

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Gambaran Umum Objek dan Sumber Data Penelitian

Objek yang dievaluasi adalah proses pengelasan sambungan pelat pada lambung kapal tunda (tugboat) yang dikerjakan dengan metode Flux Cored Arc Welding (FCAW). Data hasil pemeriksaan yang dianalisis berasal dari fabrikasi tugboat 23 m Hull 302 yang dilaporkan oleh Ryadin, Wisno, dan Arif (2020). Pada laporan tersebut terdapat 75 joinan pada body utama kapal yang dikelompokkan ke tiga area, yaitu haluan (23 joinan), midship (35 joinan), dan buritan (17 joinan).

Data pada penelitian ini merupakan data sekunder. Penulis tidak melakukan pengujian NDT secara langsung, melainkan mengolah ulang hasil inspeksi yang tersedia dengan kerangka Six Sigma (DMAIC). Oleh karena itu, hasil Bab IV menggambarkan kapabilitas proses pada paket pekerjaan yang dilaporkan dan tidak dimaksudkan sebagai representasi seluruh galangan kapal.

Pemilihan data didasarkan pada tersedianya hasil PT dan UT per area, sehingga variasi kualitas antarbagian lambung dapat dihitung. Data tersebut juga dapat ditelusuri ke publikasi sumber sehingga angka masukan yang digunakan dalam perhitungan dapat diperiksa kembali.

4.2. Objek Penelitian dan Alur Pemeriksaan

Menurut Ryadin et al. (2020), sambungan lambung dikerjakan melalui pemasangan pelat, pembentukan kampuh dengan gouging, penghalusan kampuh menggunakan gerinda, pengelasan FCAW, kemudian pemeriksaan dengan PT dan UT. PT digunakan untuk indikasi yang terbuka pada permukaan, sedangkan UT digunakan untuk indikasi internal. Data kegagalan pada laporan sumber dibagi menurut area haluan, midship, dan buritan.

Laporan sumber juga mencatat bahwa joinan yang gagal berada pada lokasi dengan variasi pelat dan area yang relatif sulit dijangkau, terutama haluan dan buritan. Temuan ini digunakan sebagai petunjuk awal pada tahap Analyze, tetapi tidak diperlakukan sebagai bukti tunggal mengenai akar penyebab

4.3. Deskripsi Kapal Tug Boat

Objek penelitian ini berupa kapal tunda (harbour tug) yang dibangun untuk mendukung kegiatan olah gerak kapal-kapal berukuran besar di kawasan pelabuhan. Kapal tunda dipilih sebagai objek penelitian karena memiliki kebutuhan daya mesin yang tinggi dibandingkan dimensinya, sehingga memerlukan konstruksi lambung baja dengan ketebalan yang lebih besar. Kondisi tersebut menyebabkan proses pengelasan pada pembangunan kapal menjadi lebih kompleks dan dilakukan dengan intensitas yang lebih tinggi dibandingkan pada kapal niaga pada umumnya. Adapun spesifikasi teknis kapal yang menjadi objek penelitian disajikan pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Data Objek Kapal Berdasarkan Ryadin dkk. (2020)

(sumber : Ryadin, A. U., Ohara, W., dan Hakim, A. R., “Analisa Kualitas Pengelasan Flux Cored Arc Welding (FCAW) pada Pabrikasi Tugboat 23 M, Hull 302,” SIGMA TEKNIKA, Vol. 3, No. 1, pp. 39–49, 2020. doi: 10.33373/sigma.v3i1.2483.)

No.	Parameter	Keterangan
1	Jenis kapal	Tugboat/kapal tunda
2	Ukuran nominal	23 m
3	Hull	Hull 302
4	Objek pekerjaan	Body utama kapal
5	Proses pengelasan	FCAW
6	Bentuk kampuh	Single bevel dan bevel V
7	Pemeriksaan NDT	Penetrant Test (PT) dan Ultrasonic Test (UT)
8	Area 1	Kepala/bow
9	Joinan area kepala	23
10	Area 2	Tengah/midship
11	Joinan area tengah	35
12	Area 3	Belakang/stern
13	Joinan area belakang	17
14	Total joinan	75
15	Data pengamatan	Hasil pemeriksaan NDT pada joinan
16	Variabel konstruksi yang dianalisis	Single bevel, bevel V, dan variasi thickness

Berdasarkan Tabel 4.1, objek penelitian yang digunakan dalam penelitian ini merupakan kapal tugboat dengan identitas Hull 302 dan ukuran nominal 23 m sebagaimana dilaporkan oleh Ryadin dkk. (2020). Penelitian tersebut berfokus pada proses pengelasan pada bagian badan utama kapal dengan menggunakan metode Flux Cored Arc Welding (FCAW). Pemeriksaan kualitas hasil pengelasan dilakukan menggunakan metode Non-Destructive Testing (NDT), yaitu Penetrant Testing (PT) dan Ultrasonic Testing (UT). Pemeriksaan dilakukan pada tiga bagian utama kapal, yaitu bagian depan (head), bagian tengah (middle), dan bagian belakang (rear). Jumlah sambungan las yang diperiksa sebanyak 75 sambungan, yang terdiri atas 23 sambungan pada bagian head, 35 sambungan pada bagian middle, dan 17 sambungan pada bagian rear.

