

Analisis Pengaruh Arus Listrik dan Elektroda Terhadap Kekuatan dan Kekerasan pada Proses Pengelasan SMAW Baja Karbon Rendah

Enos Tambing^{1✉}, Thomas Pagasis², Obet Takke Ranteallo³, David Mangallo⁴, Samuel Parlidungan Siregar⁵, Agustinus⁶

^{1, 2, 3, 4, 5, 6} Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Cenderawasih, Indonesia

Informasi Artikel

Riwayat Artikel

Diserahkan : 29-02-2024

Direvisi : 03-03-2024

Diterima : 09-03-2024

Kata Kunci:

Baja Karbon Rendah,
Kekerasan Material,
Kekuatan Tarik,
Pengelasan SMAW,
Variasi Diameter
Elektroda.

Keywords :

Low Carbon Steel, Material
Hardness, Tensile Strength,
Shielded Metal Arc Welding
(SMAW), Electrode Diameter
Variation.

Corresponding Author :

Enos Tambing

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Cenderawasih, Indonesia

Jl. Kamp Wolker, Kampus Baru Uncen Waena, Jayapura – Papua, 99351

Email: enos_tambing@ftuncen.ac.id

ABSTRAK

Pengelasan SMAW, merupakan metode umum dalam pengelasan busur listrik, menjadi fokus penelitian menggunakan pelat baja karbon rendah dengan variasi diameter elektroda. Tujuan utamanya adalah mengevaluasi kekuatan hasil pengelasan serta kekerasan permukaan zona spesimen. Dengan menggunakan pendekatan eksperimental, pelat baja karbon rendah dipotong berbentuk alur V, dan disambung menggunakan las listrik SMAW. Data yang dikumpulkan melibatkan uji Tarik dan pengujian kekerasan di tiga zona pengelasan. Hasil menunjukkan bahwa panas yang dihasilkan arus listrik berdampak signifikan pada perubahan kekuatan dan kekerasannya. Kekuatan tarik tertinggi tercapai pada pengelasan dengan arus 120 A, dan nilai kekerasan bervariasi di masing-masing zona. Pada base metal (BM), tingkat kekerasan tertinggi pada pengelasan dengan arus 80 A dan elektroda berdiameter 2,6 mm. Sebaliknya, zona HAZ menunjukkan tingkat kekerasan maksimal spesimen dengan arus 120 A dan elektroda berdiameter 3,2 mm. Daerah *weld metal* (WM) mencapai tingkat kekerasan tertinggi spesimen dengan arus listrik 120 A dan elektroda berdiameter 3,2 mm.

ABSTRACT

Shielded Metal Arc Welding (SMAW) is widely used in electric arc welding, focusing on research with low-carbon steel plates and varying electrode diameters. The main goal is to evaluate welding strength and surface hardness in specimen zones. Through an experimental approach, low-carbon steel plates are V-groove cut and joined using SMAW electric welding. The collected data involve tensile tests and hardness examinations in three welding zones, revealing significant impacts of electrical current-induced heat on strength and hardness. Optimal tensile strength is achieved at 120 A welding current, with hardness variations in each zone. In the base metal (BM), peak hardness occurs at 80 A current with a 2.6 mm electrode diameter. Conversely, the Heat-Affected Zone (HAZ) shows maximum hardness in 120 A current specimens with a 3.2 mm electrode diameter. The weld metal (WM) region reaches maximum hardness at a 120 A electrical current and a 3.2 mm electrode diameter.

PENDAHULUAN

Material yang seringkali digunakan dalam proses Shielded Metal Arc Welding (SMAW) adalah baja karbon rendah. Mutu sambungan pengelasan pada baja karbon rendah memberikan dampak yang sangat besar pada keandalan struktural suatu konstruksi atau produk manufaktur. Oleh karena itu, pemahaman yang mendalam terhadap berbagai faktor yang memengaruhi karakteristik mekanis dari sambungan pengelasan, termasuk kekuatan dan kekerasan, menjadi sangat krusial untuk meningkatkan mutu hasil pengelasan. Faktor-faktor seperti arus listrik yang digunakan selama proses pengelasan SMAW dan pemilihan jenis elektroda memegang peranan yang sangat penting dalam menentukan sifat-sifat mekanis yang dimiliki oleh sambungan pengelasan tersebut. Penelitian yang luas telah dilakukan untuk mengeksplorasi pengaruh arus listrik dan elektroda terhadap kekuatan dan kekerasan baja karbon rendah dalam proses Shielded Metal Arc Welding (SMAW). Temuan dari beberapa peneliti, seperti Jasman (2018), menunjukkan bahwa pemanfaatan arus pengelasan sebesar 130A dengan elektroda berdiameter 3,2 mm dapat meningkatkan tingkat kekerasan. Sebaliknya, Pathak (2020) dan Sumardiyanto (2019) menyatakan bahwa peningkatan arus pengelasan berdampak negatif pada kekuatan tarik dan kekerasan baja. Meski demikian, hasil penelitian Bodude (2015) menunjukkan bahwa kekuatan impak pengelasan meningkat ketika masukan panas lebih tinggi.

