

ANALISIS PENYEBAB KEBOCORAN JALUR *FLOWLINE* MENGGUNAKAN METODE FMEA DAN *ROOT CAUSE ANALYSIS* (RCA) PADA SUMUR SGT-1 PT. XYZ

Indra Setiawan Saputra¹, Parji², Selvia Sarungu³

^{1,2,3}Sekolah Tinggi Teknologi Migas, Balikpapan Indonesia

Email: david.indra999@gmail.com

Abstrak

Kebocoran jalur *flowline* merupakan permasalahan operasional yang dapat menyebabkan kehilangan produksi, pencemaran lingkungan, kerusakan fasilitas, dan risiko keselamatan kerja. Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi mode kegagalan, menentukan prioritas risiko, dan menganalisis akar penyebab kebocoran pada jalur *flowline* sumur SGT-1 PT. XYZ. Penelitian menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif yang didukung data kualitatif melalui observasi lapangan, wawancara, dokumentasi, dan data perusahaan. *Failure Mode and Effects Analysis* digunakan untuk menghitung *Risk Priority Number* berdasarkan nilai *Severity*, *Occurrence*, dan *Detection*. Diagram Pareto berdasarkan nilai RPN digunakan untuk menentukan mode kegagalan dominan. Mode kegagalan dengan prioritas tertinggi selanjutnya dianalisis menggunakan Diagram *Fishbone*, *5 Why Analysis*, dan *Root Cause Analysis*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa korosi memperoleh RPN tertinggi sebesar 486, diikuti umur pipa sebesar 384 dan kerusakan material atau *elbow* sebesar 200. Korosi eksternal dipengaruhi oleh umur operasi, tanah lembap, genangan air, dan inspeksi yang belum optimal. Rekomendasi utama meliputi inspeksi ketebalan pipa, perbaikan coating, pengendalian drainase, dan penggantian *flowline* berdasarkan kondisi aktual serta umur operasi.

Kata Kunci: FMEA, Flowline, Kebocoran, RCA, Risk Priority Number

Abstract

Flowline leakage is a critical operational problem in the oil and gas industry because it can cause production losses, environmental pollution, equipment damage, and occupational safety risks. This study aims to identify flowline failure modes, determine risk priorities, and analyze the root causes of leakage at the SGT-1 well of PT. XYZ. The study used a quantitative descriptive approach supported by qualitative data obtained through field observations, interviews, documentation, and company records. Failure Mode and Effects Analysis was applied to calculate the Risk Priority Number based on Severity, Occurrence, and Detection ratings. A Pareto diagram based on RPN values was used to determine the dominant failure mode. The highest-priority failure was further analyzed using Fishbone Diagram, 5 Why Analysis, and Root Cause Analysis. The results showed that corrosion had the highest RPN of 486, followed by pipeline aging with 384 and material or elbow cracking with 200. External corrosion was influenced by prolonged service life, moist soil, waterlogging, and inadequate inspection. Recommended actions include pipe thickness inspection, coating improvement, drainage control, and flowline replacement based on actual conditions and service life.

Keywords: Corrosion, FMEA, Flowline, RCA, Risk Priority Number.

A. PENDAHULUAN

Industri minyak dan gas bumi merupakan salah satu sektor strategis yang memiliki peranan penting dalam memenuhi kebutuhan energi serta mendukung aktivitas ekonomi nasional. Dalam kegiatan produksi minyak dan gas, sistem perpipaan menjadi salah satu aset utama yang berfungsi untuk menyalurkan fluida produksi dari sumur menuju fasilitas pengumpulan, pemisahan, dan pengolahan. Salah satu bagian penting dari sistem perpipaan tersebut adalah *flowline*, yaitu jalur pipa yang menghubungkan *wellhead* dengan fasilitas pemrosesan awal seperti manifold atau separator. Keandalan sistem *flowline* menjadi faktor penting dalam menjaga kontinuitas produksi karena kegagalan pada jalur tersebut dapat menyebabkan gangguan operasional, kehilangan produksi, peningkatan biaya pemeliharaan, serta risiko terhadap keselamatan dan lingkungan (Khan et al., 2021; Yanti & Bukori, 2025; Syamikhah & Islami, 2025).

