

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Kajian Penelitian Terdahulu

Penelitian yang menerapkan metode Six Sigma dan pendekatan DMAIC, dapat diidentifikasi beberapa kecenderungan sekaligus kesenjangan (gap) penelitian. Pertama, sebagian besar penelitian terdahulu menerapkan Six Sigma (DMAIC) pada konteks manufaktur umum, seperti produk pagar, pupuk, komponen otomotif, dan pressure vessel industri kilang, sehingga belum menyorot secara khusus pada material baja lambung kapal. Kedua, penelitian yang membahas pengelasan pada industri perkapalan cenderung berfokus pada manajemen produksi atau optimalisasi proses secara umum, tanpa mengintegrasikan analisis sifat mekanik material maupun perhitungan DPMO dan sigma level pada jenis cacat las tertentu. Ketiga, penelitian yang secara eksplisit membahas jenis cacat las seperti porosity, slag inclusion, dan lack of fusion umumnya dilakukan pada objek di luar konstruksi kapal, misalnya pressure vessel kilang minyak, sehingga karakteristik operasional dan kondisi material yang berbeda menyebabkan temuannya tidak sepenuhnya dapat diterapkan pada material lambung kapal tugboat.

Penelitian Madasari et al. (2021) membahas analisis kualitas proses pembangunan kapal baru dengan pendekatan Six Sigma pada PT. ASSI. Penelitian tersebut mengidentifikasi berbagai jenis defect dalam proses hull construction, termasuk cacat kualitas pengelasan pada proses assembly. Hasil penelitian menunjukkan nilai sigma sebesar 3,608. Analisis penyebab dilakukan menggunakan fishbone diagram dan Failure Mode and Effects Analysis (FMEA), kemudian menghasilkan rekomendasi perbaikan yang berkaitan dengan pembacaan Welding Procedure Specification (WPS), peningkatan kompetensi tenaga kerja, serta pengendalian proses produksi. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa Six Sigma dapat digunakan untuk mengevaluasi kualitas proses pembangunan kapal dan mengidentifikasi sumber utama terjadinya defect (Madasari et al., 2021).

Nadila (2023) melakukan penelitian mengenai mutu hasil uji radiografi pengelasan lambung kapal tunda 2 × 2200 HP tipe ASD. Penelitian tersebut memiliki keterkaitan langsung dengan objek penelitian karena membahas kualitas hasil pengelasan pada konstruksi lambung kapal tunda. Penelitian tersebut menekankan pentingnya pemeriksaan kualitas hasil pengelasan melalui metode pengujian tidak merusak (Non-Destructive Testing/NDT) untuk mengetahui keberadaan ketidaksempurnaan pada sambungan las (Nadila, 2023).

Amalliyah dan Nugraha (2025) melakukan penelitian mengenai pengendalian kualitas hasil pengelasan pada bengkel welding di perusahaan manufaktur maritim menggunakan metode Six Sigma dan New Seven Tools. Penelitian tersebut menemukan beberapa jenis cacat, antara lain spatter, undercut, dan pin hole. Hasil pengukuran menghasilkan nilai DPMO sebesar 49.289 dengan tingkat sigma sebesar 3,15. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa penerapan DMAIC dapat digunakan untuk mengidentifikasi jenis cacat, menganalisis faktor penyebab, dan merumuskan tindakan perbaikan pada proses pengelasan di industri maritim (Amalliyah & Nugraha, 2025).

Penelitian terbaru oleh Pardede dan Irwan (2026) menganalisis dan

meningkatkan kualitas proses Flux Cored Arc Welding (FCAW) menggunakan metode Six Sigma dengan pendekatan DMAIC pada industri fabrikasi baja. Penelitian tersebut menggunakan data produksi sebagai dasar pengukuran kualitas dan mengidentifikasi porosity serta slag inclusion sebagai cacat dominan. Analisis fishbone menunjukkan bahwa faktor manusia, metode, material, mesin, dan lingkungan berkontribusi terhadap terjadinya cacat. Perbaikan melalui standarisasi parameter pengelasan, peningkatan kompetensi welder, pengendalian kebersihan material, dan pengendalian lingkungan kerja mampu menurunkan nilai DPMO serta meningkatkan kapabilitas proses (Pardede & Irwan, 2026).