Wilayah yang terpengaruh oleh panas dalam proses pengelasan, yang dikenal sebagai Heat-Affected Zone (HAZ), merupakan area kritis yang dapat memengaruhi kualitas lasan. Struktur mikro HAZ memiliki sifat yang heterogen dan terdiri dari beberapa zona yang berbeda, termasuk HAZ berbutir kasar, HAZ berbutir halus, HAZ interkritis, dan HAZ over-tempered, seperti yang diungkapkan oleh penelitian Yong-jun *et al.*, (2022). Properti-properti unik di dalam zona-zona ini dapat memiliki dampak signifikan pada integritas keseluruhan lasan, dan seringkali, HAZ dapat menjadi komponen yang paling rentan dari keseluruhan sambungan lasan, sesuai penelitian oleh Vuherer (2022). Dalam konteks pengelasan baja karbon rendah menggunakan metode Shielded Metal Arc Welding (SMAW), perhatian khusus harus diberikan pada struktur mikro HAZ. Studi yang dilakukan oleh Pico *et al.*, (2022) menyelidiki pengaruh hidrogen dan struktur mikro terhadap kerentanan retak dingin pada HAZ baja karbon rendah. Temuan mereka menegaskan bahwa struktur mikro memiliki peran yang lebih dominan daripada kandungan hidrogen dalam menentukan tingkat kerentanan terhadap retak dingin di HAZ, sebagaimana dijabarkan oleh Aydin *et al.*, (2023). Oleh karena itu, pemahaman mendalam dan kontrol yang efektif terhadap struktur mikro HAZ menjadi krusial untuk menjamin integritas lasan yang optimal pada proses pengelasan baja karbon rendah dengan menggunakan metode SMAW.

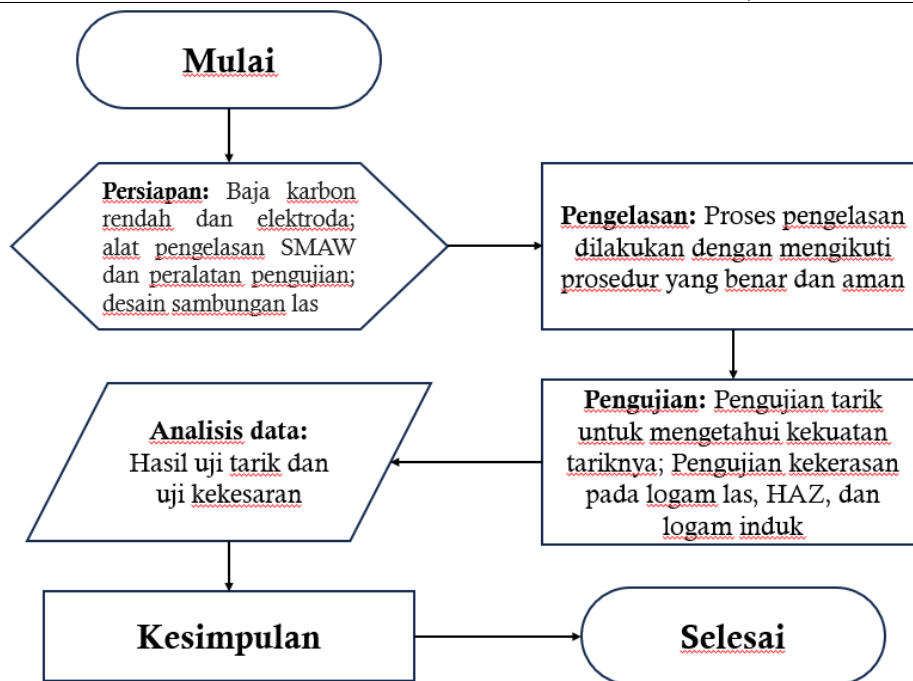
Penelitian ini memiliki tujuan untuk menyumbangkan wawasan mendalam terkait dampak arus listrik dan seleksi elektroda terhadap tingkat kekuatan dan kekerasan dalam konteks proses pengelasan Shielded Metal Arc Welding (SMAW) pada baja karbon rendah. Elektroda yang digunakan khusus dirancang untuk pelat dengan ketebalan 5 mm, yang merupakan baja jenis ST 37. Rentang arus pengelasan yang diuji berkisar antara 80 hingga 120 ampere.

