

e-ISSN: 2502-1516

Case Studies

Dikirim: 10 April, 2026  
Direvisi: 26 Mei, 2026  
Diterima: 3 Juni, 2026  
Tersedia Online: Juni 2026

## **PENINGKATAN KUALITAS *FLANGE* MANAGEMENT SYSTEM PIPING MENGGUNAKAN PENDEKATAN DMAIC-FMEA UNTUK MENURUNKAN TINGKAT *REWORK* DI PERUSAHAAN INDUSTRI MINYAK DAN GAS**

### **Kata Kunci:**

DMAIC; FMEA; manajemen *flange*; industri minyak dan gas; *rework*

### **Penulis korespondensi:**

e-mail:  
maretsitumorang17@gmail.com

Maret Situmorang\*, Hery Irwan

1. Departemen Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Riau Kepulauan, Jalan Letjend Suprpto, Bukit Tempayan, Kepulauan Riau, Indonesia 29425

### **Abstrak**

Industri minyak dan gas dihadapkan pada tantangan kualitas pada sistem manajemen *flange* piping, di mana tingkat *rework* yang tinggi menyebabkan pemborosan waktu dan biaya operasional yang signifikan. Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi penyebab utama *rework* pada proses pemasangan *flange*, menganalisis mode kegagalan, serta memberikan rekomendasi perbaikan untuk meningkatkan kualitas proses. Pendekatan yang digunakan adalah DMAIC (Define, Measure, Analyze, Improve, Control) yang diintegrasikan dengan Failure Mode and Effect Analysis (FMEA). Tahap Define mengidentifikasi problem statement dan CTQ; tahap Measure mengukur baseline kapabilitas proses dengan nilai Sigma 2,87; tahap Analyze mengidentifikasi tiga mode kegagalan utama: misalignment *flange* (RPN=392), torsi baut tidak sesuai (RPN=336), dan gasket tidak terpasang benar (RPN=280). Tahap Improve merancang poka-yoke berupa checklist digital dan prosedur torque wrench terstandarisasi. Setelah implementasi, tingkat *rework* turun dari 18,6% menjadi 3,9% dan Sigma meningkat menjadi 3,87. Integrasi DMAIC-FMEA terbukti efektif menurunkan defect pada proses *flange* management di industri minyak dan gas.

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 minyak dan gas bumi merupakan sektor strategis yang memerlukan standar keselamatan dan kualitas tertinggi. Sistem perpipaan merupakan tulang punggung infrastruktur pemrosesan hidrokarbon, di mana integritasnya berdampak langsung pada keandalan operasional dan keselamatan kerja (C. Wang & Wang, 2024). Berdasarkan laporan dari Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration (PHMSA), kegagalan sistem perpipaan menyebabkan ratusan insiden setiap tahunnya yang berdampak pada kerugian ekonomi, pencemaran lingkungan, serta risiko keselamatan pekerja (PHMSA, 2023). Penelitian terdahulu juga menunjukkan bahwa kebocoran pada sistem perpipaan minyak dan gas dapat menimbulkan gangguan operasional serta meningkatkan risiko kecelakaan industri sehingga diperlukan pengawasan integritas perpipaan yang andal (Jahanian et al., 2021). Kegagalan pada sambungan *flange*, meskipun bersifat minor, dapat menimbulkan konsekuensi serius mulai dari terhentinya operasi, pencemaran lingkungan, hingga risiko kebakaran dan ledakan.

*Flange* merupakan komponen mekanis berbentuk cakram berlubang yang digunakan untuk menyambungkan segmen pipa, valve, atau peralatan proses melalui mekanisme baut-mur dengan gasket sebagai seal (Hutagalung et al., 2025). Standar ASME B16.5 mengatur spesifikasi dimensional, material, dan rating tekanan *flange* secara ketat (Ritonga et al., 2025). Proses *Flange Management System* (FMS) mencakup inspeksi, assembly, torquing, testing, hingga dokumentasi setiap titik sambungan. Pada perusahaan objek penelitian, sebuah perusahaan fabrikasi minyak dan gas di Batam, tingkat *rework* pada proses FMS mencapai 18,6% dari 860 titik *flange* selama Januari–Juni 2025, jauh

melampaui target perusahaan sebesar 5%. Kondisi ini menyebabkan pemborosan biaya operasional dan keterlambatan jadwal proyek. Tingginya tingkat *rework* juga berdampak pada peningkatan penggunaan material, jam kerja tambahan, serta penurunan produktivitas proyek yang berpotensi mengganggu ketepatan waktu penyelesaian pekerjaan dan menambah biaya kualitas (*cost of quality*) perusahaan. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa aktivitas *rework* pada industri manufaktur dan konstruksi dapat menyebabkan peningkatan biaya proyek dan penurunan efisiensi operasional sehingga diperlukan pengendalian kualitas yang efektif untuk meminimalkan terjadinya pekerjaan ulang (Hwang et al., 2017). Oleh karena itu, diperlukan upaya perbaikan berkelanjutan untuk mengurangi tingkat *rework* pada proses FMS guna meningkatkan efisiensi operasional dan kualitas pekerjaan.

Efektivitas pendekatan Six Sigma dan FMEA telah dibuktikan dalam berbagai konteks industri melalui sejumlah penelitian terdahulu. Analisis FMEA yang diterapkan secara sistematis pada peralatan rantai pengolahan minyak menunjukkan bahwa pendekatan tiga tahap meliputi analisis komponen, struktural, dan fungsional mampu menghasilkan penilaian risiko yang objektif melalui perhitungan *Priority Number of Risk* ( $PNR = S \times O \times D$ ) sebagai dasar prioritisasi tindakan perbaikan (Petrovskiy et al., 2015). Pada sektor manufaktur transportasi, (Daniyan et al., 2022) mengimplementasikan *Lean Six Sigma* (LSS) pada proses perakitan bogie kereta api menggunakan alat-alat Lean seperti Kaizen dan *Value Stream Mapping*, dengan hasil peningkatan *Process Cycle Efficiency* (PCE) sebesar 46,8% dan penurunan *lead-time* sebesar 27,9%, yang membuktikan efektivitas LSS dalam meningkatkan efisiensi operasional secara signifikan.

Dalam konteks industri Indonesia, kajian literatur sistematis terhadap 52 artikel implementasi Six Sigma–DMAIC periode 2016–2020 mengungkapkan rata-rata nilai sigma sebesar 3,68, sekaligus mengidentifikasi bahwa Six Sigma memberikan manfaat nyata pada peningkatan kualitas, produktivitas, dan pengurangan biaya, meskipun penerapannya pada industri kecil dan menengah masih menghadapi tantangan keterbatasan sumber daya (Widjajanto & Purba, 2021). Sementara itu, L. Wang et al. (2021) mengembangkan pendekatan FMEA yang dimodifikasi menggunakan metode *fuzzy TOPSIS* berbasis *Fuzzy Evidence Reasoning* (FER) untuk memprioritaskan risiko kegagalan pada sistem pengolahan minyak dan gas di *Floating Production Storage and Offloading* (FPSO), dengan mempertimbangkan bobot subjektif pakar dan bobot objektif faktor O, S, dan D secara komprehensif sehingga menghasilkan prioritas risiko yang lebih akurat. Integrasi Six Sigma–DMAIC dan FMEA pada proses produksi koran di industri percetakan Indonesia terbukti efektif dalam mengidentifikasi lima jenis cacat utama dan menentukan prioritas perbaikan pada mode kegagalan paling kritis, dengan level sigma awal yang terukur sebesar 4,04 (Lutfianto & Prabowo, 2022).