Selain berdasarkan pembagian lokasi pemeriksaan, Ryadin dkk. (2020) juga membahas kondisi sambungan berdasarkan bentuk kampuh pengelasan, yaitu single bevel dan V bevel, serta pengaruh variasi ketebalan pelat terhadap hasil pemeriksaan. Tahapan pekerjaan pengelasan yang dijelaskan meliputi pemasangan pelat oleh fitter, proses gouging untuk membentuk kampuh, grinding, proses pengelasan menggunakan FCAW, kemudian dilanjutkan dengan pemeriksaan PT dan UT. Dengan demikian, data yang digunakan sebagai dasar objek penelitian ini merupakan data hasil pemeriksaan kualitas sambungan las pada Hull 302 yang mencakup jumlah

sambungan, lokasi pemeriksaan, jenis kampuh, proses pengelasan, serta hasil pengujian NDT. Data tersebut selanjutnya digunakan sebagai dasar pengolahan dan analisis pada penelitian ini.

4.4. Data Awal Inspeksi Cacat Las

Berdasarkan laporan Ryadin dkk. (2020), dari total 75 joinan yang diperiksa terdapat 9 joinan yang dinyatakan gagal (failed). Kegagalan tersebut terdiri atas 3 kegagalan PT dan 6 kegagalan UT. Untuk menjaga konsistensi dengan dua CTQ yang ditetapkan, kegagalan PT diperlakukan sebagai crack dan kegagalan UT sebagai porosity pada analisis kuantitatif. Pemetaan ini merupakan pengelompokan analitis berdasarkan metode NDT karena sumber tidak memberikan jumlah indikasi secara terpisah, disajikan pada tabel 4.2. sebagai berikut.

Tabel 4.2 Rekapitulasi Hasil Inspeksi NDT Per Area Lambung
(Sumber : Ryadin, A. U., Ohara, W., dan Hakim, A. R. (2020), diolah penulis.)

No	Area Lambung	Jml. Joinan	PT Failed	UT Failed	Total Failed	% Keberhasilan
1	Kepala (Bow / Haluan)	23	2	4	6	73,91%
2	Tengah (Midship)	35	1	0	1	97,14%
3	Belakang (Stern / Buritan)	17	0	2	2	88,23%
TO T A L	Keseluruhan Body Utama	75	3	6	9	88,00%

Berdasarkan data pada Tabel 4.2, area haluan (bow) menunjukkan persentase keberhasilan terendah yaitu 73,91%, dengan 2 joinan gagal pada PT dan 4 joinan gagal pada UT. Data pada Tabel 4.3 merupakan data sekunder yang diadaptasi dari hasil pemeriksaan NDT pada penelitian Ryadin dkk. (2020). Sumber asli menyajikan hasil kegagalan berdasarkan metode pemeriksaan, yaitu Penetrant Test (PT) dan Ultrasonic Test (UT), serta berdasarkan area lambung. Oleh karena penelitian ini membatasi CTQ pada crack dan porosity, data PT dan UT digunakan sebagai dasar pengelompokan analisis, namun jumlah masing-masing jenis cacat tidak dianggap sebagai jumlah crack dan porosity secara langsung karena sumber asli tidak menyajikan rekapitulasi cacat berdasarkan jenis tersebut.

4.5. Tahap Define (Pendefinisian Masalah)

Tahap Define bertujuan menetapkan masalah, ruang lingkup, CTQ, unit analisis, dan definisi defect sebelum perhitungan dilakukan. Berdasarkan Tabel 4.3, dari 75 joinan terdapat 9 joinan gagal sehingga first pass yield sebesar 88,00%. Kegagalan terbesar berada di haluan, yaitu 6 dari 23 joinan (26,09%).

Kondisi tersebut menunjukkan adanya variasi kualitas hasil pengelasan antararea. Penelitian kemudian memusatkan pengukuran Six Sigma pada dua CTQ, yaitu crack dan porosity, dengan tetap mempertahankan data dasar 75 joinan dan hasil PT/UT yang tersedia.

Permasalahan utama yang menjadi fokus penelitian adalah variasi kualitas

sambungan las pada lambung tugboat. Analisis diarahkan untuk mengukur kapabilitas proses, menentukan area dan kategori defect yang dominan, mengidentifikasi faktor penyebab potensial, serta menyusun usulan perbaikan dan pengendalian.

Critical to Quality (CTQ) merupakan karakteristik kualitas kritis yang menjadi acuan penilaian hasil pengelasan. Berdasarkan ruang lingkup penelitian, hanya dua CTQ yang digunakan, yaitu crack dan porosity. Crack dikategorikan sebagai cacat eksternal yang dideteksi dengan PT, sedangkan porosity dikategorikan sebagai cacat internal yang dideteksi dengan UT. Dengan demikian, setiap joinan mempunyai dua peluang cacat ($OP = 2$).

Tabel 4.3 Penetapan Critical To Quality (CTQ) Cacat Las

No	Kategori	Metode Deteksi	Standar Acuan
1	Eksternal	Penetrant Test (PT)	AWS D1.1/D1.1 M; BKI
2	Internal	Ultrasonic Test (UT)	AWS D1.1/D1.1 M; BKI

Penetapan opportunity (OP) dalam perhitungan Six Sigma didasarkan pada dua CTQ per satu joinan. Dengan 75 joinan, total opportunity adalah $75 \times 2 = 150$ opportunity. Angka 150 digunakan sebagai penyebut DPMO pada tahap Measure.