METODE PENELITIAN

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini merupakan plat baja karbon rendah dengan spesifikasi ST 37 dan memiliki ketebalan 5 mm. Proses pengelasan dilakukan sesuai dengan Welding Procedure Specification (WPS), yang ditunjukkan pada Gambar 1. Elektroda yang dipilih adalah jenis AWS E6013 dengan diameter 2,6 mm dan 3,2 mm, digunakan dalam proses penyambungan pengelasan Shielded Metal Arc Welding (SMAW). Mesin las arus bolak balik (AC) digunakan untuk mencapai variasi arus listrik dan diameter elektroda yang diinginkan, sebagaimana terdokumentasikan dalam Tabel 1.

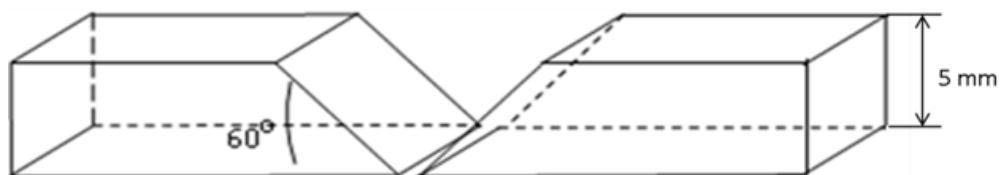
Tabel 1. Variasi penggunaan arus listrik dan elektroda

Arus (Ampere)	Jumlah Spesimen	Tebal Plat (mm)	Diameter Elektroda (mm)
80	3	5	2,6
	3	5	3,2
120	3	5	2,6
	3	5	3,2



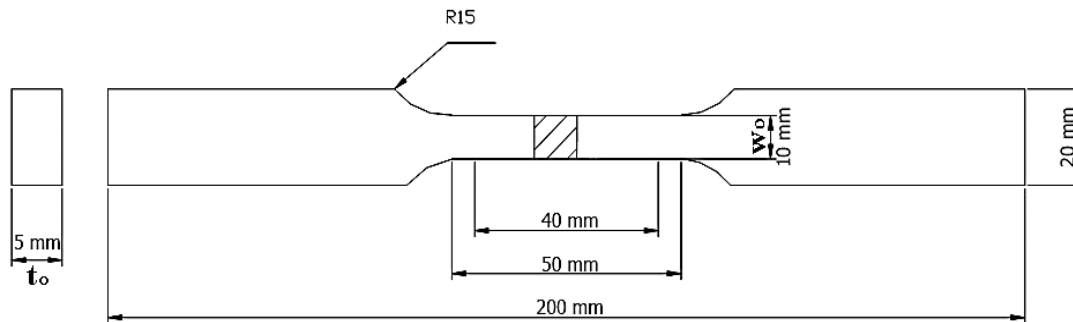
Gambar 1. Diagram alur penelitian

Penyediaan specimen uji diawali dengan pembuatan kampuh sambungan bentuk V 60° (Gambar 2) dengan menggunakan mesin drilling/gurdi, di mana pelat dipotong sesuai dengan ukuran kebutuhan pembuatan specimen sebanyak 3 buah.



