

Research Paper

Karakterisasi Inklusi Terak Pada Pengelasan Pipa SA 106 Grade B Menggunakan Mikroskop Elektron Pemindai

Characterization of Slag Inclusions in SA 106 Grade B Pipe Welding Using a Scanning Electron Microscope

Muhammad Aqdar Fitrah^{*a}, Mardin^b, Muhammad Balfas^b, Hermin Hardyanti Utami^c, Muhammad Taufiq Thahir^c, Haeruddin Hafid^d

^aProgram Studi Teknik Perawatan Mesin, Akademi Komunitas Industri Manufaktur Bantaeng, Pajukukang, Kabupaten Bantaeng, Sulawesi Selatan 92461, Indonesia

^bProgram Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muslim Indonesia, Panakukang, Kota Makassar, Sulawesi Selatan 90231, Indonesia

^cProgram Studi Analis Kimia, Akademi Komunitas Industri Manufaktur Bantaeng.

^dJurusan Teknik Pengelasan, Balai Besar Pelatihan Vokasi dan Produktivitas Makassar, Panakkukang, Kota Makassar, Sulawesi Selatan 90233, Indonesia

Artikel Histori : Submitted 22 April 2024, Revised 15 May 2024, Accepted 21 May 2024, Online 31 May 2024

 <https://doi.org/10.33096/jcpe.v9i1.725>

ABSTRAK: Pentingnya peran Mikroskop Elektron Pemindaian (SEM) dalam menganalisis pengelasan pipa, khususnya dalam konteks penggunaan material SA 106 Grade B seamless untuk aplikasi industri dengan suhu tinggi, sangatlah signifikan. Pengelasan pipa memiliki peran vital dalam berbagai industri yang dihadapkan pada lingkungan ekstrem. Faktor utama yang mempengaruhi integritas dan kinerja sistem dalam kondisi operasi yang ekstrim adalah kualitas antarmuka las dan struktur mikro dari material tersebut. Artikel ini menguraikan prinsip dasar operasi SEM dan penggunaannya dalam mengamati fenomena terak (slag) pada antarmuka las pipa yang terbuat dari material SA 106 Grade B. Penjelasan difokuskan pada proses SEM yang menggunakan aliran elektron untuk memindai permukaan sampel dan mengungkap informasi tentang struktur mikroskopis melalui interaksi antara elektron dan material. Pengamatan SEM menghasilkan pemahaman mendalam tentang karakteristik terak yang muncul selama proses pengelasan pipa, termasuk pembentukan fase silikat dan oksida, dengan keberadaan oksida besi menunjukkan bahwa terak tidak sepenuhnya terhapus. Pemindaian pada perbesaran 24x memberikan gambaran awal tentang distribusi ukuran, sedangkan pada perbesaran 150x menyoroti keberadaan butiran pada permukaan inklusi terak yang menumpuk seperti buih. Identifikasi butiran ini menjadi fokus penting karena dapat memengaruhi integritas struktural dan kualitas antarmuka las pipa.

Kata Kunci: Las Pipa; SA 106; Mikroskop Elektron Pemindaian (SEM); Terak

ABSTRACT: The importance of the role of the Scanning Electron Microscope (SEM) in analyzing pipe welding, especially in the context of using SA 106 Grade B seamless material for high temperature industrial applications, is very significant. Pipe welding plays a vital role in various industries that are faced with extreme environments. The main factors influencing system integrity and performance under extreme operating conditions are the quality of the weld interface and the microstructure of the material. This article describes the basic principles of SEM operation and its use in observing slag phenomena at pipe weld interfaces made from SA 106 Grade B material. The explanation focuses on the SEM process which uses a flow of electrons to scan the sample surface and reveal information about the microscopic structure through interactions between electrons and materials. SEM observations yielded an in-depth understanding of the characteristics of the slag that appears during the pipe welding process, including the formation of silicate and oxide phases, with the presence of iron oxide indicating that the slag was not completely removed. Scanning at 24x magnification provides an initial idea of the size distribution, while at 150x magnification highlights the presence of grains on the surface of the slag inclusions that accumulate like foam. Identification of these grains is an important focus because they can affect the structural integrity and quality of the pipe weld interface.