Secara keseluruhan, penelitian ini memiliki posisi yang lebih spesifik karena objek penelitian difokuskan pada sambungan las material lambung kapal tugboat dan jenis cacat yang dianalisis dibatasi pada *crack* dan *porosity*. Selain itu, penelitian mengintegrasikan tahapan DMAIC secara menyeluruh, mulai dari penetapan Critical to Quality (CTQ), pengukuran DPMO dan *sigma level*, analisis distribusi cacat berdasarkan area lambung, identifikasi penyebab menggunakan *fishbone diagram*, penyusunan usulan perbaikan, hingga perancangan pengendalian kualitas.

2.2. Konsep Tug Boat



Gambar 2.1 Harbour Tug PT. Jasa Armada Indonesia Tbk
(Sumber: IPC Marine, 2023)

Kapal tugboat atau kapal tunda merupakan jenis kapal yang dirancang untuk membantu pergerakan kapal lain melalui kegiatan menarik (towing), mendorong (pushing), serta membantu manuver kapal di area pelabuhan maupun perairan dengan ruang gerak terbatas. Kapal tugboat memiliki karakteristik berupa kebutuhan gaya dorong yang tinggi dan kemampuan manuver yang baik sehingga dapat digunakan untuk mendukung kegiatan operasional kapal berukuran lebih besar (Rawson & Tupper, 2001).

Kapal tugboat umumnya memiliki sistem propulsi dengan daya yang relatif besar terhadap ukuran kapal. Kemampuan tersebut diperlukan untuk menghasilkan bollard pull yang memadai ketika kapal melakukan kegiatan penarikan atau pendorongan. Selain sistem propulsi, struktur lambung, sistem kemudi, sistem perpipaan, sistem kelistrikan, dan sistem permesinan merupakan bagian penting yang saling mendukung kinerja kapal (Eyres & Bruce, 2012).

Salah satu metode utama penyambungan komponen konstruksi kapal adalah pengelasan. Pengelasan digunakan pada pelat lambung, rangka, stiffener, geladak, sekat, tangki, dan berbagai bagian struktur lainnya. Oleh karena itu, kualitas sambungan las mempunyai hubungan yang erat dengan integritas konstruksi kapal. Cacat pada sambungan las dapat menyebabkan penurunan kualitas sambungan dan meningkatkan kebutuhan pekerjaan perbaikan (repair welding) (Taggart, 1980).

2.3. Material Kapal

Material kapal merupakan salah satu komponen utama dalam pembangunan konstruksi kapal. Pemilihan material harus mempertimbangkan kekuatan, ketangguhan, kemampuan pembentukan, ketahanan terhadap lingkungan, serta kemampuan material untuk dilas (weldability). Material yang digunakan pada konstruksi kapal harus mampu menerima pembebanan selama proses fabrikasi dan selama kapal beroperasi (Eyres & Bruce, 2012).

Baja merupakan salah satu material yang banyak digunakan dalam konstruksi kapal karena mempunyai kombinasi sifat mekanik dan kemampuan fabrikasi yang sesuai dengan kebutuhan konstruksi. Baja kapal memiliki kekuatan dan ketangguhan yang memadai serta dapat diproses melalui berbagai metode pengelasan. Selain itu, baja relatif mudah dibentuk dan memiliki ketersediaan yang baik untuk kebutuhan pembangunan kapal (Rawson & Tupper, 2001).

Sifat material dapat dibedakan menjadi sifat kimia dan sifat mekanik. Sifat kimia berkaitan dengan unsur penyusun material, seperti karbon (C), mangan (Mn), silikon (Si), sulfur (S), dan fosfor (P). Komposisi unsur tersebut dapat memengaruhi kekuatan, kekerasan, ketangguhan, dan kemampuan las material. Sementara itu, sifat mekanik meliputi yield strength, tensile strength, elongation, kekerasan, dan ketangguhan (Callister & Rethwisch, 2018).

