



Ranah Research

E-ISSN: 2655-0865

Journal of Multidisciplinary Research and Development

082170743613

ranahresearch@gmail.com

<https://jurnal.ranahresearch.com>

DOI: <https://doi.org/10.38035/rrj.v8i4>

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Integrasi Extended Failure Mode And Effect Analysis Pada Quality Improvement Matrix untuk Mendukung Peningkatan Kualitas

Aldiva Syawallad Akbar¹, Putu Dana Karningsih²

¹Program Studi Teknik Sistem dan Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Indonesia, syawalladaldiva@gmail.com.

²Program Studi Teknik Sistem dan Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Indonesia, putu.karningsih@gmail.com.

Corresponding Author: syawalladaldiva@gmail.com¹

Abstract: *Quality improvement in the manufacturing industry is generally carried out using various tools sequentially and in isolation. The Quality Improvement Matrix (QIM) has been developed as an integrated tool based on Failure Mode and Effect Analysis and Quality Function Deployment, aimed at quality improvement. The QIM analysis stages follow the logic of the House of Risk framework, but are modified for a different purpose namely to assist companies in analyzing defects, root causes of defects, and the prioritization of corrective actions. At present, the QIM still has several limitations: the assessment of Severity and implementation difficulty (Difficulty) do not explicitly account for cost factors. Furthermore, the QIM does not incorporate the Detection parameter, which is an important basis for developing corrective actions. This study proposes an enrichment of the QIM across three aspects. First, the integration of the Extended FMEA concept into the QIM by incorporating cost considerations into the Severity parameter through the Severity Cost (C) parameter, along with the addition of a Detection (D) parameter. Second, accommodating cost and time aspects in the assessment of the Difficulty parameter. Third, categorizing the root causes of defects based on Man, Machine, Method, Material, Measurement, and Mother Nature, with the aim of focusing the development of corrective actions. In addition, the corrective action stage (preventive action) emphasizes the use of Jidoka as one of the available improvement methods. The developed framework is then applied to a case study of a bogie manufacturer and validated through expert assessment within the company*

Keyword: *Extended FMEA, Jidoka, Quality Improvement Matrix, 6M*

Abstrak: Perbaikan kualitas pada industri manufaktur umumnya dilakukan menggunakan berbagai *tools* secara sekuensial dan terpisah, sehingga tidak tersedia ringkasan terintegrasi yang dapat menggambarkan prioritas perbaikan secara menyeluruh. *Quality Improvement Matrix* (QIM) telah dikembangkan sebagai *tool* terintegrasi berbasis *Failure Mode and Effect*

Analysis (FMEA) dan *Quality Function Deployment* (QFD) untuk mendukung perbaikan kualitas. Namun QIM masih memiliki keterbatasan: penilaian *Severity* dan *Difficulty* tidak secara eksplisit mempertimbangkan biaya, dan parameter *Detection* belum diintegrasikan. Penelitian ini mengembangkan *framework* QIM yang diperkaya melalui integrasi konsep *Extended FMEA*. Pengembangan mencakup tiga aspek utama: (1) penambahan parameter *Severity Cost* (C) yang mempertimbangkan biaya kegagalan, dan parameter *Detection* (D) yang mengukur kemampuan sistem mendeteksi akar penyebab *defect*; (2) pengayaan parameter *Difficulty* (D_k) dengan aspek biaya dan waktu implementasi; serta (3) kategorisasi akar penyebab berdasarkan kerangka 6M (*Man, Machine, Method, Material, Measurement, Mother Nature*). Pada QIM 2, rekomendasi *preventive action* secara eksplisit mengintegrasikan alat-alat *Jidoka* sebagai pilihan metode perbaikan. *Framework* diterapkan pada studi kasus produksi bogie di Foundry I. Dari 5 *defect* dominan dan 32 akar penyebab yang diidentifikasi, analisis QIM 1 menghasilkan nilai *Value of Aggregate Defect* yang mengelompokkan akar penyebab ke dalam empat kluster prioritas. Dua belas akar penyebab pada kluster Utama dan Tinggi, yang didominasi faktor *Method* dan *Machine*, menjadi fokus utama QIM 2. Hasil perbandingan *preventive action* berdasarkan nilai ETD_k menunjukkan urutan prioritas: SOP (797.040), *Training* (313.200), *Poka-Yoke* (281.880), *Sensor* (198.450), *Andon* (162.360), dan *Fixed-Position Stop* (135.360). Validasi komparatif membuktikan bahwa *framework* QIM menghasilkan ringkasan terintegrasi yang secara substansial lebih informatif dibandingkan sebelumnya yang digunakan perusahaan

Kata Kunci: *Extended FMEA, Jidoka, Quality Improvement Matrix, 6M*

PENDAHULUAN

Kualitas merupakan aspek fundamental yang menentukan diterimanya suatu produk oleh pengguna. Pada industri manufaktur, kegagalan memenuhi standar kualitas berdampak langsung pada aspek finansial. Biaya kegagalan internal dan eksternal (*cost of poor quality*) dilaporkan dapat mencapai 5–25% dari total penjualan, bergantung pada tingkat kematangan sistem mutu yang diterapkan (Feigenbaum, 1991; Campanella, 1999). *Defect* menimbulkan kerugian melalui biaya *rework*, *scrap*, dan *downtime* mesin yang berdampak langsung terhadap daya saing dan profitabilitas (Subramanian et al., 2022). Karena itu, pengendalian kualitas yang mampu tidak hanya mengidentifikasi *defect* tetapi juga menentukan prioritas perbaikan secara sistematis dan efisien menjadi kebutuhan strategis bagi perusahaan manufaktur.

Kebutuhan tersebut terlihat nyata pada PT X, Badan Usaha Milik Negara yang bergerak di bidang rekayasa dan manufaktur alat berat, peralatan industri, serta komponen perkeretaapian. Salah satu produk strategisnya adalah *bogie*, yaitu rangka roda yang menopang badan kereta dan menentukan kestabilan, kemampuan pengereman, serta kenyamanan perjalanan. Sebagai komponen keselamatan kritis, *bogie* tunduk pada standar kualitas yang sangat ketat. Penelitian terdahulu di PT X mengidentifikasi berbagai jenis *defect* pada produksi *bogie*, antara lain porositas, *cold shut*, *shrinkage porosity*, *misrun*, dan inklusi pasir, yang secara kolektif berkontribusi pada tingkat *rejection* yang signifikan serta kerugian finansial yang substansial selama periode pengamatan (Ramadhani & Ramadhani, 2024).

Dokumen biaya *rework* tahun 2021 mencatat total biaya *rework* aktual sebesar Rp303 juta untuk 26 kejadian *non-conformance* pada komponen *bogie* SCT (*Standard Car Truck*), dengan biaya per set berkisar antara Rp700 ribu hingga lebih dari Rp12 juta bergantung pada jenis dan tingkat keparahan *defect*. Angka ini mengindikasikan bahwa dampak finansial *defect*

di Foundry X berada pada skala ratusan juta rupiah hanya dari satu periode pencatatan. Persoalannya, pencatatan biaya kualitas semacam ini tidak dilakukan secara berkelanjutan, sehingga kerugian pada periode setelahnya tidak terukur secara rutin. Akibatnya, dimensi biaya kegagalan belum dapat dijadikan dasar yang objektif dalam penentuan prioritas perbaikan, padahal setiap jenis *defect* menimbulkan beban biaya yang berbeda-beda.

Untuk mengendalikan kualitas, PT X saat ini menggunakan *check sheet*, diagram Pareto, *cause and effect diagram* dan *value stream mapping* yang umum diterapkan dalam praktik peningkatan kualitas manufaktur (Montgomery, 2009; Mitra, 2008). Meskipun pendekatan ini terbukti efektif, penggunaannya secara terpisah membutuhkan waktu analisis yang lebih lama serta berpotensi menimbulkan inkonsistensi interpretasi, sehingga rekomendasi perbaikan yang dihasilkan kurang aplikatif di tingkat operasional (Katon & Karningsih, 2023).

Untuk mengatasi keterbatasan pendekatan tersebut, Katon dan Karningsih (2023) mengembangkan *Quality Improvement Matrix* (QIM), yaitu *tool* terintegrasi yang mengadopsi struktur *House of Risk* (HOR) dan menggabungkan *House of Quality* (HOQ), *Root Cause Analysis* (RCA), serta FMEA dalam satu kerangka analisis. Namun demikian, QIM versi Katon dan Karningsih (2023) memiliki tiga keterbatasan utama. Pertama, parameter *Severity* pada QIM hanya bersifat kualitatif tanpa mempertimbangkan dimensi ekonomi. Kedua, QIM tidak mempertimbangkan parameter *Detection*, padahal *defect* yang sulit dideteksi memiliki risiko lebih besar dibanding *defect* yang mudah terdeteksi meskipun tingkat keparahannya sama (Stamatis, 2003; AIAG & VDA, 2019). Ketiga, penilaian tingkat kesulitan implementasi pada QIM 2 hanya menggunakan skala kualitatif tanpa mempertimbangkan kriteria biaya dan waktu implementasi secara eksplisit (Partiwi et al., 2023).

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, penelitian ini mengembangkan QIM melalui pengintegrasian konsep *Extended FMEA* ke dalam struktur matriksnya. Pengembangan pertama adalah pengintegrasian parameter *Severity Cost* (C) dan *Detection* (D) ke dalam QIM 1 di samping parameter *Severity* non-biaya (S) yang sudah ada. Pengembangan kedua adalah pengayaan *preventive action* pada QIM 2 dengan menggunakan alat-alat *Jidoka* sebagai kerangka rekomendasi perbaikan, meliputi *Andon* dan *Poka-Yoke*. Selain itu, parameter Dk pada QIM 2 dikembangkan dengan mempertimbangkan kriteria biaya dan waktu implementasi mengacu pada Partiwi et al. (2023).

Dengan dua pengembangan tersebut, penelitian ini mengintegrasikan konsep *Extended FMEA* ke dalam framework *Quality Improvement Matrix* sehingga menghasilkan kerangka yang lebih komprehensif dibandingkan versi Katon dan Karningsih (2023). Proses analisis tidak hanya mencakup identifikasi dan prioritas akar penyebab *defect*, tetapi juga mempertimbangkan dampak ekonomi, kemampuan deteksi, serta menghasilkan rekomendasi perbaikan terstruktur berbasis *Jidoka*. Framework yang dikembangkan bersifat umum sehingga dapat diterapkan pada berbagai industri manufaktur dan divalidasi melalui penerapan pada studi kasus di PT X.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode *quasi experiment* dan studi kasus yang bertujuan mengembangkan serta menerapkan *Quality Improvement Matrix* (QIM) yang terintegrasi dengan *Extended Failure Mode and Effect Analysis* (*Extended FMEA*) dan konsep *Jidoka* pada industri manufaktur. Penelitian dilaksanakan pada industri *foundry* yang memproduksi bogie sebagai objek studi kasus selama periode pengumpulan dan pengolahan data penelitian. Populasi penelitian meliputi seluruh data proses produksi, data *defect*, serta aktivitas pengendalian kualitas pada perusahaan, sedangkan sampel penelitian

ditentukan secara *purposive* berdasarkan data defect, lini proses, dan akar penyebab yang relevan dengan tujuan penelitian. Instrumen penelitian berupa lembar observasi, pedoman wawancara, dokumen produksi dan kualitas perusahaan, *Fishbone Diagram* berbasis pendekatan 6M, serta matriks QIM yang dikembangkan. Teknik pengumpulan data dilakukan melalui observasi lapangan, wawancara dengan operator, teknisi, dan *quality control*, studi dokumentasi, serta *focus group discussion (FGD)* dengan para ahli perusahaan. Data yang diperoleh dianalisis menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif melalui identifikasi defect, *Root Cause Analysis (RCA)*, penilaian parameter *Severity (S)*, *Severity Cost (C)*, *Occurrence (O)*, *Detection (D)*, dan relasi (R), perhitungan *Value of Aggregate Defect (VAD)*, penentuan prioritas akar penyebab defect, penyusunan *preventive action* berbasis *Jidoka*, serta validasi internal, eksternal, dan komparatif untuk menilai efektivitas framework yang dikembangkan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

