

Analisis dan Improvement Kualitas Pengelasan Berdasarkan *Rejection Rate* Hasil NDT Ultrasonic Testing Menggunakan Metode Six Sigma

Ahmad Ridwan¹, Nandar Cundara², Sanusi³

^{1,2,3}Universitas Ibnu Sina; Jl. Teuku Umar, Lubuk Baja Kota, Kec, Lubuk Baja, Kota Batam, Kepulauan Riau, Telp. 0778 - 425391

Program Studi Teknik Industri, Fakultas Sains dan Teknologi – Universitas Ibnu Sina, Batam

e-mail: 211026201040@uis.ac.id, nandarcundara@uis.ac.id, sanusi@uis.ac.id

Abstrak

Kualitas pengelasan merupakan aspek penting dalam menjamin integritas struktur pada industri minyak dan gas. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis faktor penyebab utama tingginya rejection rate hasil Non-Destructive Testing (NDT) dengan metode Ultrasonic Testing (UT), serta memberikan usulan perbaikan kualitas melalui pendekatan Six Sigma dengan tahapan DMAIC (Define, Measure, Analyze, Improve, Control). Objek penelitian adalah sambungan las pada Proyek Sofia di PT. Seatrium (SMOE Indonesia) dengan data inspeksi UT selama 40 minggu. Dari 2.368 sambungan yang diuji, ditemukan 28 cacat dengan dominasi lack of fusion (39,29%) dan slag inclusion (32,14%). Nilai awal Defects per Million Opportunities (DPMO) sebesar 38.043 menghasilkan level sigma 2,9. Setelah implementasi perbaikan—meliputi verifikasi gap sambungan, kalibrasi parameter mesin las, serta penggunaan oven elektroda secara konsisten—DPMO menurun menjadi 3.853 dan level sigma meningkat menjadi 3,8. Hasil penelitian membuktikan bahwa pendekatan Six Sigma berbasis DMAIC efektif dalam menurunkan cacat lebih dari 90%, meningkatkan stabilitas proses, serta mendukung pencapaian standar kualitas internal maupun industri.

Kata kunci: Pengelasan, Ultrasonic Testing, Six Sigma, Rejection Rate, DMAIC

Abstract

Welding quality is a critical factor in ensuring structural integrity in the oil and gas industry. This study aims to analyze the main causes of high rejection rates based on Non-Destructive Testing (NDT) using the Ultrasonic Testing (UT) method and to propose quality improvement strategies through the Six Sigma approach with the DMAIC stages (Define, Measure, Analyze, Improve, Control). The research object is welded joints in the Sofia Project at PT. Seatrium (SMOE Indonesia), with UT inspection data collected over 40 weeks. Out of 2,368 inspected joints, 28 defects were identified, with lack of fusion (39.29%) and slag inclusion (32.14%) as the dominant types. The initial Defects per Million Opportunities (DPMO) was 38,043, corresponding to a sigma level of 2.9. After implementing corrective actions—such as joint gap verification, calibration of welding parameters, and consistent use of electrode ovens—the DPMO decreased to 3,853 and the sigma level improved to 3.8. The findings demonstrate that the Six Sigma DMAIC approach is effective in reducing welding defects by more than 90%, improving process stability, and ensuring compliance with both internal and industrial quality standards.

Keywords: Welding, Ultrasonic Testing, Six Sigma, Rejection Rate, DMAIC.

PENDAHULUAN

Kualitas pengelasan memiliki peran penting dalam menjamin kekuatan dan keandalan struktur, terutama di industri minyak dan gas yang menuntut standar keselamatan tinggi. Hasil pengelasan yang tidak memenuhi standar dapat menyebabkan tingginya tingkat rejection rate, yang berimplikasi pada meningkatnya biaya produksi, keterlambatan proyek, serta potensi kegagalan struktur (Suryanto, 2018). Oleh karena itu, pengendalian mutu pengelasan menjadi aspek strategis dalam mendukung efisiensi dan daya saing perusahaan.

