

e-ISSN: 2502-1516

Research Article

Dikirim: 19 Februari, 2026

Direvisi: 23 Maret, 2026

Diterima: 26 Maret, 2026

Tersedia Online: Mei 2026

## ANALISIS DAN PENINGKATAN KUALITAS FLUX CORED ARC WELDING (FCAW) MENGUNAKAN METODE SIX SIGMA DENGAN PENDEKATAN DMAIC PADA INDUSTRI FABRIKASI BAJA

**Kata Kunci:**

DMAIC; FCAW; Six Sigma;  
*steel fabrication; welding  
quality*

**Penulis korespondensi:**

e-mail:

221010014jonathan@gmail.com

**Jonathan Mianro Pardede\*, Heri Irwan**

1. Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Riau  
Kepulauan

**Abstrak**

*Proses Flux Cored Arc Welding (FCAW) memegang peranan penting dalam industri fabrikasi baja, namun tingkat cacat sambungan las yang tinggi dapat menurunkan kekuatan struktur, meningkatkan biaya rework, dan mengurangi efisiensi produksi. Penelitian ini bertujuan meningkatkan kualitas proses FCAW melalui penerapan metodologi Six Sigma dengan siklus Define, Measure, Analyze, Improve, dan Control (DMAIC). Studi kasus dilakukan pada perusahaan fabrikasi baja di Batam dengan menggunakan data produksi Januari–Juni 2025 sebagai baseline dan data pasca perbaikan Juli 2025. Hasil pengukuran menunjukkan tingkat cacat rata-rata sebesar 11,09% dengan nilai Defects per Million Opportunities (DPMO) sekitar 22.182 dan level sigma 3,5 yang mengindikasikan proses belum terkendali secara optimal. Analisis Pareto mengidentifikasi porosity dan slag inclusion sebagai cacat dominan, sedangkan analisis fishbone menunjukkan pengaruh faktor manusia, metode kerja, material, mesin, dan lingkungan kerja. Implementasi perbaikan melalui standarisasi parameter pengelasan, peningkatan kompetensi welder, pengendalian kebersihan material, serta pengendalian lingkungan kerja berhasil menurunkan DPMO menjadi sekitar 12.000 dan meningkatkan kapabilitas proses. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan Six Sigma efektif dalam menurunkan cacat, meningkatkan konsistensi kualitas, dan mendukung efisiensi operasional industri fabrikasi baja.*

Copyright © 2026 by Authors,

Published by Universitas Diponegoro Publishing Group.

This open access article is distributed under a Creative Commons

Attribution 4.0 International license

**1. Pendahuluan**

Industri fabrikasi baja memiliki peran strategis dalam mendukung pembangunan infrastruktur, sektor minyak dan gas, serta manufaktur berat. Kualitas hasil fabrikasi, khususnya pada proses pengelasan, menjadi faktor krusial karena berkaitan langsung dengan kekuatan struktur, keselamatan operasional, dan keandalan produk akhir. Dalam praktiknya, proses pengelasan sering mengalami variasi kualitas yang menyebabkan munculnya cacat (*defect*), sehingga meningkatkan biaya *rework*, memperpanjang *lead time*, serta menurunkan efisiensi operasional perusahaan (Montgomery, 2019). Oleh karena itu, pengendalian kualitas pada proses *welding* menjadi aspek penting dalam manajemen operasi industri fabrikasi.

Salah satu metode pengelasan yang banyak digunakan dalam industri fabrikasi baja adalah FCAW. Metode ini memiliki keunggulan dari sisi produktivitas, penetrasi, dan efisiensi deposisi logam, sehingga cocok digunakan pada material dengan ketebalan menengah hingga tebal. Namun demikian, proses FCAW tetap rentan terhadap berbagai jenis cacat seperti *porosity*, *slag inclusion*, *undercut*, *lack of fusion*, dan *crack* apabila parameter proses tidak dikendalikan secara konsisten. Faktor-faktor utama yang memengaruhi kualitas hasil las meliputi variasi parameter pengelasan (arus, tegangan, *travel speed*), kondisi material, keterampilan operator, serta lingkungan kerja (Cary & Helzer, 2011; Sindo Kou, 2021; Kim & Park, 2022).

Berbagai penelitian terdahulu menunjukkan bahwa pendekatan *Six Sigma* efektif dalam menurunkan tingkat cacat pada proses manufaktur (Pyzdek & Keller, 2018; Schroeder et al., 2022; Antony et al., 2023). Metodologi DMAIC memungkinkan identifikasi akar penyebab variasi proses secara sistematis dan berbasis data (Pande et al., 2000). Penelitian lain menyatakan bahwa penerapan *Six Sigma* mampu meningkatkan kapabilitas proses melalui pengukuran DPMO dan level sigma sebagai indikator kinerja kualitas (Evans & Lindsay, 2020). Selain itu, Pyzdek dan Keller (2018) menegaskan bahwa keberhasilan implementasi *Six Sigma* sangat bergantung pada ketepatan identifikasi *Critical to Quality* (CTQ) dan pengendalian variasi proses secara berkelanjutan.

Hanya sedikit penelitian yang mengaplikasikan pendekatan DMAIC secara komprehensif pada proses FCAW di industri fabrikasi baja berbasis proyek (*high variety, low volume*), terutama di Indonesia. Kajian yang mengintegrasikan pengukuran DPMO, analisis Pareto, diagram *fishbone*, serta evaluasi *before after* berdasarkan data produksi aktual perusahaan masih sangat terbatas (Timans et al., 2021; Sony et al., 2022).

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan mengisi *research gap* tersebut melalui penerapan *Six Sigma* pada proses FCAW di PT. XYZ Batam dengan menggunakan data produksi aktual periode Januari–Juni 2025, total produksi mencapai 7.700 *joint* dengan jumlah cacat sebesar 854 *defect* atau 11,09%. Jenis cacat dominan yang ditemukan adalah *slag inclusion* dan *porosity*. Tingginya tingkat cacat tersebut menunjukkan bahwa level sigma 3,3–3,4, yang jauh di bawah standar industri kelas dunia (minimal 4,5 sigma). Kondisi ini menyebabkan lebih dari satu dari sepuluh sambungan las memerlukan *rework*, sehingga meningkatkan biaya produksi, memperpanjang *lead time* proyek, dan berpotensi menurunkan kepuasan pelanggan (Montgomery, 2019; Pyzdek & Keller, 2018). Beberapa penelitian sebelumnya telah menerapkan *Six Sigma* untuk pengendalian kualitas manufaktur, namun sebagian besar berfokus pada proses *machining* dan *assembly*. Kajian yang secara spesifik menganalisis cacat FCAW pada industri fabrikasi baja dengan pendekatan kuantitatif berbasis DPMO dan *level sigma* masih terbatas.