Seiring bertambahnya umur operasi, kondisi *flowline* dapat mengalami penurunan akibat berbagai mekanisme degradasi material. Penurunan integritas pipa dapat disebabkan oleh korosi internal maupun eksternal, penipisan dinding pipa, retakan material, kerusakan sambungan, perubahan sifat mekanik akibat usia operasi, hingga pengaruh lingkungan sekitar. Korosi menjadi salah satu penyebab utama kegagalan pada sistem perpipaan karena prosesnya berlangsung secara bertahap dan dapat mengurangi ketebalan dinding pipa sehingga kemampuan pipa dalam menahan tekanan internal mengalami penurunan (Askari et al., 2019; Zani & Supriyanto, 2021). Selain itu, kondisi lingkungan seperti kelembapan tanah, keberadaan air, temperatur, serta karakteristik fluida yang dialirkan dapat mempercepat proses degradasi material dan meningkatkan kemungkinan terjadinya kebocoran (Wasim & Djukic, 2022; Silvianita, 2025)).

Kebocoran pada jalur *flowline* merupakan salah satu permasalahan kritis dalam industri minyak dan gas bumi karena dapat memberikan dampak yang luas, seperti kehilangan fluida produksi, pencemaran lingkungan, kerusakan fasilitas, penghentian proses produksi, hingga risiko keselamatan pekerja. Kegagalan sistem perpipaan tidak hanya dipengaruhi oleh kondisi material, tetapi juga dapat terjadi akibat faktor manusia, metode pemeliharaan yang kurang optimal, kesalahan operasional, maupun faktor eksternal seperti aktivitas alat berat di sekitar jalur pipa. Oleh karena itu, pengelolaan integritas perpipaan perlu dilakukan dengan pendekatan berbasis risiko agar potensi kegagalan dapat diidentifikasi dan dikendalikan sebelum menyebabkan kerugian yang lebih besar (Vishnuvardhan et al., 2023; Chusnah & Cahyana, 2024).

PT. XYZ menggunakan jalur *flowline* pada sumur SGT-1 untuk menyalurkan fluida produksi dari *wellhead* menuju separator pada stasiun pengumpul awal. Berdasarkan hasil observasi lapangan, wawancara, dokumentasi, dan data historis perusahaan, ditemukan beberapa mode kegagalan yang berpotensi menyebabkan kebocoran pada jalur tersebut. Mode kegagalan tersebut meliputi kebocoran akibat korosi, penurunan kondisi akibat umur pipa, retak material atau kerusakan *elbow*, benturan alat berat, kerusakan *valve*, serta faktor kesalahan manusia (*human error*). Saat ini tindakan pengendalian yang dilakukan masih cenderung bersifat korektif, seperti pemasangan *clamp*, pengelasan, maupun penggantian komponen setelah kegagalan terjadi. Pendekatan tersebut mampu mengembalikan fungsi sistem dalam waktu tertentu, tetapi belum sepenuhnya mampu mencegah terjadinya kegagalan berulang karena belum mengidentifikasi tingkat risiko dan akar penyebab secara menyeluruh.

Berdasarkan kondisi tersebut, diperlukan suatu metode analisis yang mampu menentukan prioritas risiko dari setiap mode kegagalan serta mengidentifikasi penyebab utama terjadinya kegagalan. Salah satu metode yang banyak digunakan dalam analisis risiko kegagalan adalah *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA). FMEA merupakan metode sistematis yang digunakan untuk mengidentifikasi potensi kegagalan, menganalisis dampak yang ditimbulkan, serta menentukan tingkat prioritas risiko berdasarkan tiga parameter utama,

yaitu *Severity*, *Occurrence*, dan *Detection*. Ketiga parameter tersebut digunakan untuk menghitung nilai *Risk Priority Number* (RPN) sebagai dasar dalam menentukan urutan prioritas risiko kegagalan (IEC, 2018). Nilai RPN memberikan pendekatan kuantitatif sehingga perusahaan dapat menentukan mode kegagalan yang membutuhkan tindakan perbaikan terlebih dahulu (Kim & Zuo, 2018).

