

Analisis Perbaikan Defect Slag Inclusion Menggunakan SPC dan FMEA pada Jacket Structure di PT McDermott

Novia Nur Rhamadhan^{1✉}, Hery Irwan²

(1, 2) Program Studi Teknik Industri, Universitas Riau Kepulauan, Batam, Kepulauan Riau, Indonesia

Abstrak: Proses pengelasan pada McDermott jacket structure memerlukan pengendalian kualitas yang ketat karena cacat dapat menurunkan integritas sambungan dan meningkatkan pekerjaan ulang. Penelitian ini bertujuan menganalisis cacat slag inclusion, mengevaluasi kestabilan proses, mengidentifikasi penyebab utama, serta menentukan prioritas perbaikan pada proses Flux-Cored Arc Welding di PT McDermott. Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode Statistical Process Control (SPC), diagram sebab-akibat, dan Failure Mode and Effects Analysis (FMEA). Data diperoleh dari hasil inspeksi Ultrasonic Testing (UT) dan Magnetic Particle Inspection (MPI) terhadap 340 sambungan selama Oktober 2025 hingga April 2026. Hasil penelitian menunjukkan bahwa 23 sambungan mengalami cacat, dengan 12 kasus (52,17%) merupakan slag inclusion. Verifikasi parameter pengelasan menunjukkan bahwa seluruh parameter aktual telah sesuai dengan Welding Procedure Specification (WPS). Analisis peta kendali p menghasilkan rata-rata proporsi cacat sebesar 0,0353. Subgrup pada 25 Februari 2026 memiliki proporsi 0,1600 yang melampaui batas kendali atas (0,1460), sehingga proses belum sepenuhnya terkendali secara statistik. Hasil FMEA menunjukkan pembersihan slag antar-pass yang tidak sempurna sebagai penyebab prioritas dengan nilai RPN tertinggi sebesar 224. Setelah perbaikan, total RPN menurun dari 1.288 menjadi 301 atau sebesar 76,63%. Hasil ini menunjukkan bahwa integrasi SPC dan FMEA efektif dalam mengidentifikasi variasi proses dan menurunkan risiko kegagalan secara terukur.

Abstract: Welding operations in jacket structure fabrication require strict quality control because defects may reduce joint integrity and increase rework. This study aims to analyze slag inclusion defects, evaluate process stability, identify root causes, and determine improvement priorities in the flux-cored arc welding process at PT McDermott. A quantitative approach was applied using Statistical Process Control (SPC), cause-and-effect diagram, and Failure Mode and Effects Analysis (FMEA). Data were collected from Ultrasonic Testing (UT) and Magnetic Particle Inspection (MPI) covering 340 welded joints from October 2025 to April 2026. The results show that 23 joints were defective, with 12 cases (52.17%) identified as slag inclusion. Verification confirms that all welding parameters comply with the Welding Procedure Specification (WPS). The p-chart analysis resulted in an average defect proportion of 0.0353. One subgroup on February 25, 2026 recorded a proportion of 0.1600, exceeding the upper control limit of 0.1460, indicating that the process is not fully statistically controlled. FMEA identified inadequate interpass slag cleaning as the highest-risk cause with an RPN of 224. After improvements, the total RPN decreased from 1,288 to 301, representing a 76.63% reduction. These findings indicate that the integration of SPC and FMEA effectively identifies process variation and reduces operational risk.

Article history:

Received: 18 June 2026

Revised: 06 July 2026

Accepted: 09 July 2026

Published: 12 July 2026

Kata Kunci:

FMEA; FCAW, jacket structure, Statistical Process Control, slag inclusion

Keyword:

Failure Mode and Effects Analysis, Flux-Cored Arc Welding, jacket structure, slag inclusion, Statistical Process Control

This is an open-access article under the [CC-BY-SA License](#).



How to cite: Rhamadhan, N. N., & Irwan, H. (2026). Analisis Perbaikan Defect Slag Inclusion Menggunakan SPC dan FMEA pada Jacket Structure di PT McDermott. *RESWARA: Jurnal Riset Ilmu Teknik*, 4(3), 360–376. <https://doi.org/10.70716/reswara.v4i3.626>

PENDAHULUAN

Struktur jacket merupakan struktur penyangga utama pada fasilitas lepas pantai yang harus mampu menerima beban statis, dinamis, gelombang, arus laut, dan kondisi lingkungan korosif selama masa operasinya. Tingkat keandalan struktur tersebut sangat bergantung pada kualitas setiap

sambungan las yang dibentuk selama proses McDermott. Cacat pengelasan dapat mengurangi luas penampang efektif, menciptakan konsentrasi tegangan, menurunkan kekuatan sambungan, serta meningkatkan risiko kegagalan struktur ketika menerima beban berulang. Penelitian Mubarak dan Machfuroh (2024) menunjukkan bahwa pengendalian kualitas pengelasan diperlukan untuk mencegah munculnya porositas, undercut, dan retak pada konstruksi baja. Muhammad et al. (2020) juga menemukan bahwa porositas dan slag inclusion menjadi cacat penting pada proses pengelasan pipa penstock. Selain memengaruhi integritas sambungan, cacat las dapat menurunkan produktivitas karena perusahaan harus melakukan gouging, pengelasan ulang, inspeksi ulang, dan penjadwalan kembali pekerjaan. Massandi et al. (2024) menegaskan bahwa slag inclusion pada proses pengelasan dapat meningkatkan waktu pengerjaan dan menurunkan produktivitas lini produksi. Oleh karena itu, pengendalian cacat pengelasan pada jacket structure tidak hanya berhubungan dengan pemenuhan spesifikasi teknis, tetapi juga memengaruhi keselamatan, biaya kualitas, dan ketepatan penyelesaian proyek.

Proses Flux-Cored Arc Welding banyak digunakan dalam McDermott struktur baja karena memiliki laju deposisi tinggi, mampu digunakan pada berbagai posisi pengelasan, dan sesuai untuk sambungan dengan ketebalan besar. Namun, penggunaan elektroda berinti fluks menghasilkan lapisan terak yang harus dibersihkan secara menyeluruh sebelum pengelasan lapisan berikutnya. Pembersihan yang tidak sempurna dapat menyebabkan terak terperangkap di dalam logam las dan membentuk slag inclusion. Risiko tersebut meningkat pada pengelasan multipass, terutama ketika welder bekerja pada ruang terbatas, posisi sulit, sudut elektroda tidak tepat, dan kecepatan pengelasan tidak konsisten. Huda (2018) menjelaskan bahwa variasi metode kerja dan faktor operator dapat meningkatkan ketidaksesuaian hasil pengelasan walaupun parameter mesin masih berada dalam rentang prosedur. Febriansyah et al. (2022) menunjukkan bahwa pengurangan tingkat cacat pengelasan tubular memerlukan tahapan pengukuran, analisis penyebab, dan tindakan korektif yang terstruktur. Penggunaan basic seven tools dan new seven tools juga dapat membantu perusahaan mengidentifikasi pola cacat dan hubungan antarpengyebab dalam proses pengelasan (Jannaah & Winursito, 2025). Sani dan Sumiati (2023) selanjutnya memperlihatkan bahwa kombinasi pengendalian kualitas statistik dan FMEA dapat digunakan untuk menentukan jenis cacat dominan serta menyusun prioritas perbaikan dalam proyek McDermott logam.

Pengendalian kualitas yang efektif membutuhkan metode yang mampu menjawab dua persoalan utama, yaitu apakah proses berjalan secara stabil dan faktor apa yang paling berisiko menyebabkan kegagalan. Statistical Process Control digunakan untuk memantau variasi proses berdasarkan data aktual melalui check sheet, diagram Pareto, dan peta kendali. Metode tersebut membantu perusahaan membedakan variasi yang melekat pada proses dengan variasi khusus yang muncul akibat kondisi tertentu. Mulia dan Rochmoeljati (2021) menggunakan SQC dan FMEA untuk mengidentifikasi cacat pengelasan pada industri perkapalan dan menyusun tindakan perbaikan berdasarkan tingkat risikonya. Rochmoeljati et al. (2022) menemukan bahwa slag inclusion menyumbang 23,26% dari keseluruhan cacat pengelasan yang diamati, sehingga cacat tersebut memerlukan pengendalian khusus. Sementara itu, Lisna et al. (2023) menerapkan FMEA pada proses pengelasan proyek feed drum untuk menilai mode kegagalan berdasarkan tingkat keparahan, peluang kejadian, dan kemampuan deteksi. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa SPC dan FMEA memiliki fungsi yang saling melengkapi. SPC menunjukkan kapan dan seberapa besar proses mengalami penyimpangan, sedangkan FMEA menentukan penyebab yang harus diprioritaskan dalam program perbaikan.