**Quality Improvement Matrix 1
Identifikasi Defect dan Lini Proses**

Tabel 1. Distribusi Volume Afkir per Jenis Defect

No.	Kode Defect	Jenis Defect	Klasifikasi ICFTA	Total Afkir (kg)	Persentase (%)	% Kumulatif
1	D1	Gas Hole	Gas Porosity (B100–B124)	15.981	30,38%	30,38%
2	D2	Cold Shut	Cold Shut (C300–C331)	13.806	26,24%	56,62%
3	D4	Core Geser	Incorrect Dimensions (F100–F231)	5.298	10,07%	66,69%
4	D5	Break Mould	Metallic Projection / Mold Failure (E100–E131)	4.841	9,20%	75,90%
5	D3	Cross Joint	Crack (C100–C222)	4.287	8,15%	84,05%
6	-	Mech. Prop	Mechanical Properties Failure	3.782	6,49%	89,70%
7	-	Slag	Slag Inclusion	2.280	3,91%	93,61%
8	-	Crack	Crack (general)	2.499	4,29%	97,90%
9	-	Mulet	Sand Drop / Mulet	450	0,77%	98,67%
10	-	Chemical	Chemical Composition OOSpec	320	0,55%	99,22%
TOTAL				52.606	100%	

Berdasarkan Tabel 1, *Gas Hole* merupakan *defect* dengan volume afkir tertinggi sebesar 15.981 kg (30,38%), diikuti *Cold Shut* sebesar 13.806 kg (26,24%). Lima *defect* dengan volume afkir tertinggi yaitu *Gas Hole*, *Cold Shut*, *Core Geser*, *Break Mould*, dan *Cross Joint* secara kumulatif menyumbang 44.213 kg atau 84,05% dari total massa afkir. Dengan demikian, penanganan kelima *defect* tersebut memiliki potensi dampak terbesar terhadap pengurangan afkir di *Foundry X*. Atas dasar pertimbangan tersebut, penelitian ini memfokuskan analisis pada 5 *defect* dominan ini (D1–D5), yang diklasifikasikan berdasarkan standar ICFTA (*International Committee of Foundry Technical Associations*) sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Identifikasi Lima Defect Dominan Produk Bogie di Foundry X

No.	Kode	Jenis Defect	Klasifikasi ICFTA	Lini Proses Terjadinya	Deskripsi Teknis
1	D1	Gas Hole	Gas Porosity (B100–B124)	Moulding – Pouring	Rongga akibat gas (H ₂ , CO, N ₂) terperangkap dalam logam cair selama solidifikasi
2	D2	Cold Shut	Cold Shut (C300–C331)	Melting – Pouring	Dua aliran logam cair tidak menyatu sempurna karena temperatur atau kecepatan tuang di bawah standar
3	D3	Cross Joint	Crack (C100–C222)	Shakeout – Finishing	Retak pada sambungan atau permukaan produk akibat tegangan termal atau mekanis selama pendinginan
4	D4	Core Geser	Incorrect Dimensions (F100–F231)	Setting Core – Pouring	Pergeseran posisi inti cetak (core) menyebabkan ketidaksesuaian dimensi rongga produk
5	D5	Break Mould	Metallic Projection / Mold Failure (E100–E131)	Moulding – Pouring	Kerusakan cetakan pasir menyebabkan cacat bentuk berupa flash, fin, atau proyeksi logam berlebih

Dari Tabel 2 dapat diketahui bahwa kelima *defect* dominan tersebar di tahapan proses yang berbeda. *Gas Hole* dan *Cold Shut* berasal dari tahapan *Moulding* hingga *Pouring*, sehingga akar penyebabnya berkaitan erat dengan kualitas cetakan dan parameter penuangan logam cair. *Cross Joint* terjadi pada rentang yang lebih luas dari *Shakeout* hingga *Finishing*, menunjukkan bahwa faktor pendinginan dan penanganan produk turut berkontribusi. *Core Geser* bersumber dari tahap *Setting Core* hingga *Pouring*, dan *Break Mould* murni merupakan kegagalan cetakan pada tahap *Moulding* hingga *Pouring*.

Identifikasi Akar Penyebab *Defect*

Tabel 3. Rekapitulasi Akar Penyebab *Defect* Produk Bogie di Foundry

No	Defect	Kategori 6M	Akar Penyebab Defect	Kode
1	Gas Hole	Method	Sistem venting (saluran gas) cetakan kurang memadai	A1
2		Method	Tidak dilakukan degassing logam cair sebelum penuangan	A2
3		Method	Holding time cetakan-penuangan terlalu lama	A3
4		Material	Permeabilitas pasir cetak terlalu rendah	A4
5		Material	Kadar air (moisture) pasir cetak terlalu tinggi	A5
6		Man	Operator menuang terlalu tinggi dari sprue (turbulensi)	A6
7		Man	Rongga cetakan kurang dibersihkan dari kotoran/debu	A7
8		Environment	Kelembapan udara area moulding tinggi (musim hujan)	A8
9	Cold Shut	Method	Temperatur penuangan aktual di bawah standar	A9
10		Method	Kecepatan penuangan terlalu lambat	A10
11		Machine	Desain gating system terlalu panjang atau sempit	A11
12		Machine	Pre-heating ladle tidak optimal	A12
13		Material	Fluiditas logam rendah (komposisi tidak standar)	A13
14		Man	Penuangan dilakukan terputus-putus (interrupted pouring)	A14
15	Cross Joint	Man	Handling kasar dan assembly cetakan tidak presisi	A15
16		Machine	Mismatch cope-drag; perubahan ketebalan mendadak	A16
17		Method	Pendinginan tidak merata; shakeout terlalu cepat	A17
18		Material	Kandungan S/P tinggi; kekakuan pasir hambat kontraksi	A18
19		Measurement	Tidak ada mismatch check; suhu antar-tahap tidak terukur	A19
20		Environment	Gradien suhu lingkungan sebabkan pendinginan tak seragam	A20

21	Core Geser	Man	Pemasangan core/chaplet kurang presisi atau tidak terkunci	A21
22		Machine	Core print aus/longgar; dudukan core kurang rigid	A22
23		Method	Gaya buoyancy dan laju penuangan menggeser core	A23
24		Material	Kekuatan core rendah; melengkung saat kontak logam panas	A24
25		Measurement	Tidak ada verifikasi posisi/dimensi core sebelum cetakan ditutup	A25
26		Environment	Getaran area kerja menggeser setting core	A26
27	Break Mould	Man	Handling cetakan kasar dan ramming tidak merata	A27
28		Machine	Flask atau pola aus dan rusak	A28
29		Method	Tekanan/kecepatan penuangan tinggi; clamping kurang kuat	A29
30		Material	Kekuatan ikat pasir (binder/bentonite) rendah	A30
31		Measurement	Mould hardness tidak diukur sebelum penuangan	A31
32		Environment	Kelembapan lingkungan menurunkan kekuatan pasir cetak	A32

Dari Tabel 3 terlihat bahwa 32 akar penyebab terdistribusi ke seluruh kategori 6M sebagai berikut: *Method* (10 akar penyebab: A1, A2, A3, A9, A10, A17, A23, A29, dan lainnya), *Man* (7 akar penyebab: A6, A7, A14, A15, A21, A27, dan lainnya), *Material* (6 akar penyebab: A4, A5, A13, A18, A24, A30), *Machine* (5 akar penyebab: A11, A12, A16, A22, A28), *Measurement* (3 akar penyebab: A19, A25, A31), dan *Environment* (4 akar penyebab: A8, A20, A26, A32). Dominasi kategori *Method* menunjukkan bahwa prosedur dan standar operasional proses pengecoran merupakan area yang paling banyak membutuhkan perhatian dalam upaya perbaikan kualitas. Penilaian parameter S, C, D, O, dan R untuk setiap akar penyebab diuraikan pada subbab-subbab berikutnya.

Penilaian Parameter *Severity Non-Cost* (S)

Tabel 4. Skala Penilaian *Severity Non-Cost* (S) dari Defect Produk

Rating (S)	Kategori	Kriteria Dampak Defect terhadap Kualitas Produk	Defect Bogie yang Masuk Kategori Ini
10	Hazardous without Warning	Mode kegagalan menimbulkan risiko keselamatan tanpa peringatan; produk gagal total	-
9	Hazardous with Warning	Berpotensi membahayakan keselamatan; ada peringatan sebelum gagal; produk wajib scrap	-
8	Very High	Cacat berat scrap total; tidak dapat diperbaiki dan tidak dapat lanjut proses	-
7	High	Cacat berat rework intensif (welding, grinding besar); berpotensi scrap	-
6	Moderate	Cacat sedang masih dapat di-rework untuk memenuhi spesifikasi; mempengaruhi performa	Cold Shut (D2)
5	Low	Penurunan kualitas dalam batas toleransi setelah rework ringan; fungsi utama tidak terpengaruh	Gas Hole (D1), Core Geser (D4)
4	Very Low	Cacat ringan finishing minor (grinding/dempul); tidak mempengaruhi fungsi produk	Cross Joint (D3)
3	Minor	Cacat kosmetik kecil; tidak mempengaruhi fungsi maupun penampilan secara signifikan	Break Mould (D5)
2	Very Minor	Penyimpangan sangat kecil; hanya terdeteksi inspeksi detail	-
1	None	Tidak terdapat dampak terhadap kualitas produk maupun proses	-

Berdasarkan Tabel 4, skala *Severity* yang relevan untuk kelima *defect* dominan berada pada rentang nilai 3 hingga 6, mencerminkan bahwa tidak ada *defect* yang berdampak pada risiko keselamatan langsung (S=8-10) maupun yang berdampak sangat kecil (S=1-2). Penilaian *Severity* dilakukan oleh tim QC Foundry X melalui *Focus Group Discussion* (FGD) dengan mempertimbangkan kondisi nyata proses produksi bogie. Hasil penilaian *Severity* untuk kelima *defect* dominan ditunjukkan pada Tabel 5 berikut.

Tabel 5. Penilaian Nilai *Severity Non-Cost (S) Defect* Produk Bogie

No.	Kode	Jenis Defect	Nilai S	Justifikasi Penilaian
1	D1	Gas Hole	5	Gas Hole masih dapat di-rework melalui proses gouging dan welding setelah terdeteksi pada tahap NDT (MPI/UT). Fungsi utama produk tidak terpengaruh setelah rework, namun kualitas material di area tersebut menurun. Sesuai kategori Low pada skala Severity.
2	D2	Cold Shut	6	Cold Shut menyebabkan ketidaksempurnaan fusi logam yang berdampak pada performa mekanis produk. Masih dapat di-rework dengan welding, namun mempengaruhi performa struktural bogie. Sesuai kategori Moderate pada skala Severity.
3	D3	Cross Joint	4	Cross Joint berupa retak ringan pada permukaan sambungan yang dapat diperbaiki dengan grinding dan welding minor. Tidak mempengaruhi fungsi struktural utama bogie. Sesuai kategori Very Low pada skala Severity.
4	D4	Core Geser	5	Core Geser menyebabkan penyimpangan dimensi rongga produk yang memerlukan koreksi machining. Fungsi utama masih dapat dipulihkan setelah rework, namun toleransi dimensi kritis bogie menjadi terbatas. Sesuai kategori Low pada skala Severity.
5	D5	Break Mould	3	Break Mould menghasilkan cacat berupa flash atau fin pada permukaan produk yang bersifat kosmetik dan mudah diperbaiki dengan grinding minor. Tidak mempengaruhi fungsi maupun dimensi kritis bogie. Sesuai kategori Minor pada skala Severity.