Berdasarkan kesenjangan penelitian tersebut, kebaruan ilmiah (*novelty*) artikel ini terletak pada penerapan metodologi *Six Sigma* (DMAIC) secara komprehensif pada proses FCAW di industri fabrikasi baja berbasis proyek di Indonesia, dengan mengintegrasikan analisis DPMO, Pareto, *fishbone diagram*, serta evaluasi *before after* menggunakan data produksi aktual perusahaan. Penelitian sebelumnya umumnya dilakukan pada proses *machining* dan *assembly*, sedangkan penelitian ini fokus pada FCAW berbasis proyek dengan data aktual industri. Penelitian ini berbeda dengan studi sebelumnya yang umumnya bersifat deskriptif atau dilakukan pada skala laboratorium.

Berdasarkan latar belakang tersebut, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

- (1) Bagaimana tingkat kapabilitas proses FCAW di PT. XYZ Batam berdasarkan pengukuran *Six Sigma*?
- (2) Faktor-faktor apa yang menjadi penyebab utama terjadinya cacat pada proses FCAW tersebut?

Berdasarkan rumusan masalah tersebut, penelitian ini difokuskan pada analisis kapabilitas proses FCAW serta identifikasi faktor dominan penyebab cacat untuk merumuskan usulan perbaikan berbasis *Six Sigma*. Cacat pengelasan tidak hanya berdampak pada kualitas produk, tetapi juga meningkatkan biaya produksi akibat *rework*, keterlambatan jadwal proyek, serta potensi penurunan kepuasan pelanggan. Dalam industri fabrikasi baja yang berorientasi proyek, keterlambatan akibat perbaikan cacat dapat mempengaruhi kinerja rantai pasok dan kepercayaan klien terhadap perusahaan. Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis kinerja kualitas proses FCAW menggunakan pendekatan *Six Sigma*, mengidentifikasi faktor penyebab utama terjadinya cacat las, serta merumuskan dan mengevaluasi tindakan perbaikan guna menurunkan tingkat *defect* dan meningkatkan kapabilitas proses pada industri fabrikasi baja.

## 2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan menerapkan metodologi *Six Sigma* melalui siklus *Define, Measure, Analyze, Improve, dan Control* (DMAIC). Pemilihan metode ini didasarkan pada karakteristik *Six Sigma* sebagai strategi perbaikan kualitas berbasis data yang berorientasi pada pengurangan variasi proses secara sistematis untuk menekan tingkat cacat hingga mendekati nol (Pyzdek & Keller, 2018). Dalam konteks industri fabrikasi baja, pengendalian kualitas pada proses pengelasan membutuhkan kerangka analisis yang terstruktur dan terukur untuk mengidentifikasi jenis cacat, mengukur kapabilitas proses, serta mengevaluasi efektivitas tindakan perbaikan secara empiris dan objektif.

Objek penelitian difokuskan pada proses FCAW di PT. XYZ Batam, sebuah perusahaan fabrikasi baja yang berlokasi di Batam. Data yang dianalisis mencakup data historis produksi selama enam bulan (Januari–Juni 2025) sebagai *baseline* kondisi awal, serta data pasca-implementasi perbaikan pada Juli 2025 sebagai pembandingan. Analisis dilakukan secara bertahap mengikuti tahapan DMAIC guna memastikan bahwa proses peningkatan kualitas berlangsung secara sistematis, terdokumentasi, dan dapat dievaluasi secara kuantitatif.

### 2.1 Jenis dan Pendekatan Penelitian

Penelitian ini dirancang sebagai studi kasus dengan pendekatan kuantitatif deskriptif-analitis. Pendekatan studi kasus dipilih karena memungkinkan peneliti melakukan eksplorasi mendalam terhadap satu unit analisis spesifik, yaitu proses FCAW pada PT. XYZ Batam. Melalui pendekatan ini, kondisi aktual proses dapat dianalisis secara komprehensif dengan mempertimbangkan aspek teknis dan operasional yang mempengaruhi kualitas hasil pengelasan.

**Tabel 1.** Data Produksi dan Total *Defect* Proses FCAW PT. XYZ

Bulan	Total Joint	Total Defect	Persentase Defect (%)
Januari	1.250	138	11,04
Februari	1.300	145	11,15
Maret	1.280	142	11,09
April	1.270	136	10,71
Mei	1.300	148	11,38
Juni	1.300	145	11,15
Total	7.700	854	11,09

**Tabel 2.** Distribusi Jenis *Defect* FCAW Januari – Juni 2025

Jenis Defect	Jumlah	Persentase (%)
<i>Porosity</i>	312	36,54
<i>Slag Inclusion</i>	276	32,32
<i>Undercut</i>	128	14,99
<i>Lack of Fusion</i>	94	11,01
<i>Crack</i>	44	5,14
Total	854	100

Pendekatan kuantitatif diterapkan untuk mengukur tingkat cacat secara numerik melalui perhitungan DPMO dan penentuan *level sigma* sebagai indikator performa kualitas (Montgomery, 2019). Alur penelitian dimulai dari identifikasi masalah pada tahap *Define*, pengumpulan serta pengukuran data pada tahap *Measure*, analisis akar penyebab pada tahap *Analyze*, implementasi solusi pada tahap *Improve*, hingga pengendalian keberlanjutan perbaikan pada tahap *Control*. Metode *Six Sigma* dipilih karena mampu mengintegrasikan pendekatan statistik dengan strategi manajerial dalam satu kerangka kerja perbaikan berkelanjutan (Evans & Lindsay, 2020).

## 2.2 Sumber dan Teknik Pengumpulan Data

Data penelitian diperoleh melalui integrasi sumber data primer dan sekunder guna menghasilkan gambaran menyeluruh mengenai kinerja kualitas proses pengelasan. Data primer diperoleh melalui observasi langsung di area fabrikasi, diskusi teknis dengan *welding supervisor*, serta verifikasi parameter mesin terhadap *Welding Procedure Specification* (WPS). Parameter yang diamati meliputi kuat arus listrik, tegangan, kecepatan pengelasan (*travel speed*), serta aliran gas pelindung. Evaluasi jenis cacat mengacu pada standar internasional seperti *American Welding Society* (AWS) dan *American Society of Mechanical Engineers* (ASME). Menurut Heizer et al. (2020), observasi langsung dalam manajemen operasional sangat penting untuk menangkap variasi aktual proses yang sering kali tidak tercermin secara detail dalam laporan administratif.

