

Analisa Cacat Las GMAW Pada Proses Pabrikasi Bak Dump Truck Menurut AWS D1.1 2015 Dengan Metode Inspeksi Visual di PT Metalindo Teknik Utama

Dani Nugraha Pratama*, Rizal Hanifi, Ratna Dewi Anjani

Program Studi Teknik Mesin, Universitas Singaperbangsa Karawang, Jawa Barat

*Koresponden email: pratamadaninugraha@gmail.com

Diterima: 22 November 2025

Disetujui: 27 November 2025

Abstract

The welding quality of dump truck fabrication plays a crucial role in ensuring structural strength and production reliability. The Gas Metal Arc Welding (GMAW) process has the potential to generate welding defects when welding parameters and material preparation are not properly controlled. This study aims to identify welding defects occurring in the fabrication process at PT Metalindo Teknik Utama and to evaluate their acceptance based on the AWS D1.1:2015 criteria through visual inspection. Visual inspection was conducted on several weld joints using a welding gauge and vernier caliper to measure undercut depth, reinforcement height, and surface defects. The results show six types of welding defects, namely undercut, spatter, porosity, pin hole, surface cold lap, and excessive capping. According to AWS D1.1:2015, three defects were classified as rejected (undercut of 1.25 mm, pin hole >3 mm, and 4 mm capping), while spatter, porosity, and surface cold lap were considered accepted. These defects were mainly caused by improper welding parameters, insufficient welding technique control, and inadequate surface preparation. Corrective actions such as grinding, gouging, and re-welding were applied. The results indicate that visual inspection based on AWS D1.1:2015 is effective in evaluating weld quality and supporting improvement in the production process.

Keywords: AWS D1.1:2015, gas metal arc welding, dump truck, metalindo teknik utama, visual inspection

Abstrak

Kualitas sambungan pengelasan pada pabrikasi bak *dump truck* sangat menentukan kekuatan konstruksi. Proses *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) berpotensi menimbulkan cacat las apabila parameter pengelasan dan persiapan material tidak sesuai. Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi jenis cacat pengelasan pada proses pabrikasi di PT Metalindo Teknik Utama serta mengevaluasi kesesuaiannya dengan *acceptance criteria* AWS D1.1:2015 melalui inspeksi visual. Pengamatan dilakukan secara langsung pada beberapa titik sambungan menggunakan *welding gauge* dan jangka sorong untuk mengukur kedalaman *undercut*, tinggi *capping*, serta ukuran cacat permukaan. Hasil inspeksi menunjukkan enam jenis cacat, yaitu *undercut*, *spatter*, *porosity*, *pin hole*, *surface cold lap*, dan *capping* berlebih. Berdasarkan standar AWS D1.1:2015, tiga cacat dinyatakan *rejected* (*undercut* 1,25 mm, *pin hole* >3 mm, dan *capping* 4 mm), sedangkan *spatter*, *porosity*, dan *surface cold lap* masih *accepted*. Cacat tersebut terutama disebabkan oleh ketidaksesuaian parameter pengelasan dengan WPS, teknik pengelasan yang kurang terkontrol, serta kondisi permukaan material yang tidak optimal. Perbaikan dilakukan melalui grinding, gouging, dan pengelasan ulang. Hasil ini menunjukkan bahwa inspeksi visual berbasis standar AWS D1.1:2015 efektif dalam mengevaluasi kualitas pengelasan dan mendukung peningkatan proses produksi.

Kata Kunci: AWS D1.1:2015, gas metal arc welding, dump truk, metalindo teknik utama, inspeksi visual

1. Pendahuluan

Industri otomotif, khususnya pada bidang karoseri kendaraan berat, terus berkembang seiring meningkatnya kebutuhan transportasi dan logistik di Indonesia. Perkembangan ini mendorong perusahaan untuk meningkatkan kualitas produksinya, termasuk pada proses penyambungan material logam melalui pengelasan [1], [2]. PT Metalindo Teknik Utama, sebagai salah satu produsen karoseri yang memproduksi sekitar 100 unit dump truck setiap bulan, menggunakan metode *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) sebagai proses pengelasan utama dalam pembuatan produknya. GMAW merupakan teknik pengelasan yang memanfaatkan busur listrik sebagai sumber panas, dengan kawat gulung yang terus terumpan sebagai elektroda, serta gas pelindung untuk menjaga logam cair dari kontaminasi udara [3]. Metode ini dipilih

karena prosesnya cepat, efisien, dan dapat menghasilkan sambungan yang bersih tanpa slag [4]. Namun, seperti proses pengelasan lainnya, GMAW tetap berpotensi menghasilkan cacat las yang dapat memengaruhi kekuatan dan keamanan struktur [1], [5].