Berdasarkan Tabel 5, *Cold Shut* mendapatkan nilai S tertinggi (S = 6, kategori *Moderate*) karena cacat ini berdampak pada performa mekanis struktural bogie dan memerlukan *rework welding* yang mempengaruhi integritas material. *Gas Hole* dan *Core Geser* sama-sama mendapatkan S = 5 (*Low*), mencerminkan bahwa kedua *defect* ini masih dapat diperbaiki melalui *rework* dengan memulihkan fungsi produk dalam batas toleransi. *Cross Joint* mendapat S = 4 (*Very Low*) karena retak yang terjadi umumnya bersifat permukaan dan dapat diperbaiki tanpa mempengaruhi fungsi struktural utama. *Break Mould* mendapat nilai S terendah (S = 3, *Minor*) karena dampaknya murni bersifat kosmetik.

Distribusi nilai S menunjukkan variasi yang relatif kecil (rentang 3-6) di antara kelima *defect*. Kondisi ini menggambarkan bahwa secara keparahan teknis, kelima *defect* berada pada tingkat yang serupa tidak ada satu pun *defect* yang jauh lebih berbahaya secara teknis dibanding yang lain. Oleh karena itu, parameter S saja tidak cukup untuk membedakan prioritas penanganan secara bermakna, yang justru menegaskan pentingnya penambahan parameter C dan D dalam *framework Extended FMEA* yang dikembangkan.

Penilaian Parameter *Severity Cost (C)*

Tabel 5. Skala Penilaian *Severity Cost (C)* dari *Defect* Produk

Rating (C)	Kategori	Kriteria Biaya Tambahan per Set Bogie	Defect Bogie yang Masuk Kategori Ini
10	Extremely High	≥ Rp 12.000.000	-
9	Very High	Rp 9.500.000 - < Rp 12.000.000	-
8	High	Rp 7.500.000 - < Rp 9.500.000	-
7	Moderately High	Rp 5.500.000 - < Rp 7.500.000	-
6	Moderate-High	Rp 3.800.000 - < Rp 5.500.000	Core Geser (D4)
5	Moderate	Rp 2.500.000 - < Rp 3.800.000	Cold Shut (D2), Cross Joint (D3)
4	Low-Moderate	Rp 1.400.000 - < Rp 2.500.000	Gas Hole (D1)
3	Low	Rp 700.000 - < Rp 1.400.000	Break Mould (D5)
2	Very Low	Rp 300.000 - < Rp 700.000	-
1	Negligible	< Rp 300.000	-

Penilaian *Severity Cost* dilakukan melalui *Focus Group Discussion* (FGD) dengan tim QC dan kepala bagian produksi Foundry X, dengan mengacu pada skala biaya yang telah dikalibrasi dari data NCR 2021. Penilaian mempertimbangkan estimasi total biaya *rework* per set bogie yang mencakup biaya tenaga kerja, material, penggunaan mesin, dan pengujian ulang (NDT). Hasil penilaian C untuk kelima *defect* dominan ditunjukkan pada Tabel 7.

Tabel 6 Penilaian Nilai *Severity Cost* (C) *Defect* Produk Bogie

No.	Kode	Jenis Defect	Nilai C	Justifikasi Penilaian
1	D1	Gas Hole	4	Rework Gas Hole mencakup proses gouging, welding repair, dan NDT ulang (MPI/UT). Berdasarkan data NCR 2021, biaya perbaikan per unit berkisar Rp 1.400.000 - < Rp 2.500.000 (rata-rata setara Shaft Bracket dan produk sejenisnya). Masuk kategori Low-Moderate (C = 4).
2	D2	Cold Shut	5	Rework Cold Shut memerlukan welding repair pada area sambungan, diikuti pengujian NDT dan finishing. Berdasarkan data NCR 2021 untuk Bolster dan Side Frame standar (kisaran Rp 2.154.916 - Rp 2.219.478 per unit), biaya masuk kategori Moderate (C = 5), rentang Rp 2.500.000 - < Rp 3.800.000.
3	D3	Cross Joint	5	Rework Cross Joint mencakup welding repair retak dan heat treatment ulang untuk menghilangkan tegangan sisa. Biaya setara dengan Cold Shut mengingat prosedur perbaikan yang serupa. Berdasarkan data NCR 2021, masuk kategori Moderate (C = 5), rentang Rp 2.500.000 - < Rp 3.800.000.
4	D4	Core Geser	6	Core Geser mengakibatkan penyimpangan dimensi yang memerlukan koreksi machining dan re-MPI. Biaya perbaikan tergolong tinggi karena melibatkan mesin CNC dan pengujian ulang dimensional. Berdasarkan data NCR 2021 untuk Bolster S2E/S2C premium (Rp 4.152.207 - Rp 5.181.474), masuk kategori Moderate-High (C = 6), rentang Rp 3.800.000 - < Rp 5.500.000.
5	D5	Break Mould	3	Break Mould menghasilkan cacat flash/fin yang dapat diperbaiki dengan grinding minor. Biaya perbaikan rendah karena tidak memerlukan welding atau NDT khusus. Berdasarkan data NCR 2021 untuk produk kecil (Rp 236.783 - Rp 414.733), diskalakan ke produk bogie, masuk kategori Low (C = 3), rentang Rp 700.000 - < Rp 1.400.000.

Berdasarkan Tabel 7, *Core Geser* mendapatkan nilai C tertinggi (C = 6, *Moderate-High*) dengan estimasi biaya Rp 3.800.000 - < Rp 5.500.000 per set bogie, karena perbaikannya memerlukan koreksi *machining* CNC dan re-MPI yang biayanya tergolong tinggi. *Cold Shut* dan *Cross Joint* sama-sama mendapatkan C = 5 (*Moderate*) karena keduanya memerlukan *welding repair* yang melibatkan material filler dan *heat treatment* lokal. *Gas Hole* mendapat C = 4 (*Low-Moderate*) karena *rework*-nya berupa *gouging* dan *welding* yang relatif lebih sederhana. *Break Mould* mendapat nilai C terendah (C = 3, *Low*) karena dampak biayanya minimal hanya berupa *grinding minor*.

Penting dicatat bahwa terdapat perbedaan urutan antara ranking S dan ranking C pada beberapa *defect*. *Core Geser* (S=5) memiliki C lebih tinggi (C=6) dibanding *Cold Shut* (S=6, C=5), menunjukkan bahwa *defect* yang secara teknis lebih ringan dapat memiliki dampak ekonomi yang lebih besar fenomena yang persis seperti yang diidentifikasi oleh Von Ahsen (2008) sebagai kelemahan utama FMEA konvensional yang tidak mempertimbangkan dimensi biaya.

Penilaian Parameter *Detection* (D)

Tabel 7. Skala Penilaian *Detection* (D) dari *Defect* Produk

Rating (D)	Kategori	Kriteria Kemampuan Sistem Deteksi	Defect Bogie yang Masuk Kategori Ini
10	Almost Impossible	Alat/sistem tidak mampu mendeteksi defect sebelum produk ke pelanggan	-
9	Very Remote	Kemampuan deteksi sangat kecil; hanya mungkin pada inspeksi destruktif	-
8	Remote	Defect hanya teridentifikasi pada inspeksi khusus yang tidak rutin	-
7	Very Low	Deteksi rendah; defect sering lolos dari kontrol rutin	-
6	Low	Beberapa metode deteksi tersedia namun tidak selalu efektif; probabilitas deteksi rendah	Gas Hole (D1)
5	Moderate	Kadang terdeteksi melalui inspeksi visual atau pengukuran dimensional rutin	-
4	Moderately High	Cukup mudah terdeteksi melalui MPI atau pengukuran rutin antar tahap proses	Cold Shut (D2), Core Geser (D4)
3	High	Mudah terdeteksi dengan inspeksi rutin (visual + alat ukur) di tahap proses	Cross Joint (D3)
2	Very High	Hampir selalu terdeteksi melalui sistem kontrol otomatis atau inspeksi 100%	-
1	Almost Certain	Pasti terdeteksi melalui sistem poka-yoke atau sensor otomatis	Break Mould (D5)

Penilaian parameter D dilakukan melalui FGD dengan tim QC Foundry X dengan mempertimbangkan efektivitas seluruh titik inspeksi yang ada dalam proses produksi bogie, mulai dari inspeksi visual *pasca-shakeout* hingga MPI II sebelum *component application*. Hasil penilaian D untuk kelima *defect* dominan ditunjukkan pada Tabel 9.

Tabel 8. Penilaian Nilai *Detection* (D) *Defect* Produk Bogie

No.	Kode	Jenis Defect	Nilai D	Justifikasi Penilaian
1	D1	Gas Hole	6	Gas Hole berupa rongga internal yang tidak terlihat dari luar. Sistem deteksi yang tersedia (MPI dan UT) tidak selalu efektif karena rongga kecil di bagian dalam sering lolos dari area scanning yang tidak mencakup seluruh volume produk. Defect baru dapat dipastikan setelah machining atau saat NDT area spesifik dilakukan. Sesuai kategori Low (D = 6) pada skala <i>Detection</i> .
2	D2	Cold Shut	4	Cold Shut pada permukaan sambungan relatif mudah terdeteksi melalui inspeksi visual setelah <i>shakeout</i> dan MPI rutin. Sistem inspeksi 100% pada tahap QC Inspect mampu mendeteksi sebagian besar Cold Shut sebelum produk berlanjut ke machining. Sesuai kategori Moderately High (D = 4) pada skala <i>Detection</i> .
3	D3	Cross Joint	3	Cross Joint berupa retak yang tampak jelas secara visual pada permukaan produk setelah <i>shakeout</i> . Inspeksi visual rutin oleh operator QC dikombinasikan dengan MPI tahap pertama (MPI I) dapat mendeteksi Cross Joint dengan andal. Sesuai kategori High (D = 3) pada skala <i>Detection</i> .
4	D4	Core Geser	4	Core Geser terdeteksi melalui pengukuran dimensional setelah <i>shakeout</i> atau pada tahap Gage + Visual. Meskipun ada inspeksi dimensional, penyimpangan kecil (<2 mm) dapat lolos dari pengukuran manual dan baru terdeteksi saat machining. Sesuai kategori Moderately High (D = 4) pada skala <i>Detection</i> .
5	D5	Break Mould	1	Break Mould menghasilkan cacat yang tampak secara langsung dan nyata pada produk — berupa flash, fin, atau proyeksi logam berlebih — yang langsung terlihat saat <i>shakeout</i> oleh operator tanpa memerlukan alat bantu khusus. Tidak ada kemungkinan lolos dari inspeksi. Sesuai kategori Almost Certain (D = 1) pada skala <i>Detection</i> .

Berdasarkan Tabel 9, *Gas Hole* mendapatkan nilai D tertinggi (D = 6, kategori *Low*) yang mencerminkan bahwa rongga internal akibat *porosity* sering tidak terdeteksi melalui inspeksi visual standar dan baru dapat diidentifikasi melalui MPI/UT pada area tertentu. *Cold Shut* dan *Core Geser* sama-sama mendapat D = 4 (*Moderately High*) karena keduanya cukup mudah dideteksi melalui inspeksi visual dan MPI rutin. *Cross Joint* mendapat D = 3 (*High*) karena retak permukaan sangat mudah diidentifikasi secara visual. *Break Mould* mendapat D = 1 (*Almost Certain*) cacat langsung terlihat nyata saat *shakeout* tanpa memerlukan alat bantu apapun.

Nilai D *Gas Hole* yang tinggi (6) dibandingkan *Cold Shut* (4) dan *Core Geser* (4) memiliki implikasi penting terhadap prioritasasi. Meski secara keparahan teknis (S) *Gas Hole* lebih ringan dari *Cold Shut*, kemampuan deteksi *Gas Hole* yang lebih rendah menyebabkan risiko sesungguhnya lebih besar *defect* yang tidak terdeteksi berpotensi sampai ke pelanggan dan membahayakan keselamatan.