Integrasi SPC dan FMEA telah diterapkan pada berbagai objek manufaktur dan menunjukkan kemampuan yang baik dalam mendukung pengambilan keputusan berbasis risiko. Azis dan Mahbubah (2023) mengintegrasikan SPC dan FMEA pada proses casting casing cover untuk mengidentifikasi cacat dominan dan menentukan penyebab dengan nilai risiko tertinggi. Pada proyek konstruksi baja, Zilfianah et al. (2022) menunjukkan bahwa kombinasi Statistical Quality Control dan FMEA dapat menghubungkan frekuensi cacat dengan potensi dampak operasionalnya. Husein dan Rochmoeljati (2021) menerapkan metode serupa pada produk bogie dan menggunakan nilai Risk Priority Number untuk menentukan urutan penyebab yang harus diperbaiki. Kosasih et al. (2015) juga menunjukkan bahwa penggunaan peta kendali dan FMEA pada produk bucket dapat menghasilkan rekomendasi perbaikan yang lebih spesifik dibandingkan analisis persentase cacat semata. Pada proses zinc phosphate coating, Zulkarnain et al. (2024) menggunakan SPC untuk mengidentifikasi variasi kualitas, kemudian menggunakan FMEA untuk memprioritaskan faktor yang paling berpengaruh terhadap ketidaksesuaian produk. Meskipun objek penelitian tersebut berbeda, hasilnya menunjukkan bahwa integrasi analisis statistik dan analisis risiko dapat diterapkan secara luas pada proses yang memiliki variasi dan potensi kegagalan berulang.

Ketepatan penggunaan SPC sangat ditentukan oleh kelengkapan data dan pemilihan peta kendali yang sesuai dengan karakteristik proses. Peta kendali p sesuai digunakan ketika data berbentuk proporsi produk atau unit cacat dan ukuran sampel setiap subgrup berbeda. Seluruh unit yang diperiksa, termasuk subgrup yang tidak memiliki cacat, harus dimasukkan dalam perhitungan agar garis pusat dan batas kendali mewakili kondisi proses yang sebenarnya. Fajrin dan Sulistiyowati (2018) menunjukkan bahwa analisis SPC perlu diikuti dengan identifikasi akar penyebab agar hasil pengendalian tidak berhenti pada pemetaan frekuensi cacat. Mahaputri et al. (2025) juga menjelaskan bahwa rekomendasi perbaikan harus didasarkan pada pola variasi proses, bukan hanya pada total produk cacat. Pada proses pengelasan, Ramadayanti dan Suryadi (2024) menggunakan SQC untuk memantau tingkat reject dan merumuskan tindakan pengendalian berkelanjutan. Hamzah et al. (2024) selanjutnya menegaskan bahwa penggunaan tujuh alat kualitas dapat memberikan gambaran yang lebih sistematis mengenai jenis cacat, frekuensi kejadian, dan faktor penyebabnya. Berdasarkan pertimbangan tersebut, penelitian ini menggunakan check sheet, diagram Pareto, dan peta kendali p untuk menentukan dominasi serta kestabilan proses slag inclusion berdasarkan seluruh sambungan yang diperiksa.

FMEA berperan dalam menerjemahkan hasil identifikasi penyebab menjadi prioritas tindakan yang terukur. Setiap penyebab dinilai berdasarkan severity, occurrence, dan detection, kemudian ketiga nilai tersebut dikalikan untuk memperoleh RPN. Penyebab dengan nilai RPN tinggi memerlukan tindakan lebih cepat karena memiliki kombinasi dampak, kemungkinan kejadian, dan kesulitan deteksi yang lebih besar. Oktaviani et al. (2025) menggunakan FMEA untuk menentukan penyebab prioritas pada produk under bracket dan mengarahkan tindakan terhadap sumber reject utama. Kifta (2018) menggabungkan Six Sigma dan FMEA untuk menganalisis tingkat cacat pengelasan dan menyusun tindakan korektif berdasarkan risiko. Rastiti et al. (2019) juga menggunakan FMEA dalam kerangka DMAIC untuk meminimalkan cacat inklusi pasir melalui pemilihan solusi yang didasarkan pada prioritas penyebab. Secara lebih spesifik pada pengelasan, Wisnubroto et al. (2010) mengidentifikasi slag inclusion sebagai cacat dengan tingkat risiko tinggi yang dipengaruhi oleh praktik kerja, metode pengelasan, dan kedisiplinan operator. Hasil penelitian terdahulu tersebut memperlihatkan bahwa FMEA relevan digunakan setelah penyebab slag inclusion diidentifikasi melalui analisis sebab-akibat.

Namun, perubahan nilai risiko sesudah perbaikan harus dilakukan secara hati-hati. Tindakan seperti pelatihan, standardisasi pembersihan, dan inspeksi visual lebih tepat menurunkan nilai occurrence dan detection, sedangkan nilai severity tetap karena dampak dasar cacat terhadap integritas sambungan tidak berubah.

Hasil inspeksi Non-Destructive Testing menggunakan Ultrasonic Testing dan Magnetic Particle Inspection pada proses pengelasan jacket structure di PT McDermott selama Oktober 2025 hingga April 2026 menunjukkan bahwa 23 dari 340 sambungan mengalami defect. Dari jumlah tersebut, slag inclusion menjadi cacat dominan dengan 12 kasus atau 52,17%, diikuti lack of root fusion sebanyak 8 kasus dan lack of side wall fusion sebanyak 3 kasus. Kondisi tersebut terjadi meskipun hasil verifikasi menunjukkan bahwa parameter arus, tegangan, travel speed, root gap, jenis elektroda, diameter elektroda, posisi pengelasan, dan heat input telah sesuai dengan Welding Procedure Specification. Hal ini menunjukkan bahwa kepatuhan terhadap parameter WPS belum sepenuhnya menjamin konsistensi kualitas apabila faktor metode kerja, pembersihan antar-pass, keterampilan welder, akses pengelasan, dan pengawasan proses belum dikendalikan secara optimal. Sebagian besar penelitian terdahulu membahas pengelasan kapal, pipa, ducting, feed drum, H-beam, atau produk manufaktur umum. Namun, kajian yang secara khusus mengintegrasikan diagram Pareto, peta kendali p dengan ukuran subgrup berbeda, diagram sebab-akibat, dan FMEA pada proses pengelasan jacket structure masih relatif terbatas. Penelitian ini bertujuan menganalisis dominasi dan kestabilan slag inclusion, mengidentifikasi faktor penyebab utama, menentukan prioritas risiko, serta menyusun tindakan perbaikan pada pengelasan FCAW di PT McDermott. Kontribusi penelitian terletak pada integrasi analisis statistik dan analisis risiko untuk menghasilkan rekomendasi perbaikan yang lebih terukur dan sesuai dengan karakteristik McDermott struktur lepas pantai.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif terapan dengan desain studi kasus pada proses McDermott jacket structure di PT McDermott. Pendekatan kuantitatif dipilih karena penelitian menggunakan data numerik berupa jumlah sambungan yang diperiksa, jumlah cacat, proporsi cacat, batas kendali proses, serta nilai risiko kegagalan. Studi kasus digunakan karena analisis difokuskan pada satu proses produksi tertentu, yaitu pengelasan Flux-Cored Arc Welding pada struktur lepas pantai. Integrasi Statistical Process Control dan Failure Mode and Effects Analysis digunakan untuk menilai kestabilan proses sekaligus menentukan prioritas penyebab kegagalan. Pendekatan serupa telah digunakan untuk menganalisis pengendalian kualitas pengelasan dan menentukan tindakan perbaikan berdasarkan frekuensi cacat serta tingkat risiko proses (Mulia & Rochmoeljati, 2021; Rochmoeljati et al., 2022; Lisna et al., 2023).