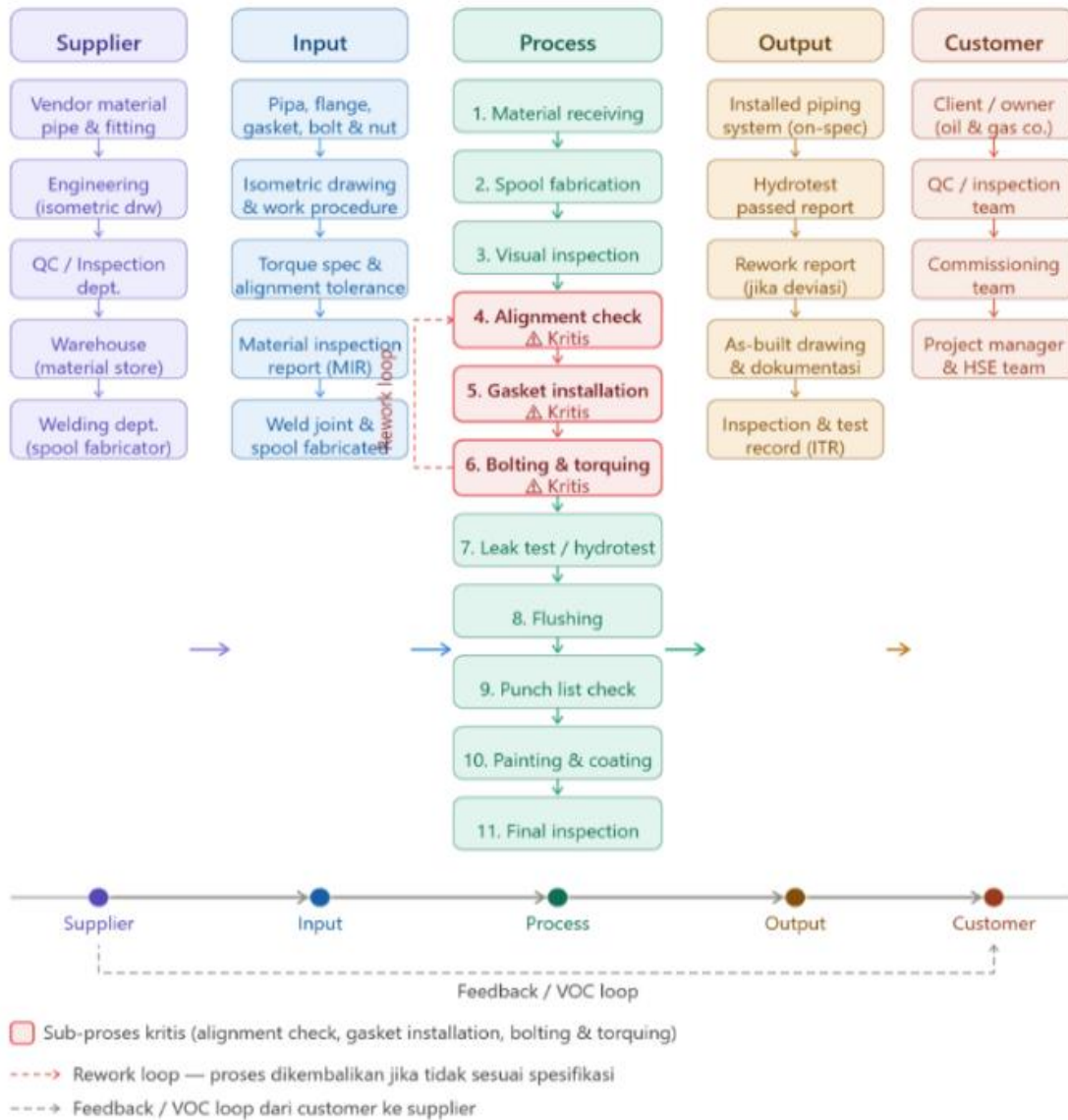
Meskipun demikian, penelitian-penelitian tersebut belum ada yang secara khusus mengintegrasikan DMAIC–FMEA secara komprehensif pada proses *Fabrication & Mechanical Setting* (FMS) *piping* di industri *oil and gas* Indonesia. Proses FMS *piping* memiliki karakteristik teknis yang unik dengan tingkat risiko *rework* yang tinggi, sehingga memerlukan pendekatan analisis yang lebih spesifik dibandingkan industri manufaktur umum. Oleh karena itu, ujian penelitian ini adalah mengisi kesenjangan tersebut melalui integrasi DMAIC–FMEA, dengan tujuan spesifik: (1) mengidentifikasi penyebab utama *rework*; (2) mengukur *baseline* kapabilitas proses; (3) menganalisis mode kegagalan kritis; (4) merancang solusi perbaikan terstruktur; dan (5) menetapkan mekanisme kontrol berkelanjutan.

## 2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode penelitian deskriptif-analitik yang berfokus pada peningkatan kualitas proses dalam FMS *piping* di lingkungan industri *oil and gas*. Pendekatan yang digunakan adalah kerangka DMAIC (*Define, Measure, Analyze, Improve, Control*) yang merupakan bagian dari metodologi *Six Sigma*, dikombinasikan dengan alat analisis *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA). Pemilihan metode DMAIC didasarkan pada kemampuannya dalam mengidentifikasi akar permasalahan secara sistematis dan terstruktur, sehingga tepat digunakan untuk menurunkan tingkat *rework* pada proses pemasangan dan inspeksi *flange* di lapangan. Penelitian dilakukan secara *longitudinal* dengan pengamatan langsung terhadap proses kerja di unit *piping* selama periode tertentu guna memperoleh data yang representatif dan akurat.

Penelitian dilaksanakan di perusahaan fabrikasi minyak dan gas di Batam, Kepulauan Riau pada Januari–Desember 2025, yang memiliki sistem jaringan perpipaan bertekanan tinggi dengan komponen *flange* sebagai elemen kritis dalam menjaga integritas sistem. Objek penelitian difokuskan pada proses FMS yang mencakup aktivitas pemasangan (*assembly*), pengencangan baut (*bolting & torquing*), inspeksi, tes kebocoran (*hydro test*), dan proses dokumentasi *flange*. Pemilihan lokasi penelitian didasarkan pada pertimbangan bahwa tingkat *rework* pada proses FMS di perusahaan tersebut melebihi batas toleransi yang telah ditetapkan.

Pengumpulan data dalam penelitian ini dilakukan melalui beberapa teknik yang saling melengkapi. Pertama, observasi langsung (*direct observation*) dilakukan terhadap proses kerja di lapangan untuk mengidentifikasi potensi kegagalan dan ketidaksesuaian dalam pelaksanaan FMS. Kedua, studi dokumen dilakukan dengan menelaah laporan *rework*, *work order*, *inspection report*, dan *nonconformance report* (NCR) yang tersedia di perusahaan selama periode dua belas bulan terakhir. Ketiga, wawancara mendalam (*in-depth interview*) dilaksanakan dengan para *inspector*, *supervisor*, dan *engineer* yang terlibat langsung dalam proses FMS guna menggali informasi kualitatif terkait akar penyebab terjadinya *rework*. Keempat, pengisian formulir FMEA dilakukan bersama tim ahli melalui sesi *Focus Group Discussion* (FGD) untuk menilai tingkat keparahan (*severity*), kemungkinan kejadian (*occurrence*), dan kemampuan deteksi (*detectability*) dari setiap mode kegagalan yang teridentifikasi.



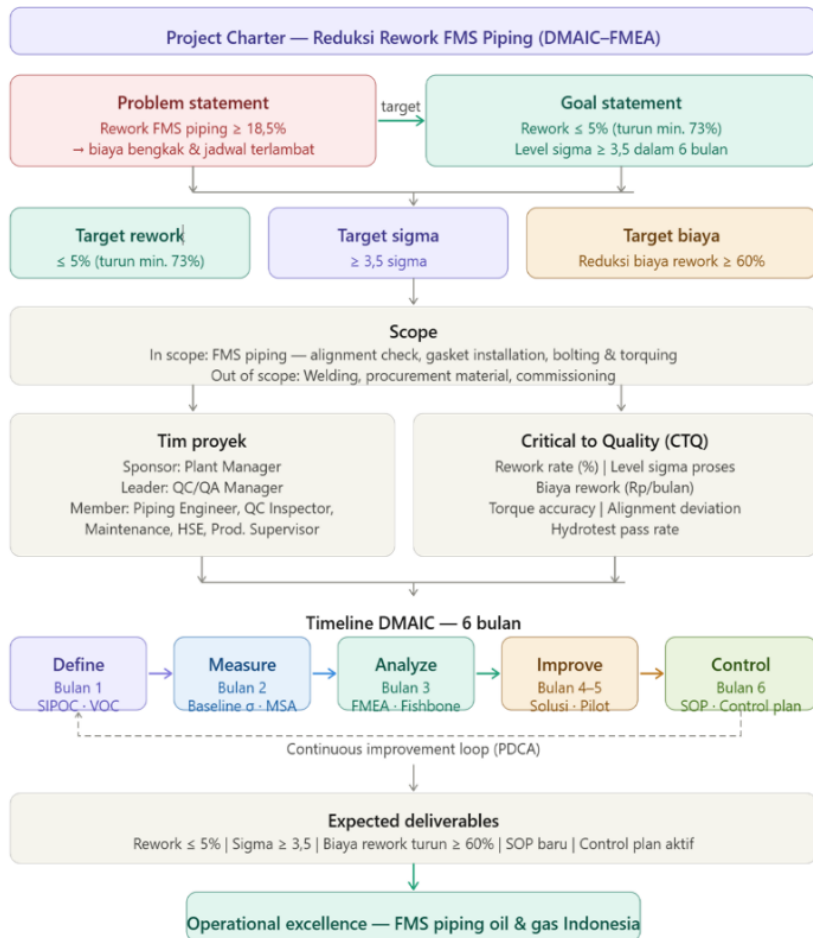
Gambar 1. Diagram SIPOC

Analisis data dalam penelitian ini dilakukan secara bertahap mengikuti alur tahapan DMAIC. Pada tahap *Define*, digunakan diagram SIPOC (*Supplier, Input, Process, Output, Customer*), *project charter* untuk mendefinisikan ruang lingkup masalah *rework* secara komprehensif, dan *Voice of Customer* (VoC) untuk mengidentifikasi kebutuhan kritis. Pada tahap *Measure*, data dikumpulkan dan diolah menggunakan peta kendali (*control chart*) dan analisis kapabilitas proses ( $C_p$  dan  $C_{pk}$ ) untuk mengukur kinerja proses FMS saat ini. Selanjutnya, pada tahap *Analyze*, digunakan diagram Pareto, diagram Ishikawa (*fishbone*), serta perhitungan *Risk Priority Number* (RPN) dari FMEA untuk mengidentifikasi dan memprioritaskan akar penyebab *rework*. Nilai RPN dihitung berdasarkan perkalian tiga faktor utama, yaitu *Severity* (S), *Occurrence* (O), dan *Detection* (D), dengan skala penilaian 1-10 untuk masing-masing faktor. Pada tahap *Improve* dan *Control*, diusulkan serta diimplementasikan solusi perbaikan berdasarkan prioritas RPN tertinggi, kemudian dipantau efektivitasnya menggunakan *Statistical Process Control* (SPC).