Penilaian Parameter Occurrence (O)

Tabel 9. Skala Penilaian Occurrence (O) dari Akar Penyebab Defect

Rating (O)	Kategori	Deskripsi	Frekuensi Kemunculan
10	Very High	Akar penyebab defect tidak bisa dihindari	Terjadi setiap hari
9	Very High	Akar penyebab defect hampir selalu terjadi	Terjadi setiap hari
8	High	Akar penyebab defect berulang terjadi	Terjadi setiap minggu
7	Moderately High	Akar penyebab cukup sering terjadi	Terjadi setiap minggu
6	Moderate	Akar penyebab sesekali terjadi	Terjadi setiap bulan
5	Low-Moderate	Akar penyebab jarang-sedang terjadi	Terjadi setiap bulan
4	Low	Akar penyebab jarang terjadi	Terjadi setiap tahun
3	Very Low	Akar penyebab sangat jarang terjadi	Terjadi setiap tahun
2	Remote	Akar penyebab hampir tidak mungkin terjadi	-
1	Extremely Unlikely	Akar penyebab tidak mungkin terjadi	-

Penilaian O dilakukan dengan cara turun langsung ke lini produksi Foundry X, dengan menilai frekuensi kemunculan masing-masing akar penyebab ditunjukkan pada Tabel 11.

Tabel 10. Penilaian Nilai Occurrence (O) Akar Penyebab Defect

No.	ID	Defect	Akar Penyebab Defect	Nilai O	Kategori
1	A1	Gas Hole	Sistem venting (saluran gas) cetakan kurang memadai	6	Moderate
2	A2		Tidak dilakukan degassing logam cair sebelum penuangan	5	Low-Moderate
3	A3		Holding time cetakan-penuangan terlalu lama	7	Moderately High
4	A4		Permeabilitas pasir cetak terlalu rendah	6	Moderate
5	A5		Kadar air (moisture) pasir cetak terlalu tinggi	8	High
6	A6		Operator menuang terlalu tinggi dari sprue (turbulensi)	7	Moderately High
7	A7		Rongga cetakan kurang dibersihkan dari kotoran/debu	6	Moderate
8	A8		Kelembapan udara area moulding tinggi (musim hujan)	8	High
9	A9	Cold Shut	Temperatur penuangan aktual di bawah standar	7	Moderately High
10	A10		Kecepatan penuangan terlalu lambat	6	Moderate
11	A11		Desain gating system terlalu panjang atau sempit	5	Low-Moderate
12	A12		Pre-heating ladle tidak optimal	6	Moderate
13	A13		Fluiditas logam rendah (komposisi tidak standar)	4	Low
14	A14		Penuangan dilakukan terputus-putus (interrupted pouring)	7	Moderately High
15	A15	Cross Joint	Handling kasar dan assembly cetakan tidak presisi	6	Moderate
16	A16		Mismatch cope-drag; perubahan ketebalan mendadak	7	Moderately High
17	A17		Pendinginan tidak merata; shakeout terlalu cepat	8	High
18	A18		Kandungan S/P tinggi; kekakuan pasir hambat kontraksi	5	Low-Moderate
19	A19		Tidak ada mismatch check; suhu antar-tahap tidak terukur	6	Moderate
20	A20		Gradien suhu lingkungan sebabkan pendinginan tak seragam	4	Low
21	A21	Core Geser	Pemasangan core/chaplet kurang presisi atau tidak terkunci	7	Moderately High
22	A22		Core print aus/longgar;udukan core kurang rigid	8	High
23	A23		Gaya buoyancy dan laju penuangan menggeser core	9	Very High
24	A24		Kekuatan core rendah; melengkung saat kontak logam panas	6	Moderate
25	A25		Tidak ada verifikasi posisi/dimensi core sebelum cetakan ditutup	7	Moderately High
26	A26		Getaran area kerja menggeser setting core	3	Very Low
27	A27	Break Mould	Handling cetakan kasar dan ramming tidak merata	6	Moderate
28	A28		Flask atau pola aus dan rusak	7	Moderately High
29	A29		Tekanan/kecepatan penuangan tinggi; clamping kurang kuat	9	Very High
30	A30		Kekuatan ikat pasir (binder/bentonite) rendah	8	High
31	A31		Mould hardness tidak diukur sebelum penuangan	6	Moderate
32	A32		Kelembapan lingkungan menurunkan kekuatan pasir cetak	5	Low-Moderate

Berdasarkan Tabel 11, terdapat dua akar penyebab yang mendapatkan nilai O tertinggi (O = 9, *Very High*), yaitu A23 (Gaya *buoyancy* dan laju penuangan menggeser *core*) dan A29 (Tekanan/kecepatan penuangan tinggi, *clamping* kurang kuat). Nilai O = 9 menunjukkan bahwa kedua kondisi tersebut hampir selalu terjadi dalam proses penuangan logam, terutama karena sifat fisika yang *inherent* gaya *buoyancy* pada *core* bersifat alami dan tidak dapat dihilangkan sepenuhnya, hanya dapat dimitigasi.

Lima akar penyebab mendapatkan O = 8 (*High*, terjadi setiap minggu), yaitu A5, A8, A17, A22, dan A30, yang mencerminkan frekuensi tinggi akibat faktor lingkungan (kelembapan) dan kondisi peralatan (keausan *core print*). Mayoritas akar penyebab (10 dari 32) berada pada skala O = 6 (*Moderate*, terjadi setiap bulan). Satu akar penyebab dengan O

terendah adalah A26 (Getaran area kerja menggeser *core*) dengan $O = 3$, menunjukkan bahwa getaran sebagai faktor eksternal sangat jarang menjadi penyebab *Core Geser*.

Distribusi nilai O menunjukkan bahwa sebagian besar akar penyebab memiliki frekuensi kemunculan pada tingkat moderat hingga tinggi ($O = 5-8$), dengan rata-rata O sebesar 6,41. Kondisi ini mencerminkan karakteristik industri foundry yang prosesnya sangat bergantung pada kondisi lingkungan, kualitas material, dan keterampilan operator faktor-faktor yang sulit dikontrol secara konsisten tanpa sistem pengendalian yang terstruktur.

Pemetaan Relasi *Defect*-Akar Penyebab (R)

Tabel 11. Skala Penilaian Relasi *Defect*-Akar Penyebab (R)

Nilai R	Kategori Relasi	Kriteria
0	Tidak ada relasi	Akar penyebab tidak berkontribusi terhadap terjadinya defect yang bersangkutan
1	Relasi lemah	Akar penyebab berperan kecil dalam menyebabkan terjadinya defect; pengaruhnya terbatas
3	Relasi sedang	Akar penyebab berperan sedang dalam menyebabkan terjadinya defect; ada hubungan kausal yang teridentifikasi
9	Relasi kuat	Akar penyebab berperan besar dan langsung dalam menyebabkan terjadinya defect

Perhitungan Nilai *Value of Aggregate Defect (VAD)* dan Perangkingan Akar Penyebab

Setelah diperoleh seluruh nilai parameter S , C , D , O , dan R untuk setiap *defect* dan akar penyebabnya, langkah selanjutnya adalah menghitung nilai *Value of Aggregate Defect (VAD)* dari setiap akar penyebab. *VAD* merupakan pengembangan dari nilai *Aggregate Root Cause (ARC)* yang diusulkan Katon & Karningsih (2023) dengan mengintegrasikan parameter C dan D dari konsep *Extended FMEA*. Formula perhitungan *VAD* adalah sebagai berikut:

$$VAD_j = O_j \times \sum_i (S_i \times C_i \times D_i \times R_{ij})$$

Keterangan:

- VAD_j = *Value of Aggregate Defect* untuk akar penyebab ke- j
- O_j = Nilai *Occurrence* akar penyebab ke- j (skala 1-10)
- S_i = Nilai *Severity Non-Cost defect* ke- i (skala 1-10)
- C_i = Nilai *Severity Cost defect* ke- i (skala 1-10)
- D_i = Nilai *Detection defect* ke- i (skala 1-10)
- R_{ij} = Nilai relasi antara *defect* ke- i dan akar penyebab ke- j (skala 0/1/3/9)
- i = Indeks *defect* (1 sampai dengan jumlah *defect*)
- j = Indeks akar penyebab (1 sampai dengan jumlah akar penyebab)

Tabel 12. Contoh Perhitungan *VAD* untuk Lima Akar Penyebab Peringkat Tertinggi

ID	Defect	Akar Penyebab	O_i	S_i	C_i	D_i	R_{ij}	Perhitungan	VAD
A23	Core Geser	Gaya buoyancy & laju penuangan menggeser core	9	5	6	4	9	$VAD_{A23} = 9 \times (5 \times 6 \times 4 \times 9) = 9 \times 1.080$	9.720
A22	Core Geser	Core print aus/longgar, kedudukan core kurang rigid	8	5	6	4	9	$VAD_{A22} = 8 \times (5 \times 6 \times 4 \times 9) = 8 \times 1.080$	8.640
A8	Gas Hole	Kelembapan udara area moulding tinggi (musim hujan)	8	5	4	6	9	$VAD_{A8} = 8 \times (5 \times 4 \times 6 \times 9) = 8 \times 1.080$	8.640
A5	Gas Hole	Kadar air (moisture) pasir cetak terlalu tinggi	8	5	4	6	9	$VAD_{A5} = 8 \times (5 \times 4 \times 6 \times 9) = 8 \times 1.080$	8.640
A25	Core Geser	Tidak ada verifikasi posisi/dimensi core sebelum cetakan ditutup	7	5	6	4	9	$VAD_{A25} = 7 \times (5 \times 6 \times 4 \times 9) = 7 \times 1.080$	7.560

Sebagai contoh, perhitungan VAD untuk A23 adalah:
 $VAD_{A23} = 9 \times (5 \times 6 \times 4 \times 9) = 9 \times 1.080 = 9.720$. Nilai ini diperoleh dari: $O_{A23} = 9$ (very high), kemudian dikalikan dengan perkalian $S_{D4} \times C_{D4} \times D_{D4} \times X_{R_{D4,A23}} = 5 \times 6 \times 4 \times 9 = 1.080$. Perhitungan serupa diterapkan untuk seluruh 32 akar penyebab. Matriks lengkap 5 defect \times 32 akar penyebab beserta seluruh nilai VAD disajikan pada Tabel 5.14 berikut. Karena matriks berukuran lebar, tabel ini ditampilkan dalam orientasi landscape seperti berikut.

Tabel 13. Matriks Quality Improvement Matrix 1

Lini Proses	Defect	Man					Machine					Material					Method					Measurement			Environment				S	C	D						
		A6	A7	A14	A15	A21	A27	A11	A12	A16	A22	A28	A4	A5	A13	A18	A24	A30	A1	A2	A3	A9	A10	A17	A23	A29	A19	A25				A31	A8	A20	A26	A32	
Moulding-Pouting	Gas Hole	9	9								9	9	9						9	9	9						9								5	4	6
Melting-Pouting	Cold Shut			9				9	9					9							9	9													6	5	4
Shakeout-Finishing	Cross Joint				9					9					9								9			9			9						4	5	3
Setting-Core-Pouting	Core Geser					9					9					9									9		9								5	6	4
Moulding-Pouting	Break Mould						9				9						9								9		9						9	3	3	1	
Occurrence Akar Penyebab (O)		7	6	7	6	7	6	7	6	5	6	7	6	8	4	5	6	8	6	5	7	7	6	8	9	9	6	7	6	8	4	3	5				
Value of Aggregate Defect (VAD)		7.6	6.5	7.6	3.2	7.6	4.86	5.4	6.5	3.8	8.6	5.67	6.5	8.6	4.3	2.7	6.5	6.48	6.5	5	7.6	7.6	6.5	4.3	9.7	7.29	3.2	7.6	4.86	8.6	2.2	3.2	4.05				
Prioritas Akar Penyebab		9	14	7	24	6	31	17	12	21	2	29	15	4	20	25	11	28	16	18	10	8	13	19	1	27	23	5	30	3	26	22	32				

Berdasarkan Matriks QIM 1 pada Tabel 14, nilai VAD tertinggi dimiliki oleh A23 dari kategori *Method* sebesar 9.720, diikuti A22 (Core print aus/longgar) dari *Machine* dan A5 (Kadar air pasir terlalu tinggi) serta A8 (Kelembapan udara tinggi) dari *Material* dan *Mother Nature* dengan VAD = 8.640. Pola yang menarik terlihat bahwa dari 6 akar penyebab berprioritas utama (VAD \geq 7.560 dan rank 1–6), 4 di antaranya berasal dari *defect Core Geser* (A21, A22, A23, A25) meskipun volume akhirnya tidak tertinggi hal ini disebabkan oleh kombinasi nilai C = 6 (biaya *rework* tertinggi) dan nilai O yang tinggi untuk beberapa akar penyebabnya. Seluruh akar penyebab *Break Mould* (A27–A32) menempati peringkat 27–32 karena kombinasi S, C, dan D yang rendah.