Cacat las adalah ketidaksempurnaan pada hasil pengelasan yang dapat menurunkan kekuatan sambungan dan umur pakai komponen [6]. Beberapa cacat umum yang sering muncul dalam proses GMAW antara lain *undercut*, *porosity*, *lack of fusion*, *crack*, *spatter*, dan *underfill* [7]. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa *porosity* dan *pin hole* pada hasil GMAW banyak dipengaruhi oleh parameter arus, kecepatan pengelasan, dan perlindungan gas [1], [2], [3]. Karena itu, identifikasi dini terhadap cacat-cacat tersebut sangat penting agar produk tetap memenuhi standar kualitas.

Dalam proses kontrol kualitas, inspeksi visual menjadi metode *Non-Destructive Testing* (NDT) yang paling mudah, murah, dan biasanya dilakukan pertama kali sebelum metode inspeksi lainnya [8]. Inspeksi ini dapat menemukan berbagai cacat permukaan seperti crack, undercut, porosity, spatter, dan masalah bentuk geometri lainnya tanpa merusak komponen [9]. Keberhasilan inspeksi visual sangat bergantung pada kemampuan *inspector*, kondisi pencahayaan, serta pemahaman terhadap kriteria penerimaan yang digunakan [10]. Selain itu, beberapa penelitian terkini menunjukkan bahwa teknologi *image processing* dan *deep learning* mulai diterapkan untuk meningkatkan akurasi inspeksi visual pada proses pengelasan [4], [11], [12], [13].

Standar AWS D1.1:2015 dari *American Welding Society* menyediakan pedoman lengkap mengenai *acceptance criteria* untuk berbagai jenis cacat pada struktur baja [6]. Standar ini menjelaskan batas toleransi cacat yang masih dapat diterima serta prosedur perbaikan jika cacat tersebut tidak memenuhi persyaratan. Penerapan standar ini sangat penting, terutama pada komponen kritis seperti bak dump truck yang bekerja menahan beban berat dan harus aman digunakan [14].

Di industri karoseri, cacat las pada proses GMAW masih menjadi masalah yang sering muncul dan dapat mengurangi kualitas produk. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa ketidaksesuaian parameter pengelasan dan kurangnya kompetensi operator menjadi penyebab utama tingginya cacat produksi [1], [2], [5], [7]. Di PT Metalindo Teknik Utama, belum ada kajian menyeluruh mengenai jenis cacat yang paling sering terjadi, penyebabnya, serta apakah cacat tersebut sudah sesuai dengan *acceptance criteria* standar internasional. Tanpa kajian ini, ada kemungkinan produk cacat lolos ke tahap produksi berikutnya atau bahkan sampai ke konsumen, yang pada akhirnya bisa membahayakan keselamatan dan merusak reputasi perusahaan [11], [12].

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini berfokus pada empat hal utama, yaitu bagaimana prosedur inspeksi visual pengelasan diterapkan pada pabrikasi bak dump truck di PT Metalindo Teknik Utama, jenis-jenis cacat las yang muncul pada proses GMAW, kesesuaian cacat tersebut dengan *acceptance criteria* AWS D1.1:2015, serta faktor penyebab terjadinya cacat dan metode perbaikan yang paling tepat untuk mengatasinya. Penelitian ini bertujuan untuk mendeskripsikan prosedur inspeksi visual yang dilakukan pada proses pengelasan bak dump truck, menganalisis jenis cacat las yang terjadi pada pengelasan GMAW untuk material plat SPHC-PO tebal 6 mm, mengevaluasi apakah cacat yang ditemukan memenuhi standar penerimaan AWS D1.1:2015, serta mengidentifikasi penyebab cacat dan memberikan rekomendasi metode perbaikan sesuai standar agar kualitas hasil pengelasan dapat meningkat [1], [4], [6], [11].