Kandungan karbon merupakan salah satu aspek yang penting dalam kemampuan las baja. Peningkatan kandungan karbon dan unsur paduan tertentu dapat meningkatkan kekuatan material, tetapi pada kondisi tertentu juga dapat meningkatkan sensitivitas terhadap pembentukan retak selama proses pengelasan. Oleh karena itu, pemilihan material harus mempertimbangkan kesesuaian antara sifat mekanik dan kemampuan pengelasannya.

Kualitas material juga mempunyai hubungan dengan kualitas hasil pengelasan. Permukaan material yang mengandung karat, minyak, air, atau kontaminan lain dapat mengganggu proses pembentukan sambungan. Oleh sebab itu, material yang akan dilas harus memenuhi spesifikasi dan dipersiapkan dengan baik sebelum proses pengelasan dilakukan (American Welding Society [AWS], 2020).

2.4. Pengelasan Pada Konstruksi Kapal

Pengelasan merupakan salah satu proses manufaktur utama dalam pembangunan kapal. Sebagian besar komponen struktur kapal disatukan melalui proses pengelasan karena metode tersebut dapat menghasilkan sambungan permanen dengan efisiensi produksi yang tinggi. Sambungan las pada konstruksi kapal harus mampu menerima beban statis, beban dinamis, getaran, dan perubahan kondisi pembebanan selama kapal beroperasi (Wirjosumarto & Okumura, 2000).

Metode pengelasan yang umum digunakan dalam konstruksi kapal antara lain *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW), *Gas Metal Arc Welding* (GMAW), *Submerged Arc Welding* (SAW), dan *Flux Cored Arc Welding* (FCAW). Pemilihan proses pengelasan dipengaruhi oleh jenis material, ketebalan pelat, posisi pengelasan, produktivitas, kebutuhan penetrasi, serta persyaratan kualitas sambungan (AWS, 2020).

FCAW merupakan salah satu proses pengelasan yang menggunakan elektroda berbentuk kawat berinti flux. Proses ini dapat memberikan produktivitas deposisi yang tinggi dan banyak digunakan pada pekerjaan fabrikasi baja. Penggunaan FCAW tetap memerlukan pengendalian parameter, kondisi material, perlindungan proses, serta

kompetensi operator agar kualitas sambungan memenuhi persyaratan (AWS, 2020).

2.4.1. Definisi Pengelasan

Pengelasan merupakan proses penyambungan material yang menghasilkan ikatan metalurgi melalui penggunaan panas, tekanan, atau kombinasi panas dan tekanan, dengan atau tanpa penggunaan logam pengisi. Pada proses pengelasan fusi, sebagian material dasar mengalami pencairan dan kemudian mengalami proses pembekuan untuk membentuk sambungan permanen (Wiryosumarto & Okumura, 2000).

Secara metalurgi, proses pengelasan menyebabkan perubahan kondisi material pada daerah sambungan. Daerah yang mengalami siklus panas dapat membentuk perubahan struktur mikro dan sifat mekanik. Besarnya perubahan tersebut dipengaruhi oleh masukan panas, jenis material, laju pendinginan, serta parameter pengelasan yang digunakan (Kalpakjian & Schmid, 2014).

Dalam konstruksi kapal, proses pengelasan digunakan pada berbagai bagian struktur, termasuk pelat lambung, stiffener, frame, bulkhead, geladak, dan tangki. Oleh karena itu, kualitas proses pengelasan mempunyai pengaruh langsung terhadap kualitas konstruksi secara keseluruhan.

2.4.2. Jenis Sambungan Las

Sambungan las merupakan konfigurasi geometris yang digunakan untuk menghubungkan dua atau lebih komponen melalui proses pengelasan. Jenis sambungan dipilih berdasarkan bentuk konstruksi, arah pembebanan, ketebalan material, kebutuhan kekuatan, dan kemudahan proses fabrikasi (Wiryosumarto & Okumura, 2000).