Untuk memudahkan pembacaan, hasil perankingan seluruh 32 akar penyebab berdasarkan nilai VAD disajikan secara tersendiri pada Tabel 15 berikut

Tabel 14. Perangkingan Berdasarkan Nilai VAD

Ranking	ID	Defect	Kategori 6M	Akar Penyebab	VAD	Prioritas
1	A23	Core Geser	Method	Gaya buoyancy & laju penuangan menggeser core	9.720	Utama
2	A22	Core Geser	Machine	Core print aus/longgar; dudukan core kurang rigid	8.640	Utama
3	A8	Gas Hole	Environment	Kelembapan udara area moulding tinggi (musim hujan)	8.640	Utama
4	A5	Gas Hole	Material	Kadar air (moisture) pasir cetak terlalu tinggi	8.640	Utama
5	A25	Core Geser	Measurement	Tidak ada verifikasi posisi/dimensi core sebelum cetakan ditutup	7.560	Utama
6	A21	Core Geser	Man	Pemasangan core/chaplet kurang presisi/tidak terkunci	7.560	Utama
7	A14	Cold Shut	Man	Penuangan dilakukan terputus-putus (interrupted pouring)	7.560	Tinggi
8	A9	Cold Shut	Method	Temperatur penuangan aktual di bawah standar	7.560	Tinggi
9	A6	Gas Hole	Man	Operator menuang terlalu tinggi dari spruc (turbulensi)	7.560	Tinggi
10	A3	Gas Hole	Method	Holding time cetakan-penuangan terlalu lama	7.560	Tinggi
11	A24	Core Geser	Material	Kekuatan core rendah; melengkung saat kontak logam panas	6.480	Tinggi
12	A12	Cold Shut	Machine	Pre-heating ladle tidak optimal	6.480	Tinggi
13	A10	Cold Shut	Method	Kecepatan penuangan terlalu lambat	6.480	Menengah
14	A7	Gas Hole	Man	Rongga cetakan kurang dibersihkan dari kotoran/debu	6.480	Menengah
15	A4	Gas Hole	Material	Permeabilitas pasir cetak terlalu rendah	6.480	Menengah
16	A1	Gas Hole	Method	Sistem venting (saluran gas) cetakan kurang memadai	6.480	Menengah
17	A11	Cold Shut	Machine	Desain gating system terlalu panjang atau sempit	5.400	Menengah
18	A2	Gas Hole	Method	Tidak dilakukan degassing logam cair sebelum penuangan	5.400	Menengah
19	A17	Cross Joint	Method	Pendinginan tidak merata; shakeout terlalu cepat	4.320	Menengah
20	A13	Cold Shut	Material	Fluiditas logam rendah (komposisi tidak standar)	4.320	Menengah
21	A16	Cross Joint	Machine	Mismatch cope-drag; perubahan ketebalan mendadak	3.780	Manajerial
22	A26	Core Geser	Environment	Getaran area kerja menggeser setting core	3.240	Manajerial
23	A19	Cross Joint	Measurement	Tidak ada mismatch check; suhu antar-tahap tidak terukur	3.240	Manajerial
24	A15	Cross Joint	Man	Handling kasar dan assembly cetakan tidak presisi	3.240	Manajerial
25	A18	Cross Joint	Material	Kandungan S/P tinggi; kekakuan pasir hambat kontraksi	2.700	Manajerial
26	A20	Cross Joint	Environment	Gradien suhu lingkungan sebabkan pendinginan tak seragam	2.160	Manajerial
27	A29	Break Mould	Method	Tekanan/kecepatan penuangan tinggi; clamping kurang kuat	729	Manajerial
28	A30	Break Mould	Material	Kekuatan ikat pasir (binder/bentonite) rendah	648	Manajerial
29	A28	Break Mould	Machine	Flask atau pola aus dan rusak	567	Manajerial
30	A31	Break Mould	Measurement	Mould hardness tidak diukur sebelum penuangan	486	Manajerial
31	A27	Break Mould	Man	Handling cetakan kasar dan ramming tidak merata	486	Manajerial
32	A32	Break Mould	Environment	Kelembapan lingkungan menurunkan kekuatan pasir cetak	405	Manajerial

Berdasarkan Tabel 15, hasil perangkingan VAD menghasilkan empat kluster prioritas yang berbeda. Kluster Prioritas Utama ($VAD \geq 7.560$) mencakup 6 akar penyebab: A23, A22, A8, A5 (kluster $VAD = 8.640-9.720$), serta A25 dan A21 ($VAD = 7.560$). Empat dari enam akar penyebab prioritas utama berasal dari *defect Core Geser* (A21, A22, A23, A25), menunjukkan bahwa *Core Geser* merupakan *defect* yang paling membutuhkan perhatian segera secara komprehensif meskipun volume akhirnya lebih rendah dari *Gas Hole* dan *Cold Shut*. Hal ini dapat dijelaskan oleh kombinasi nilai C tertinggi ($C = 6$) dan O yang sangat tinggi untuk beberapa akar penyebabnya (A23: $O = 9$, A22: $O = 8$).

Klaster Prioritas Tinggi (VAD = 6.480-7.560) mencakup 6 akar penyebab: A14, A9, A6, A3 (VAD = 7.560) serta A24 dan A12 (VAD = 6.480), yang terdistribusi di *Cold Shut*, *Gas Hole*, dan *Core Geser*. Klaster Prioritas Menengah (VAD = 3.780-6.480) mencakup 8 akar penyebab dari *Cold Shut*, *Gas Hole*, dan *Cross Joint*, menunjukkan bahwa kelompok ini masih perlu ditangani namun dapat dijadwalkan setelah klaster prioritas yang lebih tinggi. Klaster Pertimbangan Manajerial (VAD ≤ 3.780) mencakup 12 akar penyebab, terutama seluruh akar penyebab *Break Mould* (A27-A32) yang memiliki nilai VAD sangat rendah (405-729) akibat kombinasi S, C, dan D yang rendah.

Pola lain yang perlu diperhatikan adalah bahwa seluruh akar penyebab *Break Mould* (A27-A32) menempati peringkat 27-32 meskipun beberapa di antaranya memiliki O yang cukup tinggi (A29: O = 9, A30: O = 8). Hal ini terjadi karena nilai S (= 3), C (= 3), dan D (= 1) untuk *defect Break Mould* sangat rendah, jauh lebih kecil dibanding komponen *defect* lain (misalnya *Core Geser*: 5 × 6 × 4 × 9 = 1.080). Temuan ini konsisten dengan data lapangan: meskipun *Break Mould* sering terjadi, dampaknya mudah dideteksi dan biaya perbaikannya rendah, sehingga tidak menjadi prioritas utama.

Hasil perangkangan VAD dari QIM 1 ini selanjutnya digunakan sebagai input dalam pengembangan QIM 2 untuk menentukan dan memprioritaskan *preventive action* berbasis *Jidoka* yang akan direkomendasikan guna menanggulangi akar penyebab *defect* yang telah diprioritaskan.

Quality Improvement Matrix 2 Penentuan Preventive Action

Tabel 15. Identifikasi Preventive Action per Akar Penyebab Defect

No	ID	Defect	Akar Penyebab	Preventive Action Utama
1	A1	Gas Hole	Sistem venting (saluran gas) cetakan kurang memadai	IA2 Poka-Yoke; IA5 SOP
2	A2		Tidak dilakukan degassing logam cair sebelum penuangan	IA5 SOP; IA6 Training
3	A3		Holding time cetakan-penuangan terlalu lama	IA1 Andon; IA5 SOP
4	A4		Permeabilitas pasir cetak terlalu rendah	IA3 Sensor; IA5 SOP
5	A5		Kadar air (moisture) pasir cetak terlalu tinggi	IA3 Sensor
6	A6		Operator menuang terlalu tinggi dari sprue (turbulensi)	IA2 Poka Yoke; IA6 Training
7	A7		Rongga cetakan kurang dibersihkan dari kotoran/debu	IA5 SOP; IA6 Training
8	A8		Kelembapan udara area moulding tinggi (musim hujan)	IA3 Sensor; IA5 SOP
9	A9	Cold Shut	Temperatur penuangan aktual di bawah standar	IA1 Andon; IA3 Sensor
10	A10		Kecepatan penuangan terlalu lambat	IA1 Andon; IA3 Sensor; IA6 Training
11	A11		Desain gating system terlalu panjang atau sempit	IA2 Poka-Yoke; IA5 SOP
12	A12		Pre-heating ladle tidak optimal	IA1 Andon; IA3 Sensor
13	A13		Fluiditas logam rendah (komposisi tidak standar)	IA3 Sensor
14	A14		Penuangan dilakukan terputus-putus (interrupted pouring)	IA1 Andon; IA4 FP-Stop; IA5 SOP; IA6 Training
15	A21	Core Geser	Pemasangan core/chaplet kurang presisi atau tidak terkunci	IA2 Poka-Yoke; IA5 SOP; IA6 Training
16	A22		Core print aus/longgar; dudukan core kurang rigid	IA3 Sensor; IA4 FP-Stop
17	A23		Gaya buoyancy dan laju penuangan menggeser core	IA3 Sensor; IA4 FP-Stop; IA5 SOP
18	A24		Kekuatan core rendah; melengkung saat kontak logam panas	IA3 Sensor; IA4 FP-Stop
19	A25		Tidak ada verifikasi posisi/dimensi core sebelum cetakan ditutup	IA2 Poka Yoke; IA3 Sensor; IA4 FP Stop; IA5 SOP
20	A26		Getaran area kerja menggeser setting core	IA1 Andon; IA3 Sensor; IA4 FP Stop

Dari Tabel 16 dapat diketahui bahwa IA5 (SOP) dan IA6 (*Training*) merupakan *preventive action* yang paling banyak diterapkan secara lintas akar penyebab, mencerminkan bahwa standarisasi prosedur dan peningkatan kompetensi operator merupakan fondasi yang mendasar bagi pengendalian kualitas di Foundry X. IA3 (Sensor) menjadi *preventive action* yang paling banyak diperlukan untuk mengatasi akar penyebab berbasis parameter proses, terutama untuk menangani *Core Geser* dan *Cold Shut* yang berkaitan dengan parameter temperatur, kecepatan tuang, dan posisi *core*.

Deskripsi lengkap dari setiap *preventive action* beserta penerapannya pada proses produksi bogie di Foundry X disajikan pada Tabel 17 berikut.