Data sumber hanya menyediakan rekapitulasi hasil NDT pada level metode pemeriksaan, yaitu PT gagal dan UT gagal, serta pembagian area bow, midship, dan stern. Data kuantitatif yang memisahkan jumlah indikasi crack dan porosity secara langsung tidak dicantumkan. Oleh sebab itu, untuk memenuhi pembatasan dua CTQ, kegagalan PT dipetakan sebagai crack dan kegagalan UT dipetakan sebagai porosity. Pemetaan tersebut harus dipahami sebagai klasifikasi analitis berbasis metode NDT, bukan sebagai hasil hitungan indikasi individual yang lebih rinci dari sumber. Dengan keterbatasan tersebut, analisis kuantitatif dilakukan pada level dua CTQ yang telah ditetapkan dan tiga area lambung. Tidak ada estimasi tambahan mengenai jumlah indikasi yang tidak tercantum pada sumber. Hal ini menjaga agar angka yang digunakan tidak melebihi informasi yang tersedia.

4.6. Tahap Measure (Pengukuran Kualitas Proses)

Tahap Measure mengubah hasil inspeksi menjadi ukuran kapabilitas proses. Unit (U) adalah satu joinan, defect (D) adalah satu joinan yang dinyatakan gagal, dan opportunity (OP) adalah dua CTQ per joinan. Dengan demikian, total opportunity pada 75 joinan adalah 150.

Tabel 4.4 Rekapitulasi Data Untuk Perhitungan DPMO

Area Lambung	Jml. Joinan (U)	Jml. Defect (D)	Opportunity/Unit (OP)	Total Opportunity (U×OP)
Haluan (Bow)	23	6	2	46
Midship (Tengah)	35	1	2	70
Buritan (Stern)	17	2	2	34
Total	75	9	2	150

DPMO dihitung menggunakan persamaan:

$$DPMO = [D / (U \times OP)] \times 1.000.000 \quad (5)$$

Untuk keseluruhan proses, D = 9, U = 75, dan OP = 2, sehingga:

$$\text{DPMO} = [9 / (75 \times 2)] \times 1.000.000 = [9 / 150] \times 1.000.000 = 60.000$$

Nilai DPMO total sebesar 60.000 berarti terdapat sekitar 60.000 defect per satu juta peluang berdasarkan dua CTQ yang digunakan. Perhitungan yang sama dilakukan pada setiap area untuk melihat variasi kapabilitas proses.

Tabel 4.5 Hasil Perhitungan DPMO Per Area Lambung

Area Lambung	D	U × OP	DPMO
Haluan (Bow)	6	46	130.434,78
Midship (Tengah)	1	70	14.285,71
Buritan (Stern)	2	34	58.823,53
Keseluruhan (Total)	9	150	60.000,00

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa area haluan memiliki DPMO tertinggi, yaitu 130.434,78, diikuti buritan 58.823,53 dan midship 14.285,71. Urutan area tetap sama dengan analisis berbasis jumlah defect karena jumlah joinan dan defect per area tidak berubah, sedangkan nilai DPMO meningkat akibat penyesuaian opportunity dari lima menjadi dua CTQ.

Langkah Perhitungan DPMO

Langkah perhitungan DPMO dilakukan dengan menentukan jumlah unit joinan, jumlah defect, dua opportunity per joinan, menghitung total opportunity ($U \times OP$), kemudian membagi defect dengan total opportunity dan mengalikan hasilnya dengan satu juta.

1. Menentukan jumlah opportunity yang mungkin terjadi. Pada penelitian ini, opportunity ditentukan dari kombinasi jumlah unit joinan dan jumlah kesempatan terjadinya cacat yang ditetapkan sesuai konteks pengendalian kualitas pada proses pengelasan.

2. Jumlah defect ditentukan dari hasil inspeksi NDT pada tiap area. Dalam klasifikasi dua CTQ, kegagalan PT dipetakan sebagai crack dan kegagalan UT dipetakan sebagai porosity.

3. Menghitung nilai DPMO menggunakan persamaan:

$$\text{DPMO} = [D / (U \times OP)] \times 1.000.000 \quad (6)$$

D = jumlah cacat, U = jumlah unit joinan, dan OP = jumlah opportunity per unit (sesuai penetapan pada definisi proses).

4. Melakukan perhitungan pada masing-masing area agar diperoleh gambaran kapabilitas proses dan kontribusi cacat per area.

Setelah DPMO diperoleh, yield dihitung dengan $\text{Yield} = 1 - \text{DPMO}/1.000.000$. Nilai yield kemudian dikonversi ke nilai Z pada distribusi normal baku dan ditambahkan pergeseran proses 1,5 sigma, sesuai pendekatan Six Sigma jangka panjang.

Dengan DPMO total 60.000, yield proses keseluruhan adalah 94,00%. Konversi menghasilkan sigma level sekitar 3,05.

Nilai yield keseluruhan = $1 - 60.000/1.000.000 = 0,9400$ atau 94,00%. Dengan pendekatan Sigma level = $\Phi^{-1}(\text{Yield}) + 1,5$, diperoleh sigma level total sekitar 3,05.