Berbagai faktor dapat memengaruhi kualitas sambungan las, seperti parameter pengelasan (arus, tegangan, kecepatan), keterampilan operator, kondisi material, serta lingkungan kerja. Cacat pengelasan yang umum ditemukan antara lain lack of fusion, slag inclusion, porosity, dan undercut, yang berpotensi melemahkan sambungan dan mengurangi umur pakai struktur (Maddox & Hooper, 2017; Mills, 2016). Untuk memastikan kualitas, perusahaan biasanya menerapkan metode Non-Destructive Testing (NDT), salah satunya Ultrasonic Testing (UT), yang efektif dalam mendeteksi cacat internal pada sambungan las (Masubuchi, 2013).

Sejumlah penelitian terdahulu telah menyoroti penerapan metode Six Sigma dalam pengendalian kualitas pengelasan. Kifta (2015) melaporkan penurunan defect rate di PT. Profab Indonesia dari 15,5% menjadi 2,63% setelah penerapan Six Sigma. Rohimudin dkk. (2016) menggunakan DMAIC untuk mengurangi cacat pada konstruksi baja, dengan hasil peningkatan level sigma dari 1,7 menjadi 2,1. Penelitian lain oleh Kurniadi dkk. (2022) di PT. Meindo Elang Indah menunjukkan bahwa analisis Pareto dan FMEA efektif dalam memetakan cacat dominan serta faktor penyebab utamanya. Penelitian-penelitian tersebut menegaskan efektivitas Six Sigma dalam menurunkan cacat, namun sebagian besar berfokus pada sektor manufaktur atau konstruksi darat.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dirancang menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis analisis data inspeksi kualitas pengelasan. Metode dipilih agar hasil yang diperoleh tidak hanya bersifat deskriptif, tetapi juga mampu memberikan rekomendasi perbaikan yang terukur dan aplikatif. Mengingat penelitian berfokus pada tingkat rejection rate hasil pengelasan, digunakan kombinasi Non-Destructive Testing (NDT) khususnya Ultrasonic Testing (UT) sebagai sumber data utama, serta kerangka Six Sigma berbasis DMAIC (Define, Measure, Analyze, Improve, Control) sebagai alat analisis dan perbaikan. Dengan pendekatan ini, penelitian dapat secara sistematis mengidentifikasi jenis cacat dominan, menganalisis penyebab utama, serta menguji efektivitas solusi perbaikan yang diterapkan.

2.1 Objek Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada Proyek Sofia di PT. Seatrium (SMOE Indonesia), sebuah perusahaan fabrikasi lepas pantai yang bergerak di industri minyak dan gas. Objek penelitian adalah sambungan las pada struktur baja yang digunakan dalam konstruksi modul lepas pantai. Selama periode 40 minggu, sebanyak 2.368 sambungan las diperiksa menggunakan metode UT, sehingga menghasilkan data kuantitatif mengenai jumlah, jenis, dan persentase cacat.

2.2 Jenis dan Data Sumber

Data yang digunakan terdiri dari:

- a) Data primer: hasil inspeksi UT, observasi langsung di lapangan, serta wawancara dengan welder, welding engineer, dan inspector QC.
- b) Data sekunder: standar pengelasan internasional (AWS D1.1, API 1104, ISO 5817, ASME Section IX), Welding Procedure Specification (WPS), serta catatan historis rejection rate perusahaan.

Kombinasi data primer dan sekunder ini memberikan gambaran menyeluruh mengenai kondisi aktual proses pengelasan sekaligus membandingkannya dengan standar yang berlaku.

2.3 Pendekatan Analisis

Penelitian ini mengintegrasikan metode inspeksi UT dengan kerangka Six Sigma DMAIC:

- a) Define: Identifikasi masalah utama berupa tingginya rejection rate yang melebihi target internal 1,2%.
- b) Measure: Pengukuran jumlah cacat dominan, persentase rejection rate, Defects per Million Opportunities (DPMO), dan level sigma.
- c) Analyze: Identifikasi jenis cacat dominan menggunakan Diagram Pareto, serta analisis akar penyebab menggunakan Diagram Fishbone berdasarkan pendekatan 6M (Man, Method, Machine, Material, Measurement, Environment).
- d) Improve: Perumusan tindakan korektif, seperti verifikasi fit-up gap dengan feeler gauge, kalibrasi parameter mesin las sesuai WPS, penggunaan oven elektroda, serta pelatihan penyegaran bagi welder.
- e) Control: Evaluasi keberlanjutan perbaikan dengan monitoring rejection rate, audit internal, serta penggunaan check sheet QC sebagai alat kontrol kualitas jangka panjang.

