https://doi.org/10.56862/irajtma.v4i3.334

IRA Jurnal Teknik Mesin dan Aplikasinya (IRAJTMA)

Vol. 4, No. 3, 2025, pp. 143-152, e-ISSN: 2962-4290

Available online http://e-journals.irapublishing.com/index.php/IRAJTMA/

Scientific Articles

Analisis Cacat Las SMAW dengan Elektroda Berbeda Posisi 2G pada Baja ST 37 Metode FTA

Analysis of SMAW Weld Defects Using Different Electrodes in 2G Position on ST 37 Steel by FTA Method

Iman Pradana A. Assagaf[1*], Ariyanto[1], Angger Bagus Prasetyo[2], Muhammad Aqdar Fitrah[3]

[1]Teknik Manufaktur Industri Agro, Politeknik ATI Makassar, Makassar, Sulawesi Selatan 90245, Indonesia

[2]Teknik Mesin, Universitas Tidar, Magelang, Jawa Tengah 56116, Indonesia

[3]Teknik Perawatan Mesin, Akademi Komunitas Manufaktur Bantaeng, Sulawesi Selatan 92461, Indonesia

**Corresponding author*: iman.pradana@atim.ac.id

Diterima: 06-10-2025 **Disetujui: 20-11-2025** **Dipublikasikan: 28-12-2025**

IRAJTMA is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis jenis dan penyebab cacat las yang terjadi pada proses pengelasan SMAW dengan variasi elektroda pada posisi 2G menggunakan material baja ST 37. Penelitian dilakukan oleh mahasiswa Program Studi Diploma III Teknik Manufaktur Industri Agro, Politeknik ATI Makassar, dengan pendekatan kualitatif dan kuantitatif. Sebanyak 10 sampel hasil pengelasan diuji secara visual dan melalui metode uji penetrant cair untuk mendeteksi cacat permukaan. Analisis dilakukan menggunakan metode Fault Tree Analysis (FTA) dengan pendekatan deduktif untuk mengidentifikasi top event berupa cacat utama, menelusuri penyebab mendasar melalui struktur pohon kesalahan menggunakan gerbang logika AND dan OR, serta menganalisis hubungan antar faktor penyebab. Hasil penelitian menunjukkan lima jenis cacat dominan, yaitu spatter, stop-start, surface undercut, root concavity, dan blow hole, yang berkontribusi sebesar 61,7% dari total cacat. Cacat tersebut disebabkan oleh faktor teknis seperti ketidakstabilan busur listrik, kesalahan sudut dan kecepatan pengelasan, serta kebersihan elektroda dan material yang kurang terjaga. Jenis cacat lain seperti root undercut, cold lap, excessive penetration, pin hole, dan porosity juga memengaruhi mutu sambungan las. Berdasarkan hasil FTA, direkomendasikan perbaikan melalui pelatihan ulang, pengaturan parameter pengelasan, perawatan peralatan, serta peningkatan pengawasan langsung untuk meningkatkan kualitas hasil pengelasan.

Kata Kunci: Pengelasan, Posisi 2G, *Fault Tree Analysis*, Cacat las.

Abstract

This study aims to analyze the types and causes of welding defects that occur during Shielded Metal Arc Welding (SMAW) using different electrodes in the 2G position on ST 37 steel. The research was conducted by students of the Diploma III Industrial Agro-Manufacturing Engineering Study Program at Politeknik ATI Makassar using both qualitative and quantitative approaches. A total of 10 welded samples were visually examined and tested using the liquid penetrant method to detect surface defects. The analysis employed the Fault Tree Analysis (FTA) method with a deductive approach to identify the top events representing major defect types, trace their root causes through the fault tree structure using AND and OR logic gates, and analyze the relationships among contributing factors. The results revealed five dominant defect types—spatter, stop-start, surface undercut, root concavity, and blow hole—which accounted for 61.7% of all detected defects. These defects were primarily caused by technical factors, including unstable arc control, improper welding angles and travel speeds, and poor cleanliness of electrodes and materials. Other defects, including root undercut, cold lap, excessive penetration, pin hole, and porosity, also affected weld quality. Based on the FTA findings, corrective actions were recommended, including operator retraining, proper parameter adjustment, equipment maintenance, and enhanced supervision to improve overall weld quality.

Keywords: *Welding Position 2G, Fault Tree Analysis, Weld Defects.*

1. Pendahuluan

Perkembangan zaman yang pesat, baik di sektor industri manufaktur maupun jasa, menuntut setiap perusahaan untuk mampu beradaptasi dan bersaing agar tetap kompetitif dan bertahan di pasar (Rathinasuriyan et al. 2023; Kumar Katheria et al. 2020). Politeknik ATI Makassar, sebagai perguruan tinggi vokasi negeri di Indonesia, memegang peran strategis dalam pengembangan sumber daya manusia (SDM) yang kompeten dan selaras dengan kebutuhan dunia industri, khususnya pada sektor logam dan manufaktur (Setiawan, Salam, and Adi 2023; A. Y. W. Putra and Wijanarka 2019). Salah satu kompetensi yang sangat dibutuhkan dalam sektor tersebut adalah pengelasan (welding), mengingat perannya yang vital dalam proses konstruksi dan produksi (Mazur 2017). Oleh karena itu, pembekalan keterampilan dan pengetahuan teknis di bidang pengelasan perlu dilakukan secara terarah dan berbasis standar industri (Kifta et al. 2023).