Keywords: SA 106, Scanning Electron Microscope (SEM), Slag, Weld Pipe

Published by
Department of Chemical Engineering
Faculty of Industrial Technology
Universitas Muslim Indonesia, Makassar
Address

Jalan Urip Sumohardjo km. 05 (Kampus 2 UMI) Makassar- Sulawesi Selatan
e-mail : jcpe@umi.ac.id

Corresponding Author *
muh.aqdarfitrah@akom-bantaeng.ac.id



1. PENDAHULUAN

Pengelasan pipa SA 106 Grade B merupakan proses yang kritis dalam konstruksi sistem pipa untuk aplikasi industri, termasuk dalam industri minyak dan gas, pembangkit listrik, dan industri kimia. Dalam ilmu metalurgi slag inclusion memainkan peran penting dalam produksi logam. Slag adalah hasil samping dari proses metalurgi dan dapat terperangkap dalam logam yang dihasilkan [1][2][3]. Dalam konteks ini, karakterisasi inklusi slag menjadi faktor penting yang memengaruhi kekuatan, keawetan, dan keandalan struktural dari sambungan las. Inklusi terak, yang merupakan residu dari proses pengelasan, dapat mempengaruhi integritas struktural dan kinerja mekanik pipa [4]. Penelitian telah menunjukkan bahwa inklusi terak dapat menyebabkan titik fokus stres, memicu retak, dan mengurangi ketahanan korosi dari pipa yang terkait [5][6]. Oleh karena itu, karakterisasi yang cermat terhadap inklusi terak menjadi krusial untuk memastikan keandalan dan keselamatan sistem pipa tersebut.

Selain itu, kualitas material dan keandalan struktural juga memengaruhi kinerja dan efisiensi operasional dalam industri-industri tersebut [7][8]. Material yang berkualitas tinggi cenderung memiliki kekuatan, kekakuan, dan ketahanan korosi yang lebih baik, yang pada gilirannya dapat meningkatkan efisiensi proses produksi dan mengurangi kebutuhan perawatan dan penggantian yang mahal [9][10]. Dengan memastikan keandalan struktural dan kualitas material yang tinggi, perusahaan dapat mengurangi risiko kegagalan peralatan, downtime produksi, dan biaya pemeliharaan, sehingga meningkatkan daya saing dan profitabilitas mereka di pasar [11][12].

Pengelasan pipa SA 106 Grade B khususnya terhadap inklusi terak menjadi sangat penting karena dapat memiliki dampak signifikan pada keandalan struktural dan kinerja mekanik pipa tersebut [13][14]. Masalah yang terkait dengan inklusi terak dalam pengelasan pipa SA 106 Grade B meliputi beberapa aspek penting. Inklusi terak dapat menyebabkan cacat struktural pada sambungan las, seperti porositas, rekahan, dan retak, yang mengurangi kekuatan dan integritas struktural pipa [15][16]. Inklusi terak juga dapat mempengaruhi kinerja mekanik pipa, seperti kekuatan tarik, kekakuan, dan ketahanan korosi. Adanya inklusi terak dapat menjadi titik fokus stres yang potensial, yang dapat mempercepat proses kelelahan dan mengurangi masa pakai pipa secara keseluruhan [4][9].

Dalam industri dengan standar keamanan dan keandalan yang tinggi seperti industri minyak dan gas, masalah inklusi terak dalam pengelasan pipa SA 106 Grade B menjadi perhatian serius bagi para insinyur dan ahli pengelasan. Oleh karena itu, karakterisasi inklusi terak dengan menggunakan metode analisis yang cermat dan teknologi yang tepat, seperti Mikroskop Elektron Pemindai (SEM), sangat diperlukan untuk mengidentifikasi, memahami, dan mengatasi masalah tersebut. Dengan pemahaman yang mendalam tentang masalah inklusi terak, dapat diambil tindakan preventif dan korektif yang diperlukan untuk memastikan keandalan dan keselamatan sistem pipa SA 106 Grade B dalam operasi industri yang kritis.