2.4 Implementasi dan Validasi

Implementasi perbaikan dilakukan secara langsung di area produksi dengan melibatkan tim Quality Control (QC) dan welding engineer sebagai pengawas teknis. Langkah pertama adalah sosialisasi kepada welder mengenai hasil analisis cacat dominan, termasuk penjelasan teknis mengenai lack of fusion dan slag inclusion. Hal ini penting agar welder memahami alasan di balik setiap tindakan korektif yang dirancang.

Beberapa tindakan perbaikan utama yang diterapkan meliputi:

- a) Verifikasi fit-up gap menggunakan feeler gauge sebelum pengelasan untuk memastikan bukaan akar sesuai spesifikasi WPS.
- b) Kalibrasi parameter mesin las secara rutin agar arus, tegangan, dan kecepatan pengelasan berada dalam rentang standar.
- c) Penggunaan oven elektroda secara konsisten untuk mencegah elektroda menyerap kelembaban yang dapat memicu cacat slag inclusion maupun porosity.

Proses implementasi dilakukan secara bertahap dengan monitoring mingguan. Setiap hasil inspeksi UT setelah perbaikan dicatat dan dibandingkan dengan data historis sebelum perbaikan. Evaluasi difokuskan pada tiga parameter utama: rejection rate, Defects per Million Opportunities (DPMO), dan level sigma.

Validasi keberhasilan diperoleh dengan membandingkan kondisi awal dan kondisi setelah implementasi. Hasilnya menunjukkan penurunan signifikan pada jumlah cacat yang terdeteksi, disertai peningkatan level sigma. Selain itu, variasi proses pengelasan juga menurun, yang ditunjukkan dengan lebih konsistennya hasil inspeksi UT dari minggu ke minggu.

Dengan demikian, implementasi perbaikan tidak hanya berdampak pada pengurangan cacat, tetapi juga meningkatkan stabilitas jangka panjang proses pengelasan. Validasi ini memperkuat bahwa pendekatan Six Sigma DMAIC efektif untuk diterapkan dalam konteks fabrikasi lepas pantai, sekaligus memberikan dasar bagi perbaikan berkelanjutan di proyek-proyek berikutnya.

2.4 Alat Analisis Tambahan

Selain pendekatan DMAIC, penelitian ini menggunakan beberapa alat analisis kualitas, yaitu:

- a) Diagram Pareto, untuk memetakan prioritas cacat dominan.

- b) Diagram Fishbone, untuk mengidentifikasi akar penyebab cacat.
- c) Statistical Process Control (SPC), untuk menilai kestabilan proses pengelasan.
- d) Perhitungan Yield, untuk mengukur tingkat kelulusan sambungan las terhadap inspeksi UT.

Dengan metode ini, penelitian tidak hanya berfungsi sebagai evaluasi kualitas, tetapi juga menghasilkan strategi perbaikan yang praktis, terukur, dan dapat langsung diimplementasikan dalam proyek fabrikasi lepas pantai.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan metodologi yang telah dijelaskan sebelumnya, analisis dilakukan dengan memanfaatkan data inspeksi Ultrasonic Testing (UT) serta pendekatan Six Sigma berbasis DMAIC. Data yang diperoleh kemudian diolah untuk mengidentifikasi jenis cacat dominan, menghitung tingkat rejection rate, DPMO, dan level sigma, serta mengevaluasi efektivitas tindakan perbaikan yang diimplementasikan. Hasil penelitian berikut disajikan secara bertahap, dimulai dari temuan inspeksi UT hingga analisis perbandingan kondisi sebelum dan sesudah perbaikan.

3.1 Hasil Inspeksi *Ultrasonic Testing (UT)*

Inspeksi Ultrasonic Testing (UT) dilakukan terhadap 2.368 sambungan las pada Proyek Sofia dengan tujuan mendeteksi ketidak sempurnaan internal pada sambungan tanpa merusak material. Dari hasil pemeriksaan tersebut, ditemukan 28 cacat yang tidak sesuai standar kualitas perusahaan maupun standar internasional yang berlaku.