Namun, penggunaan metode FMEA saja memiliki keterbatasan karena hanya mampu memberikan prioritas risiko tanpa menjelaskan secara mendalam mengenai penyebab dasar dari suatu kegagalan. Oleh karena itu, diperlukan metode tambahan untuk melakukan analisis akar penyebab (*root cause*) terhadap mode kegagalan dengan tingkat risiko tertinggi. *Root Cause Analysis* (RCA) merupakan metode yang digunakan untuk menelusuri hubungan sebab-akibat suatu kegagalan sehingga dapat ditemukan faktor utama yang menyebabkan masalah tersebut terjadi. RCA dapat membantu organisasi menyusun tindakan perbaikan yang lebih efektif karena tidak hanya berfokus pada gejala kegagalan, tetapi juga pada sumber permasalahan utama (Wilson et al., 2021; Rizki & Saputra, 2022).

Dalam penelitian ini, analisis dilakukan secara terintegrasi dengan menggabungkan metode FMEA, Diagram Pareto berbasis nilai RPN, Diagram Fishbone, *5 Why Analysis*, dan RCA. FMEA digunakan untuk menentukan tingkat prioritas setiap mode kegagalan berdasarkan nilai risiko. Selanjutnya, Diagram Pareto digunakan untuk menentukan mode kegagalan dominan berdasarkan kontribusi nilai RPN. Mode kegagalan dengan tingkat risiko tertinggi kemudian dianalisis menggunakan Diagram Fishbone untuk mengelompokkan faktor penyebab berdasarkan aspek manusia (*man*), metode (*method*), material (*material*), dan lingkungan (*environment*). Analisis dilanjutkan menggunakan *5 Why Analysis* dan RCA untuk memperoleh akar penyebab utama serta menyusun rekomendasi perbaikan yang lebih tepat sasaran (Liu et al., 2013; Susendi & Saputra, 2022; Saekan & Ismiyah, 2026).

Kesenjangan penelitian (*research gap*) pada penelitian ini terletak pada kebutuhan untuk mengintegrasikan proses penentuan prioritas risiko dengan analisis akar penyebab kegagalan pada sistem *flowline*. Penelitian yang hanya menggunakan RCA mampu menjelaskan penyebab kegagalan, tetapi belum memberikan dasar numerik untuk menentukan risiko yang harus diprioritaskan. Sebaliknya, FMEA mampu memberikan nilai prioritas risiko melalui RPN, tetapi belum mampu menjelaskan hubungan sebab-akibat secara mendalam. Oleh karena itu, integrasi FMEA dan RCA dalam penelitian ini menjadi pendekatan yang memberikan nilai tambah karena mampu menghubungkan tingkat risiko dengan penyebab fundamental kegagalan sehingga rekomendasi perbaikan yang dihasilkan lebih sistematis dan berbasis risiko.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi mode kegagalan yang berpotensi menyebabkan kebocoran pada jalur *flowline* sumur SGT-1 PT. XYZ, menentukan tingkat risiko menggunakan metode FMEA melalui perhitungan nilai RPN, menentukan mode kegagalan prioritas menggunakan Diagram Pareto berbasis RPN, serta menganalisis akar penyebab kegagalan menggunakan Diagram Fishbone, *5 Why Analysis*, dan RCA. Selain itu, penelitian ini bertujuan menghasilkan rekomendasi perbaikan yang dapat digunakan sebagai dasar peningkatan keandalan sistem *flowline*.

Penelitian ini memberikan kontribusi secara akademik maupun praktis. Secara akademik, penelitian ini memberikan penerapan model integrasi metode FMEA dan RCA dalam analisis kegagalan sistem perpipaan minyak dan gas. Secara praktis, hasil penelitian dapat membantu PT. XYZ dalam menentukan strategi inspeksi, pemeliharaan preventif, dan pengendalian risiko berdasarkan tingkat prioritas kegagalan. Dengan demikian, perusahaan dapat mengurangi kemungkinan terjadinya kebocoran berulang, meningkatkan keandalan aset, serta menjaga keberlangsungan operasi produksi secara aman dan efektif.