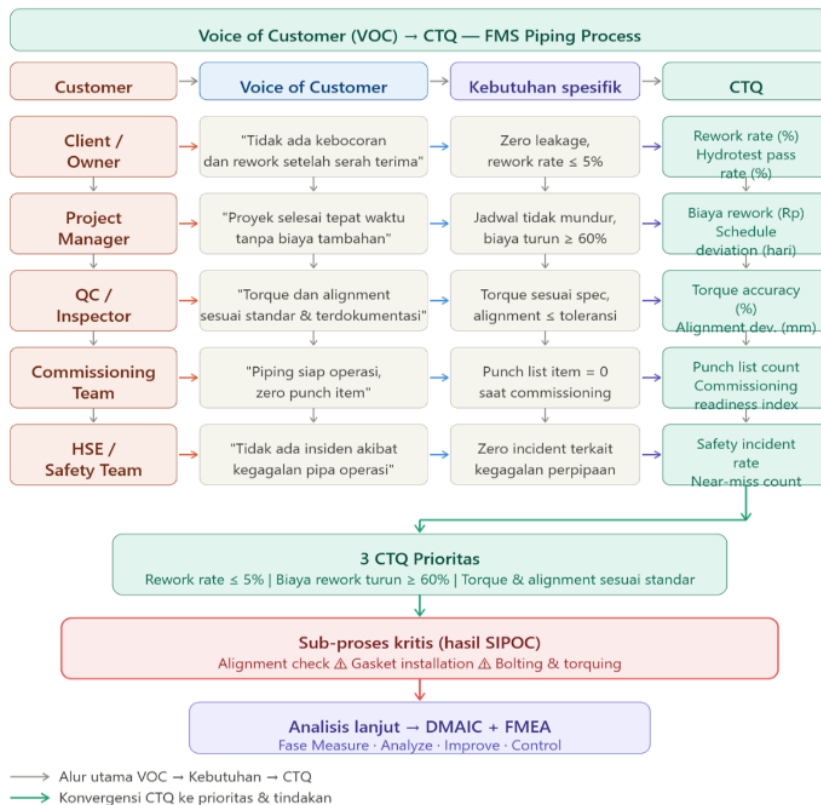
## 2.1 Tahap Define

Tahap *Define* menggunakan: (a) diagram SIPOC untuk memetakan proses FMS dari hulu ke hilir; (b) *Project Charter* untuk mendefinisikan ruang lingkup, tujuan, jadwal, dan tim proyek; dan (c) *Voice of Customer* (VoC) untuk mengidentifikasi kebutuhan kritis. Tiga *Critical to Quality* (CTQ) ditetapkan: ketepatan *alignment flange* ( $\pm 1,5$  mm per ASME B16.5), nilai torsi baut sesuai spesifikasi ( $\pm 10\%$ ), dan kondisi *gasket* yang benar sebelum *flange* ditutup.

Diagram SIPOC pada Gambar 1 menggambarkan alur proses instalasi *piping* mulai dari *supplier*, input material dan dokumen, tahapan proses pekerjaan, hingga *output* dan *customer*. Pada proses terdapat tahapan kritis yaitu *alignment check*, *gasket installation*, serta *bolting & torquing* karena berpengaruh terhadap kualitas dan keamanan sistem perpipaan. Diagram ini menjadi dasar penyusunan tahap berikutnya yaitu *Project Charter* dan *Voice of Customer* (VOC).



Gambar 2. Diagram *Project Charter*



Gambar 3. Diagram VOC

Diagram *Project Charter* pada Gambar 2 menjelaskan rencana perbaikan untuk mengurangi *rework* pada 173

proses FMS *piping* menggunakan metode DMAIC-FMEA. Target proyek yaitu menurunkan *rework* menjadi  $\leq 5\%$ , meningkatkan level sigma  $\geq 3,5$ , dan mengurangi biaya *rework*  $\geq 60\%$  dalam waktu 6 bulan, dengan fokus pada *alignment check*, *gasket installation*, serta *bolting & torquing*.

Diagram VOC (*Voice of Customer*) pada **Gambar 3** menunjukkan hubungan antara kebutuhan *customer* dengan target kualitas proses *piping* (CTQ). Setiap kebutuhan *customer* diterjemahkan menjadi kebutuhan spesifik dan indikator kualitas seperti *rework rate*, biaya *rework*, *torque accuracy*, *alignment deviation*, dan *hydrotest pass rate*.

Hasil VOC menunjukkan tiga prioritas utama yaitu *rework*  $\leq 5\%$ , penurunan biaya *rework*  $\geq 60\%$ , serta *torque* dan *alignment* sesuai standar. Prioritas tersebut kemudian difokuskan pada subproses kritis hasil SIPOC yaitu *alignment check*, *gasket installation*, serta *bolting & torquing* untuk dianalisis lebih lanjut menggunakan DMAIC-FMEA.

## 2.2 Tahap Measure

Data dikumpulkan dari 860 titik *flange* selama enam bulan menggunakan *check sheet* terstandarisasi. Kapabilitas proses diukur menggunakan nilai DPMO (*Defects Per Million Opportunities*) menggunakan **Persamaan 1**:

$$DPMO = \frac{\text{Jumlah Defect}}{\text{Total Opportunity}} \times 1.000.000 \quad (\text{Persamaan 1})$$

Total *Opportunities* = Jumlah unit  $\times$  Jumlah CTQ per unit. Level *Sigma* ditentukan menggunakan tabel konversi Sigma standar (Sheel, 2025)

## 2.3 Tahap Analyze

*Fishbone diagram* digunakan untuk memetakan penyebab ke dalam kategori: *Man*, *Machine*, *Method*, *Material*, *Measurement*, dan *Environment* (Valentino et al., 2025) Selanjutnya FMEA dilakukan untuk setiap mode kegagalan teridentifikasi menggunakan **Persamaan 2**:

$$RPN = S \times O \times D \quad (\text{Persamaan 2})$$

S = *Severity*

O = *Occurrence*

D = *Detection*

Nilai S, O, D pada skala 1–10. Mode kegagalan dengan  $RPN \geq 200$  atau  $S \geq 8$  diprioritaskan untuk perbaikan (Lutfianto & Prabowo, 2022)

Setelah akar penyebab *rework flange* berhasil dipetakan melalui diagram *fishbone*, langkah selanjutnya adalah menilai tingkat risiko dari setiap mode kegagalan menggunakan metode FMEA. Penilaian dilakukan secara kolektif oleh *supervisor maintenance*, teknisi FMS senior, dan *quality control engineer* melalui diskusi terstruktur berbasis data *historis rework* selama periode penelitian. Setiap mode kegagalan dinilai berdasarkan tiga dimensi, yaitu tingkat keparahan dampak (*Severity*), frekuensi kejadian (*Occurrence*), dan kemampuan deteksi (*Detection*), yang kemudian dikalikan untuk menghasilkan nilai RPN sebagai dasar penentuan prioritas perbaikan.

Dari lima mode kegagalan yang dianalisis, tiga di antaranya masuk dalam kategori prioritas tinggi dengan nilai  $RPN \geq 200$ . Mode kegagalan dengan risiko tertinggi adalah *misalignment flange* ( $RPN = 392$ ), yang terjadi karena prosedur FMS rev.01 tidak mewajibkan *alignment check* sebelum pemasangan *gasket*. Tanpa tahapan verifikasi ini, ketidaksejajaran *flange* sulit terdeteksi lebih awal dan berujung pada kegagalan saat *hydro test*. Berikutnya, torsi baut tidak sesuai ( $RPN = 336$ ) menjadi perhatian serius mengingat 40% *torque wrench* yang digunakan tidak terkalibrasi sesuai jadwal, dengan deviasi rata-rata mencapai  $\pm 15\%$ . Penyimpangan torsi sekecil ini sudah cukup menyebabkan *flange* tidak rapat dan berpotensi bocor saat unit beroperasi. Mode kegagalan ketiga, *gasket* salah pasang ( $RPN = 280$ ), terjadi akibat tidak adanya *checklist* verifikasi maupun mekanisme *two-man check* pada pekerjaan kritis, sehingga kesalahan pemasangan kerap tidak tertangkap sebelum unit dikirim.