Tabel 16. Deskripsi dan Penerapan Preventive Action Berbasis Jidoka

Kode	Jenis Jidoka	Preventive Action	Deskripsi dan Penerapan pada Proses Produksi Bogie
IA1	Andon	Sistem Andon Visual Berbasis Sensor Parameter Kritis	Pemasangan sistem Andon pada titik-titik kritis proses pengecoran yang menampilkan status parameter proses secara real-time (temperatur ladle, waktu tuang, holding time). Sinyal kuning muncul otomatis ketika parameter mendekati batas kritis, sinyal merah dan alarm berbunyi ketika parameter sudah melampaui batas, sehingga operator dan supervisor langsung mengetahui abnormalitas tanpa menunggu laporan manual. Diterapkan terutama pada area Pouring dan Moulding untuk memonitor temperatur penuangan, kecepatan tuang, dan durasi holding time cetakan.
IA2	Poka-Yoke	Poka-Yoke Mekanis dan Prosedural untuk Pengendalian Kualitas Proses	Perancangan mekanisme pencegahan kesalahan (error-proofing) yang mencegah timbulnya kondisi penyebab defect sejak awal. Implementasi mencakup: (1) contact method berupa jig/fixture pada cetakan yang memastikan venting terpasang pada posisi benar, (2) fixed-value method berupa checklist terverifikasi sebelum cetakan ditutup untuk memastikan kebersihan rongga dan posisi core, dan (3) sistem kunci (interlock) pada cetakan yang mencegah proses berlanjut sebelum verifikasi posisi core selesai. Poka-Yoke bersifat komplementer dengan Andon — jika Andon mendeteksi masalah setelah terjadi, Poka-Yoke mencegah masalah terjadi sejak awal.
IA3	Sensor Automated Detection	Sistem Sensor Otomatis Pemantauan Parameter Proses	Instalasi sensor-sensor pengukuran parameter kritis yang terhubung ke sistem monitoring terpusat, mencakup: (1) sensor kelembapan pasir cetak (untuk mendeteksi kadar air berlebih penyebab Gas Hole), (2) sensor suhu thermocouple pada ladle dan cetakan (untuk memastikan temperatur penuangan di atas minimum), (3) sensor posisi core berbasis laser atau proximity sensor (untuk mendeteksi pergeseran core sebelum penuangan dimulai), dan (4) sensor fluiditas logam berbasis komposisi kimia real-time. Data sensor diintegrasikan ke dashboard monitoring yang secara otomatis memicu alarm Andon ketika parameter menyimpang dari spesifikasi.
IA4	Fixed-Position Stop	Sistem Penghentian Terposisi (Fixed-Position Stop)	Implementasi mekanisme penghentian proses terposisi yang memastikan penuangan dihentikan pada titik yang telah ditentukan ketika terjadi kondisi abnormal, terutama untuk mencegah Core Geser akibat tekanan penuangan berlebih dan Cold Shut akibat penuangan terputus. Sistem ini terintegrasi dengan sensor parameter proses — ketika sensor mendeteksi parameter di luar batas (misalnya kecepatan tuang terlalu tinggi), ladle diposisikan pada titik henti yang aman sebelum proses dihentikan sepenuhnya. Mekanisme ini mencegah penghentian mendadak yang justru dapat memperparah kondisi penuangan.
IA5	SOP Standarisasi	Standarisasi Prosedur Operasi Berbasis Parameter Kritis	Penyusunan dan penerapan SOP yang dikontekstualisasi terhadap parameter kritis proses pengecoran bogie, mencakup: (1) SOP Venting dan Pembersihan Cetakan dengan checklist wajib sebelum penutupan cetakan, (2) SOP Parameter Penuangan (temperatur minimum, kecepatan tuang standar, batas holding time) dengan toleransi yang terukur, (3) SOP Degassing dengan jadwal wajib setiap ladle, (4) SOP Setting Core dengan prosedur verifikasi posisi dan penguncian. SOP diintegrasikan dengan sistem visual berbasis Andon sehingga penyimpangan dari SOP segera terdeteksi. Ini adalah preventive action dengan Dk = 1 (sangat mudah, biaya rendah) dan merupakan fondasi bagi implementasi Jidoka tools lainnya.
IA6	Training Pelatihan	Program Pelatihan Operator Berbasis	Program pelatihan komprehensif yang meningkatkan kompetensi operator dalam mengidentifikasi kondisi abnormal dan merespons sesuai prosedur Jidoka. Materi pelatihan mencakup: (1) pengenalan parameter kritis proses (temperatur, komposisi, kadar

Kode	Jenis Jidoka	Preventive Action	Deskripsi dan Penerapan pada Proses Produksi Bogie
	Jidoka dan Parameter Kritis		air pasir, posisi core) dan dampaknya terhadap kualitas produk, (2) cara membaca dan merespons sinyal Andon dengan benar, (3) prosedur penggunaan Poka-Yoke devices (jig, checklist, interlock), dan (4) wewenang dan prosedur penghentian lini (Fixed-Position Stop) ketika abnormalitas terdeteksi. Pelatihan dilaksanakan secara periodik (minimal 2× per tahun) dan terintegrasi dengan evaluasi kompetensi operator QC.

Penilaian Efektivitas Preventive Action terhadap Akar Penyebab Defect (E_{jk})

Tabel 17. Skala Penilaian Efektivitas Preventive Action terhadap Akar Penyebab Defect (E_{jk})

Nilai Ejk	Kategori	Kriteria
0	Tidak efektif	Preventive action tidak dapat digunakan untuk meminimalisir akar penyebab defect tersebut
1	Efektivitas lemah	Preventive action berperan kecil dalam meminimalisir akar penyebab defect
3	Efektivitas sedang	Preventive action berperan sedang dalam meminimalisir akar penyebab defect
9	Efektivitas tinggi	Preventive action berperan besar dalam meminimalisir akar penyebab defect

Penilaian nilai E_{jk} dilakukan melalui *Focus Group Discussion* (FGD) dengan tim QC dan wakil manager produksi Foundry X. Penilaian mempertimbangkan secara spesifik mekanisme kerja setiap *preventive action* terhadap sifat dari masing-masing akar penyebab *defect*. Hasil penilaian E_{jk} untuk 20 akar penyebab prioritas \times 6 *preventive action* ditampilkan dalam Matriks QIM 2 berikut.

Perhitungan Tingkat Efektivitas Total dari Tiap Preventive Action (TEK)

Berdasarkan nilai VAD dari QIM 1 dan nilai E_{jk} yang telah diperoleh, langkah selanjutnya adalah menghitung nilai tingkat efektivitas total dari setiap *preventive action* (TE_k). Nilai TE_k diperoleh dari perkalian nilai VAD setiap akar penyebab *defect* dengan nilai efektivitas preventive action terhadap akar penyebab tersebut (E_{jk}), kemudian dijumlahkan untuk semua akar penyebab yang dicakup. Perhitungan TEK dapat dinotasikan sebagai berikut:
 $TE_k = \sum_j (VAD_j \times E_{jk})$

Keterangan:

TEK = Tingkat efektivitas total dari tiap *preventive action* ke-k

VAD_j = Value of Aggregate Defect untuk akar penyebab ke-j

E_{jk} = Nilai efektivitas *preventive action* ke-k terhadap akar penyebab ke-j (skala 0/1/3/9)

Perbedaan mendasar dari QIM versi Katon & Karningsih (2023) terletak pada nilai yang digunakan di baris matriks. Pada penelitian ini digunakan VAD menggantikan ARC, karena VAD telah mengintegrasikan parameter *Extended FMEA* yaitu *Severity Cost* (C) dan *Detection* (D) sehingga prioritasasi *preventive action* yang dihasilkan lebih komprehensif. Sebagai ilustrasi, berikut adalah contoh perhitungan TE_k untuk IA5 (SOP) dan IA3 (Sensor) yang merupakan dua preventive action dengan TE_k tertinggi.

Tabel 18. Contoh Perhitungan Tingkat Efektivitas Total (TEk) untuk IA5 dan IA3

ID	Defect	Akar Penyebab	VAD _j	Ejk (IA5 SOP)	VAD × E (IA5)	Ejk (IA3 Sensor)	Uraian Perhitungan TE _{IA5}
A1	Gas Hole	Sistem venting kurang memadai	6.480	9	58.320	3	6.480 × 9 = 58.320
A2	Gas Hole	Tidak dilakukan degassing	5.400	9	48.600	1	5.400 × 9 = 48.600
A3	Gas Hole	Holding time terlalu lama	7.560	9	68.040	3	7.560 × 9 = 68.040
A4	Gas Hole	Permeabilitas pasir terlalu rendah	6.480	3	19.440	9	6.480 × 3 = 19.440
A5	Gas Hole	Kadar air pasir terlalu tinggi	8.640	3	25.920	9	8.640 × 3 = 25.920
...
A25	Core Geser	Tidak ada verifikasi posisi core	7.560	9	68.040	9	7.560 × 9 = 68.040
A26	Core Geser	Getaran area kerja	3.240	3	9.720	3	3.240 × 3 = 9.720
				TE _{IA5}	797.040	TE _{IA3}	793.800

Berdasarkan contoh pada Tabel 19, TE_k untuk IA5 (SOP) adalah 797.040 dan TE_k untuk IA3 (Sensor) adalah 793.800. Selisih yang sangat kecil antara TE_k IA5 dan IA3 menunjukkan bahwa kedua *preventive action* ini memiliki jangkauan efektivitas yang hampir setara secara absolut namun perbedaan signifikan akan muncul setelah mempertimbangkan tingkat kesulitan implementasi (Dk) pada tahap perhitungan ETDk. Perhitungan TE_k untuk seluruh 6 *preventive action* dilakukan melalui Matriks QIM 2 yang ditampilkan dalam orientasi *landscape* pada subbab berikut.

Penilaian Tingkat Kesulitan Implementasi (Dk)

Tabel 19. Penilaian Tingkat Kesulitan Implementasi (Dk) Preventive Action

Kode	Jenis Jidoka	Nama Preventive Action	Estimasi Biaya	Estimasi Waktu	Justifikasi Penilaian Dk
IA1	Andon	Sistem Andon Visual Berbasis Sensor	Rp 30 - 100 jt	1 - 3 bulan	Implementasi Andon memerlukan pengadaan display panel, kabel, dan integrasi software monitoring. Estimasi biaya Rp 25-100 juta, waktu 1-3 bulan untuk instalasi dan uji coba. Sesuai sub-kriteria biaya (Dk=3: Rp 25-100 juta) dan waktu (Dk=3: 1-3 bulan). Nilai Dk = 3 (Sedang).
IA2	Poka-Yoke	Poka-Yoke Mekanis dan Prosedural	Rp 5-25 jt	1-4 minggu	Poka-Yoke berupa jig, fixture, dan checklist terverifikasi. Biaya relatif rendah (Rp 5-25 juta untuk pembuatan jig dan fixture cetakan). Waktu implementasi 1-4 minggu. Sesuai sub-kriteria biaya (Dk=2: Rp 5-25 juta) dan waktu (Dk=2: 1-4 minggu). Nilai Dk = 2 (Mudah).
IA3	Sensor / Automated Detection	Sistem Sensor Otomatis Parameter Proses	Rp 100-500 jt	3-6 bulan	Instalasi sensor (thermocouple, proximity sensor core, sensor kelembapan) dan integrasi ke sistem SCADA/dashboard memerlukan investasi cukup besar. Estimasi biaya Rp 100-500 juta, waktu 3-6 bulan untuk engineering, instalasi, dan kalibrasi. Sesuai sub-kriteria biaya (Dk=4: Rp 100-500 juta) dan waktu (Dk=4: 3-6 bulan). Nilai Dk = 4 (Sulit).
IA4	Fixed-Position Stop	Sistem Penghentian Terposisi	Rp 25-100 jt	1-3 bulan	Sistem FP-Stop memerlukan modifikasi mekanisme ladle dan integrasi dengan sistem sensor. Estimasi biaya Rp 25-100 juta, waktu 1-3 bulan. Sesuai sub-kriteria biaya (Dk=3: Rp 25-100 juta) dan waktu (Dk=3: 1-3 bulan). Nilai Dk = 3 (Sedang).
IA5	SOP / Standarisasi	Standarisasi Prosedur Operasi	< Rp 5 jt	< 1 minggu	Penyusunan SOP hanya memerlukan waktu dan sumber daya SDM internal (tim QC dan produksi). Biaya minimal (cetak dokumen, sosialisasi) < Rp 5 juta, waktu < 1 minggu. Sesuai sub-kriteria biaya (Dk=1: ≤ Rp 5 juta) dan waktu (Dk=1: ≤ 1 minggu). Nilai Dk = 1 (Sangat Mudah).
IA6	Training / Pelatihan	Program Pelatihan Operator	Rp 5-25 jt	1-4 minggu	Pelatihan internal dapat dilaksanakan dengan instruktur dari tim QC dan produksi perusahaan. Biaya mencakup materi pelatihan, waktu kerja operator, dan evaluasi (Rp 5-25 juta). Waktu 1-4 minggu per siklus pelatihan. Sesuai sub-kriteria biaya (Dk=2: Rp 5-25 juta) dan waktu (Dk=2: 1-4 minggu). Nilai Dk = 2 (Mudah).