Penelitian dilaksanakan di area McDermott jacket structure PT McDermott selama periode Oktober 2025 sampai April 2026. Objek penelitian adalah cacat slag inclusion yang ditemukan pada sambungan pengelasan FCAW. Proses pengelasan menggunakan elektroda E81T1-GC-H4 berdiameter 1,2 mm dengan posisi pengelasan 1G, 2G, dan 3G. Populasi penelitian mencakup seluruh sambungan yang menjalani inspeksi Non-Destructive Testing selama periode pengamatan. Teknik pengambilan sampel menggunakan metode sensus karena seluruh populasi yang tersedia digunakan sebagai unit analisis. Jumlah unit yang dianalisis sebanyak 340 sambungan yang terbagi ke dalam 15

subgrup berdasarkan tanggal inspeksi. Penggunaan seluruh unit inspeksi diperlukan agar rata-rata proporsi cacat dan batas kendali menggambarkan kondisi proses secara utuh.

Data penelitian terdiri atas data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh melalui observasi langsung terhadap proses pengelasan, pembersihan slag antar-pass, pengaturan posisi kerja, penggunaan peralatan, dan pelaksanaan inspeksi visual sebelum pengelasan lapisan berikutnya. Wawancara terstruktur dilakukan kepada welder, welding engineer, welding inspector, dan QC supervisor untuk mengidentifikasi faktor manusia, metode, mesin, material, pengukuran, serta kondisi lingkungan yang dapat memengaruhi munculnya slag inclusion. Data sekunder diperoleh dari dokumen Welding Procedure Specification, catatan parameter pengelasan aktual, laporan inspeksi Ultrasonic Testing, laporan Magnetic Particle Inspection, laporan perbaikan pengelasan, dan rekapitulasi hasil NDT. Kombinasi observasi, wawancara, dan dokumen digunakan untuk meningkatkan ketepatan identifikasi penyebab kegagalan.

Instrumen penelitian meliputi lembar observasi proses, pedoman wawancara, check sheet cacat, lembar verifikasi parameter WPS, diagram Pareto, lembar perhitungan peta kendali p, diagram sebab-akibat, dan tabel FMEA. Check sheet digunakan untuk mencatat tanggal inspeksi, jumlah sambungan yang diperiksa, jenis cacat, serta jumlah kejadian setiap cacat. Diagram Pareto digunakan untuk mengurutkan jenis cacat berdasarkan frekuensi dan persentase kumulatif sehingga diperoleh cacat yang menjadi prioritas utama. Penggunaan check sheet dan diagram Pareto membantu memusatkan tindakan perbaikan pada jenis ketidaksesuaian yang memberikan kontribusi terbesar terhadap total cacat (Hamzah et al., 2024; Jannaah & Winursito, 2025).

Tahap awal analisis dilakukan dengan memverifikasi kesesuaian parameter pengelasan aktual terhadap WPS. Parameter yang dibandingkan meliputi arus, tegangan, travel speed, root gap, jenis elektroda, diameter elektroda, posisi pengelasan, dan heat input. Verifikasi dilakukan untuk menentukan apakah slag inclusion disebabkan oleh penyimpangan parameter pengelasan atau oleh faktor lain di luar rentang WPS. Setelah verifikasi, seluruh hasil inspeksi NDT direkap menggunakan check sheet. Frekuensi setiap jenis cacat kemudian dihitung dengan persamaan:

Persentase cacat = (jumlah setiap jenis cacat / jumlah seluruh cacat) × 100%.

Hasil perhitungan digunakan untuk membentuk diagram Pareto dan menentukan jenis cacat dominan. Pendekatan ini sejalan dengan penelitian Huda (2018), Sani dan Sumiati (2023), serta Mubarak dan Machfuroh (2024), yang menggunakan data frekuensi untuk menentukan fokus pengendalian kualitas pengelasan.

Kestabilan proses slag inclusion dianalisis menggunakan peta kendali atribut jenis p. Peta kendali p dipilih karena data berbentuk proporsi sambungan cacat dan ukuran sampel setiap subgrup berbeda. Seluruh subgrup, termasuk subgrup tanpa slag inclusion, dimasukkan dalam perhitungan agar garis pusat tidak mengalami bias. Nilai rata-rata proporsi cacat dihitung menggunakan persamaan:

$$\bar{p} = \frac{\sum d_i}{\sum n_i}$$

dengan $\bar{p}$ sebagai rata-rata proporsi cacat, d_i sebagai jumlah slag inclusion pada subgrup ke- i , dan n_i sebagai jumlah sambungan yang diperiksa pada subgrup ke- i . Batas kendali atas dan batas kendali bawah dihitung untuk setiap subgrup dengan persamaan:

$$UCL_i = \bar{p} + 3 \sqrt{\frac{\bar{p}(1 - \bar{p})}{n_i}}$$

$$LCL_i = \bar{p} - 3 \sqrt{\frac{\bar{p}(1 - \bar{p})}{n_i}}$$

Apabila hasil LCL bernilai negatif, nilainya ditetapkan menjadi nol. Titik yang berada di luar batas kendali dikategorikan sebagai variasi penyebab khusus dan memerlukan investigasi lebih lanjut. Prinsip penggunaan peta kendali untuk menilai kestabilan proses telah diterapkan dalam penelitian pengendalian kualitas manufaktur dan pengelasan (Fajrin & Sulistiyowati, 2018; Ramadayanti & Suryadi, 2024; Mahaputri et al., 2025).

Setelah kestabilan proses dianalisis, penyebab slag inclusion diidentifikasi menggunakan diagram sebab-akibat dengan pendekatan 5M+1E, yaitu man, machine, method, material, measurement, dan environment. Faktor man mencakup keterampilan dan ketelitian welder. Faktor machine mencakup kestabilan mesin las dan wire feeder. Faktor method mencakup pembersihan antar-pass, sudut elektroda, kecepatan gerak, serta teknik pengelasan. Faktor material mencakup karakteristik fluks dan kondisi permukaan material. Faktor measurement mencakup pengawasan parameter dan inspeksi antar-pass. Faktor environment mencakup keterbatasan akses dan kondisi ruang kerja. Hasil analisis sebab-akibat digunakan sebagai dasar penyusunan FMEA agar setiap penyebab potensial dapat dinilai secara sistematis.

FMEA digunakan untuk menentukan prioritas tindakan berdasarkan tiga kriteria, yaitu severity, occurrence, dan detection. Severity menunjukkan tingkat keparahan dampak kegagalan terhadap kualitas dan integritas sambungan. Occurrence menunjukkan kemungkinan atau frekuensi terjadinya penyebab kegagalan. Detection menunjukkan kemampuan sistem pengendalian dalam mendeteksi penyebab atau kegagalan sebelum hasil pengelasan dinyatakan selesai. Setiap kriteria dinilai menggunakan skala 1 sampai 10 berdasarkan konsensus welding engineer, welding inspector, dan QC supervisor. Nilai Risk Priority Number dihitung menggunakan persamaan:

$$RPN = S \times O \times D$$

Penyebab dengan nilai RPN tertinggi ditempatkan sebagai prioritas utama perbaikan. Metode ini telah digunakan pada pengelasan, konstruksi baja, produk bogie, produk bucket, serta proses casting untuk menentukan sumber risiko yang membutuhkan tindakan segera (Kosasih et al., 2015; Husein & Rochmoeljati, 2021; Zilfianah et al., 2022; Azis & Mahbubah, 2023).