Gambar 2. Penampang Las Dengan Kampuh V

Langkah selanjutnya melibatkan proses pengelasan pada specimen dengan tegangan pengelasan dan arus pengelasan masing-masing sebesar 25 Volt dan 80 serta 120 Ampere. Proses pengelasan ini dilaksanakan dalam tiga lapisan, yaitu lapisan pertama, kedua, dan ketiga, dengan tujuan membentuk daerah logam lasan (weld metal), daerah pengaruh panas (HAZ), dan daerah logam dasar (Base Metal). Selanjutnya, specimen untuk pengujian tarik disiapkan mengikuti standar JIS Z 2201 tahun 1981 untuk mengevaluasi kualitas kekuatan tarik bahan. Setelah proses pengelasan selesai, pembuatan specimen dilanjutkan sesuai dengan standar JIS Z 2201 tahun 1981, sebagaimana terlihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Spesimen Uji Tarik dengan Standar JIS Z 2201 1981

HASIL DAN PEMBAHASAN

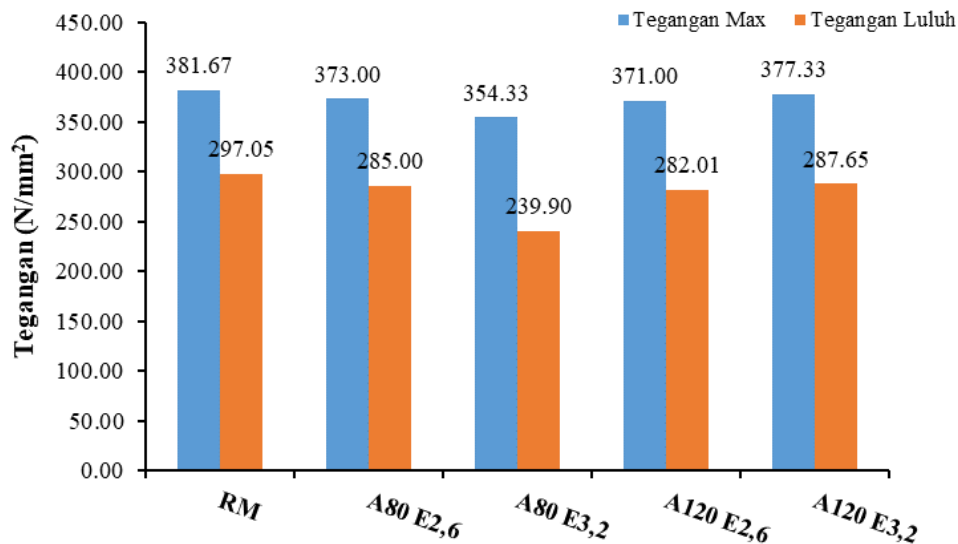
Semua spesimen yang diuji secara eksperimental tidak putus pada daerah lasan seperti ditunjukkan pada Gambar 4. Patahan pada umumnya terjadi sekitar (20-30) mm dari wilayah pengelasan, dengan karakteristik perpatahan yang terjadi antara bagian yang ulet dan bagian yang getas, ditandai dengan pengecilan penampang. Keadaan ini dapat diatribusikan kepada penggunaan parameter pengelasan yang optimal serta berperan pula faktor penggunaan elektroda E6013.



Gambar 4. Spesimen putus setelah diuji tarik

Kekuatan Tarik

Gambar 5 yang disertakan mengkomparasikan arus listrik dan elektroda yang berbeda, yang masing-masing diidentifikasi sebagai 120 A E 3,2; 120 A E 2,6; 80 A E 3,2; dan 80 A E 2,6. Penulisan angka "120 A" dan "80 A" pada jenis baja tersebut merujuk pada arus listrik yang digunakan dalam satuan Ampere (A). Sementara itu, notasi "E 3,2" dan "E 2,6" mencerminkan nilai diameter elektroda, yang menggambarkan kapasitasnya untuk mengalami perubahan bentuk sebelum mencapai titik patah. Semakin tinggi nilai notasi tersebut, menunjukkan tingkat keuletan yang lebih baik pada baja tersebut. Tegangan maksimum, yang mencerminkan tegangan paling tinggi yang bisa ditahan oleh baja sebelum mengalami patah, varian 120 A E 3,2 menunjukkan nilai tertinggi sebesar 450 N/mm². Seiring dengan itu, tegangan luluh, yaitu titik di mana baja mulai mengalami deformasi plastis yang tidak dapat dikembalikan setelah beban dihilangkan, tercatat paling rendah pada varian 80 A E 2,6, dengan nilai sebesar 282,01 N/mm².