Di luar tiga prioritas utama tersebut, permukaan *flange* cacat memperoleh RPN 140 dengan kategori sedang. Temuan ini berkaitan dengan 8% *gasket* yang lolos inspeksi *incoming* meskipun memiliki cacat *visual*, mengindikasikan bahwa standar inspeksi yang berlaku saat ini masih perlu diperketat. Adapun dokumentasi tidak lengkap mencatat RPN terendah sebesar 80, namun tidak dapat diabaikan begitu saja karena ketiadaan sistem *reminder* yang terstruktur berpotensi memicu siklus *rework* yang berulang di kemudian hari.

## 2.4 Tahap Improve

Solusi perbaikan dirancang menggunakan prinsip *poka-yoke* (*mistake-proofing*) dan *standardized work* dari *lean* Solusi *manufacturing* (Mittal et al., 2023). *Pilot test* dilakukan pada satu *line* perpipaan selama Juli 2025 sebelum implementasi penuh pada seluruh proyek.

Penggunaan pendekatan *poka-yoke* dan *standardized work* pada tahap *improve* didasarkan pada hasil analisis *fishbone* dan FMEA yang menunjukkan bahwa sebagian besar penyebab *rework* berasal dari faktor manusia (*human error*), ketidakkonsistenan metode kerja, serta tidak adanya mekanisme verifikasi pada proses kritis. Temuan penelitian menunjukkan bahwa *misalignment flange* terjadi karena tidak adanya prosedur *alignment check* sebelum pemasangan

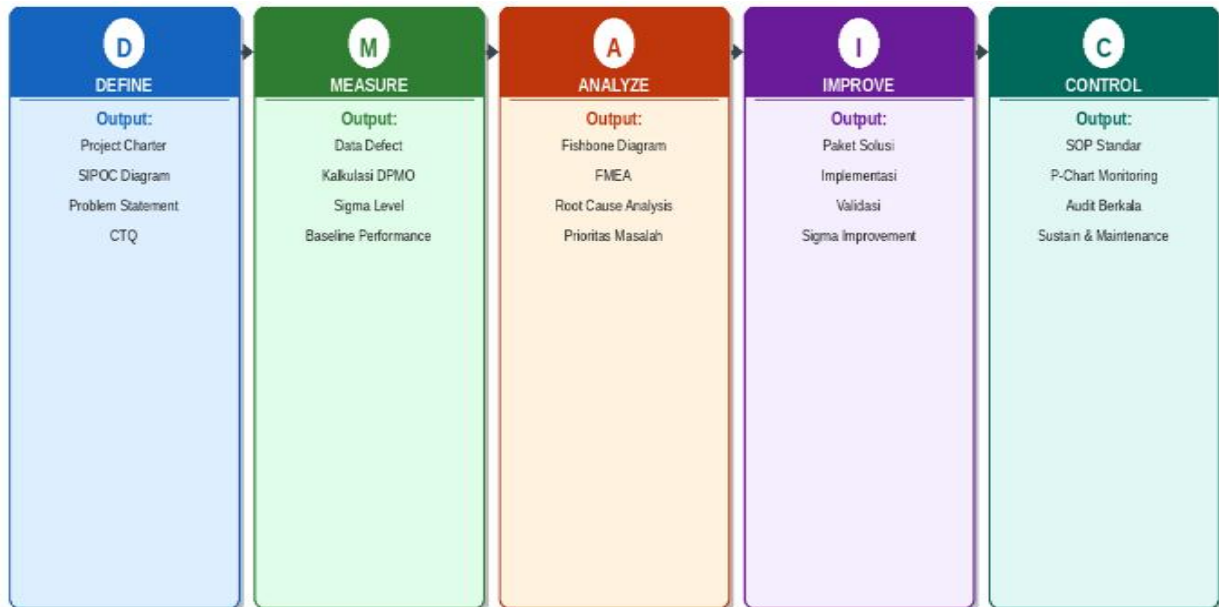


Diagram mencakup 5 fase: Define → Measure → Analyze → Improve → Control, beserta output utama tiap fase

**Gambar 4.** Diagram Alur Proses Penelitian DMAIC pada *Flange Management System*

*gasket*, torsi baut tidak sesuai disebabkan *torque wrench* yang tidak terkalibrasi dan prosedur *torquing* yang tidak seragam, serta *gasket* salah pasang terjadi akibat tidak adanya *checklist* verifikasi maupun mekanisme *two-man check*. Oleh karena itu, prinsip *poka-yoke* diterapkan melalui *checklist digital*, sistem verifikasi pekerjaan, dan kontrol tahapan kerja untuk mencegah kesalahan sebelum *defect* terjadi. Sementara itu, *standardized work* digunakan untuk memastikan seluruh teknisi melaksanakan proses *alignment*, *gasket installation*, dan *bolting & torquing* dengan metode yang seragam sesuai prosedur FMS rev.02 dan standar ASME B16.5 sehingga variasi proses dapat dikurangi dan kualitas pekerjaan menjadi lebih konsisten.

### 2.5 Tahap Control

Mekanisme kontrol meliputi *Statistical Process Control (p-chart)*, dokumentasi prosedur kerja baru (*Work Instruction FMS rev.02*) (Yusup & Momon, 2025), audit internal berkala, *Monthly Quality Review Meeting*, dan integrasi *checklist* digital ke dalam sistem ERP perusahaan.

Pemilihan peta kendali P (*p-chart*) pada tahap control didasarkan pada karakteristik data penelitian yang berbentuk data atribut, yaitu proporsi atau persentase *defect/rework* dari total titik *flange* yang diperiksa pada setiap periode pengamatan. Dalam penelitian ini, fokus pengendalian proses adalah memonitor perubahan proporsi titik *flange* yang mengalami *defect* setelah implementasi perbaikan DMAIC-FMEA. Selain itu, jumlah sampel inspeksi pada tiap periode pengamatan bersifat bervariasi sehingga *p-chart* dinilai paling sesuai dibandingkan jenis peta kendali atribut lainnya. Penggunaan *p-chart* memungkinkan peneliti untuk mengevaluasi apakah proses FMS *piping* telah berada dalam kondisi terkendali secara statistik melalui pemantauan nilai proporsi *defect* terhadap batas kendali atas (*Upper Control Limit/UCL*) dan batas kendali bawah (*Lower Control Limit/LCL*). Dengan demikian, *p-chart* dapat digunakan untuk mengidentifikasi adanya variasi khusus (*special cause variation*) maupun memastikan bahwa hasil perbaikan yang diterapkan tetap stabil secara berkelanjutan.

## 3. Hasil dan Pembahasan

Untuk memberikan gambaran menyeluruh, **Gambar 4** menyajikan diagram alur serangkaian proses penelitian yang dilakukan menggunakan kerangka DMAIC. Diagram alur di atas menggambarkan lima fase DMAIC secara berurutan beserta *output* utama tiap fase: (1) Define SIPOC dan *project charter*; (2) Measure pengumpulan data *defect* dan kalkulasi DPMO/Sigma; (3) Analyze *fishbone* diagram dan FMEA; (4) Improve implementasi tiga paket solusi secara bertahap; dan (5) Control prosedur standar, *p-chart*, dan audit berkala.

### 3.1 Hasil Tahap Define

Analisis SIPOC mengidentifikasi 11 *sub-proses* dalam FMS, dengan tiga *sproses* kritis sebagai penyumbang *rework* terbesar: *alignment check*, *gasket installation*, dan *bolting & torquing*. *Project charter* menetapkan target: *rework* ≤ 5% (penurunan minimal 73%), *level Sigma* ≥ 3,5, dan reduksi biaya *rework* minimal 60% dalam 6 bulan implementasi.