Berdasarkan Tabel 20, IA5 (SOP) mendapat nilai Dk terendah (Dk = 1, Sangat Mudah) karena implementasinya hanya memerlukan sumber daya SDM internal tanpa investasi peralatan baru. IA2 (Poka-Yoke) dan IA6 (*Training*) mendapat Dk = 2 (Mudah) karena biaya dan waktu implementasinya relatif rendah. IA1 (Andon) dan IA4 (FP-Stop) mendapat Dk = 3 (Sedang) karena memerlukan pengadaan perangkat dan waktu integrasi yang moderat. IA3 (Sensor) mendapat Dk tertinggi (Dk = 4, Sulit) karena instalasi sistem sensor terintegrasi memerlukan investasi signifikan (Rp 100–500 juta) dan waktu *engineering* yang panjang (3–6 bulan). Distribusi Dk yang bervariasi ini menegaskan pentingnya normalisasi melalui ETDk *preventive action* dengan TEK tinggi belum tentu menjadi prioritas jika Dk-nya juga tinggi.

Matriks QIM 2 dan Perhitungan ETDk

Setelah nilai Ejk, TEK, dan Dk diperoleh, seluruh komponen tersebut diintegrasikan dalam Matriks QIM 2. Matriks ini menampilkan secara lengkap: nilai Ejk (efektivitas setiap *preventive action* terhadap setiap akar penyebab), TEK (total efektivitas), Dk (tingkat kesulitan), dan ETDk (rasio efektivitas terhadap kesulitan). Nilai ETDk dihitung menggunakan formula sebagai berikut:

$$\text{ETDk} = \text{TEK} / \text{Dk}$$

Keterangan:

ETDk = Tingkat efektivitas total terhadap rasio kesulitan *preventive action* ke-k

TEK = Tingkat efektivitas total dari tiap *preventive action* ke-k

Dk = Nilai tingkat kesulitan implementasi *preventive action* ke-k

Semakin besar nilai ETDk, semakin efektif dan layak *preventive action* tersebut untuk diimplementasikan terlebih dahulu. Matriks QIM 2 lengkap ditampilkan pada Tabel 21 berikut. Karena ukurannya yang lebar (20 akar penyebab \times 6 *preventive action*), tabel ini ditampilkan dalam orientasi *landscape*. Baris akar penyebab *Cross Joint* (A15–A20) dan *Break Mould* (A27–A32) ditampilkan dalam warna abu-abu untuk menunjukkan bahwa kelompok ini tidak diikutsertakan dalam penilaian Ejk karena berada di luar *cut-off* prioritas VAD.

Tabel 21. Matriks QIM 2: Efektivitas Preventive Action, TEK, Dk, ETDk, dan Ranking

ID	Defect	Akar Penyebab	VAD	IA1 Andon	IA2 Poka-Yoke	IA3 Sensor	IA4 FP-Stop	IA5 SOP	IA6 Training
A1	Gas Hole	Sistem venting cetakan kurang memadai	6,48	1	9	3		9	3
A2		Tidak dilakukan degassing logam cair	5,4	3	3	1	-	9	9
A3		Holding time cetakan-penuangan terlalu lama	7,56	9	1	3	3	9	3
A4		Permeabilitas pasir cetak terlalu rendah	6,48	-	3	9	-	3	3
A5		Kadar air (moisture) pasir cetak terlalu tinggi	8,64	1	3	9		3	3
A6		Operator menuang terlalu tinggi (turbulensi)	7,56	3	9	3	3	3	9
A7		Rongga cetakan kurang dibersihkan	6,48	3	3	1	-	9	9
A8		Kelembapan udara area moulding tinggi	8,64		1	3		3	1
A9	Cold Shut	Temperatur penuangan di bawah standar	7,56	9	3	9	1	3	3
A10		Kecepatan penuangan terlalu lambat	6,48	9	3	9	1	3	9
A11		Desain gating system terlalu panjang/sempit	5,4		9			9	1
A12		Pre-heating ladle tidak optimal	6,48	9	3	9	-	3	3
A13		Fluiditas logam rendah	4,32	-	-	9	-	3	3
A14		Penuangan terputus-putus	7,56	9	3	3	3	9	9
A15	Cross Joint	Handling kasar & assembly tidak presisi	3,24	-	-	-	-	-	-
A16		Mismatch cope-drag	3,78	-	-	-	-	-	-
A17		Pendinginan tidak merata; shakeout cepat	4,32	-	-	-	-	-	-
A18		Kandungan S/P tinggi	2,7	-	-	-	-	-	-
A19		Tidak ada mismatch check	3,24	-	-	-	-	-	-
A20		Gradien suhu lingkungan	2,16	-	-	-	-	-	-
A21	Core Geser	Pemasangan core/chaplet kurang presisi	7,56	3	9	1	3	9	9
A22		Core print aus/longgar	8,64	1	3	9	9	3	3
A23		Gaya buoyancy menggeser core	9,72	3	3	9	9	9	3
A24		Kekuatan core rendah	6,48	1	1	9	9	3	3
A25		Tidak ada verifikasi posisi core sebelum ditutup	7,56	3	9	9	9	9	3
A26		Getaran area kerja	3,24	1	3	3	3	3	1
A27	Break Mould	Handling cetakan kasar & ramming tidak merata	486	-	-	-	-	-	-
A28		Flask/pola aus atau rusak	567						
A29		Tekanan penuangan tinggi; clamping kurang kuat	729						
A30		Kekuatan ikat pasir rendah	648	-	-	-	-	-	-
A31		Mould hardness tidak diukur	486						
A32		Kelembapan lingkungan	405	-	-	-	-	-	-
Total Efektivitas (TEk)				487,08	563,76	793,8	406,08	797,04	626,4
Tingkat Kesulitan (Dk)				3	2	4	3	1	2
Rasio Efektivitas Kesulitan (ETDk)				162,36	281,88	198,45	135,36	797,04	313,2
Peringkat Prioritas (Rk)				5	3	4	6	1	2

Berdasarkan Matriks QIM 2 pada Tabel 21, nilai TEK tertinggi dimiliki oleh IA5 (SOP) sebesar 797.040, diikuti IA3 (Sensor) sebesar 793.800. Namun setelah dinormalisasi dengan Dk, urutan berubah signifikan. IA5 (SOP) yang memiliki Dk = 1 menghasilkan ETDk sebesar 797.040, menjadikannya *preventive action* dengan rasio efektivitas-kesulitan tertinggi. Sebaliknya, IA3 (Sensor) yang memiliki TEK hampir setara dengan IA5 namun Dk = 4 hanya menghasilkan ETDk sebesar 198.450 turun ke peringkat 4. Fenomena ini secara konkret membuktikan nilai tambah pengembangan parameter Dk berbasis biaya-waktu Partawi et al. (2023) dibandingkan skala kualitatif sederhana pada QIM versi Katon & Karningsih (2023).

Tabel 20. Perankingan Prioritas Preventive Action Berdasarkan Nilai ETDk

Ranking	Kode	Preventive Action	Jenis Jidoka	TEK	Dk	ETDk	Kategori Prioritas
1	IA5	Standarisasi Prosedur Operasi (SOP)	SOP	797.040	1	797.040	Prioritas Implementasi Utama
2	IA6	Program Pelatihan Operator	Training	626.400	2	313.200	Prioritas Implementasi Utama
3	IA2	Poka-Yoke Mekanis dan Prosedural	Poka-Yoke	563.760	2	281.880	Prioritas Menengah
4	IA3	Sistem Sensor Otomatis Parameter Proses	Sensor	793.800	4	198.450	Prioritas Menengah
5	IA1	Sistem Andon Visual Berbasis Sensor	Andon	487.080	3	162.360	Prioritas Rendah
6	IA4	Sistem Penghentian Terposisi (FP-Stop)	FP-Stop	406.080	3	135.360	Prioritas Rendah

Berdasarkan Tabel 22, urutan prioritas *preventive action* dari yang tertinggi adalah: IA5 SOP (ETDk = 797.040) → IA6 *Training* (ETDk = 313.200) → IA2 Poka-Yoke (ETDk = 281.880) → IA3 Sensor (ETDk = 198.450) → IA1 Andon (ETDk = 162.360) → IA4 FP-Stop (ETDk = 135.360).

Hasil perancangan ini menghasilkan beberapa implikasi penting untuk implementasi perbaikan di Foundry X PT X. Pertama, IA5 SOP menempati peringkat 1 dengan ETDk tertinggi (797.040) yang sekaligus merupakan nilai TEk tertinggi. Kondisi ini didukung oleh Dk = 1 (sangat mudah), artinya SOP merupakan *preventive action* yang paling efektif sekaligus paling mudah dan murah untuk diimplementasikan. Cakupan SOP yang sangat luas mencakup hampir semua akar penyebab dari ketiga *defect* prioritas menjadikannya fondasi yang wajib dikerjakan terlebih dahulu sebelum implementasi alat-alat Jidoka lainnya.

Kedua, IA6 *Training* (peringkat 2, ETDk = 313.200) dan IA2 Poka-Yoke (peringkat 3, ETDk = 281.880) keduanya berada dalam kategori Prioritas Implementasi Utama dan Prioritas Menengah dengan Dk = 2, menunjukkan bahwa ketiganya (IA5, IA6, IA2) dapat diimplementasikan dalam jangka pendek tanpa investasi besar. Ketiga *preventive action* ini bersifat komplementer: SOP memberikan standar prosedur, *Training* memastikan operator memahami dan mematuhi SOP, sedangkan Poka-Yoke mencegah penyimpangan dari SOP melalui mekanisme fisik.

Ketiga, IA3 Sensor (peringkat 4, ETDk = 198.450) memiliki nilai TEk tertinggi kedua (793.800) namun Dk = 4 menurunkannya ke peringkat menengah. Meskipun demikian, IA3 tetap penting sebagai *preventive action* jangka menengah karena memberikan kemampuan deteksi otomatis yang tidak dapat digantikan oleh SOP atau pelatihan saja, terutama untuk parameter fisika seperti kelembapan pasir cetak dan posisi *core*. IA1 Andon (peringkat 5) dan IA4 FP-Stop (peringkat 6) berada di kategori prioritas rendah, namun keduanya tetap relevan sebagai investasi jangka panjang untuk menciptakan sistem deteksi dan respons abnormalitas yang komprehensif di Foundry X.

Secara keseluruhan, hasil QIM 2 merekomendasikan *roadmap* implementasi bertahap: (1) Jangka pendek (< 1 bulan) implementasi SOP dan mulai program *Training*; (2) Jangka menengah-pendek (1–3 bulan) instalasi Poka-Yoke mekanis pada titik kritis; (3) Jangka menengah (3–6 bulan) pengadaan dan instalasi sistem Andon dan FP-Stop; (4) Jangka menengah-panjang (6–12 bulan) investasi sistem Sensor otomatis terintegrasi. Urutan ini memastikan bahwa peningkatan kualitas dapat dimulai segera dengan sumber daya yang tersedia, sambil membangun kapabilitas untuk investasi yang lebih besar secara bertahap.

Validasi

Validasi Internal

Validasi internal dilakukan bersama pihak-pihak yang terlibat langsung dalam proses produksi di Foundry X PT X. meliputi supervisor produksi, manager *engineer*, dan manager *quality control*. Tujuan validasi internal adalah memastikan bahwa seluruh *output framework* yang dihasilkan mulai dari identifikasi *defect* per lini proses, analisis akar penyebab berbasis 6M, penilaian parameter *Extended FMEA*, hingga prioritas akar penyebab berdasarkan nilai VAD dan rekomendasi *preventive action* berbasis Jidoka sesuai dengan kondisi aktual di lapangan.