Beberapa jenis sambungan yang umum digunakan antara lain sebagai berikut.

1. Butt Joint

Butt joint merupakan sambungan dua pelat yang ditempatkan pada bidang yang relatif sama dan disambungkan pada bagian ujungnya. Sambungan ini banyak digunakan untuk penyambungan pelat lambung kapal karena dapat menghasilkan konfigurasi struktur yang kontinu.

2. Lap Joint

Lap joint merupakan sambungan dengan cara menumpangkan satu pelat terhadap pelat lainnya kemudian melakukan pengelasan pada bagian yang bertumpang tindih. Jenis sambungan ini relatif mudah dilakukan dalam proses fabrikasi, tetapi distribusi tegangan perlu diperhatikan.

3. T-Joint

T-joint merupakan sambungan dua komponen yang membentuk konfigurasi menyerupai huruf T. Sambungan ini banyak digunakan untuk menghubungkan stiffener dengan pelat utama pada konstruksi kapal.

4. Corner Joint

Corner joint digunakan untuk menyambungkan dua komponen pada bagian sudut. Sambungan ini dapat dijumpai pada konstruksi tangki, sekat, dan struktur berbentuk kotak.

2.4.3. Parameter Pengelasan

Parameter pengelasan merupakan variabel proses yang harus dikendalikan untuk memperoleh sambungan sesuai dengan persyaratan kualitas. Parameter utama

meliputi arus, tegangan, kecepatan pengelasan, jenis dan ukuran filler metal, polaritas, serta kondisi perlindungan selama proses pengelasan (Wiryosumarto & Okumura, 2000).

1. Arus Pengelasan

Arus pengelasan berhubungan dengan jumlah panas yang dihasilkan selama proses pengelasan. Arus yang terlalu rendah dapat menyebabkan peleburan dan penetrasi yang tidak memadai, sedangkan arus yang terlalu tinggi dapat meningkatkan penetrasi secara berlebihan, percikan, distorsi, dan masukan panas (AWS, 2020).

2. Tegangan Pengelasan

Tegangan berhubungan dengan karakteristik busur listrik. Perubahan tegangan dapat memengaruhi kestabilan busur dan bentuk manik las. Ketidaksesuaian tegangan dengan parameter lainnya dapat memengaruhi kualitas sambungan dan meningkatkan kemungkinan terjadinya ketidaksempurnaan pengelasan (AWS, 2020).

3. Kecepatan Pengelasan

Kecepatan pengelasan menentukan lamanya sumber panas bekerja pada suatu bagian material. Kecepatan yang terlalu tinggi dapat menghasilkan penetrasi yang tidak mencukupi, sedangkan kecepatan yang terlalu rendah dapat meningkatkan masukan panas dan memengaruhi bentuk serta sifat sambungan (Kalpakjian & Schmid, 2014).

4. Filler Metal atau Elektroda

Jenis dan ukuran filler metal harus disesuaikan dengan material dasar dan prosedur pengelasan. Pemilihan filler metal yang tepat diperlukan agar sifat mekanik dan karakteristik metalurgi sambungan sesuai dengan kebutuhan konstruksi (AWS, 2020).

5. *Welding Procedure Specification (WPS)*

WPS merupakan dokumen yang menetapkan variabel dan prosedur pengelasan yang harus diikuti dalam pelaksanaan pengelasan. WPS digunakan untuk menjaga konsistensi proses dan memastikan parameter yang digunakan berada dalam rentang yang telah dikualifikasi. AWS menjelaskan bahwa prosedur pengelasan yang dikualifikasi dan didokumentasikan menjadi dasar penting dalam memastikan keberhasilan penerapan proses pengelasan (AWS, 2021).

Kepatuhan terhadap WPS menjadi penting karena penyimpangan parameter dapat menyebabkan perubahan masukan panas, penetrasi, bentuk manik, dan kondisi metalurgi sambungan. Dengan demikian, penerapan WPS perlu disertai pengawasan terhadap operator, peralatan, material, dan kondisi lingkungan kerja.