Tindakan perbaikan disusun berdasarkan penyebab dengan RPN tertinggi. Usulan tindakan meliputi standardisasi pembersihan slag antar-pass, penerapan titik henti inspeksi visual, pengawasan travel speed dan arc length, perbaikan akses kerja, pelatihan ulang FCAW, serta evaluasi kompetensi welder. Efektivitas usulan dinilai melalui perbandingan RPN sebelum dan sesudah perbaikan. Pada penilaian sesudah perbaikan, nilai severity dipertahankan karena tindakan perbaikan tidak mengubah dampak dasar slag inclusion terhadap sambungan. Perubahan hanya diterapkan pada nilai occurrence dan detection. Persentase penurunan risiko dihitung menggunakan persamaan:

$$\text{Penurunan RPN \%} = \frac{\text{RPN sebelum} - \text{RPN sesudah}}{\text{RPN sebelum}} 100\%.$$

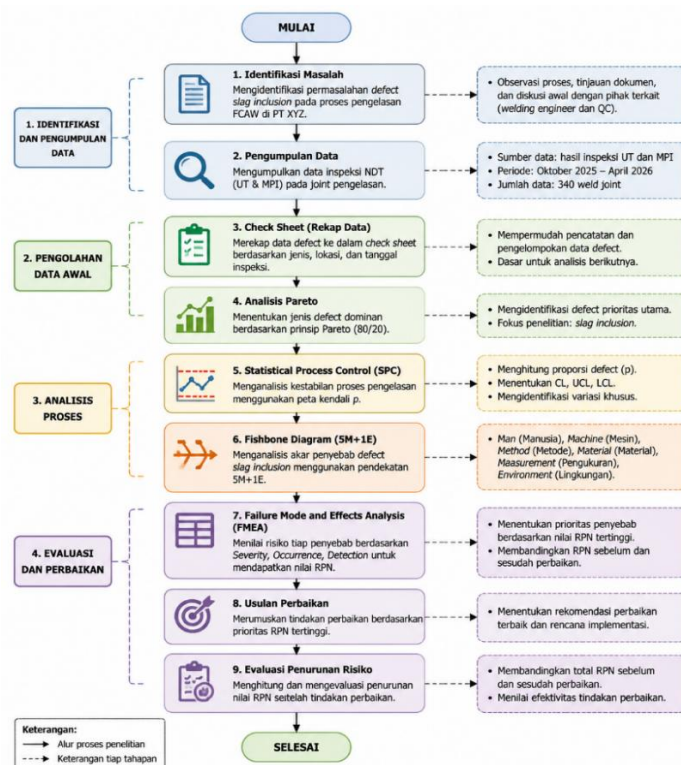
Hasil penurunan RPN digunakan sebagai indikator estimasi efektivitas tindakan. Namun, penurunan tersebut belum dianggap sebagai bukti penurunan cacat aktual sebelum dikonfirmasi melalui data inspeksi pascaperbaikan. Oleh karena itu, hasil penelitian diarahkan untuk menjadi dasar pelaksanaan peta kendali fase lanjutan setelah tindakan diterapkan.

Tahapan penelitian ini disusun secara sistematis untuk menganalisis defect slag inclusion pada proses pengelasan Flux-Cored Arc Welding (FCAW) di PT McDermott. Penelitian diawali dengan identifikasi masalah melalui observasi lapangan, studi dokumen WPS, serta diskusi dengan welding engineer dan QC.

Selanjutnya dilakukan pengumpulan data inspeksi Non-Destructive Testing (UT dan MPI) terhadap 340 weld sambungan pada periode Oktober 2025–April 2026. Data yang diperoleh kemudian direkap menggunakan check sheet untuk mengidentifikasi jenis dan frekuensi defect.

Tahap berikutnya adalah analisis Pareto untuk menentukan defect dominan, dilanjutkan dengan Statistical Process Control (SPC) menggunakan peta kendali p untuk mengevaluasi kestabilan proses. Setelah itu dilakukan analisis Fishbone Diagram (5M+1E) untuk mengidentifikasi akar penyebab, yang kemudian menjadi dasar penyusunan Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) untuk menentukan prioritas risiko berdasarkan nilai Risk Priority Number (RPN).

Tahap akhir adalah penyusunan usulan perbaikan dan evaluasi penurunan risiko berdasarkan perbandingan nilai RPN sebelum dan sesudah tindakan korektif.



Gambar 1. Flowchart Metode Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Kesesuaian Parameter Pengelasan dan Identifikasi Defect

Hasil verifikasi menunjukkan bahwa seluruh parameter aktual pengelasan FCAW masih berada dalam rentang yang ditetapkan dalam Welding Procedure Specification (WPS). Arus aktual berada pada rentang 170 sampai 259 A, tegangan 23 sampai 27 V, travel speed 200 sampai 269 mm/menit, serta heat input 0,97 sampai 1,25 kJ/mm. Jenis elektroda, diameter elektroda, root gap, dan posisi

pengelasan juga telah sesuai dengan WPS. Kesesuaian ini menunjukkan bahwa kemunculan slag inclusion tidak secara langsung disebabkan oleh penyimpangan parameter utama mesin las.

Temuan tersebut mengarahkan analisis pada faktor pelaksanaan di lapangan, seperti pembersihan slag antar-pass, teknik manipulasi elektroda, kestabilan arc length, keterampilan welder, dan keterbatasan akses pada area sambungan. Hasil ini sejalan dengan Huda (2018), yang menunjukkan bahwa defect pengelasan tetap dapat terjadi meskipun parameter mesin telah sesuai karena adanya variasi metode kerja dan perilaku operator. Mubarak dan Machfuroh (2024) juga menemukan bahwa ketidaksesuaian hasil las tidak hanya ditentukan oleh arus dan tegangan, tetapi juga oleh kondisi material, metode, mesin, serta keterampilan tenaga kerja.

Slag inclusion merupakan cacat pengelasan yang terjadi akibat terperangkapnya terak (slag) di dalam logam las selama proses pengelasan, terutama pada pengelasan multipass. Cacat ini umumnya disebabkan oleh pembersihan slag antar-pass yang tidak sempurna, teknik pengelasan yang kurang tepat, sudut elektroda yang tidak sesuai, maupun keterbatasan akses pada area sambungan. Keberadaan slag inclusion dapat menurunkan kualitas sambungan las karena menjadi titik konsentrasi tegangan yang berpotensi menurunkan kekuatan mekanik serta integritas struktur hasil pengelasan. Gambar 1(a) memperlihatkan slag yang masih menempel pada hasil pengelasan sebelum dibersihkan, sedangkan Gambar 1(b) menunjukkan contoh defect slag inclusion yang telah terbentuk pada permukaan sambungan las.

(a) Slag yang belum dibersihkan setelah proses pengelasan.



Gambar 2. Slag proses pengelasan

(b) Contoh defect slag inclusion pada sambungan las.



Gambar 3. Defect slag inclusion pada sambungan las

Keterangan: (a) menunjukkan slag yang masih menempel pada hasil pengelasan sehingga berpotensi terjebak pada lapisan pengelasan berikutnya apabila tidak dibersihkan secara sempurna. (b) menunjukkan contoh defect slag inclusion yang tampak pada permukaan sambungan las dan ditandai dengan tanda panah sebagai lokasi terperangkapnya material non-logam di dalam logam las.

Dari 340 sambungan yang diperiksa, sebanyak 23 sambungan mengalami defect atau sebesar 6,76%. Slag inclusion merupakan jenis defect yang paling dominan dengan 12 kasus atau 52,17% dari seluruh defect, diikuti lack of root fusion sebanyak 8 kasus atau 34,78%, serta lack of side wall fusion sebanyak 3 kasus atau 13,04%. Dominasi tersebut menunjukkan bahwa pengendalian kualitas perlu difokuskan pada praktik pengelasan multipass dan pembersihan terak sebelum pengelasan lapisan berikutnya.