Jenis cacat yang paling dominan adalah lack of fusion sebesar 39,29% dari total cacat, yang menunjukkan adanya kegagalan peleburan logam induk dengan logam pengisi akibat energi panas yang tidak mencukupi atau teknik pengelasan yang kurang tepat. Cacat ini sangat kritis karena dapat menurunkan kekuatan ikatan las secara signifikan dan berpotensi menyebabkan retakan pada kondisi pembebahan dinamis.

Cacat dominan berikutnya adalah slag inclusion sebesar 32,14%, yaitu terperangkapnya terak dalam logam las akibat pembersihan yang tidak sempurna antar lapisan pengelasan. Hal ini biasanya terjadi karena welder tidak melakukan pembersihan dengan benar menggunakan palu las atau sikat baja, atau karena posisi pengelasan yang sulit diakses.

Selain kedua cacat utama tersebut, ditemukan pula porosity (17,86%) yang terjadi akibat gas terperangkap dalam logam las, serta undercut (10,71%) yaitu terbentuknya alur tipis di sepanjang tepi sambungan akibat arus las yang terlalu tinggi atau sudut elektroda yang tidak tepat. Meskipun jumlahnya lebih kecil, kedua jenis cacat ini tetap berkontribusi pada penurunan kualitas sambungan.

Distribusi hasil inspeksi ini menegaskan bahwa lebih dari 70% masalah kualitas pengelasan disebabkan oleh dua jenis cacat dominan (lack of fusion dan slag inclusion). Dengan demikian, program perbaikan diarahkan secara spesifik untuk mengatasi kedua jenis cacat tersebut sebagai prioritas utama.

3.2 Tingkat Rejection Rate dan Level Sigma

Berdasarkan hasil inspeksi, tingkat rejection rate awal sebelum perbaikan tercatat sebesar 3,8%, atau setara dengan 28 sambungan yang ditolak dari total 2.368 sambungan yang diuji. Angka ini jauh lebih tinggi dibandingkan standar kualitas internal perusahaan, yang mensyaratkan rejection rate maksimum sebesar 1,2%.

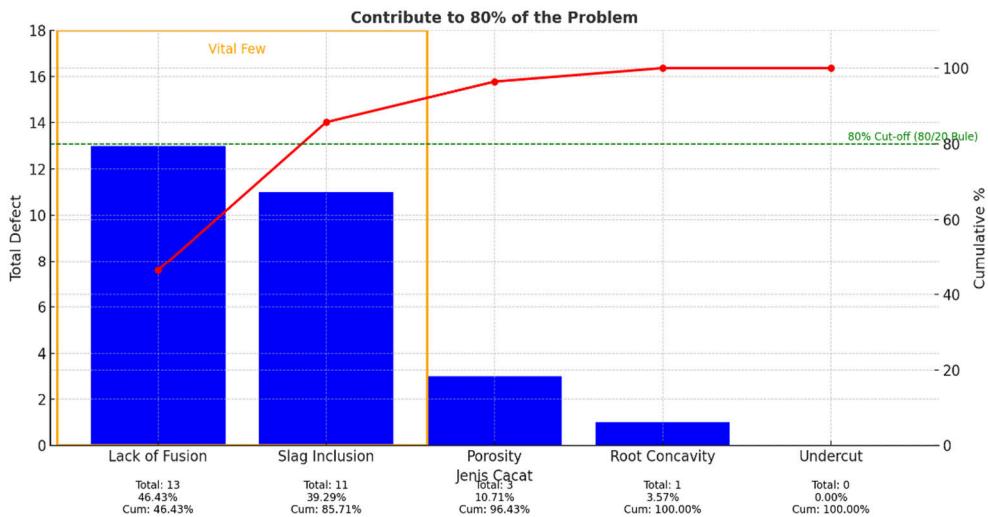
Untuk mengukur kinerja proses secara lebih detail, digunakan perhitungan Defects per Million Opportunities (DPMO). Dengan jumlah cacat 28 dan jumlah peluang kesalahan yang dihitung dari elemen kritis pada sambungan las, diperoleh nilai DPMO sebesar 38.043. Nilai ini

setara dengan level sigma 2,9, yang menunjukkan bahwa proses pengelasan berada pada kategori kualitas rendah hingga menengah. Dalam praktik industri, level sigma yang ideal untuk proses pengelasan kritis umumnya di atas 4,0 agar risiko kegagalan dapat diminimalkan.