2.5. Cacat Pengelasan

Cacat pengelasan (*welding defect*) merupakan ketidaksesuaian atau ketidaksempurnaan pada hasil pengelasan yang menyebabkan sambungan tidak memenuhi persyaratan yang ditetapkan. Cacat dapat berasal dari parameter pengelasan yang tidak sesuai, kondisi material, desain sambungan, teknik pengelasan, kondisi lingkungan, maupun faktor manusia (Cary & Helzer, 2011).

AWS mengelompokkan berbagai ketidaksempurnaan pengelasan, termasuk porosity, crack, incomplete fusion, incomplete joint penetration, undercut, dan berbagai bentuk ketidaksempurnaan lainnya. Pemeriksaan terhadap ketidaksempurnaan tersebut diperlukan untuk memastikan bahwa sambungan

memenuhi persyaratan kualitas dan penerimaan yang berlaku (AWS, 2020).

Dalam penelitian ini, cacat pengelasan dibatasi pada dua jenis, yaitu porosity dan crack. Pemilihan kedua jenis cacat tersebut disesuaikan dengan data inspeksi yang digunakan sebagai objek penelitian.

2.5.1. Porosity

Porosity merupakan ketidaksempurnaan pengelasan berupa rongga atau pori akibat gas yang terjebak di dalam logam las selama proses pembekuan. Pori dapat terbentuk secara tunggal, berkelompok, tersebar, atau dalam konfigurasi tertentu bergantung pada kondisi proses pengelasan (Cary & Helzer, 2011).

Pembentukan porosity dapat dipengaruhi oleh kondisi permukaan material, kelembapan, kontaminasi, kondisi consumable, teknik pengelasan, serta pengaturan parameter yang tidak sesuai. Kontaminan seperti minyak, air, karat, dan kotoran dapat menjadi sumber gas selama proses pengelasan dan meningkatkan kemungkinan pembentukan pori (AWS, 2020).

Porosity juga dapat berkaitan dengan kondisi perlindungan proses pengelasan. Apabila perlindungan terhadap atmosfer tidak memadai, gas dari lingkungan dapat masuk ke dalam kolam las dan terperangkap selama proses pembekuan. Oleh karena itu, kebersihan material, kondisi consumable, parameter proses, dan teknik pengelasan perlu dikendalikan.

Keberadaan porosity dalam jumlah atau ukuran tertentu dapat mengurangi luas penampang efektif sambungan dan memengaruhi sifat mekanik sambungan. Oleh karena itu, pemeriksaan terhadap porosity diperlukan untuk memastikan kesesuaian hasil pengelasan dengan kriteria penerimaan yang berlaku (AWS, 2020).

2.5.2. Crack

Crack atau retak merupakan ketidaksempurnaan berupa pemisahan material yang dapat terjadi pada logam las, daerah Heat Affected Zone (HAZ), maupun daerah sekitar sambungan. Retak merupakan salah satu jenis ketidaksempurnaan yang perlu mendapat perhatian karena dapat menjadi lokasi awal perkembangan kerusakan apabila kondisi pembebanan mendukung propagasi retak (Weman, 2012).

Retak pada sambungan las dapat berkaitan dengan tegangan sisa, kondisi pendinginan, komposisi material, hidrogen, desain sambungan, dan prosedur pengelasan. Jenis retak dapat dibedakan berdasarkan lokasi dan mekanisme pembentukannya, antara lain weld metal crack, heat affected zone crack, root crack, dan crater crack (Weman, 2012).

2.6. Pengendalian Kualitas

Pengendalian kualitas pengelasan mencakup pengendalian material, prosedur pengelasan, kompetensi welder, kondisi mesin, parameter proses, serta pemeriksaan hasil las. AWS menekankan bahwa kualitas las perlu dikendalikan sejak tahap desain, pemilihan proses, material dan filler metal, kualifikasi personel, hingga metode inspeksi dan pemeriksaan NDT (AWS, 2020).

Pendekatan pengendalian kualitas berbasis data memungkinkan perusahaan mengidentifikasi pola *defect*, mengukur kinerja proses, serta menentukan prioritas tindakan perbaikan. Salah satu metode yang dapat digunakan adalah Six Sigma.