Dalam pengelasan baja karbon rendah, *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW) merupakan salah satu metode yang paling umum digunakan karena memiliki biaya relatif rendah dan lebih mudah diterapkan dibandingkan teknik pengelasan (Kumar Katheria et al. 2020; Kumar and Singh 2019). Proses ini diatur oleh *Welding Procedure Specification* (WPS), yaitu dokumen resmi yang menetapkan prosedur dan parameter teknis untuk menjamin konsistensi serta kualitas hasil las (Aini et al. 2024). WPS memuat informasi penting seperti jenis proses pengelasan, suhu maksimum, ketebalan material, arus, tegangan, kecepatan pengelasan, dan nilai heat input yang diperbolehkan (Öberg and Åstrand 2018). Apabila proses pengelasan tidak mengikuti prosedur yang tepat, risiko munculnya cacat las seperti porositas, retakan, dan deformasi akan meningkat, yang berdampak pada penurunan kualitas sambungan secara mekanis maupun visual(Sheikh and Kamble 2008; Endramawan and Sifa 2018). Cacat-cacat tersebut dapat mengurangi integritas struktural serta daya tahan komponen, sehingga pengendalian mutu menjadi faktor krusial dalam keberhasilan konstruksi berbasis logam (Chiong et al. 2019; Hariprasath et al. 2022).

Salah satu metode yang dapat digunakan untuk menganalisis dan mengidentifikasi penyebab cacat pengelasan adalah *Fault Tree Analysis* (FTA). FTA merupakan metode analisis sistematis yang memetakan hubungan logis antar penyebab potensial suatu kegagalan dalam bentuk diagram pohon (Wessiani and Yoshio 2018). Melalui penerapan FTA, penyebab dasar dari suatu kegagalan dapat diidentifikasi dan digunakan untuk merancang langkah pencegahan yang efektif (Nikolic et al. 2020). Pendekatan ini telah banyak diterapkan, misalnya untuk mengevaluasi keandalan struktur las bucket wheel excavators (Arsic et al. 2022), mengurangi tingkat cacat pada proses resistance spot welding (Pontororing, Gilbert, and Andika 2018) serta menganalisis kegagalan pada proses orbital TIG welding dan sistem pulsating heat pipe (Hulse et al. 2023; Karthikeyan, Naikan, and Narayan 2017). Selain itu, FTA juga efektif digunakan di industri otomotif untuk mengidentifikasi faktor manusia dan proses sebagai penyebab utama cacat las, serta sebagai dasar rekomendasi peningkatan pelatihan operator (Kholil 2024).

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis jenis dan penyebab cacat las pada proses pengelasan SMAW dengan variasi elektroda pada posisi 2G menggunakan material baja ST 37, yang dilaksanakan oleh mahasiswa Program Studi Diploma III Teknik Manufaktur Industri Agro, Politeknik ATI Makassar. Selain itu, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi akar penyebab cacat melalui penerapan metode FTA guna merumuskan rekomendasi perbaikan yang dapat meningkatkan kualitas hasil pengelasan. Nilai orisinalitas penelitian ini terletak pada penerapan metode FTA dalam analisis cacat las pada proses SMAW dengan variasi elektroda dan posisi 2G di lingkungan pendidikan vokasi pendekatan yang masih jarang diterapkan. Dengan demikian, hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan

kontribusi nyata terhadap peningkatan mutu pembelajaran praktik pengelasan serta memperkuat kompetensi dan kesiapan sumber daya manusia di sektor industri manufaktur.

2. Metode

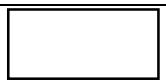
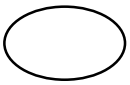
Penelitian ini menerapkan pendekatan gabungan antara metode kualitatif dan kuantitatif yang dilaksanakan di Workshop Pengelasan Politeknik ATI Makassar. Sebanyak 10 sampel hasil pengelasan mahasiswa digunakan sebagai dasar validasi data dalam analisis FTA. Proses pengelasan dilakukan pada posisi 2G dengan menggunakan material baja ST 37 berukuran 300 mm × 150 mm × 10 mm. Parameter pengelasan yang digunakan ditampilkan pada Tabel 1. Evaluasi kualitas hasil las dilakukan melalui pemeriksaan visual untuk menilai penampilan dan dimensi las, sedangkan deteksi cacat dilakukan menggunakan metode uji penetrant cair pada setiap spesimen pengelasan.

Tabel 1. Tabel Parameter Pengelasan

Layer	Proses	Jenis Elektroda	Diameter (mm)	Polaritas	Arus (A)
Root Pass	SMAW	E-7016	2,6	DCRP	60-90
Fill Pass	SMAW	E6013	3,2	DCRP	90-120
Capping pas	SMAW	E6013	3,2	DCRP	90-120