Mikroskop Elektron Pemindai (SEM) merupakan salah satu alat yang paling umum digunakan dalam karakterisasi inklusi terak [13][17]. Dengan resolusi tinggi dan kemampuan untuk memvisualisasikan struktur mikro secara detail, Mikroskop Elektron Pemindai (SEM) memungkinkan para peneliti untuk memeriksa dan menganalisis inklusi terak dengan cermat [18]. Metode-metode analisis seperti analisis komposisi kimia, morfologi, dan distribusi inklusi terak dapat dilakukan menggunakan SEM, memberikan wawasan yang berharga tentang sifat-sifat inklusi terak yang mungkin memengaruhi kinerja pipa [4].

Hal ini dapat memengaruhi kualitas logam secara keseluruhan. Inklusi slag, atau partikel-partikel slag, dapat memiliki dampak negatif, seperti menurunkan kekuatan dan meningkatkan kerapuhan logam. Inklusi slag yang terjadi dari solidifikasi fluks cair saat proses pengelasan, memegang peranan penting dalam menentukan kualitas las [19][20]. Keberadaannya dapat berdampak pada berbagai sifat las, termasuk kekuatan tarik, ketahanan korosi, dan masa pakai kelelahan.

Terak terperangkap di antara endapan las itu tidak meleleh di bawah panas busur pada proses pengelasan berikutnya [21]. Dalam pengelasan multipass, terak juga dapat terperangkap dalam rongga atau undercut yang

berlebihan pada ujung las atau pada profil permukaan yang tidak rata pada proses pengelasan sebelumnya [22]. Memahami morfologi dan komposisi unsur ini penting untuk mengoptimalkan parameter pengelasan dan meningkatkan integritas las secara keseluruhan [23]. Mikroskopi optik tradisional memiliki keterbatasan dalam karakterisasi inklusi slag secara mendalam karena dimensi mikron dan komposisi kimia yang kompleks.

Oleh karena itu, Mikroskop Elektron berpindai (SEM) menjadi alternatif kuat dengan kemampuan mikrografis resolusi tinggi dan analisis unsur melalui spektroskopi sinar-X dispersi energi [24] dalam penelitiannya untuk memahami nanokomposit Grafena Oksida Logam untuk Remediasi Organik dan Logam Berat yang dikarakterisasi menggunakan SEM. Hasil uji selama beberapa hari untuk mengetahui keberadaan logam berat di dalam air. Menariknya, pemisahan yang hampir sempurna telah diamati dengan mengolah sampel air yang terkontaminasi logam berat selama satu hingga dua hari dengan adanya nanopartikel G-SiO₂. Baja SA 106 Grade B memiliki aplikasi luas dalam struktur sasis mobil, tabung Boiler, dan industri bejana tekan [25].

2. METODE PENELITIAN

Sampel las diambil dari bagian pipa Grade B SA 106 yang dilas dalam kondisi pengelasan standar untuk dianalisis karakteristik sambungan las. Inklusi slag pada permukaan diisolasi dengan hati-hati dan dipersiapkan melalui prosedur metalografi standar, termasuk penggerindaan, polesan, dan etsa menggunakan reagen yang sesuai.

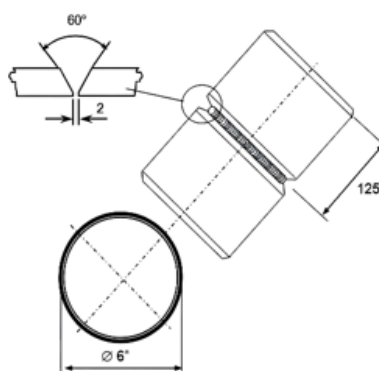
2.1. Prosedur Pengelasan

Prosedur dan persiapan pengelasan melibatkan penggunaan GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*) untuk root pass, sementara untuk proses pengelasan fill dan cap, digunakan SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*) menggunakan mesin las *Lorch Schweisstecchnik* GmbH D-71549, dalam proses pengelasan ini dipilih posisi pengelasan 6G (posisi pipa statis miring 45°) [4].