Six Sigma merupakan pendekatan pengendalian dan peningkatan kualitas yang menggunakan data dan analisis statistik untuk mengurangi variasi proses dan jumlah *defect*. Penggunaan ukuran seperti DPMO dan sigma level memungkinkan kinerja

proses dinilai secara kuantitatif (George, 2002).

Dalam penelitian ini, pengendalian kualitas digunakan untuk mengevaluasi proses pengelasan material lambung kapal tugboat. Evaluasi dilakukan dengan mengidentifikasi jenis cacat, mengukur jumlah defect, menghitung DPMO dan sigma level, menganalisis faktor penyebab, serta menyusun usulan perbaikan dan pengendalian.

2.7. Metode Six Sigma

Six Sigma merupakan metode peningkatan kualitas yang berorientasi pada pengurangan variasi proses dan pengurangan jumlah defect. Pendekatan ini menggunakan pengukuran berbasis data untuk mengetahui tingkat kinerja proses dan mengidentifikasi peluang peningkatan kualitas (George, 2002).

Six Sigma menggunakan indikator DPMO (Defects per Million Opportunities) untuk menyatakan jumlah cacat yang terjadi dalam satu juta peluang terjadinya cacat. DPMO dapat digunakan untuk membandingkan kualitas proses meskipun jumlah unit dan jumlah peluang cacat pada setiap unit berbeda.

Secara umum, DPMO dihitung dengan persamaan:

$$\text{DPMO} = \frac{D}{U \times OP} \times 1.000.000 \dots \dots \dots (1)$$

dengan:

D = jumlah defect;

U = jumlah unit atau sambungan yang diperiksa;

OP = jumlah opportunity atau peluang cacat pada setiap unit.

Sigma Level	% Defective	DPMO
1σ	30.23%	697,700
2σ	69.13%	308,700
3σ	93.32%	66,810
4σ	99.3790%	6,210
5σ	99.97670%	233
6σ	99.999660%	3.4

Tabel 2.1 Sigma Level

(sumber :<https://cqacademy.com/cqe-body-of-knowledge/continuous-improvement/continuous-improvement-techniques/>)

Nilai DPMO yang semakin rendah menunjukkan jumlah cacat yang semakin sedikit. Sebaliknya, semakin tinggi nilai DPMO menunjukkan semakin banyak peluang cacat yang menghasilkan ketidaksesuaian.

Selain DPMO, kinerja proses dapat dinyatakan dalam bentuk sigma level. Nilai sigma menunjukkan posisi kinerja proses berdasarkan tingkat ketidaksesuaian yang terjadi. Dalam praktik Six Sigma, konversi DPMO menjadi tingkat sigma umumnya menggunakan pendekatan distribusi normal dengan shift 1,5 sigma.

Dalam penelitian ini, nilai DPMO dan sigma level digunakan untuk mengukur tingkat kualitas proses pengelasan berdasarkan data cacat yang ditemukan pada sambungan lambung kapal tugboat.

2.8. Tahapan DMAIC

DMAIC merupakan kerangka kerja sistematis dalam penerapan Six Sigma yang terdiri atas lima tahapan, yaitu Define, Measure, Analyze, Improve, dan Control.

Setiap tahap mempunyai tujuan dan keluaran yang saling berkaitan sehingga proses perbaikan dapat dilakukan secara sistematis (George, 2002).

1. Define

Tahap Define merupakan tahap untuk mendefinisikan masalah kualitas yang akan dianalisis. Pada tahap ini ditentukan ruang lingkup penelitian, objek yang dianalisis, kebutuhan pelanggan atau persyaratan kualitas, serta karakteristik kualitas kritis atau Critical to Quality (CTQ).

Dalam penelitian ini, tahap Define digunakan untuk menetapkan cacat crack dan porositas sebagai karakteristik kualitas yang menjadi fokus evaluasi.