Six Sigma Conversion Table								
Yield	DPMO	Sigma	Yield	DPMO	Sigma	Yield	DPMO	Sigma
6.6%	934,000	0	69.2%	308,000	2	99.4%	6,210	4
8.0%	920,000	0.1	72.6%	274,000	2.1	99.5%	4,660	4.1
10.0%	900,000	0.2	75.8%	242,000	2.2	99.7%	3,460	4.2
12.0%	880,000	0.3	78.8%	212,000	2.3	99.75%	2,550	4.3
14.0%	860,000	0.4	81.6%	184,000	2.4	99.81%	1,860	4.4
16.0%	840,000	0.5	84.2%	158,000	2.5	99.87%	1,350	4.5
19.0%	810,000	0.6	86.5%	135,000	2.6	99.90%	960	4.6
22.0%	780,000	0.7	88.5%	115,000	2.7	99.93%	680	4.7
25.0%	750,000	0.8	90.3%	96,800	2.8	99.95%	480	4.8
28.0%	720,000	0.9	91.9%	80,800	2.9	99.97%	330	4.9
31.0%	690,000	1	93.3%	66,800	3	99.977%	230	5
35.0%	650,000	1.1	94.5%	54,800	3.1	99.985%	150	5.1
39.0%	610,000	1.2	95.5%	44,600	3.2	99.990%	100	5.2
43.0%	570,000	1.3	96.4%	35,900	3.3	99.993%	70	5.3
46.0%	540,000	1.4	97.1%	28,700	3.4	99.996%	40	5.4
50.0%	500,000	1.5	97.7%	22,700	3.5	99.997%	30	5.5
54.0%	460,000	1.6	98.2%	17,800	3.6	99.9980%	20	5.6
58.0%	420,000	1.7	98.6%	13,900	3.7	99.9990%	10	5.7
61.8%	382,000	1.8	98.9%	10,700	3.8	99.9992%	8	5.8
65.6%	344,000	1.9	99.2%	8,190	3.9	99.9995%	5	5.9
						99.99966%	3.4	6

Gambar 4.1 Gambar Tabel Six Sigma

(sumber : Araujo,Benjamin "Six Sigma Conversion Table" <URL :<https://www.studocu.com/es-mx/document/universidad-del-valle-de-mexico/cadena-de-suministros/6-sigma-conversion-table/96724519?sid=b71d2328-4785-4974-8c16-79e67c532fdb1790145147>>)

Tabel 4.6 Hasil Perhitungan Sigma Level

Area Lambung	DPMO	Yield (%)	Sigma Level
Haluan (Bow)	130.434,78	86,96	2,62
Buritan (Stern)	58.823,53	94,12	3,06
Midship (Tengah)	14.285,71	98,57	3,69
Keseluruhan (Total)	60.000,00	94,00	3,05

Dengan dua CTQ, sigma level proses keseluruhan menjadi sekitar 3,05 σ . Nilai per area adalah sekitar 2,62 σ untuk haluan, 3,69 σ untuk midship, dan 3,06 σ untuk buritan. Hasil ini harus dibaca bersama asumsi OP = 2 dan keterbatasan bahwa sumber hanya menyediakan data gagal/lulus pada level PT/UT.

Perubahan dari dua CTQ pada pengolahan sebelumnya menjadi dua CTQ meningkatkan nilai DPMO karena penyebut opportunity menjadi lebih kecil. Hal ini bukan perubahan jumlah defect aktual; jumlah defect tetap 9 dari 75 joinan. First pass yield juga tetap 88,00% karena dihitung langsung dari jumlah joinan lulus dan gagal.

Analisis sensitivitas pada sumber menunjukkan bahwa hasil Six Sigma memang bergantung pada definisi opportunity. Dalam revisi ini, OP = 2 dipilih secara konsisten dengan dua CTQ penelitian, sehingga seluruh DPMO dan sigma level pada

Bab IV dihitung ulang menggunakan 150 total opportunity.

Sebagai keterbatasan tambahan, jumlah indikasi individual dalam satu joinan tidak tersedia pada sumber. Karena satu joinan gagal dihitung sebagai satu defect, nilai DPMO dapat lebih rendah daripada kondisi sebenarnya apabila satu joinan memuat lebih dari satu indikasi cacat.

DPMO–Sigma yang dirujuk dari literatur/metode Six Sigma.

Hasil konversi dilaporkan sebagai current sigma level yang merepresentasikan tingkat kapabilitas proses berdasarkan data defect yang terukur.

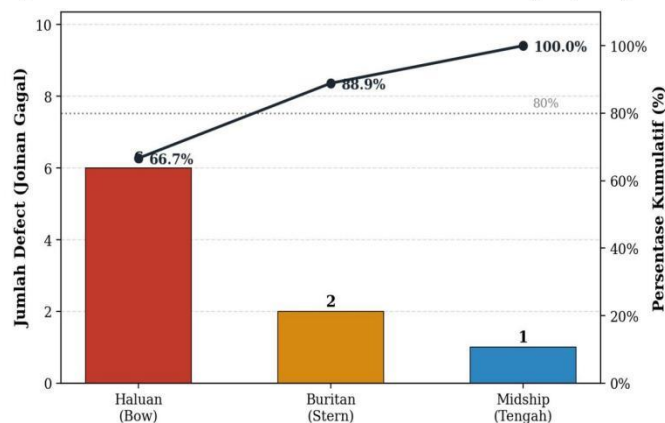
Sigma level total sekitar $3,05\sigma$ menunjukkan kapabilitas proses pada rentang 3 sampai 4 sigma dengan pendekatan perhitungan yang digunakan. Area haluan memiliki nilai terendah sekitar $2,62\sigma$, sedangkan midship tertinggi sekitar $3,69\sigma$. Perbedaan antararea menjadi dasar untuk memusatkan perhatian pada kondisi proses di haluan.