Tabel 1. Spesifikasi pengelasan Welding specifications of the gas tungsten arc welding (GTAW) methods dan shielded metal arc welding (SMAW)

Welding Methode	Base Material		Welding Material	
	Grade	Dimensions	Spec.	Size of Filler
Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)	SA 106 Gr. B	Thikness 21.9 mm Diameter 6 inch	A5.18 ER70S-G A5.1 E7016	Diameter 2.4 mm & 2.6 - 4 mm
Shielded Metal Arc Welding (SMAW)				

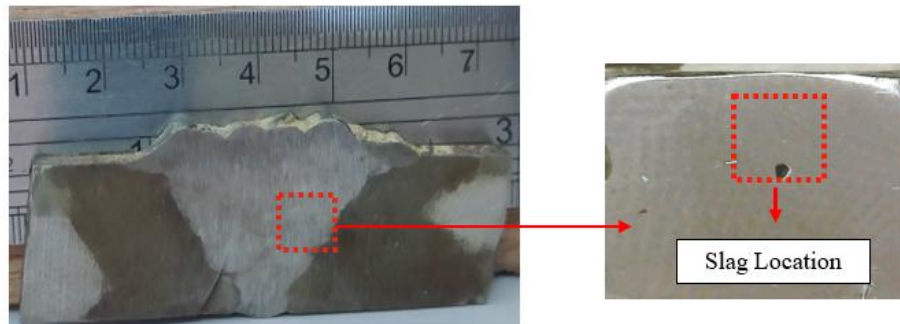
Posisi las 6G adalah posisi pengelasan yang mencakup seluruh lingkaran atau pipa dan biasanya dianggap sebagai posisi paling sulit dalam pengelasan karena melibatkan pengelasan pada berbagai sudut dan orientasi yang berbeda. Dalam posisi las 6G termasuk dalam butt joint, sambungan pipa dengan pipa yang diletakkan pada sudut 45 derajat.



Gambar 1. Weld Position 6 G

2.2. Preparasi Sampel

Dalam persiapan sampel untuk analisis menggunakan Mikroskop Elektron Pemindai (SEM) merupakan langkah penting dalam memastikan kesiapan sampel untuk pengamatan mikroskopis yang tepat. Proses ini melibatkan serangkaian prosedur teliti seperti fiksasi, pemotongan yang akurat, pengeringan menyeluruh, pelapisan konduktif, pemasangan yang stabil, pengaturan ruang vakum yang optimal, serta penyesuaian parameter SEM yang tepat, semuanya berkontribusi pada keberhasilan perolehan gambar yang akurat dan interpretasi yang tepat terhadap struktur sampel yang diamati.

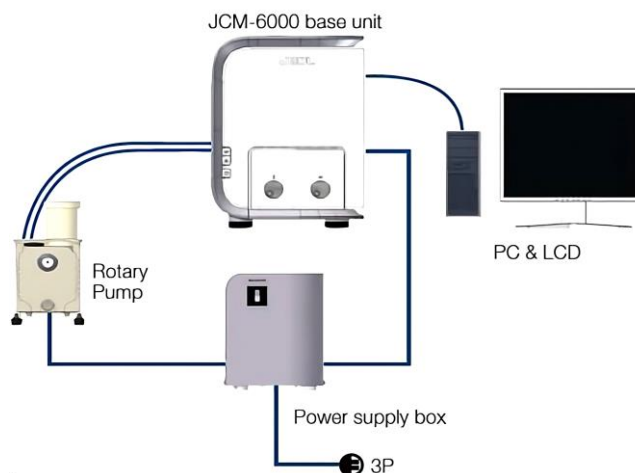


Gambar 2. Location of lag in the sample

Persiapan sampel ini agar sampel siap dan cocok untuk dilihat di bawah mikroskop dengan jelas. Langkah-langkah ini termasuk menjaga sampel dari kelembaban dan kontaminan, mempertahankan struktur dan integritas sampel, serta menyesuaikan pengaturan SEM agar hasil pengamatan optimal. Dengan persiapan yang tepat, pengamatan sampel menggunakan SEM akan memberikan informasi yang akurat dan relevan untuk analisis dan penelitian.