Gambar 5. Grafik Kekuatan Tarik

Dari analisis Gambar 5, dapat disimpulkan bahwa 120 A E 3,2 menunjukkan kombinasi tertinggi antara arus listrik dan diameter elektroda yang digunakan selama proses pengelasan, walaupun tingkat keuletannya lebih rendah jika dibandingkan dengan 120 A E 2,6. Di sisi lain, 80 A E 3,2 menawarkan kombinasi yang baik antara kekuatan tarik dan keuletan, namun tegangan luluhnya lebih rendah dibandingkan dengan varian 80 A E 2,6. Temuan ini memberikan wawasan yang signifikan terkait perbandingan karakteristik mekanis yang dimiliki oleh setiap jenis baja yang telah diuji.

Berdasarkan analisis data hasil pengujian tarik yang tergambar dalam grafik penelitian, terlihat bahwa kekuatan tarik hasil pengelasan mengalami penurunan jika dibandingkan dengan materi baku (spesimen normal). Fenomena ini terjadi karena pada saat proses peleburan logam menggunakan metode Shielded Metal Arc Welding (SMAW), terjadi aliran panas yang merambat ke arah logam dasar. Proses pemanasan tersebut memicu terjadinya siklus termal pada logam dasar, dimulai dari temperatur terendah pada titik yang paling jauh dari garis lebur, hingga mencapai temperatur tertinggi pada fase cair logam di garis lebur (Wang et al., 2023). Pada fase pendinginan, setiap titik pada logam dasar mengalami tingkat pendinginan yang berbeda. Akibat dari perubahan suhu akibat pemanasan dan pendinginan ini, daerah yang disebut sebagai heat affected zone (HAZ) di sekitar sambungan logam las mengalami perubahan struktur mikro. Perubahan tersebut sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti temperatur puncak yang tercapai, kecepatan pendinginan, dan variabel lainnya.

Kekuatan atau tegangan tarik yang terhasil dari proses pengelasan sangat terpengaruh oleh proses pemanasan, yang pada gilirannya dapat menyebabkan penurunan kekuatan pada logam dasar. Fenomena ini timbul karena adanya perbedaan suhu di dalam tiga daerah las, yang berakibat terbentuknya tegangan sisa di dalam logam dasar (Mauliza & Usman, 2023). Tegangan sisa ini muncul ketika pendinginan tidak merata terjadi di tiga daerah tersebut, sehingga menciptakan tegangan termal yang terperangkap dalam struktur logam dasar. Hal ini berujung pada deformasi struktur material dan penurunan kekuatan di sekitar lokasi tersebut.

Keadaan seperti yang dijelaskan di atas terkonfirmasi melalui hasil uji tarik, yang menunjukkan bahwa kegagalan tidak terjadi pada sambungan las, melainkan pada daerah logam dasar yang terkena pengaruh panas. Hal ini mengindikasikan bahwa panas yang diaplikasikan dalam proses pengelasan berdampak pada karakteristik mekanik baja karbon rendah (Musa et al., 2023). Penerapan busur las yang optimal, yang diikuti oleh kecepatan pengelasan yang tepat pada spesimen dengan elektroda berdiameter 3,2 mm, akan menghasilkan panas yang cukup untuk melarutkan logam, mengakibatkan peningkatan kekuatan materi.

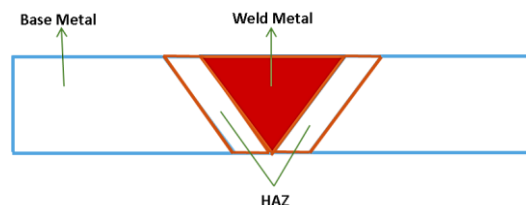
Dalam penelitian ini, terdapat spesimen pengujian las yang mengalami kegagalan pada bagian sambungan, khususnya antara wilayah weld metal dan daerah *Heat-Affected Zone* (HAZ).

Kegagalan ini terjadi pada spesimen yang menggunakan arus listrik sebesar 80 A dengan elektroda berdiameter $\phi 3,2$ mm. Penyebabnya adalah arus listrik sebesar 80 A tidak mencukupi untuk menghasilkan panas yang dapat sepenuhnya meleburkan logam pengisi dari elektroda dan logam dasar, sehingga tidak terbentuk ikatan logam sambungan yang optimal.