Proses validasi dilakukan melalui diskusi terstruktur di mana peneliti mempresentasikan hasil analisis dan meminta konfirmasi serta umpan balik dari para narasumber. Hasil validasi internal menunjukkan bahwa seluruh 5 *defect* dominan yang dipilih, 32 akar penyebab yang diidentifikasi, serta pemetaan relasi *defect*–akar penyebab yang dibangun diakui sesuai dengan permasalahan nyata yang dihadapi di rantai produksi. Penilaian parameter S, C, D, dan O yang diperoleh melalui proses *expert judgment* juga dikonfirmasi oleh validator internal sebagai mencerminkan kondisi aktual proses pengecoran bogie. Rekomendasi *preventive action* berbasis

Jidoka dinyatakan relevan dan berpotensi diterapkan, dengan catatan bahwa implementasi sistem sensor otomatis (IA3) memerlukan kajian investasi lebih lanjut sebelum dapat dieksekusi.

Validasi Eksternal

Validasi eksternal dilakukan dengan melibatkan pihak yang memiliki kompetensi di bidang manajemen kualitas dan proses manufaktur namun tidak terlibat langsung dalam penelitian. Tujuan validasi eksternal adalah memperoleh penilaian yang lebih objektif terhadap *framework* yang dikembangkan dari perspektif akademis maupun industri, serta memastikan bahwa pendekatan penelitian ini memiliki relevansi dan kontribusi yang valid bagi pengembangan ilmu pengendalian kualitas di industri manufaktur.

Validasi Komparatif

Validasi komparatif dilakukan dengan membandingkan pendekatan analisis yang selama ini digunakan PT. X dengan metode QIM yang dikembangkan dalam penelitian ini. Perbandingan ini bertujuan untuk menunjukkan secara konkret perbedaan informasi yang dapat dihasilkan oleh masing-masing pendekatan, khususnya dalam hal kemampuan merangkum, memprioritaskan, dan mengkomunikasikan informasi kualitas secara sistematis

Keterbatasan Pendekatan Sebelumnya di PT X

Berdasarkan hasil wawancara dan observasi lapangan, pengendalian kualitas di Foundry X PT X selama ini dilaksanakan melalui serangkaian tahapan yang bersifat terpisah dan sekuensial. Proses tersebut umumnya dimulai dari pencatatan data *reject* pada *check sheet* harian, dilanjutkan dengan analisis frekuensi *defect* menggunakan diagram Pareto untuk mengidentifikasi jenis *defect* yang paling dominan, kemudian analisis akar penyebab dilakukan secara terpisah menggunakan diagram *Fishbone*. Masing-masing analisis menghasilkan *output* yang berdiri sendiri dan tidak terintegrasi satu sama lain dalam satu kerangka penilaian yang holistik.

Pendekatan tersebut memiliki beberapa keterbatasan mendasar. Pertama, diagram Pareto hanya mengurutkan *defect* berdasarkan frekuensi kemunculan, tanpa mempertimbangkan dimensi keparahan dampak (*severity*), biaya yang ditimbulkan (*severity cost*), maupun kemudahan pendeteksian (*detection*). Akibatnya, *defect* dengan frekuensi rendah namun berdampak besar secara finansial berpotensi tidak mendapat perhatian yang semestinya. Kedua, diagram *Fishbone* mengidentifikasi akar penyebab secara kualitatif tanpa mekanisme kuantifikasi dan perangkingan prioritas, sehingga manajemen tidak memiliki informasi berbasis data untuk menentukan akar penyebab mana yang harus ditangani terlebih dahulu. Ketiga, tidak terdapat mekanisme yang menghubungkan secara eksplisit antara akar penyebab yang diidentifikasi dengan tindakan perbaikan yang disarankan, sehingga tindakan perbaikan yang diambil cenderung bersifat reaktif terhadap *defect* individual daripada sistematis terhadap akar penyebab dominan yang memengaruhi beberapa jenis *defect* sekaligus.

Keterbatasan yang paling kritis adalah tidak adanya *summary* terintegrasi yang dapat menggambarkan secara serentak: (1) kontribusi relatif setiap *defect* berdasarkan multipel dimensi penilaian, (2) keterkaitan antara akar penyebab dengan lebih dari satu jenis *defect*, dan (3) prioritas tindakan perbaikan yang memperhitungkan efektivitas sekaligus kesulitan implementasi. Tanpa *summary* semacam itu, manajemen tidak dapat melihat gambaran besar atas permasalahan kualitas secara menyeluruh dalam satu tampilan yang ringkas dan informatif.

Keunggulan Framework QIM yang Dikembangkan

Framework QIM yang dikembangkan dalam penelitian ini menjawab keterbatasan-keterbatasan tersebut secara langsung. QIM 1 mengintegrasikan lima dimensi penilaian sekaligus *Severity non-cost* (S), *Severity Cost* (C), *Detection* (D), *Occurrence* (O), dan relasi *defect*-akar penyebab (R) ke dalam satu matriks tunggal yang menghasilkan nilai VAD untuk

setiap akar penyebab. Nilai VAD merepresentasikan kontribusi agregat setiap akar penyebab terhadap seluruh *defect* yang dianalisis, dengan memperhitungkan tidak hanya frekuensi tetapi juga keparahan dampak, biaya kegagalan, dan tingkat deteksi.

Berbeda dengan pendekatan sebelumnya di PT X, QIM menghasilkan *summary* yang dapat dibaca secara langsung. Dari QIM 1, manajemen dapat melihat dalam satu tampilan: nilai VAD dari 32 akar penyebab yang telah diurutkan dari tertinggi ke terendah, pengelompokan ke dalam empat klaster prioritas (Utama, Tinggi, Menengah, Manajerial), serta distribusi akar penyebab berdasarkan kategori 6M. Informasi ini tidak pernah tersedia sebelumnya dari pendekatan Pareto + *Fishbone* yang digunakan, karena kedua alat tersebut beroperasi secara terpisah tanpa mekanisme integrasi.

Pada level QIM 2, *framework* ini lebih lanjut menjembatani hasil prioritas akar penyebab dengan rekomendasi tindakan perbaikan yang terukur. Nilai ETDk yang menggabungkan efektivitas total (TEk) dengan kesulitan implementasi (Dk) memberikan basis kuantitatif bagi manajemen untuk memutuskan urutan investasi perbaikan. Hal ini secara langsung menutup celah yang ada pada pendekatan sebelumnya, di mana tidak terdapat mekanisme formal untuk mengevaluasi dan membandingkan berbagai opsi tindakan perbaikan secara bersamaan. Perbandingan antara kedua pendekatan tersebut dirangkum pada Tabel berikut.

Tabel 21. Perbandingan Pendekatan Sebelumnya dengan *Framework* QIM yang Dikembangkan

Aspek	Pendekatan Sebelumnya (Pareto + Fishbone)	Framework QIM (Penelitian Ini)
Dimensi penilaian defect	Hanya frekuensi kemunculan (Occurrence)	5 dimensi terintegrasi: S, C, D, O, dan relasi R
Pertimbangan biaya kegagalan	Tidak diperhitungkan	Diperhitungkan melalui parameter Severity Cost (C)
Kemampuan deteksi	Tidak diperhitungkan	Diperhitungkan melalui parameter Detection (D)
Prioritas akar penyebab	Tidak terkuantifikasi; bersifat kualitatif dan tidak berurutan	Terkuantifikasi melalui VAD; dikelompokkan dalam 4 klaster prioritas
Keterkaitan lintas-defect	Tidak terlihat; analisis tiap defect dilakukan terpisah	Terlihat melalui matriks relasi 5 defect × 32 akar penyebab
Rekomendasi tindakan perbaikan	Tidak terprioritasi; tidak ada basis kuantitatif pembandingan antar tindakan	Diprioritaskan melalui ETDk; disertai roadmap implementasi bertahap
Ringkasan terintegrasi (summary)	Tidak tersedia; output tiap alat berdiri sendiri	Tersedia dalam satu matriks: VAD ranking, klaster prioritas, distribusi 6M, dan ETDk

Berdasarkan perbandingan pada Tabel 23, dapat disimpulkan bahwa *framework* QIM yang dikembangkan menghasilkan informasi yang secara substansial lebih kaya dan lebih dapat ditindaklanjuti (*actionable*) dibandingkan pendekatan sebelumnya. Keunggulan utama terletak pada kemampuannya menghasilkan *summary* terintegrasi yang menampilkan secara serentak seluruh dimensi penilaian dalam satu kerangka analisis.

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan *framework* Quality Improvement Matrix (QIM) yang diperkaya melalui integrasi konsep Extended FMEA dan pendekatan Jidoka. Pengembangan dilakukan dengan menambahkan parameter Severity Cost (C) untuk mempertimbangkan dampak finansial kegagalan, parameter Detection (D) untuk mengukur kemampuan deteksi akar penyebab, serta klasifikasi akar penyebab berdasarkan kerangka 6M. Selain itu, QIM 2 diperkuat melalui pengembangan parameter Difficulty (Dk) yang mempertimbangkan biaya dan waktu implementasi, serta integrasi berbagai alat Jidoka sebagai dasar penyusunan tindakan perbaikan yang lebih sistematis dan terstruktur.

Penerapan framework pada proses produksi bogie di Foundry X PT X berhasil mengidentifikasi 5 defect dominan dan 32 akar penyebab yang kemudian diprioritaskan ke dalam beberapa kluster perbaikan. Hasil analisis menunjukkan bahwa tindakan preventif dengan prioritas tertinggi adalah SOP, diikuti Training, Poka-Yoke, Sensor, Andon, dan FP-Stop, yang selanjutnya disusun dalam roadmap implementasi bertahap. Validasi komparatif juga membuktikan bahwa framework QIM memberikan informasi yang lebih komprehensif dibandingkan pendekatan Pareto dan Fishbone, karena mampu mengintegrasikan penilaian multi-dimensi, hubungan lintas-defect, klusterisasi akar penyebab, dan prioritas tindakan perbaikan dalam satu kerangka analisis yang terpadu.

REFERENSI

- AIAG, & VDA. (2019). *Failure mode and effects analysis (FMEA) handbook* (1st ed.). Automotive Industry Action Group. <https://www.aiag.org/quality/automotive-core-tools/fmea>
- Andersen, B., & Fagerhaug, T. (2006). *Root cause analysis: Simplified tools and techniques* (2nd ed.). ASQ Quality Press.
- Campanella, J. (1999). *Principles of quality costs: Principles, implementation, and use*. ASQ Quality Press.
- Feigenbaum, A. V. (1991). *Total quality control* (3rd ed.). McGraw-Hill.
- Katon, & Karningsih, P. D. (2023). *Pengembangan Quality Improvement Matrix (QIM) sebagai tool perbaikan kualitas produk* (Tesis). Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Liu, H. C., Liu, L., & Liu, N. (2013). Risk evaluation approaches in failure mode and effects analysis: A literature review. *Expert Systems with Applications*, 40(2), 828–838.
- Mitra, A. (2008). *Fundamentals of quality control and improvement* (3rd ed.). Wiley.
- Montgomery, D. C. (2009). *Introduction to statistical quality control* (6th ed.). Wiley.
- Partiwi, S. G., Islami, V. N., & Firmanto, H. (2023). House of Risk (HOR) approach to manage risk involving multi-stakeholders: The case of automotive industry cluster of multifunctional rural mechanized tool (MRMT). *Operations and Supply Chain Management*, 16(1), 133–139.
- Pujawan, I. N., & Geraldin, L. H. (2009). House of risk: A model for proactive supply chain risk management. *Business Process Management Journal*, 15(6), 953–967.
- Ramadhani, M. D., & Ramadhani, R. R. (2024). Analysis of product quality bogie set S2HD9C using six sigma and FMEA method at PT. Barata Indonesia (Persero). *Journal of Industrial Engineering Management*, 9(1).
- Siegel, A. (2016). *Practical Business Statistics*. Academic Press.
- Stamatis, D. H. (2003). *Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution* (2nd ed.). ASQ Quality Press.
- Subramanian, T., Bhaskar, S., & Balaji, M. (2022). *Review on analysis of foundry defects for quality improvement*.
- Von Ahsen, A. (2008). Cost-oriented failure mode and effects analysis. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 25(5), 466–476.