Data sekunder diperoleh dari laporan produksi dan laporan inspeksi kualitas periode Januari–Juni 2025. Validitas data dijamin melalui hasil inspeksi visual (*Visual Inspection*) dan pengujian *Non-Destructive Test* (NDT) seperti *Radiographic Test* (RT) dan *Ultrasonic Test* (UT) yang dilakukan oleh inspektur bersertifikasi. Prosedur verifikasi ini memastikan bahwa data cacat yang dianalisis telah memenuhi standar inspeksi industri dan dapat digunakan sebagai dasar analisis statistik.

Distribusi data produksi dan jumlah cacat selama periode penelitian disajikan pada **Tabel 1**. Persentase *defect* dihitung menggunakan **Persamaan 1**.

$$Defect Rate = \frac{Total Defect}{Total Joint} \times 100\% \text{ (Persamaan 1)}$$

Sebagai contoh perhitungan *defect rate* selama enam bulan:

$$Defect Rate = \frac{854}{7.700} \times 100\% = 11,09\%$$

Nilai rata-rata tingkat *defect* selama enam bulan adalah 11,09%. Hal ini menunjukkan bahwa lebih dari satu dari sepuluh sambungan las mengalami cacat dan memerlukan pekerjaan ulang (*rework*), sehingga diperlukan upaya perbaikan proses secara sistematis.

Selain total *defect*, penelitian ini juga mengidentifikasi distribusi jenis cacat untuk menentukan karakteristik kualitas dominan atau *Critical to Quality* (CTQ). Distribusi jenis cacat selama periode Januari–Juni 2025 disajikan pada **Tabel 2**. Nilai rata-rata tingkat *defect* selama enam bulan adalah 11,09%. Hal ini menunjukkan bahwa lebih dari satu dari sepuluh *joint* mengalami cacat dan memerlukan pekerjaan ulang (*rework*), yang mengindikasikan perlunya perbaikan proses secara sistematis.

Perhitungan DPMO dilakukan menggunakan rumus **Persamaan 2** (Gaspersz, 2002):

$$DPMO = \frac{Jumlah Defect}{Total Unit \times Opportunity} \times 1.000.000 \text{ (Persamaan 2)}$$

Tabel 3. Perhitungan DPMO Proses FCAW

Bulan	Total Defect	Total Joint	DPMO
Januari	138	1.250	22.080
Februari	145	1.300	22.308
Maret	142	1.280	22.187
April	136	1.270	21.417
Mei	148	1.300	22.769
Juni	145	1.300	22.308

Sebagai contoh perhitungan selama enam bulan:

$$DPMO = \frac{854}{7.700 \times 5} \times 1.000.000 = 22.182$$

Perhitungan DPMO untuk seluruh periode disajikan pada Tabel 3. Berdasarkan hasil perhitungan pada Tabel 3, diperoleh rata-rata DPMO proses FCAW sebesar 22.182 dengan *level sigma* berada pada kisaran 3,5 sigma. Nilai tersebut menunjukkan bahwa proses pengelasan masih memerlukan peningkatan kualitas untuk mengurangi variasi proses dan tingkat cacat produksi. Setelah implementasi tahap *Improve* pada Juli 2025, diperoleh data produksi sebesar 1.300 *joint* dengan jumlah *defect* sebanyak 78. Perhitungan DPMO setelah perbaikan adalah sebagai berikut:

$$DPMO = \frac{78}{1.300 \times 5} \times 1.000.000 = 12.000$$

Penurunan DPMO ini menunjukkan adanya peningkatan kapabilitas proses dibandingkan kondisi awal. Analisis komparatif sebelum dan sesudah perbaikan digunakan untuk mengevaluasi efektivitas penerapan metode *Six Sigma* secara kuantitatif. Dengan pendekatan pengumpulan dan analisis data yang terstruktur ini, penelitian mampu memberikan gambaran objektif mengenai kondisi aktual kualitas proses FCAW serta mendukung pengambilan keputusan berbasis statistik sebagaimana direkomendasikan dalam praktik manajemen kualitas modern (Heizer et al., 2020).

### 3. Hasil dan Pembahasan

Hasil dan pembahasan ini menyajikan hasil pengolahan data serta pembahasan mengenai kinerja proses FCAW pada perusahaan fabrikasi baja yang menjadi objek penelitian. Analisis dilakukan untuk mengevaluasi tingkat cacat pengelasan, mengidentifikasi jenis *defect* dominan, serta mengukur kapabilitas proses menggunakan pendekatan *Six Sigma*. Hasil perhitungan statistik digunakan untuk menilai stabilitas proses sebelum perbaikan dan mengevaluasi efektivitas tindakan perbaikan yang diterapkan.

Pembahasan dalam bab ini juga menguraikan faktor penyebab terjadinya cacat las berdasarkan data inspeksi kualitas dan parameter proses pengelasan, serta mengevaluasi peningkatan kualitas setelah implementasi tindakan perbaikan. Dengan pendekatan berbasis data dan pengendalian kualitas statistik, analisis ini diharapkan memberikan gambaran komprehensif mengenai peningkatan performa proses pengelasan serta kontribusinya terhadap peningkatan mutu produk fabrikasi (Montgomery, 2019). Selanjutnya, hasil dan pembahasan disajikan secara sistematis mulai dari kinerja proses sebelum perbaikan, implementasi tindakan perbaikan, hingga perbandingan performa proses setelah perbaikan.

#### 3.1 Kinerja Proses FCAW Sebelum Perbaikan

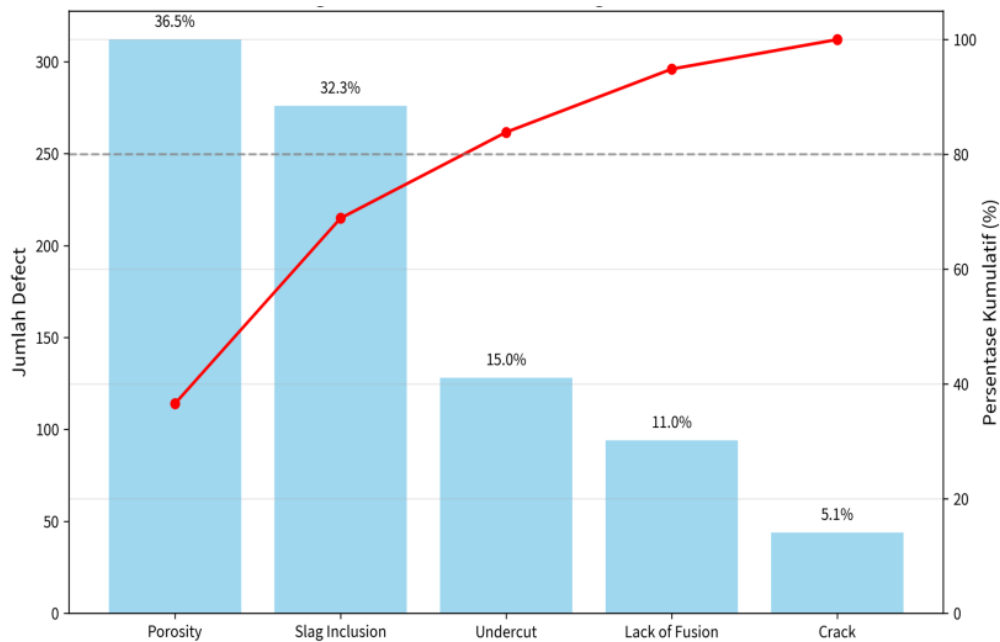
Berdasarkan data produksi proses FCAW pada perusahaan fabrikasi baja di Batam selama periode Januari–Juni 2025, total sambungan las yang diproduksi mencapai 7.700 *joint* dengan jumlah cacat sebanyak 854 *defect* atau sebesar 11,09%. Tingkat cacat ini menunjukkan bahwa lebih dari satu dari sepuluh sambungan las memerlukan pekerjaan ulang (*rework*). Jenis cacat dominan yang ditemukan meliputi *porosity*, *slag inclusion*, dan *lack of fusion* yang berpotensi menurunkan kekuatan sambungan serta kualitas produk secara keseluruhan. Berdasarkan analisis Pareto, *porosity* dan *slag inclusion* mendominasi dengan kontribusi masing-masing 36,54% dan 32,32%, atau secara bersama-sama menyumbang 68,86% dari total *defect*.

