.99
Yield Load (kN)	15.80		
Yield Stress (N/mm ²)	555		
Ultimate Tensile Load (kN)	17.33	167.39	167.62
Ultimate Tensile Stress (N/mm ²)	609	540	539
Gauge Length (mm)	25		
Elongation %	29		
Reduction of Area %	76		

Sumber: Hasil Pengujian

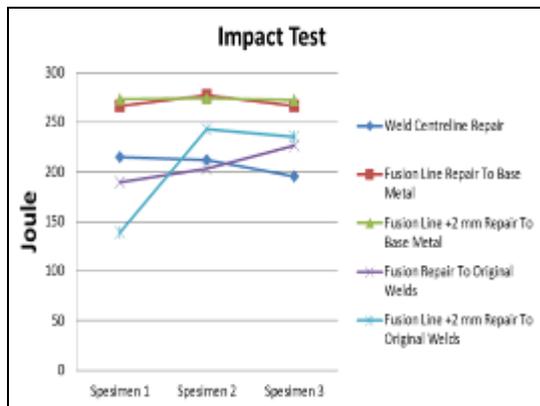
Gambar 15 menunjukkan hasil pengujian *Bending*, terlihat bahwa tidak ada diskontinuitas yang terlihat pada spesimen *bending test*.



Gambar 15: Hasil Pengujian *Bending*

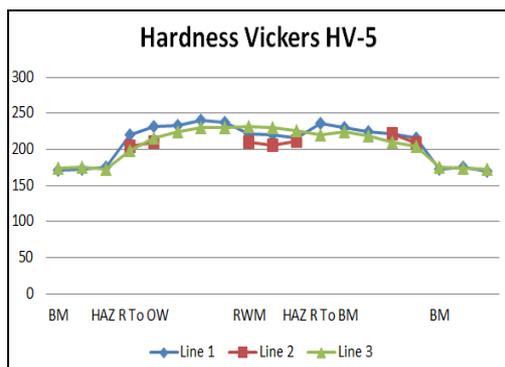
Dalam Gambar 16, grafik hasil uji *impact* memberikan gambaran perbandingan nilai *impact* pada berbagai spesimen. Spesimen 2 menunjukkan nilai tertinggi sebesar 277J pada daerah *fusion line repair to base metal*, sementara nilai uji *impact* terendah tercatat pada spesimen 1, hanya mencapai 139J pada daerah *fusion line +2 mm repair to original welds*. Penurunan signifikan pada nilai uji *impact* spesimen 1 disebabkan oleh pengaruh tingginya masukan panas atau *heat input* pada daerah *fusion line +2 mm repair to original welds*, yang berdampak

pada rendahnya nilai *impact*. Faktor tinggi atau rendahnya *heat input* memiliki pengaruh besar terhadap hasil uji *impact*, dan perbedaan nilai ini terlihat dalam hasil pengujian. Kegagalan sambungan las dapat terjadi apabila terdapat nilai *impact* yang rendah pada suatu daerah lasan. Hal ini bisa terjadi karena daerah dengan nilai *impact* yang rendah memiliki kecenderungan lebih rentan terhadap kegagalan sambungan las.

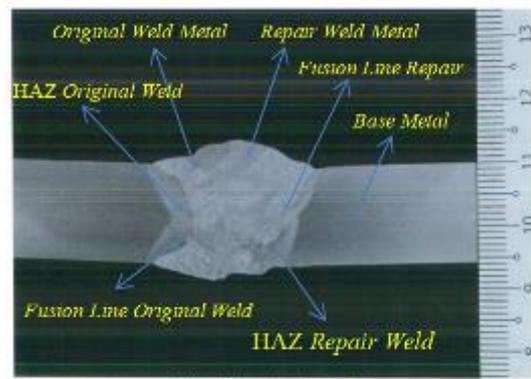


Gambar 16: Hasil Pengujian Impact

Hasil uji kekerasan *Vickers* menunjukkan nilai tertinggi terdapat pada bagian *HAZ repair to original weld* sebesar 240, sementara nilai terendah tercatat pada bagian *base metal* dengan nilai 170. Peningkatan nilai pada bagian *HAZ* disebabkan oleh pendinginan cepat di daerah tersebut. Detail lebih lanjut mengenai daerah *HAZ* dapat dilihat pada hasil pengujian makro pada Gambar 17 (b). Hasil pengujian makro menunjukkan bahwa terlihat bagian hasil las-lasan sudah *complete fusion* dan tidak adanya ditemukan *crack* dan *undercut* pada daerah hasil las-lasan.