Tabel 1. Perbandingan Parameter Pengelasan WPS dan Kondisi Aktual

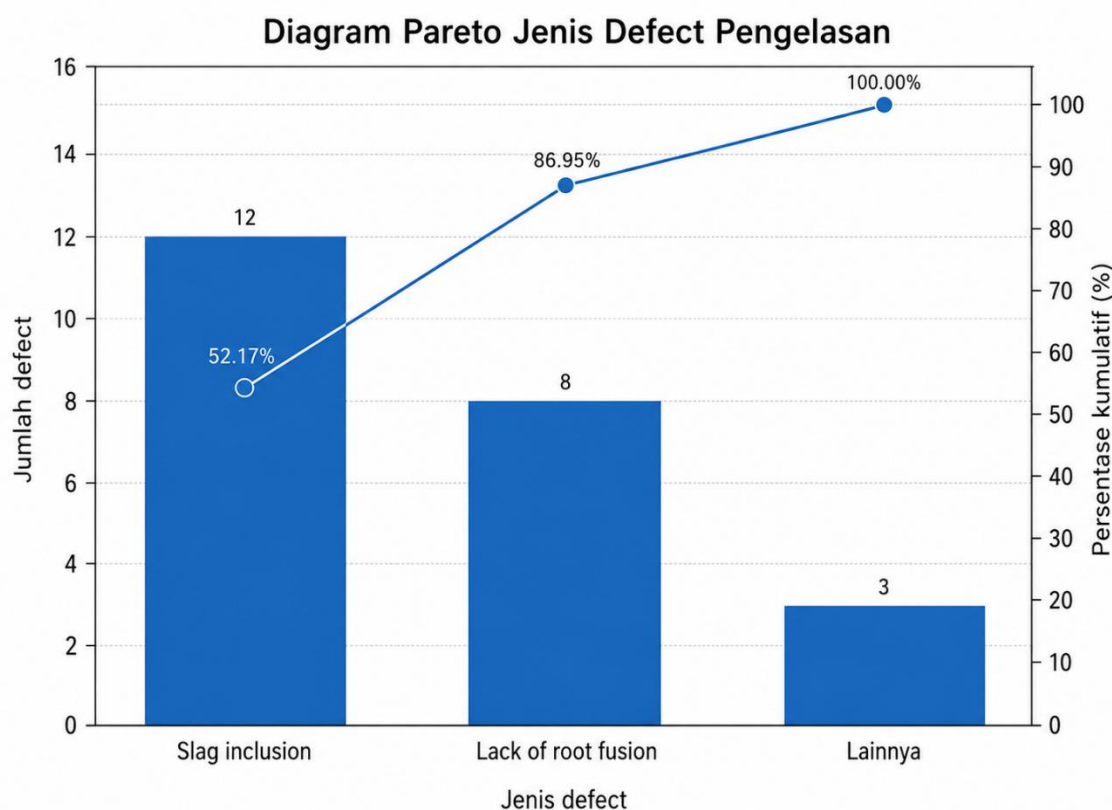
No.	Parameter	Standar WPS	Kondisi aktual	Keterangan
1	Arus	160-260 A	170-259 A	Sesuai
2	Tegangan	19-27 V	23-27 V	Sesuai
3	Travel speed	110-310 mm/menit	200-269 mm/menit	Sesuai
4	Root gap	3 mm	3 mm	Sesuai
5	Jenis elektroda	E81T1-GC-H4	E81T1-GC-H4	Sesuai
6	Diameter elektroda	1,2 mm	1,2 mm	Sesuai
7	Posisi pengelasan	1G-3G	1G, 2G, dan 3G	Sesuai
8	Heat input	0,64-1,64 kJ/mm	0,97-1,25 kJ/mm	Sesuai

Tabel 2. Distribusi Jenis Defect Pengelasan

Jenis defect	Jumlah	Persentase
Slag inclusion	12	52,17%
Lack of root fusion	8	34,78%
Lack of side wall fusion	3	13,04%
Total	23	100,00%

Analisis Diagram Pareto

Diagram Pareto menunjukkan bahwa slag inclusion memberikan kontribusi terbesar terhadap total defect, yaitu 52,17%. Jika digabungkan dengan lack of root fusion, persentase kumulatif kedua defect tersebut mencapai 86,95%. Hasil ini menunjukkan bahwa pengendalian terhadap dua jenis defect tersebut berpotensi mengurangi sebagian besar masalah kualitas pengelasan di PT McDermott. Penelitian ini memprioritaskan slag inclusion karena memiliki frekuensi paling tinggi dan berkaitan erat dengan proses pembersihan slag pada pengelasan multipass. Proporsi slag inclusion dalam penelitian ini lebih tinggi dibandingkan hasil Rochmoeljati et al. (2022), yang menemukan kontribusi slag inclusion sebesar 23,26% pada proses pengelasan di industri perkapalan. Perbedaan tersebut dapat disebabkan oleh karakteristik geometri sambungan, posisi pengelasan, akses kerja, dan kompleksitas jacket structure. Muhammad et al. (2020) juga mengidentifikasi slag inclusion sebagai salah satu defect penting pada pengelasan pipa penstock, sedangkan Sani dan Sumiati (2023) menunjukkan bahwa diagram Pareto efektif digunakan untuk menentukan defect yang harus menjadi fokus utama sebelum dilakukan analisis risiko. Hasil Pareto dalam penelitian ini tidak hanya menunjukkan frekuensi masalah, tetapi juga menjadi dasar pemilihan slag inclusion sebagai objek analisis SPC, fishbone, dan FMEA. Namun, diagram Pareto belum dapat menunjukkan kestabilan proses dari waktu ke waktu. Oleh karena itu, analisis dilanjutkan menggunakan peta kendali p untuk mendeteksi kemungkinan variasi penyebab khusus pada setiap subgrup inspeksi.



Gambar 4. Diagram Pareto Jenis Defect Pengelasan

Keterangan: diagram batang menunjukkan jumlah defect, sedangkan garis menunjukkan persentase kumulatif. Slag inclusion dan lack of root fusion menghasilkan persentase kumulatif sebesar 86,95%.

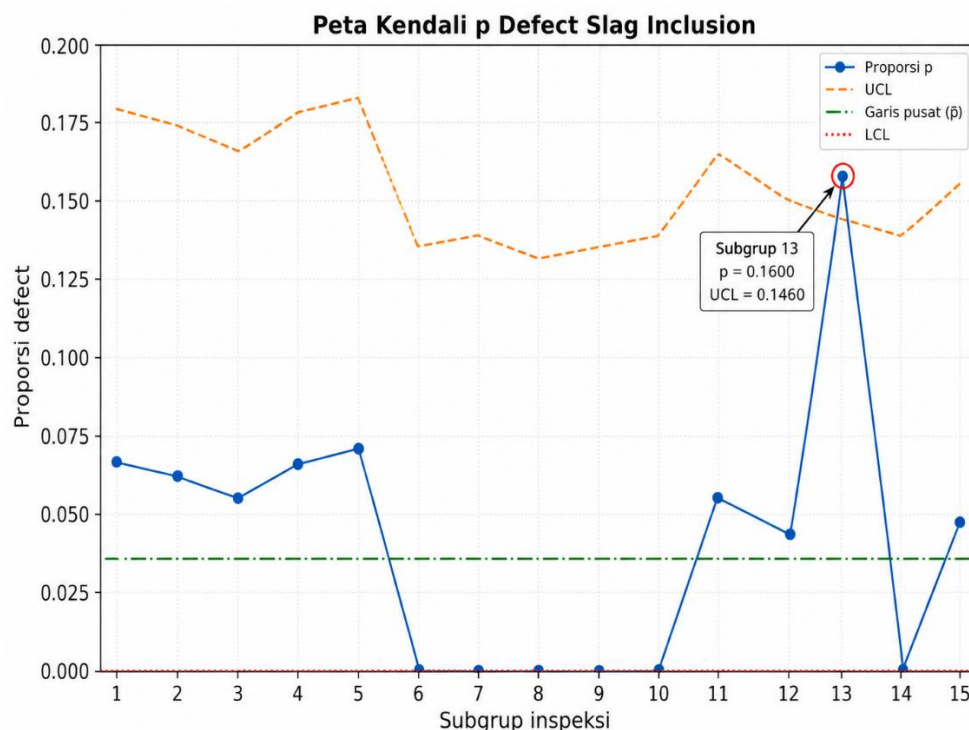
Analisis Kestabilan Proses Menggunakan Peta Kendali p