Sebelum dilakukan analisis FTA, data terlebih dahulu diolah melalui beberapa tahapan agar hasil analisis valid dan terarah. Proses diawali dengan pengumpulan data melalui pengujian visual test dan uji penetrant cair terhadap hasil pengelasan SMAW menggunakan elektroda berbeda pada posisi 2G. Data yang terkumpul kemudian digunakan untuk mengidentifikasi dan mengklasifikasikan jenis cacat las berdasarkan standar seperti AWS D1.1, meliputi *porosity*, *undercut*, dan cacat lainnya. Setiap cacat las ditabulasi dan dihitung frekuensinya untuk menentukan cacat dominan yang menjadi fokus analisis. Selanjutnya dilakukan analisis faktor penyebab yaitu faktor manusia, parameter pengelasan, peralatan dan lingkungan kerja untuk menelusuri penyebab langsung maupun tidak langsung dari cacat yang terjadi. Pengolahan dan analisis data dilakukan menggunakan metode FTA dengan tujuan mengidentifikasi *top event* atau peristiwa utama yang memiliki dampak signifikan terhadap terjadinya cacat. Metode ini mencakup penyusunan struktur pohon kesalahan untuk memetakan hubungan sebab-akibat antar faktor yang berkontribusi, sehingga dapat diketahui akar permasalahan (root cause) dari setiap jenis cacat yang muncul pada proses pengelasan. (Ruijters and Stoelinga 2015). Rincian mengenai simbol-simbol yang digunakan dalam FTA disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. *Fault Tree Analisis* Simbol (Yazdi et al. 2023)

Symbol	**Keterangan**
	Top Event
	Logic Event AND
	Logic Event Or
	Basic Event

3. Hasil dan Pembahasan

Data yang digunakan dalam penelitian ini meliputi hasil inspeksi visual las, data identifikasi cacat dari pengujian *liquid penetrant test*, hasil analisis Diagram Pareto, serta FTA terhadap cacat las. Inspeksi visual pada sambungan las merupakan tahap penting untuk memastikan mutu hasil pengelasan, yang dilakukan melalui pengamatan langsung terhadap kondisi fisik hasil las guna menilai kesesuaian bentuk, dimensi, dan kualitas permukaannya dengan standar yang ditetapkan (Hargiyarto et al. 2020). Pengukuran dimensi sambungan las dilakukan menggunakan alat bantu welding gauge, dan hasil pengukuran tersebut disajikan secara sistematis dalam bentuk Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Pengukuran dimensi pengelasan

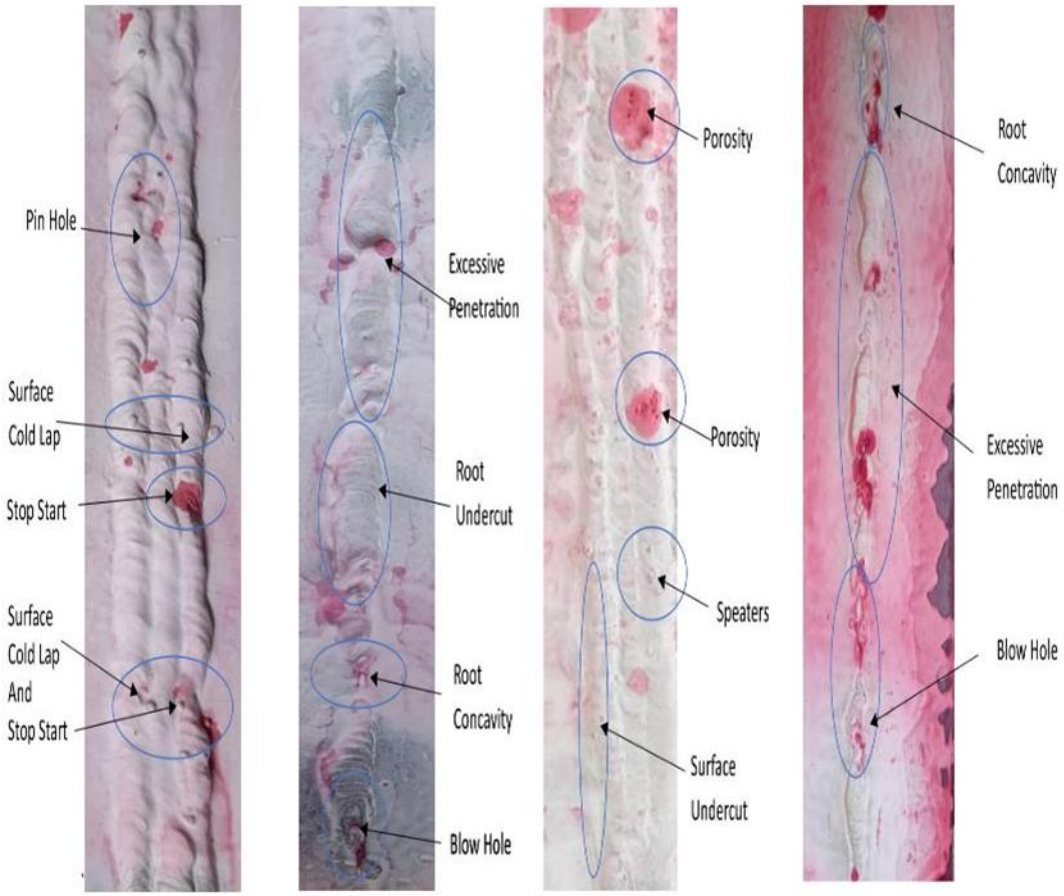
Speciment	*Capping*			Root		
	Tinggi las (mm)	Lebar las (mm)	Kedalaman cacat las (mm)	Tinggi las (mm)	Lebar las (mm)	Kedalaman cacat las (mm)
1	2,5	19,5	-1	1,5	3	-2
2	3	21	-1,5	1,5	4	-1
3	2,5	20	-0,5	2	3	-1
4	2,5	20,5	-0,5	2	4,5	-0,5
5	2,5	22,5	-0.5	2	3	-1
6	3	22,5	-0.5	1,5	3	-1
7	3	21,5	-0.5	2,5	3,5	-0,5
8	3	25,5	-1	2	3	-1
9	2	25,5	-0,5	2	3	-1,5
10	3	25	-1	1,5	3	-2
Average	**2,7**	**22,35**	**-0,75**	**1,85**	**3,3**	**-1,15**

Pengujian uji penetrant cair telah dilakukan pada sepuluh spesimen hasil pengelasan dengan posisi 2G. Hasil dari pengujian pada spesimen pengelasan ini menunjukkan adanya indikasi cacat yang bervariasi antar sampel (Manikandan et al. 2020). Dokumentasi visual hasil uji dapat dilihat pada Gambar 1.