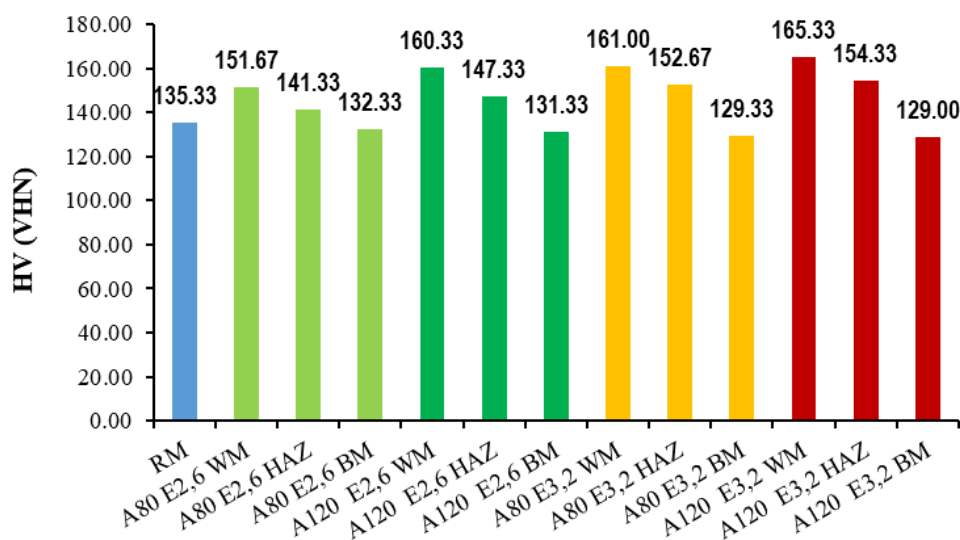
Pengujian Kekerasan

Indeks Uji Kekerasan Vickers (VHN) merujuk pada nilai numeris yang diperoleh dari prosedur pengujian Vickers, mencerminkan tingkat kekerasan bahan yang sedang diuji. Metode pengujian ini memanfaatkan indenter berbentuk piramida berlian yang diterapkan pada permukaan bahan. Ukuran diagonal lekukan yang muncul diukur, dan nilai VHN dihitung menggunakan formula khusus. Kekerasan material meningkat seiring dengan peningkatan nilai VHN. Skala Vickers ini tidak memiliki batasan tertentu, dan nilai VHN bergantung pada hasil pengukuran lekukan yang dihasilkan oleh indenter berbentuk piramida berlian pada permukaan material. Terdapat beberapa faktor yang memengaruhi nilai VHN, termasuk jenis material, besaran beban yang diterapkan pada indenter, dan durasi penekanan.

Tingkat kekerasan suatu bahan dapat dinilai dengan melakukan uji kekerasan menggunakan alat uji Vickers (VHN). Uji kekerasan ini dilaksanakan pada tiga wilayah yang berbeda dalam proses pengelasan, yaitu di daerah las (weld metal/WM), daerah yang terpengaruh panas (heat-affected zone/HAZ), dan daerah logam dasar (base metal/BM). Posisi titik beban pada setiap zona tersebut dapat diidentifikasi melalui referensi pada Gambar 6.



Gambar 6. Pengambilan titik pengujian kekerasan pada 3 daerah spesimen pengelasan SMAW



Gambar 7. Hasil Pengujian Kekerasan

Dalam Gambar 7, terlihat hasil uji kekerasan Vickers pada tiga zona las (base metal/BM, Heat Affected Zone/HAZ, dan weld metal/WM) dengan dua variasi arus listrik (80 A dan 120 A) serta dua variasi diameter elektroda (E 2,6 dan E 3,2). Penggunaan kuat arus listrik sebesar 120 A menunjukkan nilai kekerasan Vickers yang lebih tinggi daripada menggunakan 80 A di seluruh

zona las. Temuan ini konsisten dengan penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh (Huang *et al.*, 2023), yang menegaskan bahwa baja AISI 4140 (setara dengan A120) memiliki kekerasan Vickers yang lebih tinggi dibandingkan dengan baja AISI 1040 (setara dengan A80) karena tingkat kandungan karbon dan paduannya yang lebih tinggi. Perbedaan nilai kekerasan Vickers antara A80 dan A120 terlihat lebih mencolok pada daerah HAZ dan BM daripada pada daerah WM. Temuan ini menandakan bahwa material A120 memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap perubahan struktur akibat panas las, sesuai dengan penelitian sebelumnya (Tayier *et al.*, 2021; Yan *et al.*, 2022).