Interpretasi dari data ini adalah bahwa proses pengelasan pada Proyek Sofia masih memiliki variabilitas yang cukup tinggi dan belum berada dalam kondisi stabil. Tingginya rejection rate dan rendahnya level sigma menjadi dasar kuat untuk dilakukannya perbaikan sistematis melalui pendekatan Six Sigma DMAIC. Hasil perhitungan ini sekaligus memberikan baseline (kondisi awal) yang nantinya dibandingkan dengan kondisi setelah implementasi perbaikan untuk mengukur efektivitas tindakan korektif yang diterapkan.

3.3 Analisis Cacat Dominan

Diagram Pareto digunakan untuk memvisualisasikan distribusi cacat, yang menegaskan bahwa lack of fusion dan slag inclusion adalah penyumbang terbesar terhadap tingginya rejection rate.



Gambar 1. Diagram Pareto Cacat Pengelasan

Diagram Pareto menggambarkan distribusi frekuensi cacat pengelasan pada Proyek Sofia. Dari hasil inspeksi UT terhadap 2.368 sambungan, diperoleh bahwa lack of fusion (39,29%) dan slag inclusion (32,14%) mendominasi lebih dari 70% total cacat. Sementara itu, cacat lain seperti porosity (17,86%) dan undercut (10,71%) memiliki kontribusi yang jauh lebih kecil. Pola ini menegaskan prinsip Pareto, bahwa sebagian besar masalah disebabkan oleh sebagian kecil faktor, sehingga fokus perbaikan diarahkan pada dua cacat dominan.

Analisis Fishbone kemudian diterapkan untuk menelusuri akar penyebab, yang diidentifikasi berasal dari faktor manusia (keterampilan welder yang bervariasi), metode (ketidaksesuaian terhadap WPS), mesin (parameter las tidak terkalibrasi), material (penyimpanan elektroda yang kurang tepat), pengukuran (kurangnya verifikasi fit-up gap), serta lingkungan (ruang kerja sempit pada habitat welding).

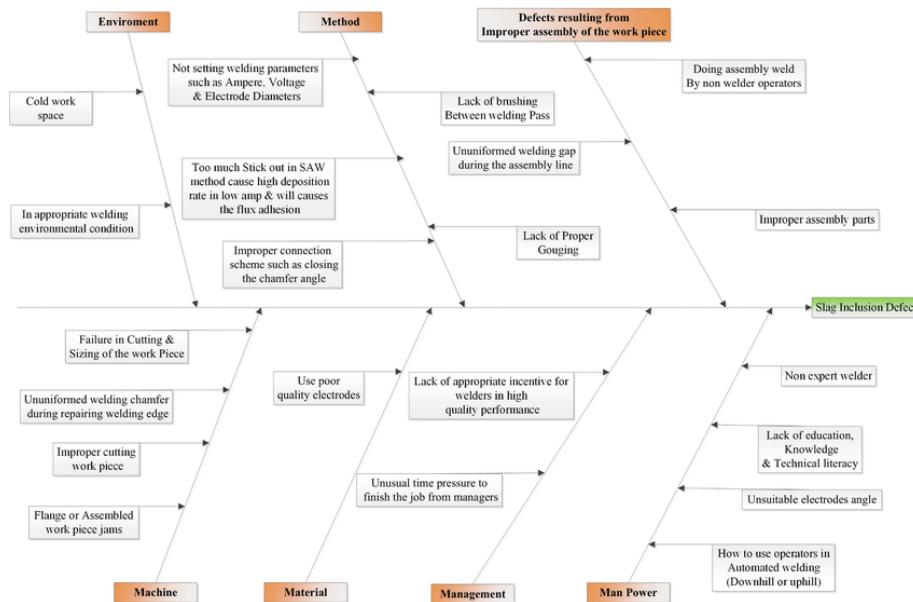
**Gambar 2.** Diagram Fishbone

Diagram Fishbone menunjukkan akar penyebab cacat dominan (lack of fusion dan slag inclusion) berdasarkan pendekatan 6M:

- Man (Manusia): keterampilan welder bervariasi, kedisiplinan terhadap WPS kurang konsisten.
- Method (Metode): verifikasi fit-up gap tidak selalu dilakukan, prosedur WPS tidak sepenuhnya dipatuhi.
- Machine (Mesin): parameter mesin las tidak terkalibrasi secara rutin.
- Material (Material): elektroda disimpan di luar oven sehingga menyerap kelembaban.
- Measurement (Pengukuran): minimnya penggunaan feeler gauge dalam memeriksa root opening.
- Environment (Lingkungan): area kerja terbatas (habitat welding) mempersulit akses dan posisi pengelasan.