Diagram Pareto merupakan alat analisis statistik yang digunakan untuk mengidentifikasi dan mengelompokkan jenis cacat las berdasarkan frekuensi kemunculannya, sehingga memungkinkan penentuan jenis cacat yang paling dominan atau paling sering terjadi dalam proses pengelasan (Ťavodová et al. 2020). Dalam konteks proses pengelasan, diagram ini menampilkan data dalam bentuk diagram batang yang tersusun secara menurun berdasarkan frekuensi kemunculan setiap jenis cacat, dimulai dari cacat yang paling sering hingga yang paling jarang terjadi (Dharma et al. 2019). Tujuan utamanya adalah untuk mengidentifikasi jenis cacat yang paling dominan dan memiliki pengaruh terbesar terhadap kualitas sambungan las, sehingga upaya perbaikan dapat difokuskan pada faktor-faktor yang paling kritis (Rezaei, Ehsanifar, and Wood 2019). Berdasarkan data cacat las yang diperoleh, setiap jenis cacat kemudian diklasifikasikan dan disusun secara sistematis ke dalam tabel sesuai kategorinya, sebagaimana ditampilkan pada Tabel 4.

Data yang disajikan pada Tabel 4 dapat dimanfaatkan untuk menyusun Diagram Pareto (Gambar 2) dengan memasukkan jumlah masing-masing jenis cacat las beserta persentase akumulasinya. Dalam upaya mengidentifikasi risiko penyebab kegagalan, dilakukan penelusuran secara mendalam hingga ditemukan akar permasalahan (root cause) dari setiap top event yang

terjadi. Berdasarkan hasil Diagram Pareto, kemudian disusun Analisis Pohon Kegagalan (FTA) untuk menentukan faktor-faktor penyebab timbulnya cacat pada proses pengelasan.



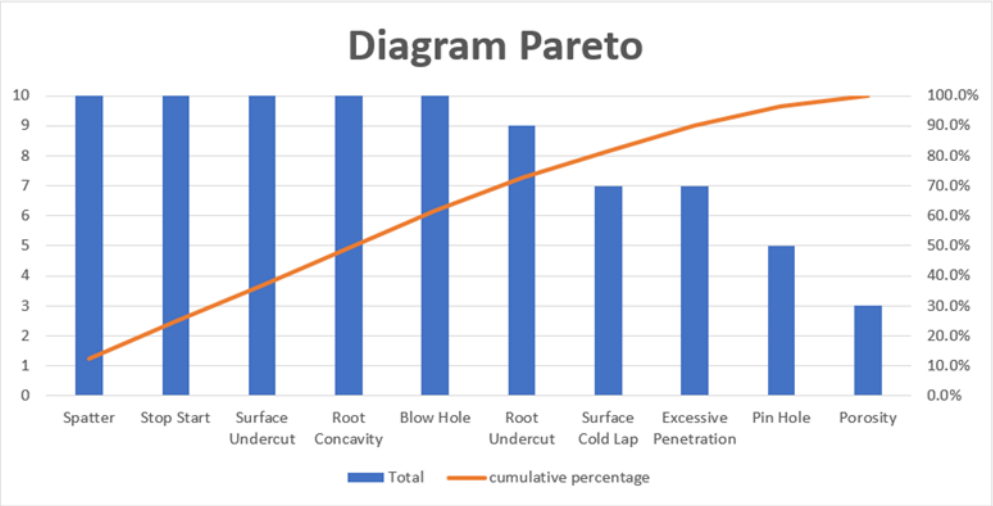
Gambar 1. Hasil Uji Penetrant Cair Spesimen 2G