2.3. Pemindaian Sampel

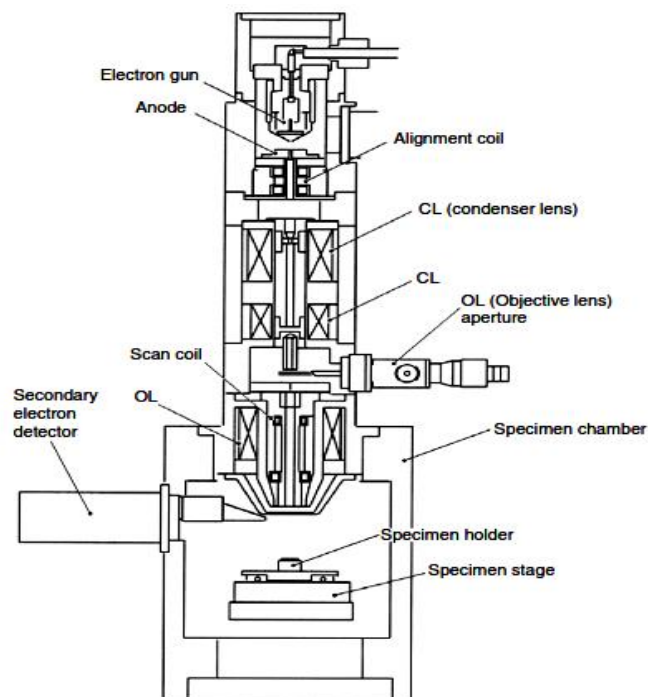
Scanning Elektron Mikroskop JEOL JCM-6000 Plus yang dilengkapi dengan detektor EDX digunakan untuk analisis rinci. Observasi dilakukan dengan tegangan percepatan 20 kV dan pembesaran variabel mulai dari 100x hingga 10.000x.



Gambar 3. Scanning Elektron Mikroskop JEOL JCM-6000 Plus

Mikroskop elektron pemindaian (SEM) menggunakan elektron sebagai pengganti cahaya dan menghasilkan gambar resolusi tinggi dengan pembesaran tinggi. Dari katoda tungsten, elektron dipancarkan secara termionik atau dipancarkan melalui emisi lapangan dan bergerak menuju anoda melalui medan elektromagnetik dan lensa dan sinar difokuskan ke bawah menuju sampel dalam ruang vakum vertikal. Ketika berkas mengenai sampel, elektron dan X- sinar dikeluarkan darinya. Dalam ilmu pengelasan, SEM (Scanning

Electron Microscope) digunakan untuk mengamati struktur mikroskopis dan karakteristik pengelasan yang tidak dapat dilihat dengan jelas menggunakan metode pengamatan konvensional. Dengan SEM, pengelasan dapat memeriksa detail-detail seperti mikrostruktur logam dasar, zona panas yang terpengaruh (HAZ), struktur zona lebur, dan sifat intergranular dari daerah pengelasan dan memahami kualitas sambungan las, mendeteksi cacat, mengidentifikasi zona kerapuhan potensial, dan merencanakan parameter pengelasan yang optimal.