Peta kendali p dihitung menggunakan seluruh 340 sambungan pada 15 subgrup inspeksi, termasuk subgrup yang tidak memiliki slag inclusion. Penggunaan seluruh data diperlukan agar garis pusat dan batas kendali menggambarkan tingkat defect aktual secara objektif. Hasil perhitungan menghasilkan rata-rata proporsi slag inclusion sebesar 0,0353 atau 3,53%. Sebanyak 14 subgrup berada di dalam batas kendali, sedangkan subgrup ke-13 pada tanggal 25 Februari 2026 mencatat empat kasus slag inclusion dari 25 joint, sehingga menghasilkan proporsi sebesar 0,1600. Nilai tersebut melampaui batas kendali atas individual sebesar 0,1460. Kondisi ini menunjukkan bahwa proses pengelasan pada subgrup tersebut mengalami variasi penyebab khusus yang tidak berasal dari variasi alamiah proses. Investigasi lebih lanjut perlu diarahkan pada identitas welder, posisi pengelasan, tingkat kesulitan joint, kondisi shift, akses pembersihan, consumable, serta pelaksanaan inspeksi antar-pass pada tanggal tersebut. Temuan ini menegaskan bahwa proses pengelasan belum sepenuhnya berada dalam kondisi terkendali secara statistik. Fajrin dan Sulistiyowati (2018) menjelaskan bahwa titik yang berada di luar batas kendali harus ditelusuri menggunakan analisis akar penyebab karena menunjukkan kondisi tidak normal. Ramadayanti dan Suryadi (2024) serta Mahaputri et al. (2025) juga menunjukkan bahwa peta kendali dapat digunakan untuk menentukan waktu terjadinya penyimpangan proses yang tidak terlihat melalui persentase cacat agregat. Meskipun sebagian besar titik berada dalam batas kendali, kondisi tersebut tidak langsung menunjukkan bahwa proses telah memenuhi seluruh target kualitas. Peta kendali hanya menilai kestabilan proses, sedangkan tingkat penerimaan kualitas tetap harus dibandingkan dengan spesifikasi dan target defect perusahaan.

Tabel 3. Perhitungan Peta Kendali p untuk Slag Inclusion

Subgrup	Tanggal inspeksi	Sambungandiperiksa	Slag inclusion	Proporsi p	UCL	LCL
1	9 Oktober 2025	15	1	0,0667	0,1783	0,0000
2	10 Oktober 2025	16	1	0,0625	0,1737	0,0000
3	11 Oktober 2025	18	1	0,0556	0,1658	0,0000
4	12 Oktober 2025	15	1	0,0667	0,1783	0,0000
5	14 Oktober 2025	14	1	0,0714	0,1835	0,0000
6	8 November 2025	30	0	0,0000	0,1364	0,0000
7	11 November 2025	28	0	0,0000	0,1399	0,0000
8	13 November 2025	32	0	0,0000	0,1331	0,0000
9	17 November 2025	30	0	0,0000	0,1364	0,0000
10	19 November 2025	28	0	0,0000	0,1399	0,0000
11	20 November 2025	18	1	0,0556	0,1658	0,0000
12	3 Februari 2026	22	1	0,0455	0,1533	0,0000

13	25 Februari 2026	25	4	0,1600	0,1460	0,0000
14	28 Maret 2026	28	0	0,0000	0,1399	0,0000
15	7 April 2026	21	1	0,0476	0,1561	0,0000
Garis pusat		340	12	0,0353		

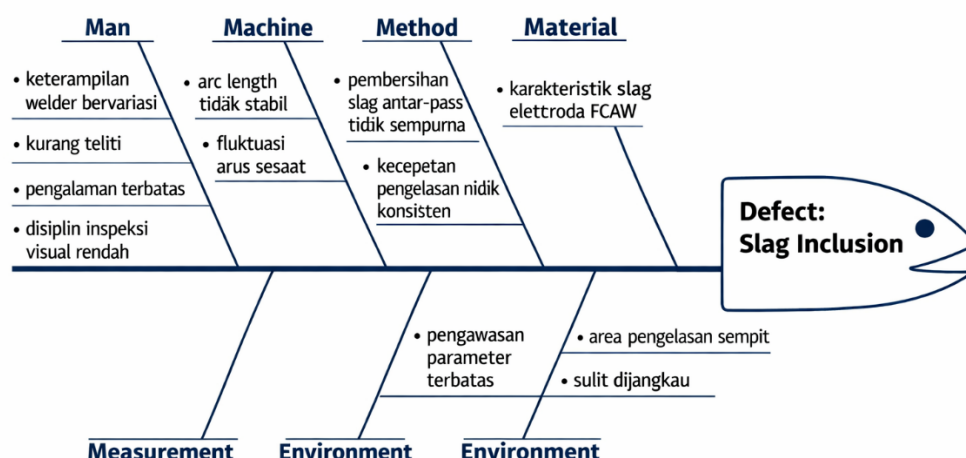


Gambar 5. Peta Kendali p Defect Slag Inclusion

Keterangan: subgrup ke-13 memiliki nilai p sebesar 0,1600 dan berada di atas UCL sebesar 0,1460, sehingga menunjukkan variasi penyebab khusus.

Identifikasi Akar Penyebab Menggunakan Diagram Fishbone

Untuk menelusuri penyebab utama kemunculan slag inclusion, dilakukan analisis akar penyebab menggunakan diagram fishbone dengan pendekatan 5M+1E. Diagram ini digunakan untuk mengelompokkan faktor penyebab dari aspek manusia, mesin, metode, material, pengukuran, dan lingkungan.



Gambar 6. Diagram Fishbone Penyebab Defect Slag Inclusion

Keterangan: diagram fishbone menunjukkan bahwa defect slag inclusion dipengaruhi oleh faktor manusia, mesin, metode, material, pengukuran, dan lingkungan.

Diagram fishbone pada Gambar 4 menunjukkan bahwa slag inclusion dipengaruhi oleh enam kelompok faktor. Pada aspek metode, penyebab utama meliputi pembersihan slag antar-pass yang tidak sempurna, kecepatan pengelasan yang tidak konsisten, teknik pengelasan yang kurang sesuai, dan urutan pengelasan yang tidak optimal. Pada aspek manusia, penyebab berkaitan dengan variasi keterampilan, ketelitian, pengalaman, dan kedisiplinan welder dalam melakukan inspeksi visual.

Selain itu, faktor lingkungan juga berperan, terutama karena area pengelasan yang sempit dan sulit dijangkau sehingga menyulitkan proses pembersihan slag dan pelaksanaan pengelasan multipass. Faktor mesin dan pengukuran berkaitan dengan ketidakstabilan arc length, fluktuasi arus sesaat, dan keterbatasan pengawasan parameter selama proses berlangsung. Sementara itu, faktor material berhubungan dengan karakteristik slag dari elektroda FCAW yang harus dibersihkan secara menyeluruh sebelum proses pengelasan berikutnya dilakukan.

Hasil identifikasi tersebut menunjukkan bahwa kemunculan slag inclusion tidak hanya dipengaruhi oleh satu faktor tunggal, tetapi merupakan hasil interaksi antara metode kerja, keterampilan operator, kondisi area kerja, dan karakteristik proses FCAW. Temuan ini memperkuat hasil analisis sebelumnya bahwa defect lebih berkaitan dengan pelaksanaan proses di lapangan daripada penyimpangan parameter utama pada WPS. Berdasarkan hasil identifikasi akar penyebab tersebut, analisis dilanjutkan menggunakan FMEA untuk menentukan tingkat prioritas risiko dari masing-masing penyebab potensial.

Analisis FMEA Sebelum Perbaikan

Berdasarkan hasil identifikasi akar penyebab melalui diagram fishbone, dilakukan analisis Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) untuk menentukan tingkat prioritas risiko dari masing-masing penyebab potensial. Hasil FMEA awal menunjukkan total Risk Priority Number (RPN) sebesar 1.288.

Pembersihan slag antar-pass yang tidak sempurna menjadi penyebab dengan nilai RPN tertinggi, yaitu 224. Kecepatan pengelasan yang tidak konsisten menempati urutan kedua dengan RPN 210, sedangkan area pengelasan sempit dan sulit dijangkau memiliki RPN 196. Hasil tersebut menunjukkan bahwa faktor metode dan kondisi kerja lebih dominan dibandingkan penyimpangan parameter WPS.