Tingkat cacat yang relatif tinggi tersebut menunjukkan bahwa proses FCAW belum berada dalam kondisi terkendali secara statistik dan memerlukan tindakan perbaikan yang sistematis. Cacat pengelasan dapat dipengaruhi oleh ketidakstabilan parameter proses, kebersihan permukaan material yang kurang optimal, serta variasi keterampilan operator dalam melakukan teknik pengelasan.

Untuk mengukur kapabilitas proses, dilakukan perhitungan DPMO dan *level sigma*. Perhitungan DPMO Konversi ke *Level Sigma* dapat dilihat pada Persamaan 2.

$$Level\ Sigma = NORMSINV \left( 1 - \frac{DPMO}{1.000.000} \right) + 1,5$$

$$Level\ Sigma = NORMSINV \left( 1 - \frac{22.182}{1.000.000} \right) + 1,5 = NORMSINV (1-0,977) + 1,5 = 3,5$$



Gambar 1. Diagram Pareto Jenis Cacat FCAW



Gambar 2. Diagram Fishbone Penyebab Cacat FCAW

Berdasarkan hasil perhitungan DPMO sebesar 22.182, level sigma proses FCAW berada pada kisaran 3,5 sigma. Nilai ini menunjukkan bahwa proses masih memerlukan peningkatan kualitas untuk mengurangi variasi dan tingkat cacat produksi.

### 3.2 Penyebab Cacat (Fishbone)

Variasi parameter FCAW terbukti berpengaruh signifikan terhadap pembentukan cacat seperti *porosity* dan *incomplete fusion* (Zhang & Wu, 2018; Sindo Kou, 2021; Wang et al., 2023). Berdasarkan analisis Pareto, *porosity* dan *slag inclusion* mendominasi dengan kontribusi masing-masing 36,54% dan 32,32%, atau secara bersama-sama menyumbang 68,86% dari total *defect*. Diagram Pareto dan Diagram *Fishbone* dapat dilihat pada **Gambar 1** dan **Gambar 2**. Untuk mengidentifikasi akar penyebab terjadinya cacat tersebut, digunakan diagram sebab akibat (*fishbone diagram*) yang mengelompokkan faktor penyebab ke dalam kategori *man*, *machine*, *method*, *material*, dan *environment*. Pendekatan ini banyak digunakan dalam pengendalian kualitas karena mampu mengidentifikasi sumber masalah secara sistematis dan komprehensif.

Hasil evaluasi menunjukkan bahwa cacat pengelasan tidak disebabkan oleh satu faktor tunggal, melainkan kombinasi berbagai faktor operasional. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa cacat FCAW sering dipengaruhi oleh faktor manusia, metode kerja, serta kondisi peralatan dan material yang digunakan.

#### A. Faktor Man (Operator/Welder)

Tabel 4. Ringkasan Penyebab Cacat FCAW

Faktor	Penyebab Utama	Dampak Cacat
<i>Man</i>	Teknik tidak konsisten, kurang pelatihan	<i>Slag inclusion, lack of fusion</i>
<i>Machine</i>	Arus & tegangan tidak stabil	<i>Porosity, incomplete fusion</i>
<i>Method</i>	<i>Travel speed</i> cepat, <i>slag</i> tidak dibersihkan	<i>Slag inclusion</i>
<i>Material</i>	Karat, minyak, kelembapan	<i>Porosity</i>
<i>Environment</i>	Angin & kelembapan tinggi	<i>Porosity</i>

Faktor manusia berkontribusi terhadap cacat akibat teknik pengelasan yang tidak konsisten, kesalahan sudut elektroda, dan kurangnya pengalaman operator. Teknik pengelasan yang tidak tepat dapat menyebabkan *slag* terperangkap atau logam tidak menyatu sempurna. Selain itu, kurangnya pelatihan dan kepatuhan terhadap prosedur kerja meningkatkan risiko cacat pada sambungan las. Temuan di lapangan:

1. Sudut elektroda tidak stabil
2. Kecepatan gerakan tidak konsisten
3. Variasi keterampilan antar *welder*

#### B. Faktor *Machine* (Peralatan dan Parameter Mesin)

Parameter mesin seperti arus, tegangan, dan kecepatan *wire feed* sangat mempengaruhi kualitas hasil las. Tegangan berlebih dan pengaturan arus yang tidak sesuai dapat menyebabkan *porosity* atau *wormholes*, sedangkan input panas yang tidak cukup dapat menyebabkan *lack of fusion*. Temuan di lapangan:

1. *Setting* arus tidak standar
2. Fluktuasi tegangan saat pengelasan
3. Perawatan mesin tidak rutin

#### C. Faktor *Method* (Metode dan Prosedur Kerja)

Metode pengelasan yang tidak sesuai prosedur seperti *travel speed* terlalu cepat, sudut pengelasan salah, atau pembersihan *slag* antar lapisan yang tidak dilakukan dengan benar dapat menyebabkan *slag inclusion* dan *incomplete fusion*. Temuan di lapangan:

1. *Travel speed* terlalu cepat
2. *Slag* tidak dibersihkan antar *pass*
3. SOP parameter tidak terdokumentasi jelas

#### D. Faktor Material

Material yang kotor, berkarat, berminyak, atau lembap merupakan penyebab utama *porosity* karena gas terperangkap dalam logam cair selama proses solidifikasi. Selain itu, kelembapan pada kawat las dan permukaan material dapat memperburuk kualitas pengelasan. Temuan di lapangan:

1. Permukaan baja berkarat ringan
2. Adanya minyak & debu
3. Penyimpanan kawat las kurang baik

#### E. Faktor *Environment* (Lingkungan Kerja)

Lingkungan kerja seperti kelembapan tinggi, aliran udara, dan ventilasi yang tidak terkontrol dapat mengganggu perlindungan gas pelindung dan memicu *porosity*. Gas pelindung yang terganggu menyebabkan udara luar masuk ke kolam las sehingga menimbulkan rongga gas. Temuan di lapangan:

1. Area terbuka terkena angin
2. Ventilasi berlebih dekat area *welding*
3. Kelembapan tinggi di area produksi

Ringkasan penyebab cacat FCAW ini dapat dilihat pada **Tabel 4**.