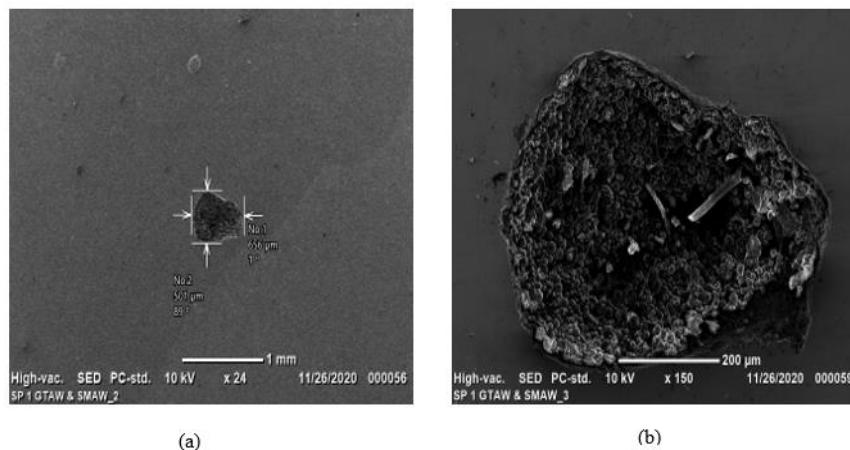


Gambar 4. Diagram Blok Dasar *Scanning Electron Microscope*

Diagram SEM mengilustrasikan struktur dan fungsi utama dari mikroskop elektron pemindaian yang mencakup gambaran komponen kunci seperti senjata elektron, kolom elektron, dan detektor. Diagram tersebut membantu dalam memahami bagaimana SEM bekerja dengan menghasilkan dan memfokuskan serbuk elektron ke sampel, serta menangkap sinyal yang dipancarkan oleh sampel sebagai respons terhadap serbuk elektron. Dengan melihat diagram SEM, dapat memperoleh gambaran yang lebih baik tentang bagaimana alat ini digunakan untuk menganalisis mikrostruktur material dan sampel biologis, serta mengaplikasikannya dalam berbagai industri.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pemeriksaan SEM menunjukkan adanya terak inklusi dalam las pipa Grade B SA 106. Terak inklusi dapat terbentuk selama proses pengelasan dan dapat mempengaruhi sifat mekanis dan kekuatan material. Analisis mikrostruktur dengan SEM memungkinkan identifikasi fase-fase yang terlibat dalam inklusi tersebut. Pengujian SEM dilaksanakan dengan tujuan untuk memahami struktur permukaan, karakteristik terak, dan dimensi sampel tersebut. Morfologi permukaan dari hasil pengelasan pipa SA 106 Grade B dieksplorasi melalui tangkapan dan analisis elektron sekunder yang dipancarkan dari sampel tersebut menggunakan SEM. Hasil pengamatan SEM mencakup gambaran visual tentang struktur permukaan pipa SA 106 Grade B. Sampel yang diidentifikasi kemudian dievaluasi pada perbesaran 24x dan 150x untuk meneliti rincian bentuk permukaannya. Berikut adalah gambaran hasil karakterisasi SEM pada sampel pengelasan pipa SA 106 Grade B.



Gambar 5. (a) foto morfologi inklusi terak pada pengelasan pipa SA 106 Grade B dengan perbesaran 24x, (b) foto morfologi inklusi terak pada pengelasan pipa SA 106 Grade B dengan perbesaran 150x

Pengamatan morfologi dengan menggunakan mesin uji SEM dilakukan pada daerah las yang diketahui mengandung inklusi slag, dan hasilnya menunjukkan pembentukan fase silikat dan oksida selama proses pengelasan. Keberadaan oksida besi menunjukkan bahwa slag tidak sepenuhnya terhapus, yang berpotensi memengaruhi sifat mekanik dari hasil pengelasan tersebut. Gambar 5 (a) merupakan hasil dari uji SEM yang menunjukkan perbesaran 24x yang dapat kita lihat distribusi ukuran belum terlihat bentuk permukaannya. Pada gambar 5 (b) keberadaan butiran pada permukaan slag inclusion tersebut terdapat penumpukan buih pada permukaan slag mengindikasikan adanya gas terperangkap selama proses pengelasan, yang bisa disebabkan oleh kelembapan, kontaminasi material, atau kawat las. Kehadiran buih ini dapat mempengaruhi kualitas sambungan las dengan menyebabkan porositas, mengurangi kekuatan mekanik dan integritas struktural. Penumpukan buih juga bisa menunjukkan bahwa parameter pengelasan, seperti arus, tegangan, dan kecepatan pengelasan yang dapat memiliki dampak signifikan terhadap integritas struktural dan kualitas antarmuka las pipa SA 106 Grade B. Oleh karena itu, pengamatan mendalam terhadap ukuran dan distribusi butiran ini pada tingkat perbesaran 150x memberikan wawasan dalam penilaian keseluruhan terhadap sambungan pengelasan dan dapat membantu dalam mengidentifikasi potensi cacat atau ketidaksempurnaan yang mungkin memengaruhi kinerja pipa dalam aplikasi industri.