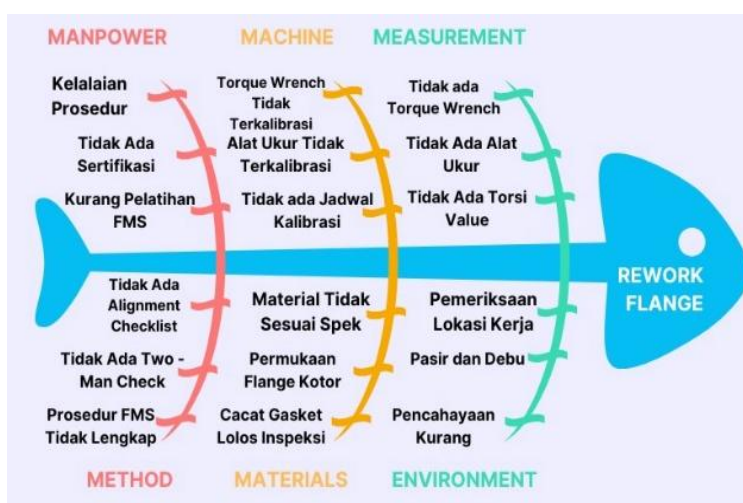
Ketiga proses kritis yang teridentifikasi pada tahap *Define* merupakan proses yang secara langsung berpotensi menimbulkan kegagalan (*defect*) apabila tidak dilaksanakan sesuai prosedur. Pada tahap *Measure*, ditemukan lima jenis *defect* aktual; tiga jenis *defect* utama (dengan frekuensi tertinggi) dapat dipetakan langsung ke masing-masing proses

Tabel 1. Distribusi Jenis *Defect Flange* (Januari–Juni 2025)

No	Jenis <i>Defect</i>	Jumlah	Persentase (%)	Proses Kritis Terkait
1	<i>Misalignment flange</i>	68	42,5	<i>Alignment check</i>
2	Torsi baut tidak sesuai	51	31,9	<i>Bolting &amp; torquing</i>
3	<i>Gasket</i> tidak terpasang benar	28	17,5	<i>Gasket installation</i>
4	Permukaan <i>flange</i> cacat	10	6,3	<i>(Inspeksi incoming)</i>
5	Lainnya	3	1,8	-

Tabel 2. Data *Rework* Bulanan Periode Januari–Juni 2025

Bulan	Total <i>Flange</i>	<i>Defect</i>	<i>Rework</i> (%)	DPMO	Sigma
Januari	145	28	19,3	64.37	2,85
Februari	138	25	18,1	60.39	2,88
Maret	152	30	19,7	65.79	2,84
April	141	24	17,0	56.74	2,91
Mei	148	28	18,9	63.06	2,86
Juni	136	25	18,4	61.28	2,87
Total	860	160	18,6	62.02	2,87



Gambar 5. Fishbone Diagram – Identifikasi Penyebab *Rework Flange Management System*

kritis tersebut, sebagaimana ditunjukkan pada kolom "Proses Kritis Terkait" di Tabel 1. Adapun dua jenis *defect* lainnya permukaan *flange* cacat dan kategori lainnya merupakan *defect* yang bersumber dari luar proses instalasi utama (proses fabrikasi *flange* dan faktor *eksternal* lainnya), sehingga tidak termasuk dalam tiga proses kritis yang diprioritaskan pada tahap *Define*. Dengan demikian, ruang lingkup penelitian ini konsisten: tiga proses kritis di *Define* menjadi landasan identifikasi penyebab *defect* pada tahap *Measure* dan *Analyze*.

### 3.2 Hasil Tahap *Measure*

Dari 860 titik *flange* yang diinspeksi selama Januari–Juni 2025, ditemukan 160 titik bermasalah (18,6%). Distribusi jenis *defect* disajikan pada Tabel 1. *Misalignment flange* mendominasi dengan 42,5%, diikuti torsi baut tidak sesuai 31,9%, dan *gasket* tidak terpasang benar 17,5%. Tren *rework* bulanan relatif konsisten (16–21%) mengindikasikan masalah bersifat sistemik. Dengan tiga CTQ per titik *flange*, total peluang =  $860 \times 3 = 2.580$ . Nilai DPMO:

$$\begin{aligned} \text{DPMO} &= \frac{160}{2.580} \times 1.000.000 \\ &= 62.015 \end{aligned}$$

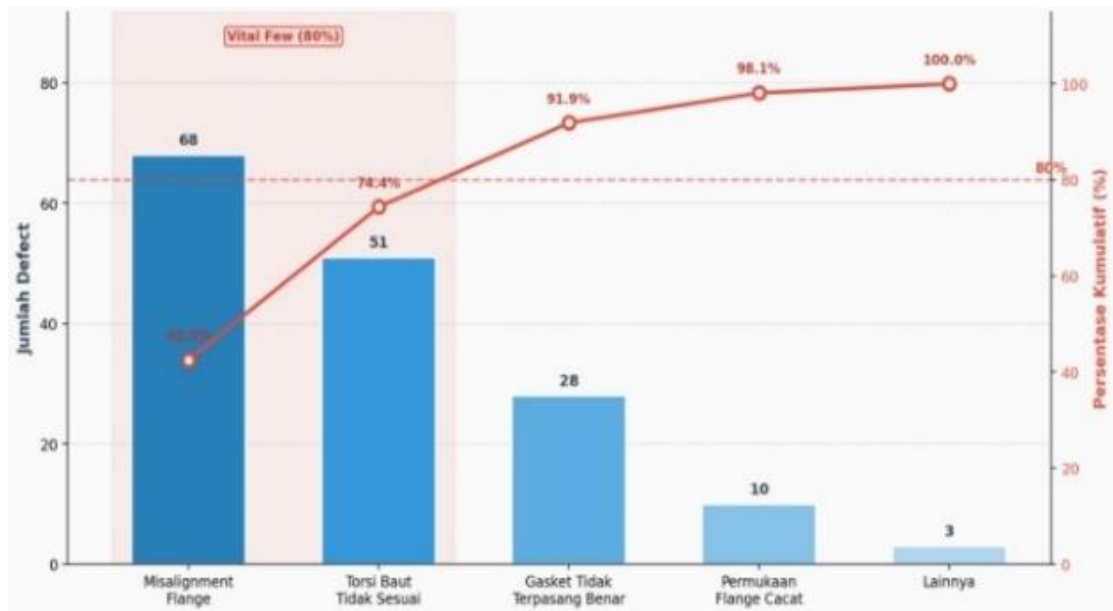
Nilai DPMO 62.015 setara level Sigma 2,87 jauh dari target Sigma 4,0 ( $\text{DPMO} \leq 6.210$ ). Data *tren* bulanan disajikan pada Tabel 2.

### 3.3 Hasil Tahap *Analyze* – Fishbone dan FMEA

*Analisis fishbone* mengidentifikasi 18 sub-penyebab dalam lima kategori. Penyebab kritis: 53% teknisi belum tersertifikasi FMS, 40% *torque wrench* tidak terkalibrasi sesuai jadwal (deviasi rata-rata  $\pm 15\%$ ), prosedur FMS rev.01 tidak mewajibkan *alignment check* sebelum pemasangan *gasket*, tidak ada *two-man check* untuk pekerjaan kritis, dan 8% *gasket* memiliki cacat visual yang terlewat saat inspeksi awal. Diagram *fishbone* lengkap disajikan pada Gambar 5.

Tabel 3. Hasil FMEA Proses *Flange Management System*

Mode Kegagalan	Penyebab Potensial	Efek Kegagalan	S	O	D	RPN	Prioritas
<i>Misalignment flange</i>	Tidak ada prosedur <i>alignment check</i>	Kebocoran, gagal <i>hydro test</i>	8	7	7	392	Tinggi
Torsi baut tidak sesuai	<i>Torque wrench</i> tidak terkalibrasi	<i>Flange</i> longgar/bocor	8	6	7	336	Tinggi
<i>Gasket</i> salah pasang	Tidak ada <i>checklist</i> verifikasi	Kebocoran saat operasi	8	5	7	280	Tinggi
Permukaan <i>flange</i> cacat	Inspeksi <i>incoming</i> tidak ketat	<i>Seal</i> tidak sempurna	7	4	5	140	Sedang
Dokumentasi tidak lengkap	Tidak ada <i>reminder</i> sistem	<i>Rework</i> berulang	5	4	4	80	Rendah



Gambar 6. Diagram Pareto – Distribusi Jenis *Defect Flange Management System*

Berdasarkan *fishbone*, FMEA dilakukan terhadap lima mode kegagalan. Tiga mode dengan  $RPN \geq 200$  ditetapkan sebagai prioritas utama perbaikan. Hasil lengkap FMEA disajikan pada **Tabel 3**. Diagram Pareto pada **Gambar 6** memperlihatkan bahwa tiga jenis *defect* pertama berkontribusi 92% total *rework* (*vital few*), sesuai prinsip pareto 80/20. Diagram Pareto pada **Gambar 6** sebagai alat verifikasi distribusi kumulatif frekuensi *defect* berdasarkan data aktual inspeksi, sehingga memberikan konfirmasi empiris terhadap prioritas yang telah diidentifikasi melalui RPN pada FMEA. Perlu ditegaskan bahwa kedua alat ini memiliki fungsi yang berbeda dan saling melengkapi, bukan saling menggantikan: FMEA dan RPN mengevaluasi prioritas mode kegagalan berdasarkan tiga dimensi risiko (*Severity, Occurrence, Detectability*), mencakup dampak potensial meskipun frekuensinya belum terjadi; sedangkan Diagram Pareto mengkonfirmasi distribusi frekuensi *defect* yang benar-benar terjadi di lapangan selama periode pengukuran, mengikuti prinsip Pareto 80/20 (*vital few vs. trivial many*). Hasilnya konsisten: tiga *defect* utama yang mendapatkan RPN tertinggi ( $\geq 280$ ) pada FMEA juga terbukti menjadi *vital few* pada Diagram Pareto dengan kontribusi kumulatif 91,9% dari total *rework*. Konsistensi ini memperkuat validitas penentuan prioritas perbaikan yang dipilih dalam penelitian ini.