Berdasarkan data produksi enam bulan, cacat *slag inclusion* dan *porosity* merupakan jenis cacat dengan frekuensi tertinggi. Kondisi ini menunjukkan bahwa faktor metode kerja, kondisi material, serta parameter proses menjadi penyebab dominan. Temuan ini sejalan dengan penelitian Kim & Park (2022) yang menyatakan bahwa standarisasi parameter pengelasan dan kebersihan material merupakan faktor kritis dalam mengurangi cacat *porosity* pada proses FCAW, serta Wang et al. (2023) yang menemukan bahwa peningkatan kompetensi *welder* dapat menurunkan *slag inclusion* hingga 40%.

Identifikasi akar penyebab ini menunjukkan bahwa perbaikan harus difokuskan pada:

1. Standarisasi parameter pengelasan
2. Peningkatan keterampilan dan disiplin *welder*
3. Pembersihan material sebelum proses *welding*
4. Pengendalian kondisi lingkungan kerja
5. Pemeliharaan mesin secara berkala

Pendekatan sistematis ini memungkinkan perusahaan menurunkan tingkat cacat secara signifikan, meningkatkan stabilitas proses, serta meningkatkan kapabilitas proses pengelasan secara berkelanjutan.

### 3.3 Implementasi Perbaikan Proses

Perbaikan dilakukan berdasarkan analisis penyebab cacat menggunakan pendekatan *Six Sigma* pada tahap *Improve*. Tindakan perbaikan yang diterapkan meliputi:

1. standarisasi parameter arus dan tegangan FCAW
2. pembersihan material sebelum pengelasan
3. pengeringan elektroda dan *flux* untuk menghindari kelembaban
4. peningkatan pelatihan *welder*
5. pengawasan visual dan inspeksi berlapis

Perbaikan ini bertujuan mengurangi *porosity* dan *slag inclusion* yang umumnya disebabkan oleh kontaminasi permukaan dan teknik pengelasan yang tidak konsisten (Kim & Na, 2015). Implementasi perbaikan difokuskan pada faktor dominan penyebab cacat yang telah diidentifikasi melalui analisis *fishbone*, yaitu faktor manusia, mesin, metode kerja, material, dan lingkungan kerja. Tahap *Improve* dalam metode *Six Sigma* diarahkan untuk mengurangi cacat utama berupa *porosity*, *slag inclusion*, dan *lack of fusion* melalui pengendalian variabel proses dan peningkatan konsistensi operasional.

Perbaikan dilakukan secara sistematis melalui standarisasi parameter pengelasan, peningkatan keterampilan operator, pengendalian kondisi material, serta pengendalian lingkungan kerja. Strategi ini sejalan dengan praktik peningkatan kualitas pada proses pengelasan yang menekankan kontrol parameter proses, kompetensi operator, dan kebersihan material sebagai faktor utama peningkatan kualitas sambungan las (Kim & Park, 2019). Pendekatan terpadu tersebut diharapkan mampu meningkatkan stabilitas proses serta mengurangi kemungkinan terjadinya cacat berulang.

#### A. Standarisasi Parameter Pengelasan (*Machine & Method*)

Parameter pengelasan memiliki pengaruh langsung terhadap stabilitas busur dan kualitas penetrasi logam las. Berdasarkan evaluasi lapangan, variasi arus dan tegangan menyebabkan ketidakstabilan kolam las yang memicu *porosity* dan *incomplete fusion*. Tindakan perbaikan:

1. Menetapkan arus pengelasan sesuai WPS ( $\pm 180\text{--}220$  A)
2. Menyesuaikan tegangan pada rentang stabil (24–30 V)
3. Mengontrol *wire feed speed* agar stabil
4. Menjaga *gas flow rate* pada 15–20 L/min

Kontrol parameter yang tepat terbukti mampu mengurangi cacat *porosity* dan meningkatkan penetrasi logam las (Cary & Helzer, 2011).

#### B. Peningkatan Kompetensi dan Disiplin *Welder* (*Man*)

Variasi keterampilan operator ditemukan berkontribusi terhadap *slag inclusion* dan *lack of fusion*. Teknik pengelasan yang tidak konsisten dapat menyebabkan *slag* terperangkap dan penyatuan logam tidak sempurna. Tindakan perbaikan:

1. Pelatihan ulang teknik FCAW sesuai prosedur
2. Standarisasi sudut elektroda ( $10^\circ\text{--}15^\circ$  *drag angle*)
3. Pengawasan kecepatan *travel speed*
4. Penerapan *checklist* kepatuhan SOP

Pelatihan dan standarisasi prosedur kerja terbukti meningkatkan kualitas pengelasan dan mengurangi kesalahan operator (Weman, 2012).

#### C. Pengendalian Kebersihan Material (*Material*)

Material yang berkarat, berminyak, atau lembap merupakan penyebab utama *porosity* akibat gas terperangkap saat proses solidifikasi logam las. Tindakan perbaikan:

1. Pembersihan permukaan material sebelum *welding*
2. Penggunaan *grinder* atau *wire brush* untuk menghilangkan karat
3. Memastikan material bebas minyak dan debu
4. Penyimpanan kawat las pada kondisi kering

Kebersihan permukaan material merupakan faktor kritis dalam mencegah cacat *porosity* dan meningkatkan kualitas sambungan las. Material yang kotor, berkarat, berminyak, atau lembap merupakan penyebab utama *porosity* karena gas terperangkap dalam logam cair selama proses solidifikasi (Messler, 2004; Kim & Na, 2022).