Perbedaan tersebut dapat digunakan sebagai dasar analisis faktor penyebab, tetapi tidak boleh dianggap sebagai bukti bahwa satu faktor tunggal menjadi penyebab. Karena data per jenis indikasi tidak tersedia, analisis Analyze menggunakan area dan kategori metode NDT sebagai dasar yang dapat ditelusuri.

4.7. Tahap Analyze (Analisis Penyebab Cacat)

Diagram Pareto digunakan untuk mengurutkan kontribusi defect berdasarkan area. Berdasarkan Tabel 4.3, haluan menyumbang 6 dari 9 defect atau 66,67%, buritan 2 defect atau 22,22%, dan midship 1 defect atau 11,11%.

Diagram Pareto Distribusi Cacat Las Berdasarkan Area Lambung Kapal Tugboat



Gambar 4.1 Diagram Pareto Distribusi Kegagalan Hasil Inspeksi Berdasarkan Area Lambung Kapal Tugboat

(Sumber : Data Ryadin dkk. (2020), diolah oleh penulis.)

Haluan tetap menjadi area dengan kontribusi defect terbesar. Jika haluan dan buritan digabungkan, keduanya menyumbang 88,89% dari total defect. Temuan ini digunakan sebagai dasar penentuan fokus Improve.

Selain area, defect dikelompokkan berdasarkan dua CTQ dan metode NDT. Kegagalan UT dipetakan sebagai porosity dan kegagalan PT dipetakan sebagai crack. Rekapitulasi disajikan pada Tabel 4.7

Tabel 4.7 Distribusi Defect Berdasarkan Hasil Metode Deteksi

Metode Deteksi	Jumlah Defect	Persentase
Ultrasonic Test (UT)	6	66,67%
Penetrant Test (PT)	3	33,33%
Total	9	100,00%

Data pada Tabel 4.7 menunjukkan 6 defect berdasarkan kegagalan UT (66,67%) dan 3 defect berdasarkan kegagalan PT (33,33%). Angka ini merupakan hasil pemetaan analitis dari kategori NDT yang tersedia; sumber tidak memberikan rincian indikasi individual per jenis cacat.

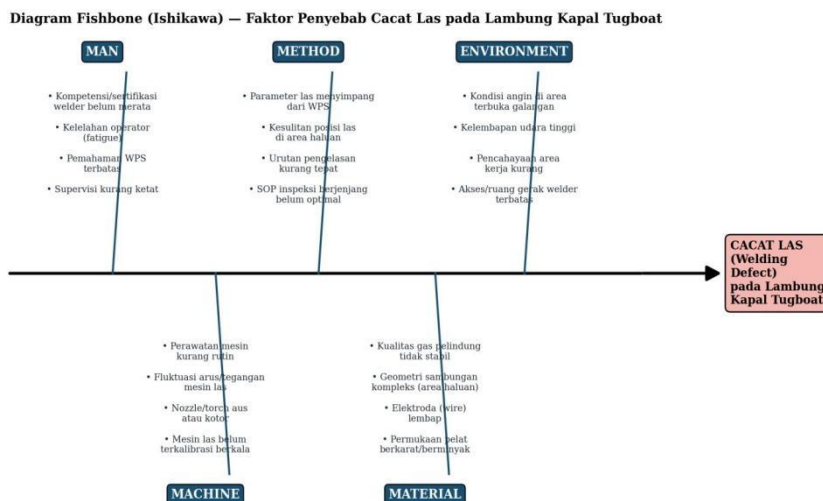
Dengan demikian, analisis tidak mengklaim adanya hitungan indikasi porosity atau crack yang lebih rinci daripada data sumber. Untuk kepentingan penelitian ini, kategori UT digunakan sebagai representasi porosity dan kategori PT sebagai representasi crack agar dua CTQ dapat dianalisis secara konsisten.

Berdasarkan hasil analisis Pareto distribusi defect antar area, kontribusi defect terbesar ditunjukkan oleh area bow. Temuan ini memberikan dasar penetapan prioritas pada tahap Improve, karena perbaikan yang difokuskan pada area dengan kontribusi defect tertinggi berpotensi memberikan dampak penurunan cacat yang lebih besar dibanding distribusi perbaikan yang menyebar merata.

Selanjutnya, temuan Pareto ini selaras dengan penggunaan fishbone pada tahap Analyze untuk mengidentifikasi akar penyebab (root causes) yang paling relevan terhadap area dominan defect, sehingga rencana tindakan pada tahap Improve dapat diarahkan secara lebih terukur dan rasional.