### 3.4 Hasil Tahap *Improve*

Tiga paket solusi perbaikan diimplementasikan secara bertahap mulai Juli 2025:

a) 3.4.1 Perbaikan 1: *checklist digital fms*

Sistem *checklist* digital berbasis tablet dikembangkan dengan 12 poin verifikasi dalam tiga *fase*: *pre-assembly* (5 poin: inspeksi *visual flange* dan *gasket*, pengukuran *alignment*, konfirmasi spesifikasi *material*), *assembly* (4 poin: pemasangan *gasket*, pengecekan posisi, *bolting simetris*), dan *post-assembly* (3 poin: *torque record, final check, hydrotest readiness*).

b) 3.4.2 Perbaikan 2: *standarisasi prosedur torque wrench*

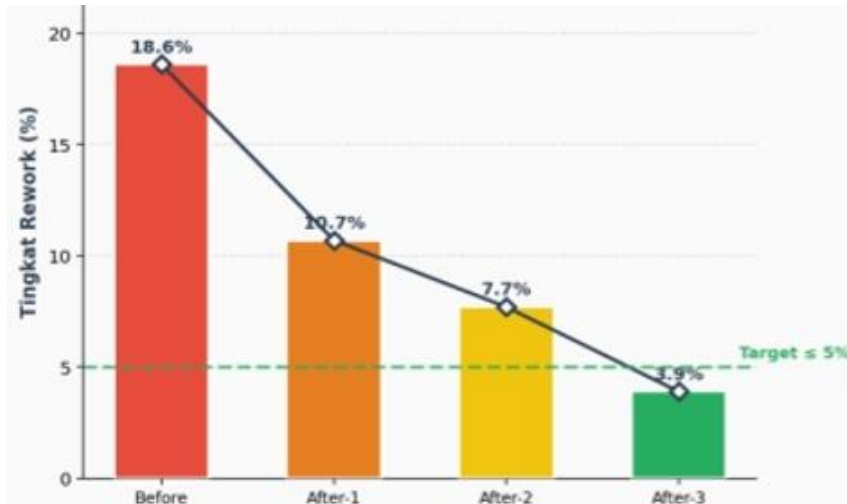
*Audit* terhadap 32 unit *torque wrench* menghasilkan 13 unit dinyatakan tidak layak. Seluruh unit tersisa dikalibrasi ulang oleh laboratorium terakreditasi. Jadwal kalibrasi diperketat dari 6 bulan menjadi 3 bulan. *Torque Specification Sheet* untuk setiap *rating flange* dipasang sebagai referensi *visual* di area kerja.

c) 3.4.3 Perbaikan 3: *program training kompetensi fms*

*Training* intensif 3 hari bagi 28 teknisi aktif mencakup: teori dasar *flange* dan ASME B16.5 (½ hari), prosedur FMS rev.02 (1 hari), dan praktik langsung menggunakan *mock-up* (1 hari), serta evaluasi kompetensi melalui *written test*

Tabel 4. Perkembangan Tingkat Rework Selama Periode Implementasi

Periode	Total Flange	Defect	Rework (%)	DPMO	Sigma
Before (Jan–Jun 2025)	860	160	18,6	62.015	2,87
After-1 (Jul–Ags 2025)	270	29	10,7	35.802	3,24
After-2 (Sep–Okt 2025)	285	22	7,7	25.731	3,44
After-3 (Nov–Des 2025)	255	10	3,9	13.072	3,87
Total After (Jul–Des 2025)	810	61	7,5	25.103	3,44



Gambar 7. Tingkat Rework Sebelum Perbaikan



Gambar 8. Level Sigma Sesudah Perbaikan

dan *practical assessment*. *Refreshment training* ditetapkan setiap tahun. Hasil pengukuran periodik setelah implementasi disajikan pada Tabel 4.

### 3.5 Pembahasan

Gambar 7 memperlihatkan perbandingan *visual tren rework* dan peningkatan *level Sigma* sebelum dan sesudah perbaikan. Gambar 8 menunjukkan level Sigma sesudah perbaikan. Penurunan rework dari 18,6% menjadi 3,9% (turun 79%) secara keseluruhan, dengan kinerja terbaik 3,9% pada After-3. *Tren* menunjukkan penurunan konsisten: After-1 (10,7%) → After-2 (7,7%) → After-3 (3,9%), membuktikan implementasi bertahap berjalan efektif. Hasil ini konsisten dengan (Rofi'ul Huda et al., 2025) melaporkan peningkatan Sigma 0,8–1,2 poin setelah DMAIC dan (Daniyan et al., 2022) yang mencatat penurunan *defect* 67% pada industri perkeretaapian.

*Checklist* digital FMS terbukti menjadi intervensi paling berdampak: 65% sisa *rework* pada After-1 terjadi pada titik yang *checklistnya* tidak diisi lengkap. Prinsip *poka-yoke* yang diterapkan secara efektif memaksa teknisi mengikuti prosedur (Mittal et al., 2023). Standarisasi *torque wrench* menurunkan proporsi *defect* torsi dari 31,9% menjadi 11,5% dari total *defect residual* (Hassan et al., 2022) Program *training* memberikan dampak jangka menengah, terlihat jelas

Tabel 5. Dampak Penurunan Rework per Jenis Defect dan per Alternatif Perbaikan

Jenis Defect	Before (Jun 2025)	After-1: Checklist Digital	After-2: Standarisasi Torque	After-3: Training	Total Penurunan	Catatan / Rekomendasi Lanjut
	$n = 160$ (18,6%)	$n = 29$ (10,7%)	$n = 22$ (7,7%)	$n = 10$ (3,9%)	$\Delta$ defect (%)	
Misalignment flange	68 (42,5%)	13 (44,8%)	7 (31,8%)	3 (30,0%)	-95,6%	Penurunan signifikan; <i>checklist digital</i> efektif memaksa <i>alignment check</i> . Defect residual perlu dievaluasi dari sisi kualitas permukaan <i>flange incoming</i> .
Torsi baut tidak sesuai	51 (31,9%)	8 (27,6%)	5 (22,7%)	2 (20,0%)	-96,1%	Standarisasi <i>torque wrench (After-2)</i> menurunkan proporsi dari 31,9% → 22,7%. Kajian lanjutan dapat dilakukan pada sistem kalibrasi <i>real-time</i> berbasis IoT.
Gasket tidak terpasang benar	28 (17,5%)	5 (17,2%)	5 (22,7%)	2 (20,0%)	-92,9%	Proporsi relatif naik pada <i>After-2</i> ; perlu evaluasi spesifikasi <i>gasket</i> dari <i>supplier</i> dan inspeksi <i>incoming</i> yang lebih ketat.
Permukaan flange cacat	10 (6,3%)	2 (6,9%)	4 (18,2%)	2 (20,0%)	-80,0%	Proporsi residual meningkat pada <i>After-2</i> dan <i>After-3</i> ; mengindikasikan bahwa akar penyebab (kualitas fabrikasi) belum tertangani. Rekomendasi: audit <i>supplier &amp; incoming QC</i> .
Lainnya	3 (1,8%)	1 (3,4%)	1 (4,5%)	1 (10,0%)	-66,7%	Proporsi residual relatif besar (10%). Penelitian lanjutan disarankan untuk mengidentifikasi penyebab spesifik kategori 'lainnya'.
Total	160 (18,6%)	29 (10,7%)	22 (7,7%)	10 (3,9%)	-93,8%	Target <i>rework</i> ≤ 5% tercapai pada <i>After-3</i> (3,9%). Level Sigma 3,44, masih di bawah target 4,0.

pada *After-3*, konsisten dengan (Widjajanto & Purba, 2021). Level Sigma sebesar 3,87 yang dicapai pada periode *After-3* (November–Desember 2025) telah berhasil melampaui target perusahaan sebesar  $\geq 3.5$

Keterangan:  $n$  = jumlah *defect* aktual pada periode tersebut; persentase dalam kurung = proporsi *defect* tersebut terhadap total *defect* pada periode yang sama;  $\Delta$  defect (%) = persentase penurunan jumlah *absolut defect* dari *Before* ke *After-3*. Kolom 'Catatan/ Rekomendasi Lanjut' ditujukan sebagai bahan evaluasi bagi penelitian selanjutnya, khususnya untuk *defect* yang proporsi residualnya masih tinggi atau yang tidak mengalami penurunan signifikan setelah implementasi alternatif perbaikan.