Dengan demikian, tindakan perbaikan sebaiknya diprioritaskan pada aspek pelaksanaan kerja di lapangan yang secara langsung berpengaruh terhadap peluang terbentuknya slag inclusion.

Temuan ini konsisten dengan Wisnubroto et al. (2010), yang menempatkan slag inclusion sebagai kegagalan pengelasan berisiko tinggi. Massandi et al. (2024) juga mengidentifikasi faktor manusia dan ketidakpatuhan terhadap prosedur sebagai penyebab penting cacat pengelasan H-beam. Penggunaan FMEA untuk menentukan penyebab kritis juga sejalan dengan Lisna et al. (2023), Oktaviani et al. (2025), Husein dan Rochmoeljati (2021), serta Zilfianah et al. (2022). Melalui nilai RPN, perusahaan dapat menghindari tindakan perbaikan yang terlalu umum dan lebih terarah pada penyebab dengan kombinasi tingkat dampak, kejadian, dan kesulitan deteksi tertinggi.

Tabel 4. Analisis FMEA Sebelum Perbaikan

Penyebab potensial	S	O	D	RPN	Prioritas
Pembersihan slag antar-pass tidak sempurna	7	8	4	224	1
Kecepatan pengelasan tidak konsisten	7	6	5	210	2
Area pengelasan sempit dan sulit dijangkau	7	7	4	196	3
Teknik pengelasan tidak sesuai prosedur	7	5	5	175	4
Keterampilan welder belum memadai	7	5	5	175	4
Karakteristik slag pada proses FCAW	7	6	4	168	6
Arc length tidak stabil dan memicu fluktuasi arus	7	5	4	140	7
Total RPN				1.288	

Usulan Perbaikan dan Evaluasi Risiko Sesudah Perbaikan

Usulan perbaikan disusun dengan memprioritaskan penurunan nilai occurrence dan detection. Nilai severity dipertahankan sebesar 7 karena tindakan perbaikan tidak mengubah konsekuensi dasar slag inclusion terhadap kekuatan dan integritas sambungan. Tindakan utama yang diusulkan meliputi penyusunan SOP pembersihan slag antar-pass, penerapan titik henti inspeksi visual sebelum lapisan berikutnya, penggunaan alat pembersih yang sesuai, pengawasan travel speed dan arc length, perbaikan akses kerja, pelatihan FCAW, serta requalification welder yang memiliki pola defect berulang.

Berdasarkan evaluasi risiko terhadap usulan tindakan perbaikan, total RPN diperkirakan turun dari 1.288 menjadi 301 atau berkurang sebesar 76,63%. Nilai RPN pembersihan antar-pass turun dari 224 menjadi 42. Kecepatan pengelasan turun dari 210 menjadi 42, sedangkan faktor area sempit turun dari 196 menjadi 42. Penurunan ini menunjukkan bahwa tindakan korektif yang difokuskan pada pengendalian metode kerja, akses pelaksanaan, dan pengawasan proses memiliki potensi yang signifikan untuk menurunkan tingkat risiko slag inclusion.

Meskipun demikian, keterampilan welder masih memiliki RPN sesudah perbaikan tertinggi, yaitu 63. Kondisi ini menunjukkan bahwa pelatihan tidak cukup hanya dilakukan dalam bentuk penyampaian materi, tetapi perlu dihubungkan dengan evaluasi kompetensi, hasil NDT per welder, posisi pengelasan, dan kompleksitas joint. Arah perbaikan ini konsisten dengan Kosasih et al. (2015), Azis dan Mahbubah (2023), serta Zulkarnain et al. (2024), yang menunjukkan bahwa tindakan perbaikan perlu diarahkan pada penyebab dengan nilai RPN tertinggi. Kifta (2018) dan Rastiti et al. (2019) juga menjelaskan bahwa perbaikan berbasis risiko perlu disertai pengukuran lanjutan untuk memastikan perubahan proses.

Penurunan RPN dalam penelitian ini merupakan estimasi penurunan risiko berdasarkan evaluasi teknis, bukan bukti langsung atas penurunan defect aktual. Oleh karena itu, PT McDermott perlu mengumpulkan data inspeksi pascaperbaikan dan membangun peta kendali fase II. Efektivitas tindakan perbaikan dapat dinyatakan secara empiris apabila proporsi slag inclusion menurun, tidak terdapat titik

di luar batas kendali, serta pola defect per welder dan jenis sambungan menunjukkan perbaikan yang konsisten.

Tabel 5. Analisis FMEA Sesudah Usulan Perbaikan

Penyebab potensial	Tindakan perbaikan	S	O	D	RPN
Pembersihan slag antar-pass tidak sempurna	SOP pembersihan, <i>titik henti inspeksi</i> , dan inspeksi visual	7	3	2	42
Kecepatan pengelasan tidak konsisten	Monitoring <i>travel speed</i> dan coaching	7	2	3	42
Area pengelasan sempit dan sulit dijangkau	Perbaikan akses dan urutan pekerjaan	7	2	3	42
Teknik pengelasan tidak sesuai prosedur	Pelatihan teknik FCAW berbasis joint	7	3	2	42
Keterampilan welder belum memadai	<i>Refresh training</i> dan <i>requalification</i>	7	3	3	63
Karakteristik slag pada proses FCAW	Optimasi pembersihan dan evaluasi consumable	7	2	2	28
<i>Arc length</i> tidak stabil dan memicu fluktuasi arus	pemantauan <i>arc length</i> dan parameter pengelasan	7	3	2	42
Total RPN					301

Tabel 6. Perbandingan RPN Sebelum dan Sesudah Perbaikan

Penyebab potensial	RPN sebelum	RPN sesudah	Penurunan
Pembersihan slag antar-pass tidak sempurna	224	42	81,25%
Kecepatan pengelasan tidak konsisten	210	42	80,00%
Area pengelasan sempit dan sulit dijangkau	196	42	78,57%
Teknik pengelasan tidak sesuai prosedur	175	42	76,00%
Keterampilan welder belum memadai	175	63	64,00%
Karakteristik slag pada proses FCAW	168	28	83,33%
<i>Arc length</i> tidak stabil dan memicu fluktuasi arus	140	42	70,00%
Total	1.288	301	76,63%

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa slag inclusion merupakan jenis defect dominan pada proses pengelasan FCAW *jacket structure* di PT McDermott. Dari 340 sambunganyang diperiksa selama Oktober 2025 sampai April 2026, sebanyak 23 sambunganmengalami defect, dengan 12 kasus atau 52,17% berupa slag inclusion. Hasil verifikasi memperlihatkan bahwa seluruh parameter pengelasan aktual, meliputi arus, tegangan, travel speed, root gap, jenis dan diameter elektroda, posisi pengelasan, serta heat input, telah sesuai dengan Welding Procedure Specification. Temuan ini menunjukkan bahwa penyebab utama defect lebih berkaitan dengan metode kerja, keterampilan welder, efektivitas pembersihan slag antar-pass, kestabilan arc length, dan keterbatasan akses pada area pengelasan. Analisis peta kendali p menghasilkan rata-rata proporsi slag inclusion sebesar 0,0353. Subgrup inspeksi pada 25 Februari 2026 memiliki proporsi sebesar 0,1600 dan melampaui batas kendali atas sebesar 0,1460, sehingga menunjukkan adanya variasi penyebab khusus yang perlu segera diinvestigasi. Analisis FMEA menghasilkan total RPN awal sebesar 1.288, dengan pembersihan slag antar-pass yang tidak sempurna sebagai penyebab prioritas utama dengan RPN 224. Setelah dirumuskan tindakan perbaikan berupa standardisasi proses pembersihan, penerapan titik henti inspeksi visual, pengawasan travel speed dan arc length, perbaikan akses kerja, pelatihan FCAW, serta requalification welder, total

RPN diperkirakan turun menjadi 301 atau berkurang sebesar 76,63%. Hasil ini menegaskan bahwa integrasi SPC dan FMEA mampu mengidentifikasi ketidakstabilan proses, menentukan akar penyebab, dan menyusun prioritas tindakan perbaikan secara terukur. Secara praktis, PT McDermott perlu menerapkan pemantauan berbasis peta kendali, evaluasi hasil NDT per welder, dan audit pembersihan antar-pass secara berkala. Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan data inspeksi pascaperbaikan untuk membuktikan penurunan defect secara aktual, membandingkan kondisi sebelum dan sesudah intervensi, serta menganalisis pengaruh posisi pengelasan, jenis joint, dan tingkat kesulitan akses terhadap peluang terjadinya slag inclusion.