4.8. Analisis Diagram Fishbone (Sebab-Akibat)

Setelah mengetahui area dan kategori cacat yang paling dominan, tahap selanjutnya adalah mengidentifikasi faktor penyebab terjadinya cacat las menggunakan diagram fishbone (Ishikawa). Diagram ini digunakan untuk menguraikan faktor penyebab suatu permasalahan ke dalam beberapa kategori utama, yaitu Man (manusia), Method (metode), Machine (mesin), Material, dan Environment (lingkungan), sehingga akar penyebab dapat diidentifikasi secara sistematis (Ishikawa, 1976). Hasil analisis fishbone terhadap potensi cacat las pada lambung kapal tugboat disajikan pada Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Diagram *Fishbone* (Ishikawa) Faktor Penyebab Cacat Las pada Lambung Kapal *Tugboat*

Berdasarkan diagram fishbone pada Gambar 4.2, dapat diuraikan penjelasan masing-masing faktor penyebab sebagai berikut:

Faktor Man, meliputi tingkat kompetensi dan sertifikasi welder yang belum merata, kelelahan operator (fatigue) akibat intensitas pekerjaan yang tinggi, keterbatasan pemahaman terhadap Welding Procedure Specification (WPS), serta pengawasan (supervisi) di lapangan yang belum berjalan secara ketat pada setiap tahapan pengelasan.

Faktor Method, meliputi penerapan parameter pengelasan yang menyimpang dari WPS, tingkat kesulitan posisi pengelasan yang lebih tinggi pada area haluan akibat geometri pelat yang kompleks, urutan pengelasan (welding sequence) yang kurang tepat sehingga meningkatkan tegangan sisa (residual stress), serta belum optimalnya SOP inspeksi berjenjang.

Faktor Machine, meliputi mesin las yang belum terkalibrasi secara berkala, kondisi nozzle atau torch yang aus maupun kotor, fluktuasi arus dan tegangan mesin las selama proses pengelasan berlangsung, serta jadwal perawatan (preventive maintenance) mesin yang belum berjalan rutin.

Faktor Material, meliputi kondisi permukaan pelat baja yang berkarat, kotor, atau terkontaminasi minyak, kelembapan pada elektroda (wire) FCAW, geometri sambungan yang kompleks khususnya pada area haluan, serta kestabilan kualitas gas pelindung (shielding gas) yang digunakan.

Faktor Environment, meliputi kondisi angin pada area kerja terbuka di galangan yang dapat mengganggu perlindungan gas las, tingkat kelembapan udara yang tinggi, pencahayaan area kerja yang kurang memadai, serta keterbatasan ruang gerak (akses) welder pada bagian haluan kapal yang memiliki geometri sempit.

Berdasarkan kelima faktor tersebut, faktor Method dan Man dipertahankan sebagai faktor potensial yang paling relevan untuk area haluan, terutama terkait kompleksitas geometri sambungan, urutan pengelasan, kompetensi welder, dan pengawasan. Faktor Machine dan Material menjadi faktor pendukung yang relevan terhadap porosity, sedangkan Environment dapat memengaruhi stabilitas proses dan perlindungan gas. Interpretasi ini merupakan analisis penyebab potensial berdasarkan fishbone dan bukan pembuktian kausal eksperimental.

Interpretasi Defect Crack dan Porosity

Dalam klasifikasi penelitian ini, porosity direpresentasikan oleh kegagalan UT dan crack direpresentasikan oleh kegagalan PT. Porosity menjadi kelompok dengan kontribusi terbesar, yaitu 66,67%, sedangkan crack 33,33%. Karena sumber tidak menyediakan rincian indikasi individual, hasil tersebut dipakai sebagai distribusi kategori analitis untuk kebutuhan DMAIC.

4.9. Tahap Improve (Usulan Perbaikan)

Usulan perbaikan pada tahap Improve disusun melalui pemetaan temuan dari tahap Analyze ke faktor penyebab potensial menggunakan kerangka 5M+1E, sebagai berikut:

1. Prioritas area dominan defect (Pareto) diarahkan sebagai fokus utama tindakan pengendalian agar sumber utama defect dapat ditekan terlebih dahulu.

2. Dominasi porosity pada kategori UT digunakan sebagai pertimbangan untuk memperkuat pengendalian stabilitas proses, kebersihan material, kondisi consumable,

dan perlindungan gas. Crack pada kategori PT digunakan sebagai pertimbangan untuk memperkuat pengendalian parameter, urutan pengelasan, tegangan sisa, serta inspeksi permukaan.

3. Konfirmasi akar penyebab melalui fishbone digunakan untuk merumuskan tindakan spesifik pada faktor terkait (misalnya peningkatan standardisasi metode kerja, pengendalian parameter, penguatan kompetensi operator, serta pengendalian kondisi material dan peralatan).

Tabel 4.8 Usulan Perbaikan Berdasarkan Faktor Penyebab Dominan

Faktor	Akar Masalah	Usulan Perbaikan
Man	Kompetensi welder belum merata; supervisi kurang ketat	Program pelatihan dan sertifikasi ulang welder mengacu AWS D1.1/BKI; penambahan tenaga QC pengawas per shift; pengaturan rotasi kerja untuk mengurangi fatigue
Method	Parameter menyimpang dari WPS; kesulitan posisi las di area haluan	Audit kepatuhan WPS secara berkala; uji coba pengelasan (mock-up trial) untuk geometri sambungan kompleks; optimasi urutan pengelasan (welding sequence) untuk mengurangi tegangan sisa
Machine	Mesin belum terkalibrasi rutin; nozzle/torch aus	Penjadwalan kalibrasi mesin las secara berkala; program preventive maintenance mingguan; penggantian consumable (nozzle, contact tip) sesuai jam pakai
Material	Permukaan pelat kotor/berkarat; elektroda lembap	Inspeksi penerimaan material (incoming inspection) dan mill certificate; penyimpanan elektroda pada oven pengering sesuai spesifikasi produsen; pembersihan permukaan pelat (grinding/degreasing) sebelum pengelasan
Environment	Paparan angin area terbuka; akses welder terbatas di haluan	Pemasangan tenda/wind shield pada area pengelasan terbuka; penambahan pencahayaan kerja; penyediaan platform/scaffolding ergonomis untuk akses area haluan