B. TINJAUAN PUSTAKA

1. Sistem Perpipaan *Flowline*

Flowline merupakan salah satu bagian dari sistem perpipaan pada industri minyak dan gas bumi yang berfungsi sebagai jalur transportasi fluida produksi dari sumur (*wellhead*) menuju fasilitas pengumpulan atau fasilitas pengolahan awal seperti manifold dan separator. Keberadaan *flowline* memiliki peranan penting dalam menjaga keberlangsungan proses produksi karena berfungsi sebagai penghubung antara sumber produksi dengan fasilitas pemrosesan. Oleh karena itu, keandalan dan integritas sistem *flowline* menjadi aspek penting yang harus dipertahankan agar proses operasi berjalan aman dan berkelanjutan (Khan et al., 2021; Oktovia et al., 2026).

Pemilihan material pada sistem *flowline* harus disesuaikan dengan karakteristik fluida yang dialirkan, tekanan operasi, temperatur, serta kondisi lingkungan sekitar. Material yang tidak sesuai atau mengalami degradasi selama masa operasi dapat menyebabkan penurunan kemampuan mekanis pipa sehingga meningkatkan risiko terjadinya kegagalan. Pada industri minyak dan gas, material yang umum digunakan adalah baja karbon karena memiliki kekuatan mekanik yang baik dan biaya relatif ekonomis, namun material tersebut tetap memiliki kerentanan terhadap mekanisme korosi terutama pada lingkungan yang mengandung air, karbon dioksida (CO₂), dan hidrogen sulfida (H₂S) (Wasim & Djukic, 2022; Johansson et al., 2025; Zhang & Chen, 2025).

2. Kegagalan dan Kebocoran *Flowline*

Kegagalan pada sistem perpipaan merupakan kondisi ketika pipa tidak mampu menjalankan fungsi desainnya akibat adanya kerusakan struktural maupun penurunan performa material. Salah satu bentuk kegagalan yang sering terjadi pada sistem *flowline* adalah kebocoran. Kebocoran terjadi ketika fluida keluar dari sistem perpipaan akibat adanya kerusakan seperti korosi, retakan, penipisan dinding pipa, kegagalan sambungan, maupun kerusakan mekanis lainnya.

Korosi merupakan salah satu penyebab utama kegagalan pada sistem perpipaan minyak dan gas bumi. Proses korosi dapat terjadi secara internal maupun eksternal. Korosi internal dipengaruhi oleh karakteristik fluida yang mengalir seperti kandungan air, CO₂, H₂S, serta kondisi temperatur dan tekanan operasi. Sementara itu, korosi eksternal dapat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan seperti kelembapan tanah, genangan air, kerusakan lapisan pelindung, serta sistem proteksi korosi yang kurang optimal (Askari et al., 2019).

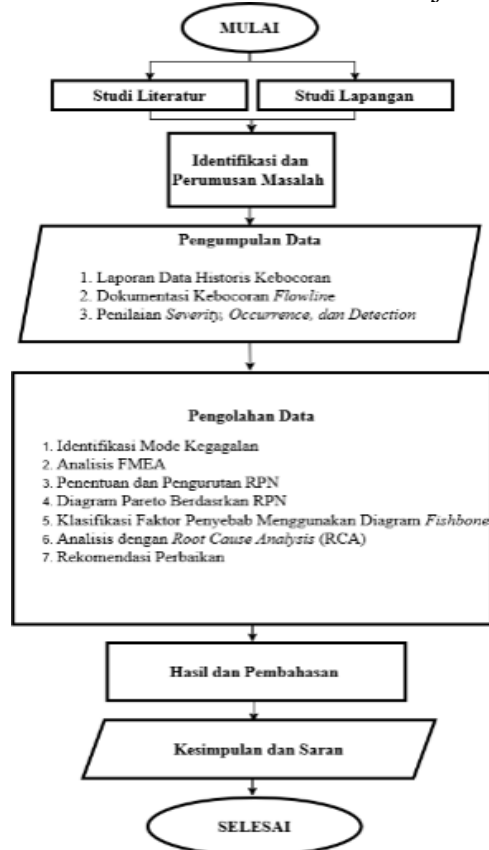
Selain korosi, kegagalan *flowline* juga dapat disebabkan oleh faktor lain seperti umur operasi pipa, kerusakan material, kesalahan pemasangan, kegagalan komponen pendukung seperti *valve*, aktivitas eksternal, serta faktor manusia (*human error*). Berbagai faktor tersebut dapat saling berinteraksi sehingga menyebabkan penurunan integritas pipa dan meningkatkan kemungkinan terjadinya kebocoran (Vishnuvardhan et al., 2023).