2. Metode Penelitian

Kegiatan kerja praktik dan pengambilan data dilakukan di PT Metalindo Teknik Utama, yang berlokasi di Jl. Akses Tol Karawang Timur, Desa Anggadita, Kecamatan Klari, Kabupaten Karawang, Jawa Barat. Pengamatan proses pengelasan dan inspeksi visual dilaksanakan selama periode 12 Mei hingga 11 Juni 2022. Penelitian ini menggunakan beberapa jenis bahan serta peralatan utama dan pendukung. Rincian lengkap mengenai spesifikasi bahan dan peralatan tersebut disajikan pada tabel berikut:

Tabel 1. Bahan Penelitian

No	Bahan	Spesifikasi / Keterangan
1	Material utama	Mild steel tipe SPHC-PO, ketebalan 6 mm, digunakan untuk pabrikasi bak dump truck karena memiliki <i>formability</i> dan <i>weldability</i> yang baik.
2	Filler welding	Jenis AWS A5.18 NK58
		Diameter kawat: 0,8 mm
		Rentang arus: 60–150 A

No	Bahan	Spesifikasi / Keterangan
3	Gas pelindung	Gas CO ₂ , digunakan untuk mencegah kontaminasi udara selama proses pengelasan.

Tabel 2. Peralatan Penelitian

No	Peralatan	Spesifikasi / Fungsi
1	Mesin las GMAW (MIG/MAG 350 KR)	Arus: 50–350 A; Tegangan input: 380 V; Frekuensi: 50/60 Hz
2	Peralatan pendukung pengelasan	Palu terak, sikat baja, tang, klem
3	Peralatan inspeksi visual	Welding gauge (pengukuran <i>reinforcement</i> , <i>undercut</i> , <i>leg length</i> , <i>throat</i>), jangka sorong, lampu inspeksi

Metode penelitian ini menggunakan inspeksi visual (*Visual Testing/VT*) sesuai standar AWS D1.1:2015 untuk menilai kualitas hasil pengelasan pada pabrikasi bak dump truck. Inspeksi visual dilakukan dalam tiga tahap, yaitu sebelum, saat, dan setelah pengelasan. Pada tahap sebelum pengelasan, dilakukan pemeriksaan kondisi material, persiapan permukaan, penentuan parameter pengelasan berdasarkan *Welding Procedure Specification* (WPS), pemilihan filler dan gas pelindung, serta pengecekan kesiapan mesin las dan perkakas. Tahap ini bertujuan memastikan seluruh persiapan sesuai prosedur agar potensi cacat dapat diminimalkan sejak awal.

Selama proses pengelasan, inspeksi dilakukan dengan mengamati kesesuaian parameter pengelasan dengan WPS, seperti arus, voltase, jenis filler, gas pelindung, teknik pengelasan, dan kecepatan gerak. Selain itu, kondisi busur las, kebersihan setiap lapisan, serta pembentukan crater, undercut, spatter, dan kontur manik las turut diperhatikan. Welding inspector memastikan bahwa setiap lapisan las telah memenuhi standar sebelum proses dilanjutkan ke tahap berikutnya.

Setelah pengelasan selesai, dilakukan inspeksi akhir menggunakan *welding gauge* dan jangka sorong untuk menilai tinggi *reinforcement*, kedalaman undercut, ukuran leg length dan throat pada fillet weld, serta mendeteksi cacat permukaan seperti porosity, pinhole, spatter, dan *cold lap*. Hasil pemeriksaan kemudian dibandingkan dengan *acceptance criteria* AWS D1.1:2015 untuk menentukan apakah sambungan masih diterima atau perlu perbaikan.

Pada tahap analisis data, seluruh hasil inspeksi dikelompokkan berdasarkan jenis cacat las yang ditemukan. Setiap cacat dinilai kelayakannya menggunakan tabel acceptance criteria, dan apabila tidak memenuhi standar maka dinyatakan reject. Cacat tersebut selanjutnya direkomendasikan untuk diperbaiki melalui proses repair seperti grinding, *gouging*, atau pengelasan ulang sesuai prosedur WPS agar kualitas sambungan dapat dipulihkan.

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil Inspeksi Visual Pengelasan

Inspeksi visual dilakukan pada beberapa titik sambungan pengelasan bak dump truck menggunakan *welding gauge* dan jangka sorong untuk mengukur parameter cacat seperti kedalaman *undercut*, tinggi *capping*, ukuran *porosity*, serta kondisi permukaan las. Pemeriksaan dilakukan setelah proses pengelasan selesai dengan fokus pada area yang memiliki potensi cacat berdasarkan bentuk manik las dan perubahan warna pada *heat affected zone* (HAZ).