#### D. Perbaikan Prosedur Kerja Pengelasan (*Method*)

Metode kerja yang tidak tepat, seperti *slag* tidak dibersihkan antar lapisan dan *travel speed* terlalu cepat, menyebabkan *slag inclusion* dan *incomplete fusion*. Tindakan perbaikan:

1. Membersihkan *slag* pada setiap lapisan pengelasan
2. Mengontrol *travel speed* agar penetrasi optimal

Tabel 5. Ringkasan Implementasi Perbaikan

Faktor	Penyebab Utama	Dampak Cacat
<i>Man</i>	Pelatihan dan standarisasi teknik	Mencegah <i>slag inclusion</i>
<i>Machine</i>	Standarisasi arus & tegangan	Mengurangi <i>porosity</i>
<i>Method</i>	SOP & pembersihan <i>slag</i>	Mencegah <i>incomplete fusion</i>
<i>Material</i>	Pembersihan & penyimpanan	Mencegah <i>porosity</i>
<i>Environment</i>	Kontrol angin & kelembaban	Stabilitas gas pelindung

3. Memastikan teknik *multi-pass* sesuai prosedur
  4. Dokumentasi dan sosialisasi SOP pengelasan
- Penerapan prosedur kerja yang benar dapat menurunkan cacat *slag inclusion* secara signifikan (Jeffus, 2020).

#### E. Pengendalian Lingkungan Kerja (*Environment*)

Lingkungan kerja yang terkena angin atau memiliki kelembaban tinggi dapat mengganggu perlindungan gas pelindung dan menyebabkan *porosity*. Tindakan perbaikan:

1. Memasang pelindung angin di area pengelasan
2. Menghindari pengelasan di area terbuka tanpa pelindung
3. Menjaga ventilasi agar tidak mengganggu gas pelindung
4. Memonitor kelembaban area kerja

Kontrol lingkungan kerja penting untuk menjaga stabilitas gas pelindung dan mencegah kontaminasi udara selama pengelasan (Lancaster, 1999). Ringkasan implementasi perbaikan dapat dilihat pada **Tabel 5**.

Berdasarkan data produksi enam bulan, cacat *slag inclusion* dan *porosity* memiliki frekuensi tertinggi. Oleh karena itu, implementasi perbaikan difokuskan pada pengendalian parameter proses, kebersihan material, serta peningkatan keterampilan operator karena faktor-faktor tersebut merupakan penyebab dominan cacat pengelasan. Pendekatan perbaikan yang terintegrasi ini memungkinkan peningkatan kualitas sambungan las secara signifikan serta mendukung peningkatan kapabilitas proses produksi secara berkelanjutan. Dengan pengendalian proses yang konsisten dan disiplin operasional yang lebih baik, perusahaan dapat menekan tingkat cacat dan meningkatkan keandalan hasil pengelasan.

### 3.4 Hasil Setelah Perbaikan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa *defect* FCAW dipengaruhi oleh faktor manusia, metode kerja, dan kondisi material. *Porosity* yang dominan mengindikasikan kontaminasi permukaan dan kelembaban elektroda, sedangkan *slag inclusion* berkaitan dengan pembersihan *slag* antar lapisan yang tidak optimal. Analisis Pareto menunjukkan bahwa *porosity* dan *slag inclusion* menyumbang sekitar 68,86% dari total *defect*. Berdasarkan prinsip Pareto, sebagian besar masalah kualitas berasal dari sedikit penyebab utama, sehingga fokus perbaikan pada cacat dominan memberikan dampak signifikan terhadap peningkatan kualitas (Montgomery, 2019).

Penurunan *defect* sebesar 45,2% tidak hanya meningkatkan kualitas produk tetapi juga menurunkan biaya *rework*. Dengan asumsi biaya perbaikan Rp75.000 per *joint*, pengurangan cacat menghasilkan penghematan biaya produksi yang signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa *Six Sigma* meningkatkan kualitas sekaligus efisiensi ekonomi. Penerapan *Six Sigma* terbukti efektif dalam mengidentifikasi penyebab utama cacat dan memberikan solusi sistematis berbasis data. Pendekatan ini meningkatkan konsistensi kualitas hasil pengelasan.

Hasil penelitian juga menunjukkan kestabilan parameter pengelasan dan kebersihan material sebagai faktor utama dalam mengurangi cacat. Temuan ini konsisten dengan penelitian sebelumnya mengenai pengaruh variasi parameter dan kontaminasi material terhadap *porosity* dan *slag inclusion*. Peningkatan *level sigma* menunjukkan proses bergerak menuju kondisi yang lebih terkendali dan andal. Perbaikan berkelanjutan berpotensi meningkatkan daya saing industri fabrikasi baja di Batam.

### 3.5 Analisis Dampak Ekonomi Kualitas

Implementasi perbaikan kualitas pada proses FCAW memberikan dampak ekonomi yang signifikan bagi perusahaan fabrikasi baja. Sebelum dilakukan perbaikan, tingginya tingkat cacat pengelasan menyebabkan meningkatnya aktivitas *rework*, penggunaan material tambahan, serta pemborosan waktu produksi. Dalam perspektif manajemen kualitas, biaya akibat kegagalan internal seperti *rework* dan *scrap* merupakan komponen utama dari *cost of poor quality* yang secara langsung menurunkan efisiensi operasional dan profitabilitas perusahaan (Evans & Lindsay, 2017).

Berdasarkan data produksi, rata-rata jumlah cacat sebelum perbaikan mencapai sekitar 142 *defect* per bulan. Setelah implementasi perbaikan melalui standarisasi parameter pengelasan, peningkatan kompetensi operator, serta penguatan pengawasan proses, jumlah cacat menurun menjadi sekitar 64 *defect* per bulan atau mengalami penurunan lebih dari 50%. Penurunan ini secara langsung mengurangi kebutuhan pekerjaan ulang serta konsumsi bahan tambahan seperti kawat las dan gas pelindung, sehingga biaya operasional dapat ditekan secara signifikan.

Aktivitas *rework* pada proses pengelasan memerlukan tambahan energi listrik, material pengisi, serta waktu kerja operator. Dengan berkurangnya jumlah cacat, konsumsi sumber daya tersebut turut menurun sehingga proses

Tabel 6. Dampak Ekonomi

Parameter	Sebelum Perbaikan	Sesudah Perbaikan	Dampak
Rata-rata <i>defect</i> /bulan	142	64	↓ >45,2 %
Aktivitas <i>rework</i>	Tinggi	Rendah	Efisiensi meningkat
Konsumsi material tambahan	Tinggi	Menurun	Penghematan biaya
Waktu produksi	Kurang stabil	Lebih stabil	<i>Lead time</i> lebih singkat
Produktivitas	Tidak optimal	Meningkat	<i>Output</i> efektif naik

produksi menjadi lebih efisien. Stevenson (2018) menyatakan bahwa pengendalian kualitas yang efektif mampu menekan biaya operasional melalui pengurangan pemborosan material dan waktu produksi. Selain itu, stabilitas kualitas proses juga berkontribusi dalam mengurangi variabilitas produksi dan meningkatkan efisiensi sistem manufaktur secara keseluruhan.