(a)



(b)

Gambar 17: (a) Hasil Pengujian Kekerasan *Vickers*, (b) Hasil Pengujian Makro

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian, secara *non destructive test*, material S355 dengan pengelasan *root* GMAW dan *filler* SAW dengan *repair weld* SMAW telah sesuai standar AWS D1.1 dengan interpretasi tidak ada cacat. Sedangkan pada *Destructive test*, nilai hasil pengujian menggambarkan sifat-sifat mekanis material hasil lasan. Pada uji *tensile*, nilai *ultimate tensile strength* mencapai 609 MPa (pada spesimen longitudinal) dan 539 MPa serta 540 MPa pada spesimen *transverse*, telah memenuhi standar AWS D1.1. Pengujian bending menunjukkan ketiadaan diskontinuitas, dan hasil uji makro memperlihatkan bahwa hasil lasan sudah mencapai *complete fusion*, tanpa ditemukan *crack* dan *undercut* pada daerah hasil lasan. Sementara itu, pada uji *impact*, hasil uji *impact* terendah ada pada spesimen 1 dengan nilai 139J pada daerah *fusion line +2 mm repair to original welds*. Hasil uji *impact* terendah dikarenakan pengaruh masukan panas atau *heat input* pada daerah *fusion line +2 mm repair to original welds* tinggi sehingga nilai *impact* nya rendah. Hasil uji kekerasan *Vickers HV 5* menunjukkan nilai puncak pada bagian *HAZ (repair to original weld)* sebesar 240 VHN. Nilai terendah hasil uji *impact* dan hasil uji mekanis lainnya menjadi kontribusi krusial dalam penyusunan *Procedure Qualification Record (PQR)*, di mana parameter-parameter pengelasan dapat diperbarui atau disesuaikan untuk mencapai hasil lasan dengan kekuatan dan kualitas yang optimal. Melalui pengujian *Destructive test* maupun *NonDestructive test*, *PQR* dapat diperbarui atau disesuaikan sesuai kebutuhan spesifik.

5. Referensi

- [1] S. Lee, B.C. Kim, and D. Kwon, "Correlation of microstructure and fracture properties in weld heat-affected zones of thermomechanically controlled processed

- steels,” *Metall. Transac.*, vol. A23, pp. 2803–2816, 1992.
- [2] M. Natschlager, R. Egger, and S.A. Kapl, “Thermomechanically Rolled Heavy Plates for Penstocks,” *Thermomechanisch gewalzte Grobbleche für Druckrohrleitungen, WasserWirtschaft*, 2018.
- [3] J. Brozda, M. Zeman, and M. Lomozik, “The weldability of thermomechanically rolled S460ML steel,” *Welding international*, vol. 14, pp. 593–605, 2000.
- [4] E. Pashinska, V. Varyukhin, A. Zavdoveev, and V. Stolyarov, “Effect of rolling with shear technology on structure, properties and plasticity of low-carbon steel,” *International Conference Technology. Plastic. ICTP 10th*, 2011.
- [5] P Nitheesh Kumar et al, “Repair of through thickness corrosion/leaking defects in corroded pipelines using Fiber Reinforced Polymer overwrap,” *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, no. 346(1):012016, Apr. 2018.
- [6] Ethan Bale, “Practice Case 4 – PQR With Dissimilar Thickness.” Accessed: Jan. 18, 2024. [Online]. Available: <https://mewelding.com/pqr-with-dissimilar-thickness/>
- [7] Douglas Serrati, Douglas Bezerra de Araújo, and Louriel Vilarinho, “Thermal-Structural Plasma Gouging Simulation for Welding Repair,” *Soldagem & Inspeção*, vol. 28 (1), no. ISSN 0104-9224, Nov. 2023.
- [8] M. Zeinoddini, S. Arnavaz, A. P. Zandi, and Y. A. Vaghasloo, “Repair welding influence on offshore pipelines residual stress fields: An experimental study,” *J Constr Steel Res*, vol. 86, pp. 31–41, Jul. 2013, doi: 10.1016/J.JCSR.2013.03.010.
- [9] Piotr Swacha and Adam Lipski, “Cracking of S355J2+N steel in the high-cycle and very-high-cycle fatigue regimes,” *Int J Fatigue*, vol. 168, no. 107388, Mar. 2023.
- [10] Anatoliy Zavdoveev *et al.*, “Effect of heat treatment on the mechanical properties and microstructure of HSLA steels processed by various technologies,” *materialstoday communications*, vol. 28, no. 102598, Sep. 2021.
- [11] Lei Cui, Xinqi Yang, Dongpo Wang, Xiaopeng Hou, Jun Cao, and Wei Xu, “Friction taper plug welding for S355 steel in underwater wet conditions: Welding performance, microstructures and mechanical properties,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 611, pp. 15–28, Aug. 2014.
- [12] Standard test method for macroetching metals and alloys, “ASTM International,” in *ASTM*, E 340-00., 2006.
- [13] AWS D1.1/D1.1M:2020, *Structural Welding Code—Steel*, 24th ed. American Welding Society, Miami, FL, 2020.