Berdasarkan hasil pengamatan, ditemukan enam jenis cacat pengelasan, yaitu *undercut*, *spatter*, *porosity*, *pin hole*, *surface cold lap*, dan *capping* berlebih. Setiap cacat memiliki karakteristik visual yang berbeda dan didokumentasikan sebagai berikut:

Pada **Gambar 1** terlihat alur cekungan sepanjang tepi manik las pada logam induk, dengan bentuk memanjang dan tidak terisi logam las. Kedalaman terukur menunjukkan 1,25 mm, melebihi batas maksimum 1 mm menurut AWS D1.1:2015. Kondisi ini berpotensi menjadi titik konsentrasi tegangan dan melemahkan sambungan.



Gambar 1. Cacat *Undercut*



Gambar 2. Cacat *Spatter*

Gambar 1 – 2 tersebut menunjukkan tampak bintang-bintang logam kecil yang menempel di sekitar area las akibat percikan logam cair. Spatter dapat dibersihkan secara mekanis dan tidak mengganggu struktur sambungan sehingga masih dapat diterima.



Gambar 3. Cacat *Porosity*

Pada **Gambar 3** terlihat rongga-rongga kecil berbentuk titik atau *cluster* pada permukaan manik las dengan ukuran sekitar 9,5 mm. Porositi ini terjadi akibat gas terjebak saat pembekuan logam las. Meskipun tampak pada permukaan, posisinya tidak mengganggu jalur penetrasi utama sehingga masih memenuhi kriteria penerimaan.



Gambar 4. Cacat *Pin Hole*

Gambar 4 terlihat lubang kecil tunggal dengan kedalaman lebih dari 3 mm pada permukaan las. Bentuknya menyerupai *porosity* namun lebih dalam dan terlokalisasi, sehingga berpotensi menjadi awal retak. Cacat ini dinyatakan tidak dapat diterima menurut AWS D1.1:2015.



Gambar 5. *Surface Cold Lap*

Gambar 5 ditandai dengan logam las yang menumpang pada permukaan logam induk tanpa menyatu sempurna. Secara visual tampak seperti lapisan yang mengalir di atas permukaan tanpa fusi yang baik. Cacat ini diterima karena tidak menunjukkan indikasi *lack of fusion* yang signifikan.



Gambar 6. *Capping Berlebih*

Gambar 6 tinggi *reinforcement* mencapai 4 mm, melebihi batas maksimum 3 mm. Secara visual terlihat tonjolan manik las yang terlalu tinggi dan tidak rata, sehingga berpotensi menyebabkan konsentrasi tegangan dan interferensi pemasangan komponen.

Penilaian Hasil Inspeksi Berdasarkan Acceptance Criteria AWS D1.1:2015

Penilaian kecacatan dilakukan dengan membandingkan ukuran cacat terhadap batas penerimaan menurut AWS D1.1:2015. Hasil evaluasi ditunjukkan pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Penilaian Cacat Las Berdasarkan Acceptance Criteria AWS D1.1:2015

No	Jenis Cacat	Ukuran Terukur	Batas Maksimum AWS D1.1	Status
1	<i>Undercut</i>	1,25 mm	1 mm	<i>Rejected</i>
2	<i>Spatter</i>	-	Dapat diterima jika dapat dibersihkan	<i>Accepted</i>
3	<i>Porosity</i>	9,5 mm	Diizinkan jika tidak mengganggu struktur	<i>Accepted</i>
4	<i>Pin Hole</i>	> 3 mm	Tidak diizinkan	<i>Rejected</i>
5	<i>Surface Cold Lap</i>	-	Diizinkan jika tidak menyebabkan lack of fusion	<i>Accepted</i>
6	<i>Capping</i>	4 mm	3 mm	<i>Rejected</i>

Tabel 2 menunjukkan bahwa tiga cacat dinyatakan rejected, yaitu *undercut*, *pin hole*, dan *capping* berlebih karena melampaui batas penerimaan. Sementara itu, *spatter*, *porosity*, dan *surface cold lap* masih memenuhi kriteria penerimaan.