Ilustrasi ini memperjelas hubungan antara faktor penyebab dengan timbulnya cacat dominan, sekaligus menjadi dasar bagi penyusunan tindakan perbaikan yang lebih terarah.

3.4 Implementasi Tindakan Perbaikan

Berdasarkan hasil analisis, beberapa tindakan korektif diterapkan, antara lain:

- Verifikasi fit-up gap menggunakan feeler gauge yang terkalibrasi sebelum pengelasan dan dicatat dalam “welding parameter” checklist untuk memastikan bukaan akar sesuai spesifikasi WPS.
- Kalibrasi parameter mesin las secara rutin agar arus, tegangan, dan kecepatan pengelasan berada dalam rentang standar, kalibrasi dilakukan secara mingguan dan jika terjadi cacat akibat mesain lat
- Penggunaan oven elektroda secara konsisten untuk mencegah elektroda menyerap kelembaban yang dapat memicu cacat slag inclusion maupun porosity, parameter oven akan disesuaikan dengan technical data sheet dari kawat las dan WPS.

3.5 Evaluasi Setelah Perbaikan

Hasil implementasi menunjukkan peningkatan signifikan pada kualitas pengelasan. Rejection rate menurun drastis dari 3,8% menjadi 0,38%. Nilai DPMO turun menjadi 3.853, dengan peningkatan level sigma menjadi 3,8. Hal ini berarti terjadi penurunan cacat lebih dari 90% dan peningkatan stabilitas proses pengelasan, angka ini merupakan standar yang cukup baik bagi industri pengelasan (Febriance dkk., 2024)

Tabel 1. Evaluasi hasil penelitian

Period	Total Joints	Defects	DPMO	Sigma Level	Yield
Before Improvement (Week 1–20)	681	26	38,180	≈ 2.9	96.20%
After Improvement (Week 21–40)	1,687	2	1,186	≈ 4.1	99.62%
Overall (Week 1–40)	2,368	28	11,823	≈ 3.4	98.82%

3.6 Diskusi

Temuan penelitian ini sejalan dengan penelitian terdahulu di industri minyak dan gas yang juga melaporkan lack of fusion dan slag inclusion sebagai cacat dominan (Kifta, 2015; Rohimudin dkk., 2016; Kurniadi dkk., 2022). Namun, berbeda dengan penelitian sebelumnya yang cenderung hanya memaparkan karakterisasi cacat, studi ini menekankan pada penggunaan Six Sigma berbasis DMAIC untuk mengidentifikasi masalah, menganalisis akar penyebab, dan memvalidasi efektivitas solusi. Hasil ini membuktikan bahwa metodologi berbasis data mampu memberikan dampak nyata terhadap pengendalian kualitas di lingkungan fabrikasi lepas pantai.

SIMPULAN

Penelitian ini menganalisis kualitas pengelasan pada Proyek Sofia di PT. Seatrium (SMOE Indonesia) dengan menggunakan data inspeksi *Ultrasonic Testing* (UT) dengan standar pengelasan internasional (AWS D1.1, API 1104, ISO 5817, ASME Section IX) dan pendekatan Six Sigma berbasis DMAIC. Hasil penelitian menunjukkan bahwa cacat dominan adalah lack of fusion (39,29%) dan slag inclusion (32,14%), yang secara bersama-sama menyumbang lebih dari 70% dari total cacat. Pada kondisi awal, rejection rate mencapai 3,8% dengan nilai DPMO 38.043 dan level sigma 2,9, melebihi batas kualitas internal perusahaan sebesar 1,2%.

Implementasi tindakan korektif—meliputi verifikasi fit-up gap, kalibrasi parameter mesin las sesuai WPS, penggunaan oven elektroda sesuai dengan petunjuk penggunaan kawat las atau technical data sheet, dan pelatihan penyegaran bagi welder berhasil menurunkan rejection rate menjadi 0,38% dengan nilai DPMO 3.853 dan level sigma 3,8. Hal ini membuktikan bahwa pendekatan Six Sigma DMAIC efektif dalam menurunkan tingkat cacat lebih dari 90% sekaligus meningkatkan stabilitas proses pengelasan.