4. KESIMPULAN

Pengamatan morfologi dengan menggunakan Mikroskop Elektron Pemindai (SEM) pada tingkat perbesaran 150x memberikan wawasan mendalam terhadap distribusi ukuran dan struktur butiran pada daerah las dengan inklusi slag. Identifikasi buih menumpuk pada permukaan slag inclusion menjadi poin kritis, karena dapat mempengaruhi kinerja mekanik dan kualitas antarmuka las. Kelembapan pada material atau kawat las, serta kontaminasi permukaan pipa sebelum pengelasan, dapat menyebabkan gas terbentuk dan terperangkap dalam slag, menghasilkan buih. Gas terperangkap ini menyebabkan porositas dalam sambungan las, mengurangi kekuatan mekanik dan integritas struktural, serta meningkatkan risiko retakan atau kegagalan. Parameter pengelasan yang tidak optimal (arus, tegangan, dan kecepatan) juga dapat meningkatkan pembentukan gas dan buih, mempengaruhi kualitas sambungan las. Oleh karena itu, pemahaman lebih lanjut terhadap potensi cacat atau ketidaksempurnaan ini diharapkan dapat membantu perbaikan proses pengelasan dan meningkatkan keandalan pipa SA 106 Grade B dalam aplikasi industri. Dengan mengevaluasi kondisi pengelasan, dapat diambil langkah-langkah perbaikan atau penyesuaian parameter untuk mengurangi atau mencegah pembentukan inklusi multiphase di masa mendatang. Informasi ini penting untuk memastikan keandalan dan keamanan pipa dalam aplikasi transportasi fluida pada suhu dan tekanan tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] T. Indrawati, T. P. Rahman, D. W. Nugroho, R. Ikono, dan N. T. Rochman, "Studi Ekstraksi Titania dari Slag Menggunakan Soda Ash pada Variasi Suhu Roasting," *Pros. Semirata FMIPA Univ. Lampung*, hal. 61–64, 2013.
- [2] M. Nofri dan A. Fardiansyah, "Analisis Sifat Mekanik Pipa Carbon Steel Grade a a106 Dan Grade B a53 Untuk Proses Produksi Pada Kilang Lng," *Bina Tek.*, vol. 14, no. 2, hal. 119, 2018, doi: 10.54378/bt.v14i2.335.
- [3] E. Martides dan G. G., "Pengaruh Proses in-Service Welding pada Nilai Kekerasan Sambungan," *Maj. Metal.*, no. 21, 2015.
- [4] M. A. Fitrah dan H. H. Utami, "Detection Of Slag Inclusions and Degree of Roughness In Welded Joints By Application Approach," *J. Sains dan Tek. Terap.*, vol. 1, no. 1, hal. 91–98, 2023.
- [5] A. L. V. Da Costa E Silva, "The effects of non-metallic inclusions on properties relevant to the performance of steel in structural and mechanical applications," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 8, no. 2, hal. 2408–2422, 2019, doi: 10.1016/j.jmrt.2019.01.009.
- [6] A. England, A. Toumpis, dan Y. Gorash, "Very High Cycle Fatigue of Welds: A Review," *Metals (Basel)*, vol. 13, no. 11, 2023, doi: 10.3390/met13111860.
- [7] F. Wurjaningrum dan A. R. Reynanda, "Pengaruh Perbaikan Kualitas Terhadap Kinerja Operasi Ukm Garmen Surabaya dengan Perbaikan Produktivitas sebagai Variabel Intervening," *Bul. Stud. Ekon.*, vol. 17, no. 2, hal. 116–132, 2012.
- [8] R. Islachiyana, A. Zunaidi, D. A. Puspitasari, dan D. Mahmudi, "Strategi Pengendalian Biaya Produksi : Analisis Perlakuan Akuntansi Produk Cacat di Usaha Kerajinan Terbang Bani Syafi ' i," in *Proceedings of Islamic Economics, Business, and Philanthropy*, 2023, vol. 2, no. 1, hal. 99–118.
- [9] H. H. Utami dan M. A. Fitrah, *Pengetahuan Bahan*, vol. 1, no. 1. 2023.
- [10] Ratna Kartikasari, Sutrisna Sutrisna, Suyitno Suyitno, dan Soekrisno Soekrisno, "Modifikasi Sifat Mekanik dan Ketahanan Korosi Paduan Fe-1,52Al-1,44C dengan Proses Tempiring," *J. Tek. Mesin*, vol. 10, no. 2, hal. 81–87, 2018, [Daring]. Tersedia pada: <http://puslit2.petra.ac.id/ejournal/index.php/mes/article/view/17819>.
- [11] R. P. Pratama, "APLIKASI WEBSEaRVER ESP8266 UNTUK PENGENDALI PERALATAN LISTRIK," *INVOTEK J. Inov. Vokasional dan Teknol.*, vol. 17, no. 2, hal. 39–44, 2017, doi: 10.24036/invotek.v17i2.87.
- [12] I. D. Pranowo, *Sistem dan Manajemen Pemeliharaan*, no. 6. 2019.
- [13] A. A. Sapriana dan Yunus, "Pengaruh Suhu PWHt Annealing Terhadap Kekuatan Bending dan Kekerasan Pipa ASTM 106 Grade B pada Pengelasan SMAW," *J. Tek. Mesin UNESA*, vol. 10, hal. 147–152, 2022.
- [14] Suherman, Rahmawaty, S. Mizhar, A. Latif, dan I. Abdullah, "Pengaruh Elektroda pada Sambungan Las Baja Sa106 Grade A Dengan Metode Pengaruh Elektroda pada Sambungan Las Baja Sa106 Grade A Dengan Metode SMAW," *Rotasi*, vol. 22, no. 4, hal. 246–252, 2020, doi: 10.14710/rotasi.22.4.246-252.