Usulan perbaikan pada Tabel 4.9 diprioritaskan pada faktor Method dan Man untuk area haluan, dengan dukungan pengendalian Machine, Material, dan Environment. Tindakan perbaikan diarahkan untuk menurunkan peluang crack dan porosity tanpa mengubah jumlah defect historis yang menjadi dasar perhitungan.

4.10. Tahap Control (Pengendalian Kualitas)

Tahap Control bertujuan menjaga hasil perbaikan agar konsisten. Control plan pada Tabel 4.9 mempertahankan pengendalian WPS, mesin, NDT, kompetensi welder, material/elektroda, dan proporsi defect per area.

Tabel 4.9 Rencana Pengendalian (*Control Plan*) Proses Pengelasan

Parameter Dikendalikan	Metode Kontrol	Frekuensi	Target/Standar
Kepatuhan terhadap WPS	Audit dokumen & observasi lapangan	Setiap shift	100% sesuai WPS
Kalibrasi mesin las	Kalibrasi & pengecekan berkala	Setiap bulan	Sesuai spesifikasi alat
Kualitas hasil las (NDT)	Penetrant Test (PT) & Ultrasonic Test (UT)	Setiap joinan kritis	Sesuai kriteria AWS D1.1
Kompetensi welder	Evaluasi & sertifikasi ulang	Setiap 6-12 bulan	Sertifikat welder aktif
Kondisi material & elektroda	Inspeksi penerimaan & penyimpanan	Setiap penerimaan batch	Sesuai mill certificate & SOP penyimpanan
Proporsi cacat per area (DPMO/sigma)	Peta kendali p (p-chart)	Berkala/periodik	Dalam batas kendali (UCL-LCL)
Kompetensi welder	Evaluasi & sertifikasi ulang	Setiap 6-12 bulan	Sertifikat welder aktif
Kondisi material & elektroda	Inspeksi penerimaan & penyimpanan	Setiap penerimaan batch	Sesuai mill certificate & SOP penyimpanan
Proporsi cacat per area (DPMO/sigma)	Peta kendali p (p-chart)	Berkala/periodik	Dalam batas kendali (UCL-LCL)

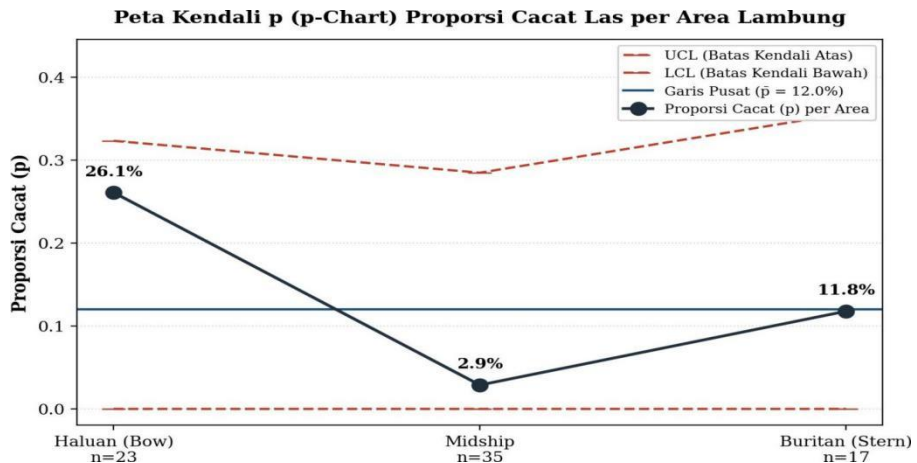
4.11. Penetapan Peta Kendali (*Control Chart*)

Peta kendali p (p-chart) digunakan untuk memantau proporsi joinan gagal pada setiap area. Nilai p dihitung dari jumlah joinan gagal dibagi jumlah joinan, sehingga analisis p-chart tidak berubah ketika OP diubah dari lima menjadi dua CTQ. Garis pusat tetap 0,1200 dan batas kendali dihitung berdasarkan ukuran sampel tiap area.

$$\text{UCL, LCL} = pE \pm 3\sqrt{pE(1-pE)/n} \quad (4)$$

Peta kendali p digunakan untuk mengetahui kestabilan proporsi sambungan las yang mengalami ketidaksesuaian berdasarkan hasil pemeriksaan. Peta kendali ini digunakan karena karakteristik data penelitian berupa data atribut, yaitu sambungan yang dinyatakan memenuhi atau tidak memenuhi kriteria hasil pemeriksaan. Perhitungan p-chart dilakukan berdasarkan jumlah sambungan yang tidak memenuhi kriteria pemeriksaan dibandingkan dengan jumlah sambungan yang diperiksa pada masing-masing area lambung.