Analisis Penyebab Cacat Pengelasan

Analisis menunjukkan bahwa cacat pengelasan muncul akibat beberapa faktor utama. Dari sisi operator, kurangnya keterampilan welder dalam mengatur ayunan elektroda, panjang busur, dan kecepatan

pengelasan menyebabkan munculnya *undercut*, *capping* berlebih, dan *spatter*. Selain itu, pengaturan parameter pengelasan yang tidak sesuai dengan WPS, seperti arus dan kecepatan pengelasan yang tidak optimal, menimbulkan *porosity* dan penetrasi yang tidak merata. Faktor lingkungan dan kondisi material juga berperan, terutama ketika permukaan logam terkontaminasi minyak, debu, atau kelembapan yang membuat gas terjebak dan menghasilkan pin hole serta *porosity*. Temuan ini konsisten dengan literatur yang menyebutkan bahwa arus, kecepatan, kebersihan material, dan keterampilan welder merupakan faktor dominan penyebab cacat pada proses GMAW [2],[6].

Metode Perbaikan Cacat (*Repair*)

Perbaikan dilakukan pada setiap cacat yang dinyatakan *rejected* sesuai standar AWS D1.1:2015. Cacat *undercut* diperbaiki dengan membersihkan area menggunakan *wire brush* kemudian mengisi ulang bagian yang bermasalah menggunakan stringer bead sesuai WPS. Untuk cacat *pin hole*, perbaikan dilakukan dengan chipping atau gouging hingga cacat benar-benar hilang sebelum dilakukan pengelasan ulang. Sementara itu, *capping* berlebih ditangani dengan proses grinding untuk meratakan permukaan sambungan, dan apabila diperlukan dilanjutkan dengan pengelasan ulang. Semua metode ini mengikuti prosedur repair yang mewajibkan penghilangan cacat terlebih dahulu sebelum proses pengelasan kembali dilakukan.

Berdasarkan hasil pengamatan, kualitas pengelasan pada pabrikasi bak dump truck masih memerlukan peningkatan, terutama dalam pengendalian parameter pengelasan dan kompetensi welder. Banyaknya cacat *undercut* dan *pin hole* menunjukkan bahwa kontrol heat input dan teknik pengelasan belum berjalan optimal. Selain itu, tidak adanya sistem monitoring otomatis menyebabkan kualitas las antar titik menjadi tidak konsisten, yang pada akhirnya meningkatkan biaya produksi karena banyaknya pekerjaan perbaikan. Oleh karena itu, penerapan parameter pengelasan yang sesuai standar, peningkatan pelatihan welder, serta penguatan prosedur inspeksi menjadi langkah penting untuk meningkatkan kualitas sambungan dan menurunkan tingkat cacat.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil inspeksi visual proses pengelasan pada pabrikasi bak dump truck di PT Metalindo Teknik Utama menggunakan standar AWS D1.1:2015, dapat disimpulkan bahwa masih ditemukan beberapa jenis cacat pengelasan pada sambungan GMAW, yaitu *undercut*, *spatter*, *porosity*, *pin hole*, *surface cold lap*, dan *capping* berlebih. Hasil penilaian menunjukkan bahwa tiga jenis cacat dinyatakan *rejected*, yaitu *undercut* dengan kedalaman 1,25 mm, *pin hole* dengan kedalaman lebih dari 3 mm, serta *capping* berlebih setinggi 4 mm karena melampaui batas penerimaan standar. Sementara itu, cacat *spatter*, *porosity*, dan *surface cold lap* masih berada dalam kategori *accepted* karena tidak mempengaruhi integritas struktur sambungan.

Cacat yang ditemukan terutama disebabkan oleh ketidaksesuaian parameter pengelasan dengan WPS, kurangnya kontrol teknik pengelasan oleh welder, serta kondisi permukaan material yang kurang bersih. Hal ini menunjukkan bahwa kualitas pengelasan masih perlu ditingkatkan melalui pengendalian parameter proses, peningkatan kompetensi welder, dan optimalisasi persiapan material.

Perbaikan terhadap cacat yang ditolak dilakukan dengan metode grinding, gouging, dan pengelasan ulang sesuai prosedur, sehingga kualitas sambungan dapat ditingkatkan. Dengan demikian, penerapan inspeksi visual berbasis standar AWS D1.1:2015 terbukti efektif dalam mengevaluasi kualitas hasil pengelasan serta memberikan dasar untuk tindakan perbaikan pada proses produksi.