Dalam tahap pengelasan, transformasi bentuk pada benda kerja merupakan aspek yang tidak dapat dihindari. Perubahan ini memiliki potensi untuk mengurangi presisi dimensi dan keindahan visual, sambil secara bersamaan dapat mengurangi kekuatan struktural (Xing *et al.*, 2023). Untuk meminimalkan dampak perubahan bentuk atau penyusutan pada benda kerja, penyesuaian optimal pada masukan panas las harus dilakukan, sehingga suhu yang dihasilkan tetap berada dalam rentang yang diperlukan. Melalui pendekatan ini, perubahan bentuk dapat dikelola dengan efisiensi maksimal. Selain itu, mengurangi jumlah logam yang mengalami pengelasan selama proses pendinginan juga dapat menjadi strategi yang efektif dalam mengatasi perubahan bentuk dan menjaga kekokohan struktural.

Penggunaan arus listrik sebesar 80 A bersamaan dengan elektroda E 3,2 menghasilkan nilai kekerasan Vickers yang sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan penggunaan elektroda E 2,6 di wilayah WM dan HAZ. Temuan ini sejalan dengan riset oleh Wang *et al.*, (2020), yang mencatat bahwa peningkatan energi las berkontribusi pada peningkatan kekerasan di daerah las baja Q235. Secara umum, urutan nilai kekerasan Vickers cenderung berada dalam urutan berikut: BM > HAZ > WM. Temuan ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Gnyusov & Golkovsky, (2022), yang menunjukkan bahwa nilai kekerasan Vickers pada daerah BM cenderung lebih tinggi dibandingkan dengan daerah HAZ dan WM. Selain itu, perbedaan nilai kekerasan Vickers antar daerah las lebih mencolok ketika menggunakan arus listrik 80 A dibandingkan dengan 120 A. Hal ini menandakan bahwa hasil lasan dengan arus listrik yang lebih tinggi, yaitu 120 A, memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap perubahan struktur akibat panas las.

Tingkat kekerasan yang paling mencolok terdapat pada wilayah weld metal, yang secara eksplisit mencerminkan tingkat kekuatan yang tinggi pada wilayah tersebut. Kejadian ini menjelaskan alasan mengapa spesimen uji tarik tidak mengalami kegagalan di zona pengelasan. Selain itu, ditemukan bahwa kombinasi parameter pengelasan yang sesuai memiliki dampak signifikan terhadap mutu kekuatan materi yang dihasilkan melalui proses pengelasan (Zulrahman & Nurrohkeyati, 2022).

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Pemilihan parameter pengelasan yang optimal memiliki dampak signifikan. Pengaruh terhadap masukan panas yang dapat diserap oleh logam menyebabkan variasi dalam kekuatan sambungan las pada material baja karbon rendah. Dalam hasil pengelasan dengan menggunakan arus sebesar 120 A dan elektroda berdiameter 3,2 mm, ditemukan bahwa kekuatan tarik mencapai puncaknya pada tingkat 377,33 N/mm². Peristiwa ini mencerminkan signifikansi dari keselarasan parameter pengelasan dalam mencapai kinerja mekanis yang optimal pada sambungan las tersebut.

Evaluasi kekerasan pada sambungan las melibatkan analisis nilai kekerasan pada tiga zona yang berbeda (zone) untuk variasi arus dan diameter elektroda yang beragam. Dalam situasi ini, tingkat kekerasan tertinggi terdapat pada logam dasar (base metal/BM) pada spesimen pengelasan dengan arus 80 A dan elektroda berdiameter 2,6 mm. Sebaliknya, zona heat-affected (HAZ) mencapai tingkat kekerasan paling maksimal pada spesimen dengan arus 120 A dan elektroda berdiameter 3,2 mm. Sementara itu, pada wilayah weld metal (WM), kekerasan puncak tercatat pada spesimen dengan arus listrik 120 A dan elektroda berdiameter 3,2 mm.

Saran

Untuk mencapai kinerja mekanis optimal pada sambungan las baja karbon rendah, disarankan untuk mempertimbangkan parameter pengelasan dengan cermat. Dan penting untuk memastikan keselarasan parameter pengelasan untuk mendapatkan hasil yang konsisten.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih atas kontribusi rekan peneliti, dan dukungan LPPM Universitas Cenderawasih yang telah memberikan bantuan dana penelitian ini.