Dari sisi efisiensi waktu, berkurangnya pekerjaan perbaikan memungkinkan aliran proses produksi berjalan lebih lancar dan mengurangi potensi keterlambatan penyelesaian proyek. Ketepatan waktu dalam industri fabrikasi berbasis proyek merupakan indikator kinerja penting yang memengaruhi kepuasan pelanggan dan keberlanjutan kontrak kerja (Slack & Brandon-Jones, 2019). Dengan menurunnya tingkat cacat, proses produksi menjadi lebih stabil dan durasi penyelesaian pekerjaan dapat diprediksi dengan lebih akurat.

Selain penghematan biaya langsung, peningkatan kualitas juga berdampak pada peningkatan produktivitas kerja. Penurunan jumlah cacat meningkatkan rasio sambungan las yang diterima tanpa perbaikan ulang, sehingga *output* efektif produksi meningkat. Montgomery (2020) menegaskan bahwa pengurangan variasi proses merupakan faktor kunci dalam peningkatan kapabilitas proses dan produktivitas sistem manufaktur. Peningkatan *level sigma* setelah implementasi perbaikan menunjukkan bahwa proses pengelasan menjadi lebih terkendali, konsisten, dan efisien.

Lebih lanjut, peningkatan kualitas produk memberikan manfaat jangka panjang berupa peningkatan kepercayaan pelanggan dan reputasi perusahaan. Produk dengan kualitas pengelasan yang baik memiliki keandalan struktural yang lebih tinggi dan risiko kegagalan lapangan yang lebih rendah. Kondisi ini sejalan dengan konsep *Total Quality Management* yang menekankan bahwa kualitas produk yang konsisten akan meningkatkan daya saing serta keberlanjutan organisasi dalam jangka panjang (Goetsch & Davis, 2016).

Dengan demikian, implementasi perbaikan kualitas berbasis *Six Sigma* pada proses FCAW tidak hanya menurunkan tingkat cacat, tetapi juga memberikan dampak ekonomi melalui pengurangan biaya *rework*, peningkatan efisiensi waktu produksi, optimalisasi penggunaan material, serta peningkatan produktivitas dan daya saing perusahaan secara berkelanjutan. Dampak ekonomi secara ringkas dapat dilihat pada **Tabel 6**.

### 3.6 Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa cacat pengelasan pada proses FCAW dipengaruhi secara signifikan oleh kombinasi faktor manusia, metode kerja, kondisi material, serta stabilitas parameter proses. Dominasi cacat *porosity* mengindikasikan adanya kontaminasi permukaan material dan gangguan perlindungan gas pelindung selama proses pengelasan, sedangkan *slag inclusion* berkaitan erat dengan teknik pembersihan *slag* antar lapisan dan konsistensi teknik operator. Temuan ini menegaskan bahwa kualitas sambungan las tidak hanya ditentukan oleh parameter teknis, tetapi juga oleh disiplin prosedural dan kondisi operasional di lapangan.

Analisis Pareto menunjukkan bahwa cacat *porosity* dan *slag inclusion* menyumbang sekitar 68,86% dari total cacat. Berdasarkan prinsip Pareto, sebagian besar masalah kualitas berasal dari sejumlah kecil penyebab utama, sehingga fokus perbaikan pada dua jenis cacat dominan tersebut memberikan dampak signifikan terhadap peningkatan kualitas proses. Pendekatan ini selaras dengan konsep pengendalian kualitas statistik yang menekankan prioritas perbaikan pada faktor kritis untuk memperoleh hasil optimal (Montgomery, 2019).

Implementasi tindakan perbaikan melalui standarisasi parameter pengelasan, peningkatan kompetensi *welder*, pengendalian kebersihan material, serta pengendalian lingkungan kerja terbukti mampu menurunkan tingkat cacat secara signifikan. Penurunan cacat berimplikasi langsung pada berkurangnya aktivitas *rework*, peningkatan efisiensi produksi, serta peningkatan konsistensi kualitas hasil pengelasan. Kondisi ini menunjukkan bahwa pendekatan *Six Sigma* tidak hanya berfungsi sebagai alat analisis kualitas, tetapi juga sebagai strategi peningkatan performa proses yang berkelanjutan.

Dari perspektif kapabilitas proses, peningkatan *level sigma* setelah implementasi perbaikan menunjukkan bahwa proses pengelasan bergerak menuju kondisi yang lebih stabil dan terkendali. Stabilitas parameter pengelasan dan kebersihan material terbukti menjadi faktor kunci dalam menekan variasi proses. Temuan ini konsisten dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa variasi parameter pengelasan dan kontaminasi permukaan material merupakan penyebab utama cacat *porosity* dan *slag inclusion* pada proses FCAW.

Selain peningkatan kualitas teknis, penurunan cacat sebesar 45,2% memberikan dampak ekonomi yang signifikan melalui pengurangan biaya *rework* dan efisiensi penggunaan material. Dalam konteks industri fabrikasi baja, efisiensi kualitas berkontribusi langsung terhadap daya saing perusahaan karena mengurangi pemborosan produksi dan meningkatkan keandalan produk. Dengan demikian, penerapan *Six Sigma* memberikan manfaat ganda, yaitu peningkatan kualitas teknis dan efisiensi operasional.

Jika perbaikan berkelanjutan dan pengendalian proses dilakukan secara konsisten, perusahaan berpotensi mencapai tingkat sigma yang lebih tinggi dan meningkatkan keandalan struktural produk. Peningkatan kualitas pengelasan tidak hanya meningkatkan efisiensi internal, tetapi juga memperkuat kepercayaan pelanggan dan reputasi perusahaan dalam industri fabrikasi baja yang kompetitif. Peningkatan level sigma dari sekitar 3,5 menjadi 3,8 menunjukkan bahwa proses pengelasan bergerak menuju kondisi yang lebih stabil dan terkendali. Dalam praktik industri manufaktur, peningkatan level sigma mencerminkan penurunan variasi proses dan peningkatan konsistensi kualitas produk.

Hasil penelitian ini sejalan dengan Kim & Park (2022) yang menemukan bahwa standarisasi parameter dan kebersihan material dapat menurunkan cacat *porosity* secara signifikan, serta Wang et al. (2023) yang menekankan pentingnya peningkatan kompetensi operator dalam mengurangi *slag inclusion*. Dengan menurunnya tingkat *defect*, perusahaan tidak hanya memperoleh peningkatan kualitas teknis, tetapi juga meningkatkan efisiensi produksi dan keandalan produk struktural.