Tabel 4. Klasifikasi Cacat Pengelasan

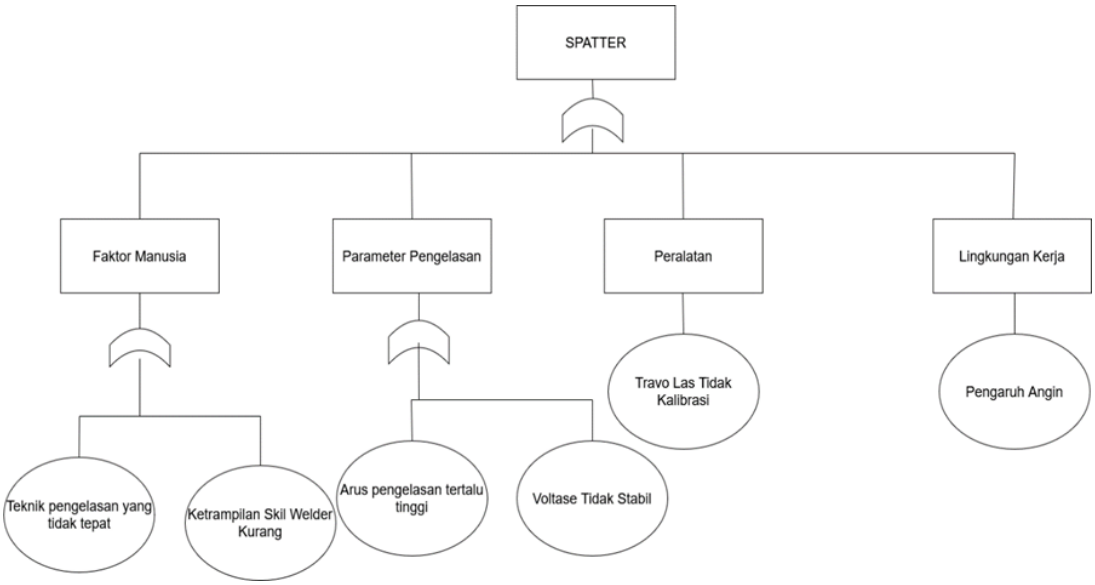
Jenis	Total	Cumulative Total	Percentage	Cumulative Percentage
Spatter	10	10	12,3%	12,3%
Stop Start	10	20	12,3%	24,7%
Surface Undercut	10	30	12,3%	37,0%
Root Concavity	10	40	12,3%	49,4%
Blow Hole	10	50	12,3%	61,7%
Root Undercut	9	59	11,1%	72,8%
Surface Cold Lap	7	66	8,6%	81,5%
Excessive Penetration	7	73	8,6%	90,1%
Pin Hole	5	78	6,2%	96,3%
Porosity	3	81	3,7%	100,0%
Total	**81**		**100%**	

Pada Gambar 2 spatter disebabkan oleh teknik pengelasan yang tidak tepat, arus dan tegangan tidak stabil, peralatan tidak terkalibrasi, serta gangguan lingkungan yang mengganggu kestabilan busur. Cacat stop-start pada pengelasan posisi 2G disebabkan oleh teknik dan parameter pengelasan yang tidak stabil, peralatan yang kurang optimal, serta kondisi lingkungan yang mengganggu visibilitas dan kestabilan busur saat penyambungan ulang. Surface undercut pada pengelasan posisi 2G disebabkan oleh teknik ayunan dan sudut elektroda yang tidak tepat,

arus dan kecepatan pengelasan berlebih, peralatan yang tidak stabil, serta pencahayaan buruk yang mengurangi ketelitian operator.