Berdasarkan Tabel 5, dapat dievaluasi bahwa *checklist digital (After-1)* memberikan dampak penurunan terbesar secara absolut, terutama pada *defect misalignment flange*. Standarisasi *torque wrench (After-2)* efektif menekan *defect* torsi namun belum optimal pada *defect* permukaan *flange* cacat yang justru meningkat proporsinya pada *After-2* dan *After-3*. Hal ini mengindikasikan bahwa akar penyebab *defect* permukaan *flange* cacat yaitu kualitas fabrikasi dan inspeksi *incoming* belum tertangani oleh ketiga alternatif perbaikan yang diimplementasikan, dan perlu menjadi fokus penelitian lanjutan.

Level Sigma 3,44 yang dicapai masih di bawah target 4,0. Analisis *defect* residual mengidentifikasi tiga akar penyebab yang belum sepenuhnya tertangani: variasi kualitas *gasket* dari *supplier*, kondisi permukaan *flange* dari proses

fabrikasi, dan keterbatasan kapasitas *QC inspector*. Perbaikan ketiga faktor ini diperkirakan dapat mendorong Sigma mencapai 4,0.

### 3.6 Hasil Tahap Control

Mekanisme kontrol yang ditetapkan sejak Oktober 2025: (1) prosedur FMS rev.02 sebagai standar resmi perusahaan; (2) *p-chart* diperbarui mingguan; (3) *audit internal* setiap dua minggu; (4) *Monthly Quality Review Meeting*; dan (5) *checklist* digital terintegrasi ke ERP. Hasil *monitoring p-chart* Oktober–Desember 2025 menunjukkan proses terkendali secara statistik dengan UCL 8% dan  $\bar{p}$  0,042, mengkonfirmasi perbaikan stabil (Mirmaningtyas & Nurwathi, 2024).

## 4. Kesimpulan

Penelitian ini secara keseluruhan membuktikan bahwa integrasi metodologi DMAIC-FMEA merupakan pendekatan yang efektif, sistematis, dan dapat diandalkan dalam meningkatkan kualitas proses FMS *piping* di industri minyak dan gas. Permasalahan *rework* yang selama ini bersifat berulang dan tidak tertangani secara tuntas berhasil diatasi melalui kerangka kerja berbasis data yang memungkinkan identifikasi masalah secara akurat, pengukuran kinerja proses secara objektif, serta perancangan solusi yang langsung menasar akar penyebab kegagalan. Kondisi awal proses FMS *piping* yang menunjukkan tingkat *rework* sebesar 18,6% dari 860 titik *flange* yang diinspeksi selama periode Januari hingga Juni 2025 mencerminkan sistem pengelolaan kualitas yang belum terstruktur, di mana ketergantungan pada kebiasaan kerja individual dan ketiadaan prosedur yang terstandarisasi menjadi faktor utama yang memperburuk tingkat ketidaksesuaian di lapangan. Melalui penelitian ini, terbukti bahwa perbaikan kualitas yang signifikan tidak selalu memerlukan investasi infrastruktur besar, melainkan dapat dicapai melalui perbaikan sistematis yang berlandaskan analisis risiko yang tepat dan komitmen seluruh pemangku kepentingan terhadap budaya kerja berbasis prosedur.

Kesimpulan pertama yang dapat ditarik dari penelitian ini adalah keberhasilan mengidentifikasi tiga mode kegagalan kritis dalam proses FMS *piping* beserta nilai *Risk Priority Number* (RPN) yang mencerminkan tingkat urgensi penanganannya secara kuantitatif. Mode kegagalan pertama, yaitu *misalignment flange*, memperoleh nilai RPN tertinggi sebesar 392 dan berkontribusi terhadap 42,5% dari total kejadian *rework*, menjadikannya sebagai penyebab tunggal terbesar kegagalan dalam siklus FMS yang diteliti. Mode kegagalan kedua adalah torsi baut tidak sesuai spesifikasi dengan nilai RPN 336 dan kontribusi 31,9%, yang terjadi akibat penerapan nilai torsi yang tidak konsisten karena penggunaan *torque wrench* yang tidak terkalibrasi serta ketiadaan *checklist torquing* sebagai panduan kerja lapangan yang mengikat. Mode kegagalan ketiga adalah *gasket* tidak terpasang dengan benar, dengan nilai RPN 280 dan kontribusi 17,5%, yang erat kaitannya dengan variasi kompetensi teknisi yang belum distandarisasi melalui mekanisme sertifikasi formal. Secara kumulatif, ketiga mode kegagalan ini bertanggung jawab atas 91,9% dari seluruh kejadian *rework* yang tercatat, sehingga *analisis* akar penyebab yang dilakukan melalui diagram *Fishbone* dan *Focus Group Discussion* berhasil mengerucutkan permasalahan pada tiga faktor fundamental, yaitu ketiadaan prosedur yang memadai, penggunaan alat yang tidak terkalibrasi, dan kompetensi teknisi yang belum terstandarisasi ketiganya yang kemudian menjadi landasan utama perancangan solusi perbaikan.

Kesimpulan kedua adalah keberhasilan tiga paket solusi perbaikan yang dirancang berdasarkan prioritas nilai RPN dalam menurunkan tingkat *rework* secara drastis dan melampaui target yang ditetapkan dalam *Project Charter*. Paket solusi pertama berupa implementasi *checklist digital* FMS berbasis *tablet* dengan sistem verifikasi QR code per titik *flange* berhasil menstandarisasi prosedur *alignment check* dan mengeliminasi risiko kelalaian yang sebelumnya kerap terjadi akibat ketergantungan pada penilaian individual teknisi di lapangan. Paket solusi kedua berupa program standarisasi dan kalibrasi ulang seluruh *torque wrench* secara menyeluruh, disertai penandaan warna berdasarkan range torsi dan jadwal kalibrasi berkala tiga bulan, terbukti efektif memastikan konsistensi nilai torsi yang diterapkan selama proses *bolting* sesuai dengan spesifikasi teknis yang ditetapkan. Paket solusi ketiga berupa program pelatihan kompetensi teknisi terstruktur selama 40 jam yang mencakup materi prosedur FMS, simulasi praktis pemasangan *gasket*, dan ujian sertifikasi *internal* berhasil mereduksi variasi kualitas pelaksanaan kerja yang sebelumnya menjadi sumber utama kegagalan *gasket installation*. Implementasi ketiga paket solusi ini secara bersama-sama berhasil menurunkan tingkat *rework* dari 18,6% menjadi 3,9%, setara dengan penurunan sebesar 79% yang melampaui target penurunan minimal 73% dengan batas *rework*  $\leq 5\%$  yang ditetapkan dalam *Project Charter*, sekaligus menghasilkan reduksi biaya *rework* sebesar 65% dari nilai *baseline* melampaui target reduksi biaya minimal 60% yang telah disepakati.

Kesimpulan ketiga adalah terkonfirmasinya peningkatan kapabilitas proses FMS *piping* yang signifikan dan terbukti stabil secara statistik sebagai dampak langsung dari seluruh intervensi perbaikan yang dilaksanakan. *Level Sigma* proses meningkat dari 2,87 Sigma pada periode *baseline* menjadi 3,87 Sigma pada periode pasca-implementasi, melampaui target yang ditetapkan sebesar  $\geq 3,5$  Sigma dan mencerminkan transformasi proses yang substantif karena setiap peningkatan satu *unit Sigma* pada rentang ini setara dengan penurunan DPMO yang eksponensial. Hal ini terbukti dari penurunan nilai DPMO dari 62.015 menjadi 13.072, atau berkurang sebesar 78,9%, yang mengindikasikan bahwa proses FMS *piping* kini beroperasi dengan tingkat *defect* yang jauh lebih terkendali dan mendekati standar kapabilitas industri minyak dan gas. Nilai rata-rata RPN pasca-implementasi juga turun dari 336 menjadi 97, mencerminkan bahwa probabilitas terjadinya kegagalan, frekuensi kemunculannya, dan tingkat kesulitan deteksinya telah berkurang secara

nyata pada ketiga mode kegagalan kritis secara bersamaan. Analisis peta kendali *p-chart* pada periode kontrol lebih lanjut mengkonfirmasi bahwa seluruh perbaikan ini bersifat stabil secara statistik, ditandai dengan seluruh titik data proporsi *defect* yang berada di antara batas kendali atas dan batas kendali bawah tanpa pola yang mengindikasikan penyebab khusus, membuktikan bahwa proses telah bertransisi menuju kondisi terkendali secara statistik dan bahwa budaya kerja berbasis prosedur yang ditanamkan telah terinternalisasi secara konsisten oleh seluruh personel yang terlibat.