Secara praktis, peningkatan kualitas pengelasan berkontribusi terhadap ketepatan waktu penyelesaian proyek, pengurangan biaya *rework*, serta peningkatan kepercayaan pelanggan. Oleh karena itu, penerapan *Six Sigma* pada proses FCAW dapat menjadi strategi peningkatan daya saing bagi industri fabrikasi baja yang berorientasi pada kualitas dan efisiensi operasional.

#### 4. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa kualitas proses FCAW pada perusahaan fabrikasi baja masih belum terkendali pada kondisi awal, dengan tingkat cacat sebesar 11,09%. Jenis cacat dominan yang ditemukan adalah *slag inclusion dan porosity*, yang sebagian besar dipengaruhi oleh kombinasi faktor manusia, metode kerja, kondisi material, stabilitas parameter pengelasan, serta lingkungan kerja. Kondisi tersebut berdampak pada meningkatnya pekerjaan ulang (*rework*), pemborosan material, dan menurunnya efisiensi produksi.

Penerapan metode *Six Sigma* melalui tahapan DMAIC terbukti efektif dalam menurunkan tingkat cacat sebesar 45,2% melalui standarisasi parameter pengelasan, peningkatan kompetensi *welder*, pengendalian kebersihan material, perbaikan prosedur kerja, serta pengendalian lingkungan kerja. Perbaikan ini meningkatkan kapabilitas proses dengan kenaikan level sigma dari sekitar 3,5 menjadi 3,8 yang menunjukkan proses menjadi lebih stabil dan terkendali. Selain meningkatkan kualitas teknis, penurunan cacat juga memberikan dampak positif terhadap efisiensi operasional melalui pengurangan *rework* dan optimalisasi penggunaan material.

Penelitian ini terbatas pada satu lini produksi dan periode pengamatan yang relatif singkat, sehingga variasi kondisi operasional jangka panjang belum sepenuhnya terwakili. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk memperluas objek kajian pada proses pengelasan lain, periode pengamatan yang lebih panjang, serta mengintegrasikan analisis statistik lanjutan dan pengujian sifat mekanik sambungan las. Secara praktis, perusahaan disarankan untuk mempertahankan standarisasi parameter proses, meningkatkan pelatihan operator secara berkelanjutan, serta menerapkan pengendalian kualitas berbasis data guna menjaga konsistensi kualitas dan meningkatkan daya saing industri fabrikasi baja.

Penelitian ini memberikan kontribusi ilmiah pada penerapan metodologi *Six Sigma* dalam proses FCAW di industri fabrikasi baja. Melalui integrasi analisis Pareto, diagram *Fishbone*, dan pendekatan DMAIC berbasis data produksi aktual, penelitian ini mengisi kesenjangan kajian sebelumnya yang masih terbatas pada industri fabrikasi baja berbasis proyek di Indonesia. Berbeda dengan studi terdahulu yang umumnya bersifat deskriptif, penelitian ini menyajikan pendekatan kuantitatif yang mengukur kapabilitas proses dan mengevaluasi efektivitas perbaikan secara empiris. Temuan penelitian menegaskan bahwa pengendalian parameter pengelasan, peningkatan kompetensi *welder*, dan pengendalian kondisi material merupakan faktor kritis dalam meningkatkan kualitas sambungan las. Secara keseluruhan, hasil ini memperkaya literatur manajemen kualitas dengan bukti empiris bahwa penerapan DMAIC secara terintegrasi mampu meningkatkan stabilitas proses dan efisiensi operasional pada industri fabrikasi baja.

#### 5. Daftar Pustaka

- Antony, J., Sony, M., & McDermott, O. (2023). *Six Sigma in non-manufacturing environments: A systematic literature review*. *Total Quality Management & Business Excellence*, 34(5-6), 678-699.
- American Welding Society. (2020). *Welding handbook: Welding processes* (Vol. 2, 9th ed.). AWS.
- Cary, H. B., & Helzer, S. C. (2011). *Modern welding technology* (6th ed.). Pearson Education.
- Evans, J. R., & Lindsay, W. M. (2020). *Managing for quality and performance excellence* (11th ed.). Cengage Learning.
- Gaspersz, V. (2002). Pedoman implementasi program *Six Sigma*. Gramedia Pustaka Utama.
- Goetsch, D. L., & Davis, S. B. (2016). *Quality management for organizational excellence* (8th ed.). Pearson.
- Heizer, J., Render, B., & Munson, C. (2020). *Operations management: Sustainability and supply chain management* (13th ed.). Pearson.
- Jeffus, L. (2020). *Welding: Principles and applications* (9th ed.). Cengage Learning.
- Kim, I. S., & Na, S. J. (2015). *Welding quality improvement through process control*. *Journal of Materials Processing Technology*, 214(11), 2343-2352.

- Kim, J., & Park, J. (2022). *Process parameter optimization for reducing welding defects in FCAW process*. *\*International Journal of Advanced Manufacturing Technology\**, 120, 145-158.
- Lancaster, J. F. (1999). *The physics of welding (2nd ed.)*. Pergamon Press.
- Messler, R. W. (2004). *Principles of welding: Processes, physics, chemistry, and metallurgy*. Wiley-Interscience.
- Montgomery, D. C. (2019). *Introduction to statistical quality control (8th ed.)*. Wiley.
- Montgomery, D. C. (2020). *Statistical quality control: A modern introduction (8th ed.)*. Wiley.
- Pande, P. S., Neuman, R. P., & Cavanagh, R. R. (2000). *The Six Sigma way*. McGraw-Hill.
- Pyzdek, T., & Keller, P. (2018). *The Six Sigma handbook (5th ed.)*. McGraw-Hill.
- Schroeder, R. G., et al. (2022). *Six Sigma implementation in project-based industries: Challenges and opportunities*. *Journal of Operations Management*, 68(4), 312-330
- Sindo Kou. (2021). *Welding metallurgy (3rd ed.)*. Wiley
- Slack, N., & Brandon-Jones, A. (2019). *Operations management (9th ed.)*. Pearson.
- Sony, M., Antony, J., & Douglas, J. A. (2022). *Lean Six Sigma in high-variety, low-volume environments: A systematic review*. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 39(8), 1895-1918.
- Stevenson, W. J. (2018). *Operations management (13th ed.)*. McGraw-Hill.
- Timans, W., Antony, J., Ahaus, K., & van Solingen, R. (2021). *Lean Six Sigma in high-variety low-volume production: A systematic literature review*. *International Journal of Production Economics*, 231, 107-120.
- Wang, Y., et al. (2023). *Defect formation mechanisms in flux-cored arc welding: A review*. *Journal of Manufacturing Processes*, 85, 234-248.
- Weman, K. (2012). *Welding processes handbook (2nd ed.)*. Woodhead Publishing.
- Zhang, Y., & Wu, C. (2018). *Influence of welding parameters on weld quality and defect formation*. *Journal of Manufacturing Processes*, 32, 305–313.