Gambar 2. Diagram Pareto

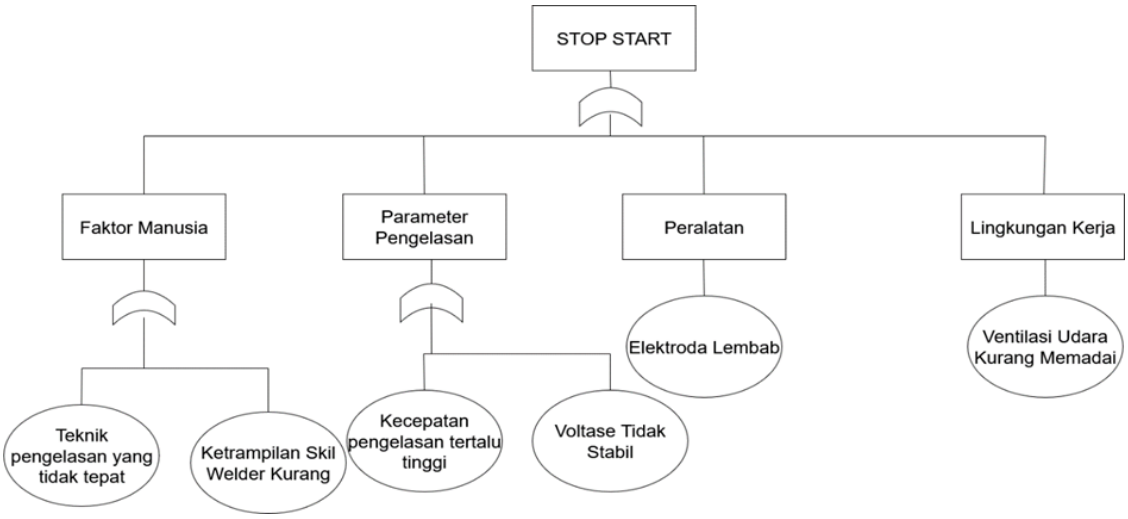


Gambar 3. *Spatter Fault Tree Analysis*

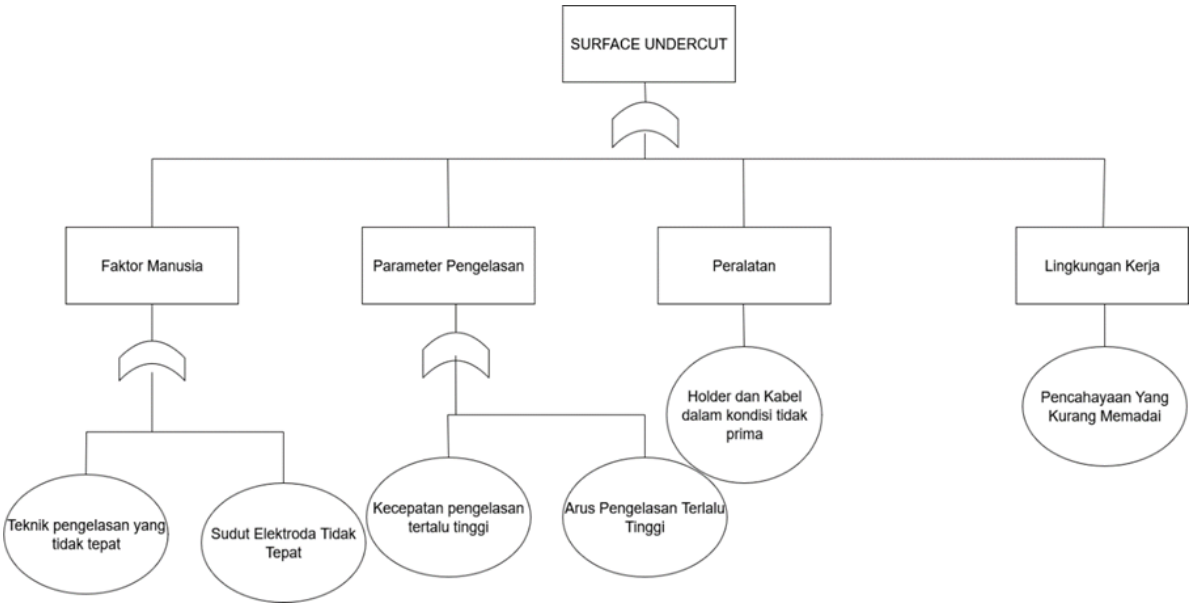
Diagram Pareto dapat dilihat pada Gambar 3 ditemukan bahwa lima jenis cacat utama yaitu speaters, stop start, surface undercut, root concavity, dan blow hole merupakan penyumbang terbesar terhadap total cacat yang terjadi. Kelima cacat ini masing-masing memiliki persentase 12,3% dengan akumulasi mencapai 61,7% dari seluruh cacat yang terdeteksi. Jenis-jenis cacat tersebut menunjukkan adanya masalah dalam teknik pengelasan, seperti kontrol busur listrik yang tidak stabil, sudut dan kecepatan pengelasan yang tidak tepat, serta kebersihan material atau elektroda yang kurang diperhatikan (Il'Yaschenko et al. 2015; Jamrozik and Górka 2021). Cacat lainnya seperti root undercut, surface cold lap, excessive penetration, pin hole, dan Porosity memiliki kontribusi yang lebih kecil dengan total akumulasi 38,3%, namun tetap berpengaruh terhadap kualitas hasil pengelasan.

Berbagai jenis cacat pada pengelasan posisi 2G umumnya disebabkan oleh kombinasi teknik pengelasan yang kurang tepat, parameter proses yang tidak stabil, serta kondisi peralatan dan lingkungan yang tidak optimal. Peningkatan spatter, cacat stop-start, dan surface undercut

muncul akibat ayunan atau sudut elektroda yang salah, arus dan tegangan yang tidak sesuai, serta kecepatan pengelasan yang tidak terkontrol. Peralatan yang longgar atau tidak terkalibrasi, pencahayaan buruk, dan gangguan lingkungan seperti angin atau ventilasi tidak memadai turut memperburuk kestabilan busur dan visibilitas operator, sehingga meningkatkan risiko cacat permukaan.



Gambar 4. *Stop Start Fault Tree Analysis*



Gambar 5. *Surface Undercut Fault Tree Analysis*

Sementara itu, cacat seperti *root concavity*, *blow hole*, *root undercut*, surface cold lap, *excessive penetration*, dan *porosity* lebih banyak dipengaruhi oleh ketidaktepatan dalam pengaturan arus, posisi elektroda, serta kondisi logam dan elektroda. Arus terlalu rendah atau tinggi, elektroda lembap, serta permukaan logam yang kotor menjadi faktor utama penyebab terbentuknya rongga, penetrasi berlebih, atau kurang sempurna pada akar sambungan. Lingkungan kerja yang lembap dan pencahayaan minim juga memperburuk hasil pengelasan. Oleh karena itu, kontrol parameter, pemilihan elektroda yang tepat, dan kondisi kerja yang baik sangat penting untuk mencegah cacat pada hasil las posisi 2G.

Hasil penelitian ini sejalan dengan temuan Muhammad Nur dkk., yang juga menunjukkan bahwa faktor utama penyebab cacat pengelasan pada konstruksi kapal adalah kesalahan

manusia dan lemahnya sistem pengendalian kualitas selama proses produksi. Dalam penelitian tersebut, metode FTA digunakan untuk mengidentifikasi keterkaitan antara berbagai jenis cacat, dimana hasilnya memperlihatkan bahwa kurangnya ketelitian operator, ketidaksesuaian parameter pengelasan, serta kontrol proses yang belum optimal merupakan penyebab dominan munculnya cacat pada sambungan las (M. N. M. Putra, Tama, and Darmawan 2015).

Untuk mencegah terjadinya berbagai cacat las pada pengelasan posisi 2G seperti *spatter, stop-start, surface undercut, root concavity, excessive penetration, blow hole, root undercut, surface cold lap, pin hole* dan *porosity* diperlukan pendekatan perbaikan yang menyeluruh. Dari sisi manusia, pelatihan ulang dan penerapan SOP sangat penting untuk meningkatkan keterampilan welder, khususnya dalam teknik kontrol busur dan penanganan cacat spesifik. Pengaturan parameter seperti arus, kecepatan, dan panjang busur harus dikendalikan dengan tepat sesuai jenis elektroda yang digunakan. Selain itu, peralatan perlu dirawat dan dikalibrasi secara berkala, termasuk menjaga kondisi elektroda agar tetap kering. Lingkungan kerja juga harus mendukung, dengan pencahayaan dan ventilasi yang memadai. Permukaan material harus dipersiapkan secara bersih dan sesuai standar groove. Terakhir, pengawasan proses secara langsung oleh instruktur atau dosen berperan penting untuk memastikan kualitas pengelasan tetap terjaga sepanjang proses berlangsung.