Meskipun seluruh target yang ditetapkan dalam *Project Charter* telah berhasil dilampaui, penelitian ini juga membuka ruang yang signifikan bagi pengembangan lebih lanjut guna mendorong *level Sigma* menuju angka  $\geq 4,0$  melalui integrasi teknologi industri 4.0 yang semakin relevan di sektor *oil and gas*. Penelitian lanjutan sangat disarankan untuk mengeksplorasi penerapan *sensor torque real-time* yang terhubung langsung ke sistem SCADA, sehingga nilai torsi pada setiap *joint flange* dapat dipantau secara langsung selama proses *bolting* berlangsung dan anomali dapat dideteksi serta direspon secara instan tanpa menunggu hasil inspeksi manual. Pengembangan sistem pemantauan berbasis *Internet of Things* (IoT) menggunakan *strain gauge* dan *wireless transmitter* juga berpotensi besar untuk mendeteksi perubahan kondisi *flange* secara *real-time* pasca instalasi, memberikan peringatan dini terhadap potensi kebocoran jauh sebelum berdampak pada integritas sistem perpipaan secara keseluruhan. Selain itu, penerapan *AI-based quality prediction* yang memanfaatkan akumulasi data historis inspeksi, kondisi material, dan parameter operasi untuk memprediksi probabilitas kegagalan *flange* secara proaktif akan memungkinkan peralihan dari pendekatan inspeksi berkala menuju inspeksi berbasis risiko yang jauh lebih efisien dan tepat sasaran. Integrasi ketiga teknologi tersebut dengan kerangka DMAIC-FMEA yang telah terbukti efektif dalam penelitian ini diyakini memiliki potensi untuk menjadikan proses FMS *piping* di industri minyak dan gas sebagai model pengelolaan kualitas berbasis data yang adaptif, prediktif, dan berorientasi pada pencapaian *zero-defect* dalam jangka panjang.

#### 4.1 Keterbatasan penelitian

Meskipun penelitian ini berhasil mencapai seluruh target yang ditetapkan dalam *Project Charter*, terdapat sejumlah keterbatasan yang perlu diakui agar hasil penelitian ini dapat diinterpretasikan secara proporsional dan menjadi landasan yang lebih kokoh bagi penelitian lanjutan. Pertama, ruang lingkup penelitian ini terbatas pada satu lokasi fasilitas minyak dan gas dengan karakteristik operasional, skala produksi, dan budaya kerja yang spesifik, sehingga generalisasi temuan dan solusi perbaikan yang diusulkan ke fasilitas lain atau sektor industri yang berbeda perlu dilakukan dengan kehati-hatian dan melalui proses adaptasi yang mempertimbangkan perbedaan konteks operasional.

Kedua, periode pengukuran pasca-implementasi yang berlangsung selama enam bulan (Juli–Desember 2025) sudah memadai untuk mengonfirmasi kestabilan statistik jangka pendek, namun belum cukup untuk mengevaluasi daya tahan solusi dalam jangka panjang, khususnya terkait konsistensi penerapan *checklist* digital dan pemeliharaan kompetensi teknisi pascaprogram pelatihan. Ketiga, dua jenis *defect* residual permukaan *flange* cacat dan variasi kualitas *gasket* dari *supplier* akar penyebabnya berada di luar kendali proses instalasi dan memerlukan intervensi pada rantai pasokan serta proses fabrikasi yang melampaui cakupan penelitian ini. Keempat, kalkulasi reduksi biaya *rework* sebesar 65% didasarkan pada biaya tenaga kerja langsung dan material; biaya tidak langsung seperti potensi kerugian akibat penundaan jadwal produksi, risiko reputasi, dan biaya peluang belum diperhitungkan, sehingga dampak ekonomi aktual dari perbaikan ini kemungkinan lebih besar dari yang dilaporkan. Kelima, penelitian ini tidak mencakup analisis komparatif dengan metode alternatif selain DMAIC-FMEA, sehingga studi perbandingan dengan pendekatan *Lean Manufacturing*, *Total Productive Maintenance* (TPM), atau *Statistical Process Control* (SPC) dapat memperkaya pemahaman tentang efektivitas relatif setiap pendekatan dalam konteks FMS *piping*.

#### Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih disampaikan kepada manajemen perusahaan objek penelitian atas izin dan dukungan data, serta kepada Kepala Program Studi Teknik Industri, Universitas Riau Kepulauan atas dukungan akademis dalam pelaksanaan penelitian ini.

#### 5. Daftar Pustaka

- Daniyan, I., Adeodu, A., Mpofu, K., Maladzhi, R., & Kana-Kana Katumba, M. G. (2022). Application of lean Six Sigma methodology using DMAIC approach for the improvement of bogie assembly process in the railcar industry. *Heliyon*, 8(3), e09043. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09043>
- Hassan, S., Wang, J., Kontovas, C., & Bashir, M. (2022.). *Modified FMEA Hazard Identification for Cross-Country Petroleum Pipeline using Fuzzy Rule Base and Approximate Reasoning*. 1–39.
- Hutagalung, M. N. A., Hadi, S., Pranoto, B., Dwiyanto, F., & Kurniawan, D. (2025). *Flange-Gasket Piping System Simulator*. 25(1), 27–34.
- Hwang, B.-G., Shan, M., & Supa'at, N. N. B. (2017). Green commercial building projects in Singapore: Critical risk factors and mitigation measures. *Sustainable Cities and Society*, 30, 237–247. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.01.020>

- Jahanian, M., Ramezani, A., & Shouredeli, M. A. (2021). Gas pipeline leakage detection in the presence of parameter uncertainty using robust extended Kalman filter. *Measurement and Control*, 43(9). <https://doi.org/10.1177/01423312219891117>
- Lutfianto, M. A., & Prabowo, R. (2022). Implementation of Six Sigma Methods with Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) as a Tool for Quality Improvement of Newspaper Products (Case Study: PT. ABC Manufacturing – Sidoarjo, East Java – Indonesia). *Journal of Integrated System*, 5(1), 87–98. <https://doi.org/10.28932/jis.v5i1.4615>
- Mirmaningtyas, D. C., & Nurwathi, N. (2024). Pengukuran dan Peningkatan Produktivitas Drafter Kontrak di PT X Oil Refinery Menggunakan Metode Objective Matrix (OMAX) dan Fishbone Diagram. *Rekayasa Industri Dan Mesin (ReTIMS)*, 5(2), 70. <https://doi.org/10.32897/retims.2024.5.2.2917>
- Mittal, A., Gupta, P., Kumar, V., Al Owad, A., Mahlawat, S., & Singh, S. (2023). The performance improvement analysis using Six Sigma DMAIC methodology: A case study on Indian manufacturing company. *Heliyon*, 9(3), e14625. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14625>
- Petrovskiy, E. A., Buryukin, F. A., Bukhtiyarov, V. V., Savich, I. V., & Gagina, M. V. (2015). The FMEA-risk analysis of oil and gas process facilities with hazard assessment based on fuzzy logic. *Modern Applied Science*, 9(5), 25–37. <https://doi.org/10.5539/mas.v9n5p25>
- Ritonga, F. S., Purba, A. S., Simanjuntak, J. K. R. S., Fadilah, N., & Amalia, M. (2025). Dimensional check of weld neck flange based on ASME B16.5. *International Journal of Mechanical Computational and Manufacturing Research*, 14(2), 49–56. <https://doi.org/10.35335/computational.v14i2.268>
- Rofi'ul Huda, M., Kurniawati, D., & Hendaryati, H. (2025). Analisis Defect Rate Pengelasan Pipa Baja Spiral dan Penanggulangannya Menggunakan Metode Six Sigma. *Journal Technology Urgency Breakthrough in Engineering*, 4(2), 338–353. <http://ejournal.umm.ac.id/index.php/turbine>
- Sheel, C. C. (2025). *A Systematic Approach and Mathematical Review to Textile Production Optimization: Implementing Lean Six Sigma DMAIC for Enhanced Product Consistency and Quality in the Field of Industrial Engineering Management*. 5(1), 37–51.
- Valentino, D., Alfian, A., Andrean, Muhammad Lutfi Pratama, A. Y., & Prasetyo, Y. (2025). *ANALISIS CACAT PRODUK DIE CASTING PADA PERUSAHAAN OTOMOTIF DENGAN METODE FISHBONE DIAGRAM*. 6(0), 167–186.
- Wang, C., & Wang, C. (2024). *Research Progress of Failure Mode Diagnosis Methods for Oil and Gas Field Pipelines*. 9(1).
- Wang, L., Sun, L., Kang, J., Wang, Y., & Wang, H. (2021). Risk identification of FPSO oil and gas processing system based on an improved FMEA approach. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(2), 1–19. <https://doi.org/10.3390/app11020567>
- Widjajanto, S., & Hardi Purba, H. (2021). Six Sigma Implementation in Indonesia Industries and Businesses: a Systematic Literature Review. *Journal of Engineering and Management in Industrial System*, 9(1), 23–34. <https://doi.org/10.21776/ub.jemis.2021.009.01.3>
- Yusup, A. S., & Momon, A. S. (2025). Analisis Penerapan Metode Statistical Process Control untuk Mengendalikan Kualitas Produk Papan Plywood Dekoratif. *Jurnal Teknologi Dan Manajemen Industri Terapan*, 4(3), 1095–1105. <https://doi.org/10.55826/jtmit.v4i3.1139>