DAFTAR PUSTAKA

- Azis, N. K., & Mahbubah, N. A. (2023). Pengendalian mutu proses *casting casing cover* type EN 1-315 berbasis integrasi metode SPC dan FMEA. *Teknika Sains: Jurnal Ilmu Teknik*, 8(1), 44–57. <https://doi.org/10.24967/teksis.v8i1.2142>
- Fajrin, M. T., & Sulistiyowati, W. (2018). Pengurangan *defect* pada produk sepatu dengan mengintegrasikan *statistical process control* (SPC) dan *root cause analysis* (RCA): Studi kasus PT. XYZ. *Spektrum Industri*, 16(1), 29–40. <https://doi.org/10.12928/si.v16i1.9778>
- Febriansyah, F., Ilmi, N., & Lawi, A. (2022). Penerapan metode Six Sigma dalam menganalisis dan menanggulangi *defect rate* pada pengelasan tubular. *Jurnal Teknik Industri*, 1(2), 128–137. <https://doi.org/10.30659/jurti.1.2.128-137>
- Hamzah, M., Donoriyanto, D. S., & Sari, R. N. (2024). Welding quality control using seven tools method at PT. XYZ. *The Indonesian Journal of Computer Science*, 13(5), 7272–7279. <https://doi.org/10.33022/ijcs.v13i5.4412>
- Huda, A. (2018). Analisis pengendalian kualitas proses pengelasan (*welding*) dengan pendekatan Six Sigma pada proyek PT. XYZ. *Jurnal Wacana Ekonomi*, 17(2), 66–78. <https://doi.org/10.52434/jwe.v17i2.295>
- Husein, K., & Rochmoeljati, R. (2021). Meminimasi cacat produk bogie tipe S2E-9C menggunakan metode *statistical quality control* (SQC) dan *failure mode effect analysis* (FMEA) pada PT XYZ. *JUMINTEN: Jurnal Manajemen Industri dan Teknologi*, 2(2), 168–179. <https://doi.org/10.33005/juminten.v2i2.250>
- Jannaah, P. D. R., & Winursito, Y. C. (2025). Analisis *total quality control* hasil pengelasan bengkel *welding* MO & EO PT XYZ menggunakan metode *basic seven tools* dan *new seven tools*. *Jurnal Teknik Industri Terintegrasi*, 8(1), 573–584. <https://doi.org/10.31004/jutin.v8i1.39919>
- Kifta, D. A. (2018). *Welding defect rate analysis and its rectification using Six Sigma method dan FMEA at PT XYZ* [Preprint]. OSF Preprints. <https://doi.org/10.31227/osf.io/8m9r2>
- Kosasih, W., Adianto, & Erickson. (2015). Analisis pengendalian kualitas produk *bucket* tipe ZX 200 GP dengan metode *statistical process control* dan *failure mode and effect analysis*: Studi kasus PT. CDE. *Jurnal Ilmiah Teknik Industri*, 3(2), 85–93. <https://doi.org/10.24912/jitiuntar.v3i2.499>
- Lisna, R. M., Priyana, E. D., & Hidayat, H. (2023). Analysis of quality control using the *failure mode and effect analysis* (FMEA) method in the welding process in the feed drum project. *SITEKIN: Jurnal Sains, Teknologi dan Industri*, 20(2), 588–594. <https://doi.org/10.24014/sitekin.v20i2.21731>
- Mahaputri, E. A., Sugiatna, A., & Jatnika, R. A. (2025). Perbaikan kualitas produk dengan menggunakan metode *statistical process control* (SPC) di PT. XYZ. *Sistemik: Jurnal Ilmiah Nasional Bidang Ilmu Teknik*, 13(1), 13–21. <https://doi.org/10.53580/sistemik.v13i1.138>
- Massandi, H., Fitra, A., Kustiwan, S., & Wiyatno, T. N. (2024). Increasing productivity of the welding process on the H-beam production line by approach RCA (*root cause analysis*) at PT. XYZ. *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, 9(7), 2253–2259. <https://doi.org/10.38124/ijisrt/IJISRT24JUL1663>

- Mubarok, M. Z., & Machfuroh, T. (2024). Pengendalian kualitas pengelasan baja SS400 untuk *ducting* pada PT. XYZ dengan metode SQC. *G-Tech: Jurnal Teknologi Terapan*, 8(4), 2178–2189. <https://doi.org/10.70609/gtech.v8i4.4776>
- Muhammad, K., Syailendri, F. R. A., & Sibarani, A. A. (2020). Analisis cacat produk pada proses pengelasan pipa *penstock*: Studi kasus PT. XYZ. *SPECTA Journal of Technology*, 4(3), 61–71. <https://doi.org/10.35718/specta.v4i3.225>
- Mulia, N. A. C., & Rochmoeljati, R. (2021). Pengendalian kualitas pengelasan menggunakan metode *statistical quality control* (SQC) dan *failure mode effect analysis* (FMEA) di PT. PAL Indonesia. *JUMINTEN: Jurnal Manajemen Industri dan Teknologi*, 2(6), 60–71. <https://doi.org/10.33005/juminten.v2i6.346>
- Oktaviani, R. D., Putri, A. D., & Suastiyanti, D. (2025). Penerapan FMEA untuk analisis penyebab reject pada produk *under bracket* HK2SO di PT XYZ. *Jurnal Sains dan Aplikasi Keilmuan Teknik Industri* (SAKTI), 5(2), 73–82. <https://doi.org/10.33479/sakti.v5i02.190>
- Ramadayanti, N., & Suryadi, A. (2024). Welding quality control using the SQC (*statistical quality control*) method in an effort to minimize the occurrence of rejects at PT. XYZ. *International Journal of Mechanical, Industrial and Control Systems Engineering*, 1(4), 43–55. <https://doi.org/10.61132/ijmicse.v1i4.125>
- Rastiti, A. V., Wiyono, I., & Juliani, I. W. (2019). Usulan rancangan perbaikan untuk meminimasi defect inklusi pasir (IP) pada proses pencetakan *shoulder for E-clip* di PT. Pindad dengan metode DMAIC. *e-Proceeding of Engineering*, 6(2), 7610–7618.
- Rochmoeljati, R., Nugraha, I., & Mulia, N. A. C. (2022). Welding quality control using statistical quality control (SQC) methods and failure mode effect analysis (FMEA) at PT. XYZ. *Nusantara Science and Technology Proceedings*, 39–45. <https://doi.org/10.11594/nstp.2022.2707>
- Sani, T. N., & Sumiati, S. (2023). Pengendalian kualitas pengelasan pada *project* fabrikasi *metal duct* MBI menggunakan metode SQC dan FMEA. *Jurnal Penelitian Rumpun Ilmu Teknik*, 3(1), 167–177. <https://doi.org/10.55606/juprit.v3i1.3221>
- Wisnubroto, P., Asih, E. W., & Gunawan, I. (2010). Analisis reaksi berantai pada tahap proses pengelasan di PT Multifab. *Jurnal Teknologi Technoscintia*, 3(1), 56–61. <https://doi.org/10.34151/technoscintia.v3i1.438>
- Zilfianah, K., Ismiyah, E., & Rizqi, A. W. (2022). Quality control analysis on steel construction projects using the method statistical quality control and failure mode and effects analysis. *MOTIVECTION: Journal of Mechanical, Electrical and Industrial Engineering*, 5(1), 13–32. <https://doi.org/10.46574/motivection.v5i1.174>
- Zulkarnain, Larisang, & Amin, I. (2024). Pengendalian kualitas *zinc phosphate coating* dengan menggunakan metode SPC dan FMEA pada PT. XYZ. *Jurnal Teknik Ibnu Sina (JT-IBSI)*, 8(2), 140–153. <https://doi.org/10.36352/jt-ibsi.v8i02.638>