Berdasarkan analisis diagram Pareto, lima cacat utama *spatter*, *stop-start, surface undercut, root concavity* dan *blow hole* menyumbang sebesar 61,7% dari total cacat yang ditemukan. Penyebab utama cacat tersebut berasal dari parameter pengelasan yang tidak stabil, teknik pengelasan yang kurang tepat, serta kebersihan material dan elektroda yang tidak terjaga. Upaya perbaikan dapat dilakukan melalui pelatihan ulang welder, pengendalian parameter pengelasan, kalibrasi peralatan secara berkala, serta peningkatan pengawasan selama proses berlangsung. Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengevaluasi pengaruh arus dan polaritas terhadap kemunculan jenis cacat pada pengelasan posisi 2G.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Civitas Akademik Politeknik ATI Makassar atas dukungan pada penelitian ini.

Daftar Pustaka

Aini, Ahmad Naufal Rizki, Tara Lydwina, Asep Ridwan Setiawan, and Aditianto Ramelan. 2024. "Assessing the Consequences of Repetitive Repair Welding in Shielded Metal Arc Welding (SMAW) on Material Properties in API 5L Grade B PSL 2 Welded Pipelines." *Transactions of the Indian Institute of Metals* 77 (8): 2093–2102. https://doi.org/10.1007/s12666-024-03263-6.

Arsic, Dušan, Snežana Kirin, Ružica Nikolic, Aleksandra Arsic, and Ljubica Radovic. 2022. "Probabilistic Approach and Fault-Tree Analysis for Increased Bucket Wheel Excavator Welded Joints Reliability." *Procedia Structural Integrity* 42: 189–95. https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.12.023.

Chiong, Randy, Noman Khandoker, Sumaiya Islam, and Edwin Tchan. 2019. "Effect of SMAW Parameters on Microstructure and Mechanical Properties of AISI 1018 Low Carbon Steel Joints: An Experimental Approach." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 495 (1): 012093. https://doi.org/10.1088/1757-899X/495/1/012093.

Dharma, Fajar Pitarsi, Zulfa Fitri Ikatrinasari, Humiras Hardi Purba, and Winda Ayu. 2019. "Reducing Non Conformance Quality of Yarn Using Pareto Principles and Fishbone Diagram

in Textile Industry." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 508 (1): 012092. https://doi.org/10.1088/1757-899X/508/1/012092.

Endramawan, T., and A. Sifa. 2018. "Non Destructive Test Dye Penetrant and Ultrasonic on Welding SMAW Butt Joint with Acceptance Criteria ASME Standard." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 306 (1): 012122. https://doi.org/10.1088/1757-899X/306/1/012122.

Hargiyarto, P., K. Syauqi, S. Sugiyono, A. Ardian, S. Sianipar, and L. A. Nadjib. 2020. "Analysis of Quality Student Practice Results in Shielded Metal Arc Welding." *Journal of Physics: Conference Series* 1700 (1): 012010. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1700/1/012010.

Hariprasath, P., P. Sivaraj, V. Balasubramanian, Srinivas Pilli, and K. Sridhar. 2022. "Effect of the Welding Technique on Mechanical Properties and Metallurgical Characteristics of the Naval Grade High Strength Low Alloy Steel Joints Produced by SMAW and GMAW." *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 37: 584–95. https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2022.03.007.

Hulse, Pamela, Luis Betancur-Arboleda, A. D. Rincon-Quintero, J. G. Ascanio-Villabona, and B. E. Tarazona-Romero. 2023. "FMECA and FTA Analysis Applied to the Manufacturing Process of Pulsating Heat Pipes." *Heritage and Sustainable Development* 6 (1): 1–12. https://doi.org/10.37868/hsd.v6i1.319.

Il'Yaschenko, D. P., D. A. Chinakhov, V. I. Danilov, G. V. Schlyakhova, and Y. M. Gotovschik. 2015. "Increasing Strength and Operational Reliability of Fixed Joints of Tubes by MMA Welding." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 91 (1): 012007. https://doi.org/10.1088/1757-899X/91/1/012007.

Jamrozik, Wojciech, and Jacek Górka. 2021. "Assessing Mma Welding Process Stability Using Machine Vision-Based Arc Features Tracking System." *Sensors* 21 (1): 1–21. https://doi.org/10.3390/s21010084.

Karthikeyan, M., V. N. A. Naikan, and R. Narayan. 2017. "Root Cause Analysis and Reliability Improvement Methods for Orbital TIG Welding Process for Propulsion Feed System of Satellites." *International Journal of System Assurance Engineering and Management* 8 (2): 910–24. https://doi.org/10.1007/s13198-016-0549-5.

Kholil, Muhammad. 2024. "Analysis of Product Defects in Stay Horn Parts During the Welding Process Using Fault Tree Analysis (FTA) and Failure Mode and Effects Analysis (FMEA)." *International Journal of Scientific and Academic Research* 4 (5): 1–7. https://doi.org/10.54756/ijsar.2024.8.