- [15] B. Yudianto, P. Wicaksana, J. Sudharto, K. UNDIP Tembalang, dan J. Tengah, “Analisis Cacat Hasil Pengelasan Pada Pipa ASTM A106 Grade B Menggunakan Magnetic Particle Test dan Liquid Penetrant Test di Workshop Las dan Inspeksi PPSDM Migas Cepu,” *J. ROTASI*, vol. 25, no. 2, hal. 54–60, 2023.
- [16] M. A. Fitrah, M. Ikhsan, dan H. H. Utami, “Analisis Leveled Surface Terhadap Diameter Nugget Las Pada Plat Stainless Steel 304 Proses Resistance Spot Welding (Rsw),” *J. Tematis (Teknologi, Manufaktur dan Ind.*, vol. 4, no. 2, hal. 2985–4946, 2023, [Daring]. Tersedia pada: <https://jurnal.politeknikbosowa.ac.id/index.php/TMT/article/view/414>.
- [17] N. A. Sasongko dan D. Yoesgiantoro, *ENERGI FOSIL*. 2023.
- [18] A. Ali, N. Zhang, dan R. M. Santos, “Mineral Characterization Using Scanning Electron Microscopy (SEM): A Review of the Fundamentals, Advancements, and Research Directions,” *Appl. Sci.*, vol. 13, no. 23, hal. 12600, 2023, doi: 10.3390/app132312600.
- [19] A. A. Tanjung, R. Gonzales, A. Seprianti, dan R. Izati, “Analisis Pemanfaatan Limbah Terak Nikel (Slag) sebagai Bahan Baku Pembuatan Shotcrete dan Penanganan Limbah Lumpur Nikel (Slurry) untuk Mengurangi Dampak Pencemaran Lingkungan,” *J. Migasian*, vol. 6, no. 2, hal. 11–22, 2022, doi: 10.36601/jm.v6i2.214.
- [20] J. Iswardoyo, “Studi Pemanfaatan Steel Slag Sebagai Bahan Bangunan Sabodam,” *Stud. Pemanfaat. Steel Slag Sebagai Bahan Bangunan SABODAM (Jati Iswardoyo)*, vol. 7, no. 2, hal. 131–146, 2016, [Daring]. Tersedia pada: <https://jurnalh.pusair-pu.go.id/index.php/JTH/article/download/564/440>.
- [21] S. J. Price dan R. B. Figueira, “Corrosion protection systems and fatigue corrosion in offshore wind structures: Current status and future perspectives,” *Coatings*, vol. 7, no. 2, hal. 1–51, 2017, doi: 10.3390/coatings7020025.
- [22] N. R. Mandal, *Welding Defects*. 2017.
- [23] B. K. Srivastava, “A Review on Effect of Arc Welding Parameters on Mechanical Behaviour of Ferrous Metals / Alloys,” *Int. J. Eng. Sci. Technol.*, vol. 2, no. 5, hal. 1425–1432, 2017.
- [24] T. E. Alam, “Metal Oxide Graphene Nanocomposites for Organic and Heavy Metal Remediation,” University of South Florida, 2012.
- [25] A. Sumesh, L. V. S. Ramnadh, P. Manish, V. Harnath, dan V. Lakshman, “A Computational approach in optimizing process parameters of GTAW for SA 106 Grade B steel pipes using Response surface methodology,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 149, no. 1, 2016, doi: 10.1088/1757-899X/149/1/012038.