2. Measure

Tahap Measure merupakan tahap pengukuran kondisi aktual proses berdasarkan data yang tersedia. Data dapat berupa jumlah unit, jumlah defect, jenis cacat, frekuensi cacat, serta jumlah peluang terjadinya cacat.

Dalam penelitian ini, tahap Measure digunakan untuk menghitung jumlah defect, total opportunity, DPMO, dan sigma level pada setiap area lambung kapal.

3. Analyze

Tahap Analyze bertujuan mengidentifikasi jenis cacat dominan dan faktor penyebab yang berkontribusi terhadap terjadinya cacat. Analisis dapat dilakukan menggunakan diagram Pareto dan fishbone diagram.

Diagram Pareto digunakan untuk mengurutkan kontribusi masalah berdasarkan frekuensi atau besarnya kejadian. Dengan demikian, jenis atau area cacat yang memberikan kontribusi terbesar dapat diidentifikasi sebagai prioritas analisis.

Fishbone diagram atau diagram sebab-akibat digunakan untuk mengelompokkan faktor penyebab ke dalam kategori seperti Man, Machine, Method, Material, dan Environment. Pendekatan tersebut membantu proses identifikasi akar penyebab secara sistematis.

4. Improve

Tahap Improve merupakan tahap penyusunan tindakan perbaikan berdasarkan hasil analisis penyebab. Tindakan perbaikan diarahkan untuk mengurangi kemungkinan terjadinya cacat dan meningkatkan konsistensi proses.

Dalam proses pengelasan, tindakan perbaikan dapat berupa peningkatan kompetensi welder, standarisasi parameter, penguatan kepatuhan terhadap WPS, pemeriksaan material, pengendalian kondisi lingkungan, serta pemeliharaan peralatan.

Penelitian pada proses FCAW menunjukkan bahwa standarisasi parameter, peningkatan kompetensi welder, pengendalian kebersihan material, dan pengendalian lingkungan dapat digunakan sebagai bagian dari strategi peningkatan kualitas pengelasan (Pardede & Irwan, 2026).

5. Control

Tahap Control bertujuan mempertahankan hasil perbaikan agar proses tetap berada dalam kondisi yang diharapkan. Pengendalian dilakukan melalui standarisasi prosedur, pemantauan indikator kualitas, dokumentasi, inspeksi, dan evaluasi secara berkala.

Dalam penelitian ini, tahap Control dilakukan melalui penyusunan control plan dan penggunaan p-chart untuk memantau proporsi cacat pada masing-masing area lambung kapal.

Peta kendali p digunakan untuk memantau proporsi unit yang mengalami cacat.

Secara umum, proporsi cacat dihitung dengan:

$$\frac{x}{n} = \frac{p}{n} \quad (2)$$

dengan:

p = proporsi cacat;

x = jumlah unit yang mengalami cacat;

n = jumlah unit yang diperiksa.

Garis pusat (Center Line/CL) dapat dihitung menggunakan proporsi rata-rata:

$$CL = \bar{p}$$

Sedangkan batas kendali atas (Upper Control Limit/UCL) dan batas kendali bawah (Lower Control Limit/LCL) dapat dihitung menggunakan:

$$UCL = \bar{p} + 3\sqrt{\bar{p}(1-\bar{p})/n} \quad (3)$$

$$LCL = \bar{p} - 3\sqrt{\bar{p}(1-\bar{p})/n} \quad (4)$$

Apabila hasil perhitungan LCL bernilai negatif, maka batas bawah secara praktis ditetapkan sebesar nol.

Penggunaan p-chart memungkinkan pemantauan perubahan proporsi cacat dari waktu ke waktu sehingga kondisi proses dapat dievaluasi dan potensi penyimpangan dapat diketahui lebih awal.

Dengan demikian, penerapan DMAIC dalam penelitian ini mencakup identifikasi masalah, pengukuran kualitas, analisis penyebab, penyusunan tindakan perbaikan, dan pengendalian hasil perbaikan. Kerangka tersebut digunakan untuk menghasilkan evaluasi kualitas pengelasan yang berbasis data dan dapat diterapkan pada proses fabrikasi lambung kapal tugboat.