Kifta, Decky Antony, Ambiyar, Remon Lapisa, and Maria Magdalena Zagoto. 2023. *Improvement of Welding Skill Using Competence Based Education and Training (CBET) Method*. Vol. 1. Atlantis Press SARL. https://doi.org/10.2991/978-2-38476-050-3_6.

Kumar Katheria, Sunil, Dinesh Kumar, Tabish Ali Khan, and Manvandra Kumar Singh. 2021. "Reality Based Skills Development Approach in Welding Technology: An Overview." *Materials Today: Proceedings* 47: 7184–88. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.453.

Kumar, Sudhir, and Rajender Singh. 2019. "Investigation of Tensile Properties of Shielded Metal Arc Weldments of AISI 1018 Mild Steel with Preheating Process." *Materials Today: Proceedings* 26: 209–22. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.10.167.

Manikandan, K. R., P. Ashwin Sivagurunathan, S. S. Ananthan, A. Arul Marcel Moshi, and S. R. Sundara Bharathi. 2020. "Study on the Influence of Temperature and Vibration on Indications of Liquid Penetrant Testing of A516 Low Carbon Steel." *Materials Today: Proceedings* 39: 1559–64. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.572.

Mazur, Magdalena. 2017. "Assessment of the Construction Welding Process." *Procedia Engineering* 192: 580–85. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.100.

Nikolic, Ruzica, Dusan Arsic, Aleksandra Arsic, Zivce Sarkocevic, Dragan Cvetkovic, and Branislav Hadzima. 2020. "The Fault Tree Analysis of Causes of the Welded Pipes Failures in Exploitation." *Communications - Scientific Letters of the University of Žilina* 22 (1): 62–70. https://doi.org/10.26552/com.c.2020.1.62-70.

Öberg, Anna Ericson, and Erik Åstrand. 2018. "Variation in Welding Procedure Specification Approach and Its Effect on Productivity." *Procedia Manufacturing* 25: 412–17. https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.06.111.

Pontororing, Pretty Pricess, Stanley Gilbert, and Aditya Andika. 2018. "Welding Products Defects Analysis with Fault Tree Analysis and Failure Modes and Effects Analysis." *Innoscape*, 38.

Putra, A. Y. W., and B. S. Wijanarka. 2019. "Occupational Competence Needs Analysis of Welder on Medium-Scaled Car Body Industries in Indonesia." *Journal of Physics: Conference Series* 1273 (1): 012054. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1273/1/012054.

Putra, Muhammad Nur Mulianto, Ishardita Pambudi Tama, and Zefry Darmawan. 2015. "Analisis Penyebab Defect Kapal Motor (KM) Pagerungan Pada Bagian Hull Construction (HC) Dengan Metode Failure Mode and Effect (FMEA) Dan Fault Tree Analysis (FTA) (Studi Kasus Di PT. Pal Indonesia)." *Jurnal Rekayasa Dan Manajemen Sistem Industri* 3 (2): 291–300.

Rathinasuriyan, C., PV Elumalai, J. Bharani Chandar, K. Karthik, Sreenivasa Reddy Medapati, Ahmad Aziz Alahmadi, Mamdooh Alwetaishi, et al. 2023. "Welding-Based Additive Manufacturing Processes for Fabrication of Metallic Parts." *Composites and Advanced Materials* 32: 26349833231210572. https://doi.org/10.1177/26349833231210572.

Rezaei, Ahmadreza, Mohammad Ehsanifar, and David A. Wood. 2019. "Reducing Welding Repair Requirements in Refinery Pressure Vessel Manufacturing: A Case Study Applying Six Sigma Principles." *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)* 13 (3): 1089–1102. https://doi.org/10.1007/s12008-019-00573-8.

Ruijters, Enno, and Mariëlle Stoelinga. 2015. "Fault Tree Analysis: A Survey of the State-of-the-Art in Modeling, Analysis and Tools." *Computer Science Review* 15: 29–62. https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2015.03.001.

Setiawan, Eril, Rendi Salam, and Adi Adi. 2023. "Learn Welding Techniques to Improve Work Skills in Vocational School Students." *Jurnal PKM Manajemen Bisnis* 3 (1): 1–7. https://doi.org/10.37481/pkmb.v3i1.582.

Sheikh, Arshad A., and Prashant D. Kamble. 2008. "Optimization of Welding Process Parameter to Minimize Defect in Welding of Sheet." *International Research Journal of Engineering and Technology* 9001 (56): 4310.

Ťavodová, Miroslava, Nataša Náprstková, Michaela Hnilicová, and Pavel Beňo. 2020. "Quality Evaluation of Welding Joints by Different Methods." *FME Transactions* 48 (4): 816–24. https://doi.org/10.5937/fme2004816T.

Wessiani, N. A., and F. Yoshio. 2018. "Failure Mode Effect Analysis and Fault Tree Analysis as a Combined Methodology in Risk Management." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 337 (1): 012033. https://doi.org/10.1088/1757-899X/337/1/012033.

Yazdi, Mohammad, Javad Mohammadpour, He Li, Hong Zhong Huang, Esmaeil Zarei, Reza Ghasemi Pirbalouti, and Sidum Adumene. 2023. "Fault Tree Analysis Improvements: A Bibliometric Analysis and Literature Review." *Quality and Reliability Engineering International* 39 (5): 1639–59. https://doi.org/10.1002/qre.3271.