Hasil penerapan peta kendali p terhadap proporsi cacat las pada masing-masing area lambung disajikan pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Peta Kendali p (p-Chart) Proporsi Cacat Las per Area Lambung Kapal Tugboat

(Sumber : Data Ryadin dkk. (2020), diolah oleh penulis.)

P-chart digunakan untuk data atribut (joinan gagal/tidak gagal), dengan tiga subgroup berdasarkan area: Bow, Midship, dan Stern. File Anda juga menetapkan garis pusat $CL=0,12$ dan $CL = 0\{, \}1200$ dan batas kendali berdasarkan ukuran sampel masing-masing area. Berdasarkan Gambar 4.3, seluruh titik pengamatan pada area Bow, Midship, dan Stern masih berada dalam batas kendali p-chart. Hal tersebut menunjukkan bahwa berdasarkan data yang dianalisis tidak terdapat titik pengamatan yang melewati batas kendali statistik. Meskipun demikian, area Bow memiliki proporsi cacat tertinggi sebesar 26,09%, sedangkan Midship sebesar 2,86% dan Stern sebesar 11,76%. Dengan demikian, area Bow menjadi area yang memiliki proporsi kegagalan paling tinggi dan perlu mendapatkan perhatian dalam upaya pengendalian kualitas, meskipun secara statistik titik tersebut masih berada dalam batas kendali.

Tabel 4.10 Angka dan Interpretasi Peta Kendali P-Chart

Area	n	Defect	Proporsi
Bow	23	6	0,2609
Midship	35	1	0,0286
Stern	17	2	0,1176
Total	75	9	0,1200

Dengan $CL=0,12$, $UCL=0,3233$, $LCL=0$, perhitungan batas kendalinya menghasilkan kira-kira:

1. Bow: $UCL = 0,3233$; $LCL = 0$
2. Midship: $UCL = 0,2848$; $LCL = 0$
3. Stern: $UCL = 0,3564$; $LCL = 0$

Tabel 4.11 Rekapitulasi Hasil Pembahasan Penelitian

(sumber : Data Ryadin dkk. (2020), diolah oleh penulis.)

Tahap DMAIC	Hasil Analisis	Temuan Utama
-------------	----------------	--------------

Define	Identifikasi CTQ	Fokus cacat las terdiri atas crack dan porosity
Measure	Data 75 joinan, 9 joinan gagal	Proporsi kegagalan keseluruhan sebesar 12,00%
Measure	Perhitungan DPMO	DPMO keseluruhan sebesar 60.000
Measure	Sigma level	Tingkat sigma ditentukan berdasarkan nilai DPMO
Analyze	Diagram Pareto	Area Bow/Haluan memiliki jumlah kegagalan tertinggi, yaitu 6 dari 9 kegagalan
Analyze	Fishbone	Faktor potensial meliputi Man, Method, Machine, Material, dan Environment
Improve	Usulan perbaikan	Penguatan pengawasan WPS, kompetensi welder, persiapan material, dan pemeriksaan proses
Control	p-chart	Seluruh titik pengamatan berada dalam batas kendali statistik; Bow memiliki proporsi cacat tertinggi sebesar 26,09%

Seluruh titik pengamatan masih berada dalam batas kendali statistik. Meskipun demikian, area Bow memiliki proporsi cacat tertinggi, yaitu 26,09%, dibandingkan dengan garis pusat sebesar 12,00%, sehingga area tersebut perlu mendapatkan perhatian dalam pengendalian kualitas. Penerapan peta kendali secara periodik pada setiap batch produksi diharapkan dapat membantu tim quality control dalam mendeteksi penyimpangan proses secara dini (early warning), sehingga tindakan korektif dapat dilakukan sebelum jumlah cacat meningkat secara signifikan dan mengganggu jadwal maupun biaya produksi kapal.

4.12. Rekapitulasi Hasil Pembahasan

Berdasarkan seluruh tahapan Define, Measure, Analyze, Improve, dan Control (DMAIC), hasil utama penelitian direkapitulasi pada Tabel 4.12 dengan menggunakan dua CTQ, yaitu *crack* dan *porosity*.

Tabel 4.12 Rekapitulasi Hasil Pembahasan Tahapan DMAIC

Tahapan DMAIC	Hasil Utama
Define	2 CTQ ditetapkan (crack dan porosity); total opportunity 150
Measure	DPMO total = 60.000; Sigma level total $\approx 3,05$ (Bow $\approx 2,62$; Stern $\approx 3,06$; Midship $\approx 3,69$)
Analyze	Area haluan dominan (66,67% defect); porosity/UT dominan (66,67%); faktor potensial utama Method & Man
Improve	Usulan perbaikan berbasis Man, Method, Machine, Material, dan Environment untuk menurunkan crack dan porosity
Control	Control plan 6 parameter kunci; p-chart tetap memakai proporsi joinan gagal dan menunjukkan seluruh area dalam batas kendali

Secara keseluruhan, proses pengelasan pada data ini menghasilkan 9 joinan gagal dari 75 joinan, dengan 150 total opportunity berdasarkan dua CTQ. DPMO total menjadi 60.000 dan sigma level sekitar $3,05\sigma$. Haluan tetap menyumbang defect terbesar, sedangkan pengendalian Method, Man, Machine, Material, dan Environment digunakan sebagai dasar usulan perbaikan dan control plan.