Secara praktis, hasil penelitian ini memberikan manfaat berupa pengurangan biaya rework, percepatan jadwal proyek, dan peningkatan kepercayaan klien terhadap kualitas produk. Secara akademis, penelitian ini memperkaya literatur mengenai penerapan Six Sigma pada industri fabrikasi lepas pantai, yang masih jarang terdokumentasi.

SARAN

Penelitian ini masih terbatas pada satu proyek dalam periode tertentu, sehingga generalisasi hasil perlu dilakukan dengan hati-hati. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk:

- a) Memperluas lingkup penelitian dengan menerapkan kerangka Six Sigma DMAIC pada berbagai proyek atau perusahaan berbeda, sehingga validitas hasil dapat diperkuat.
- b) Mengintegrasikan teknik NDT lain, seperti Radiographic Testing atau Magnetic Particle Testing, untuk memperkaya data dan melakukan validasi silang terhadap hasil inspeksi UT.
- c) Menerapkan metode analisis lanjutan, seperti Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) atau Design of Experiments (DOE), guna memprioritaskan risiko serta mengoptimalkan parameter pengelasan secara lebih sistematis.
- d) Memanfaatkan teknologi digital, misalnya sistem monitoring pengelasan secara real-time atau digital twin, yang berpotensi meningkatkan stabilitas proses sekaligus mencegah cacat sejak dini.
- e) Menggali faktor eksternal, termasuk kondisi lingkungan kerja dan aspek ergonomi welder, yang dapat berpengaruh signifikan terhadap hasil pengelasan namun belum banyak diteliti.

Dengan arah penelitian tersebut, diharapkan upaya perbaikan kualitas pengelasan di industri fabrikasi lepas pantai dapat semakin komprehensif dan mendukung tercapainya target jangka panjang, yaitu zero defect manufacturing.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis dengan tulus menyampaikan rasa terima kasih kepada PT. Seatrium (SMOE Indonesia) atas izin akses data lapangan dan dukungan teknis selama penelitian ini berlangsung. Ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya juga ditujukan kepada dosen pembimbing serta seluruh dosen di Program Studi Teknik Industri, Universitas Ibnu Sina Batam, atas bimbingan, wawasan, dan dorongan yang sangat berharga sepanjang proses penelitian.

Penulis juga berterima kasih kepada para inspektor QC, welding engineer, serta welder di PT. Seatrium, yang telah memberikan kerja sama dalam wawancara dan observasi lapangan sehingga sangat membantu penyelesaian penelitian ini.

Akhir kata, penghargaan setulusnya penulis sampaikan kepada keluarga dan rekan-rekan atas motivasi dan dukungan yang tiada henti selama proses penelitian berlangsung.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Al-Refaie, “Monitoring process quality using multivariate control chart and capability indices,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 76, no. 1, pp. 459–470, 2015.
- [2] American Petroleum Institute, API 1104: Welding of pipelines and related facilities. Washington, DC: API, 2021.
- [3] American Society for Nondestructive Testing, Ultrasonic testing handbook, Volume 1: Introduction to ultrasonic testing. Columbus, OH: ASNT, 2016.
- [4] American Welding Society, Welding handbook, Volume 1: Welding science and technology. Miami, FL: AWS, 2001.
- [5] American Welding Society, AWS D1.1/D1.1M: Structural welding code – Steel. Miami, FL: AWS, 2020.