REFERENSI

- Aydin, K., Hidiroğlu, M., & Kahraman, N. (2023). *Regional pre-heat treatment system development and applications for haz in rsw joining of high-strength steels*. (2023, Mei 30). <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2952877/v1>
- Bodude, M. A., & Momohjimoh, I. (2015). Studies on effects of welding parameters on the mechanical properties of welded low-carbon steel. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 03(03), 142–153. <https://doi.org/10.4236/jmmce.2015.33017>
- Gnyusov, S. F., & Golkovsky, M. G. (2022). Special features of heat affected zone (Haz) formation in multipass non-vacuum electron beam deposition. *Welding International*, 36(4), 237–243. <https://doi.org/10.1080/09507116.2022.2049117>
- Huang, S., Fu, Z., Liu, C., & Wang, C. (2023). Interactional relations between ablation and heat affected zone (Haz) in laser cutting of glass fiber reinforced polymer (Gfrp) composite by fiber laser. *Optics & Laser Technology*, 158, 108796. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2022.108796>
- Jasman, J., Irzal, I., Adri, J., & Pebrian, P. (2018). Effect of strong welding flow on the violence of low carbon steel results of smaw welding with electrodes 7018. *Teknomekanik*, 1(1), 24–31. <https://doi.org/10.24036/tm.v1i1.972>
- Musa, A., Abdullahi, I., Sani, A., & Jimoh, A. (2023). Effect of welding electrodes and post-weld heat treatment on some mechanical properties and microstructural transformations of mild steel weldment using smaw process. *Nigerian Journal of Engineering*, 30(1), 30. <https://doi.org/10.5455/nje.2023.30.01.05>
- Mauliza, A., & Usman, U. (2023). Analysis of the effect of current on tensile strength of aisi 1050 material in the SMAW welding process. *Journal of Welding Technology*, 4(1), 22–26. <https://doi.org/10.30811/jowt.v4i1.2996>
- Pathak, D., Singh, R. P., Gaur, S., & Balu, V. (2020). Experimental investigation of effects of welding current and electrode angle on tensile strength of shielded metal arc welded low carbon steel plates. *Materials Today: Proceedings*, 26, 929–931. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.146>
- Pico, M. V., Moya, M. D. C. C., Palma, R. E. G., & Rubio, A. M. (2022). Analisis of the fracture toughness in the heat affected zone (Haz) of one hsla steel. *DYNA*, 97(5), 543–548. <https://doi.org/10.6036/10506>
- Sumardiyanto, D., & Susilowati, E. S. (2019). Effect of Welding Parameters on Mechanical Properties of Low Carbon Steel API 5L Shielded Metal Arc Welds. *American Journal of Materials Science*, 9(1), 15-21.
- Tayier, W., Tai, V. C., & Janasekaran, S. (2023). The numerical simulation for evaluation of dimensions of bead geometry and heat-affected zone (Haz) of the weld joint. Dalam S. S. Emamian, M. Awang, J. A. Razak, & P. J. Masset (Ed.), *Advances in Material Science and*

Engineering (hlm. 385–394). Springer Nature. https://doi.org/10.1007/978-981-19-3307-3_36

- Vuherer, T. (2022). Different ways for HAZ microstructure preparation and testing on high alloy steel. *Advanced Technologies & Materials*, 47(2), 9–16. <https://doi.org/10.24867/ATM-2022-2-002>
- Wang, X., Xie, Z., Su, W., & Shang, C. (2023). Role of carbon content on microstructure evolution and impact toughness in coarse-grained heat-affected zone of high-strength steel. *Metals*, 13(1), 106. <https://doi.org/10.3390/met13010106>
- Xing, M., Wan, Y., Zhang, X., Lin, F., Zhang, P., & Huang, Z. (2023). Microstructure evolution and microhardness of thermal-simulated HAZ in Fe–Mn–Al–C steel. *Materials Science and Technology*, 39(5), 531–542. <https://doi.org/10.1080/02670836.2022.2126089>
- Yong-jun, K., Jeong-min, K., Ki-dong, K., Nam-gyu, K., Sang-woo, S. (2022). Characteristics of cold cracking in the heat-affected zone of carbon steel. *Journal of Welding and Joining*, 40(6), 478–484. <https://doi.org/10.5781/JWJ.2022.40.6.3>
- Zulrahman, D., & Nurrohkayati, A. S. (2022). The effect of welding current and electrodes on the results of aisi 1045 steel welding strength by impact testing: *Procedia of Engineering and Life Science*, 3. <https://doi.org/10.21070/pels.v3i0.1330>