5. Ucapan Terimakasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada PT Metalindo Teknik Utama yang telah memberikan kesempatan, fasilitas, serta bimbingan selama pelaksanaan kerja praktik dan pengambilan data. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada Universitas Buana Perjuangan Karawang, khususnya dosen pembimbing dan pihak program studi yang telah memberikan arahan, dukungan, serta kesempatan dalam pelaksanaan kegiatan ini. Semoga kerja sama dan ilmu yang diperoleh dapat memberikan manfaat bagi semua pihak.

6. Singkatan

GMAW	Gas Metal Arc Welding
MIG/MAG	Metal Inert Gas / Metal Active Gas
AWS	American Welding Society

WPS	<i>Welding Procedure Specification</i>
VT	<i>Visual Testing</i>
HAZ	<i>Heat Affected Zone</i>
SPHC-PO	<i>Steel Plate Hot Rolled – Pickled and Oiled</i>
CO ₂	<i>Carbon Dioxide</i>

7. Daftar Pustaka

- [1] M. García-Gómez, F. F. Curiel-López, J. J. Taha-Tijerina, V. H. López-Morelos, J. C. Verduzco-Juárez, and C. A. García-Ochoa, “Reduction in Porosity in GMAW-P Welds of CP780 Galvanized Steel with ER70S-3 Electrode Using the Taguchi Methodology,” *Metals*, vol. 14, no. 8, p. 857, Jul. 2024.
- [2] J. C. Garcia-Guerrero et al., “Impact of Welding Parameters in the Porosity of a Dissimilar Welded Lap Joint of CP800-XP1000 Steel Weldment by GMAW-P,” *Metals*, vol. 14, no. 3, p. 309, Mar. 2024.
- [3] C. A. García-Ochoa, J. A. Verduzco-Martínez, F. F. Curiel-López, and M. García-Gómez, “Advanced Porosity Control of CP780 Galvanized Steel During Gas Metal Arc Welding with Pulsed Arc,” *Metals*, 2025.
- [4] I. Díaz-Cano et al., “Automated Fillet Weld Inspection Based on Deep Learning from 2D Images,” *Applied Sciences*, vol. 15, no. 2, p. 899, Jan. 2025.
- [5] T. T. Bilgin, M. S. Kunduracı, A. Metin, M. Payar, and E. Nayir, “Application of Artificial Intelligence Techniques for Defect Prevention and Quality Control in Arc Welding Processes: A Comprehensive Review,” *Middle East Journal of Science*, vol. 10, no. 2, pp. 179–206, 2024.
- [6] T. W. Purnomo, F. Danitasari, and D. Handoko, “Weld Defect Detection and Classification based on Deep Learning Method: A Review,” *J. Ilmu Komputer dan Informasi*, vol. 16, no. 1, pp. 77–87, Mar. 2023.
- [7] G. Stemmer et al., “Unsupervised Welding Defect Detection Using Audio and Video,” *arXiv preprint*, Sep. 2024.
- [8] Y. Hahn et al., “Towards a Deep Learning-based Online Quality Prediction System for Welding Processes,” *arXiv preprint*, Oct. 2023.
- [9] E. Bulut and E. Görgün, “A New Approach to Non-Destructive Testing Using OpenCV-Based Image Processing,” *Black Sea Journal of Engineering and Science*, vol. 8, no. 4, pp. 1152–1159, Jul. 2025.
- [10] L. Nele, G. Mattera, and M. Voza, “Deep Neural Networks for Defects Detection in Gas Metal Arc Welding,” *Applied Sciences*, vol. 12, no. 7, p. 3615, Apr. 2022.
- [11] A. Fajrin, L. G. Juangsa Putra, and R. Sutrisno, “NDT Testing with Visual Testing Method in the Inside Upper Frame 6015 Area with GMAW Welding Based on 1E0099,” *J. Mech. Eng. Sci. Innov.*, 2025.
- [12] J. Zhang, “A review of algorithms for surface defect detection in welds,” *Expert Systems with Applications*, 2025.
- [13] “Impact of Cyber-Physical Systems on Enhancing Gas Metal Arc Welding Operations: A Critical Review,” *TechRxiv preprint*, 2024.
- [14] M. García-Gómez et al., “Reduction in Porosity in GMAW-P Welds of CP780 Galvanized Steel Using the Taguchi Methodology,” *Metals*, 2024.
- [15] I. Díaz-Cano et al., “Automated Fillet Weld Inspection ... YOLOv8,” *Applied Sciences*, 2025.