- [6] ASTM International, ASTM E2375-16: Standard guide for ultrasonic testing of welds. West Conshohocken, PA: ASTM, 2016.
 - [7] H. Basuki, Teknik pengelasan dan standar mutu. Yogyakarta: Deepublish, 2020.
 - [8] D. H. Besterfield, Quality control, 7th ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson Education, 2003.
 - [9] J. B. Bowles and C. E. Peláez, “Fuzzy logic prioritization of failures in a system failure mode, effects and criticality analysis,” Reliability Engineering & System Safety, vol. 50, no. 2, pp. 203–213, 1995.
 - [10] P. B. Crosby, Quality is free: The art of making quality certain. New York: McGraw-Hill, 1979.
 - [11] B. D’Silva, R. A. Pradeep, and A. Rajadurai, “A statistical study on the rejection rate of welded joints using NDT techniques,” Journal of Mechanical Engineering and Sciences, vol. 14, no. 3, pp. 7183–7194, 2020.
 - [12] H. Dalianis, “Evaluation of quality in welding,” Journal of Materials Processing Technology, vol. 161, no. 1–2, pp. 111–117, 2005.
 - [13] Det Norske Veritas, DNVGL-ST-F101: Submarine pipeline systems. Høvik: DNV, 2017.
 - [14] EN ISO, ISO 17635: NDT of welds – General rules for metallic materials. Geneva: ISO, 2016.
 - [15] J. R. Evans and W. M. Lindsay, Managing for quality and performance excellence, 8th ed. Mason, OH: Cengage Learning, 2011.
 - [16] M. Fadilah, “Evaluasi pengelasan SMAW dan UT pada proyek offshore,” Jurnal Teknik Welding, vol. 5, no. 2, pp. 30–38, 2019.
 - [17] V. Gaspersz, Lean Six Sigma untuk manufaktur dan jasa. Jakarta: Gramedia Pustaka Utama, 2007.
 - [18] H. S. Gitlow, A. J. Oppenheim, R. Oppenheim, and D. M. Levine, Quality management, 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2005.
 - [19] D. L. Goetsch and S. B. Davis, Quality management for organizational excellence, 7th ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson, 2014.
 - [20] T. S. Gokul and R. Jayakumar, “Defect analysis in welding using ultrasonic testing and visual inspection,” Materials Today: Proceedings, vol. 5, no. 1, pp. 2477–2484, 2018.
 - [21] B. Harianto, “Penerapan metode Six Sigma pada industri manufaktur,” Jurnal Teknologi Industri, vol. 5, no. 1, pp. 45–52, 2016.
 - [22] K. Ishikawa, What is total quality control? The Japanese way. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1985.
 - [23] ISO, ISO 5817: Welding — Fusion-welded joints in steel, nickel, titanium and their alloys — Quality levels for imperfections. Geneva: ISO, 2014.
 - [24] ISO, ISO 17640: Non-destructive testing of welds — Ultrasonic testing — Techniques, testing levels, and assessment. Geneva: ISO, 2018.
 - [25] J. M. Juran and A. B. Godfrey, Juran’s quality handbook, 5th ed. New York: McGraw-Hill, 1999.
 - [26] G. K. Kanji, Measuring business excellence. London: Routledge, 2002.
 - [27] K. Krishnaiah and P. Shahabudeen, Applied design of experiments and Taguchi methods. New Delhi: PHI Learning Pvt. Ltd., 2012.
 - [28] K. Masubuchi, Analysis of welded structures. Oxford: Pergamon, 2013.
 - [29] D. C. Montgomery, Introduction to statistical quality control, 6th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2009.
 - [30] C. Muralidharan, N. Anantharaman, and S. G. Deshmukh, “A study of total quality management in welding processes,” International Journal of Quality & Reliability Management, vol. 19, no. 5, pp. 497–518, 2002.
 - [31] P. S. Pande, R. P. Neuman, and R. R. Cavanagh, The Six Sigma way. New York: McGraw-Hill, 2000.
 - [32] H. Purwanto, “Implementasi diagram Pareto dan fishbone dalam perbaikan kualitas,” Jurnal Teknologi Industri, vol. 10, no. 3, pp. 45–52, 2020.
-

- [33] M. Zairul and Nurliana, “Analisis kualitas hasil las menggunakan metode SPC dan NDT UT,” Jurnal Quality Assurance, vol. 4, no. 2, pp. 35–42, 2020.
- [34] Febriance, Dutho Suh Utomo, “Analisis Kualitas Hasil Pengelasan Menggunakan Metode Six Sigma guna mengurangi weld defect,” Jurnal Teknik Industri Universitas Bung Hatta Vol 11, no 1 pp, 11-24, 2024
- [35] Arifin, N. Y., Kom, S., Kom, M., Tyas, S. S., Kom, S., Sulistiani, H., ... & Kom, M. (2022). *Analisa perancangan sistem informasi*. Cendikia Mulia Mandiri.