C. METODE

Penelitian ini dilaksanakan pada jalur *flowline* sumur SGT-1 PT. XYZ yang berlokasi di Kabupaten Kutai Timur, Kalimantan Timur, pada periode Januari hingga April 2026. Penelitian menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif dengan dukungan data kualitatif. Pendekatan kuantitatif digunakan untuk menentukan tingkat prioritas risiko setiap mode kegagalan, sedangkan data kualitatif digunakan untuk mengidentifikasi faktor penyebab dan menelusuri akar permasalahan kebocoran berdasarkan kondisi aktual di lapangan.

Data primer diperoleh melalui observasi langsung, wawancara dengan pihak yang terlibat dalam kegiatan operasi dan pemeliharaan, dokumentasi kondisi *flowline*, serta penilaian *Severity*, *Occurrence*, dan *Detection*. Data sekunder diperoleh dari data historis kebocoran, laporan inspeksi, riwayat pemeliharaan, dan dokumen pendukung perusahaan.

Data dianalisis menggunakan *Failure Mode and Effects Analysis* untuk menentukan nilai *Risk Priority Number* setiap mode kegagalan. Nilai RPN kemudian diurutkan dan disajikan menggunakan Diagram Pareto untuk menentukan risiko prioritas. Mode kegagalan dengan nilai RPN tertinggi dianalisis lebih lanjut menggunakan Diagram *Fishbone*, *5 Why Analysis*, dan *Root Cause Analysis* untuk menemukan akar penyebab serta menyusun rekomendasi perbaikan. Alur penelitian secara keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alur

1. Metode FMEA

Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) digunakan untuk menilai tingkat risiko setiap *failure mode* yang diperoleh melalui *fishbone* diagram. Penilaian dilakukan menggunakan tiga parameter, yaitu *Severity* (S), *Occurrence* (O), dan *Detection* (D) (Aisyah et al., 2011). Skala penilaian *severity* dapat dilihat pada Tabel 1

Tabel 1. Nilai *Severity*

Nilai	Kategori
1	Minor
2-3	Rendah
4-6	Sedang
7-8	Tinggi
9-10	Sangat Tinggi

Skala penilaian *Occurrence* dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Nilai *Occurrence*

Nilai	Kategori
1	Sangat Jarang
2	Sangat Rendah
3	Rendah

4-6	Sedang
7-8	Tinggi
9-10	Sangat Tinggi

Skala penilaian *Detection* dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Nilai *Detection*

Nilai	Kategori
1	Sangat Tinggi
2-5	Tinggi
6-8	Sedang
9	Rendah
10	Sangat Rendah

Nilai dari ketiga parameter tersebut digunakan untuk menghitung *Risk Priority Number* (RPN) dengan rumus sebagai berikut:

$$RPN = S \times O \times D$$

Keterangan:

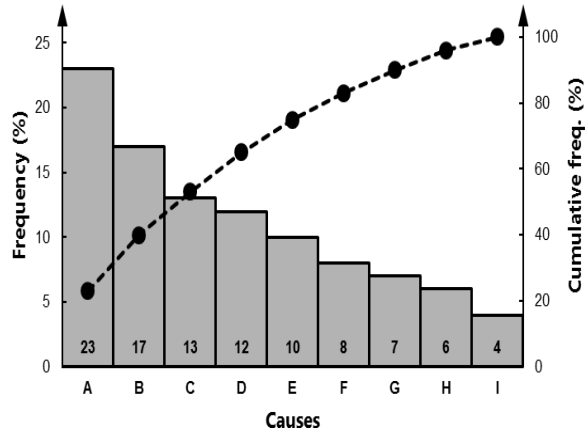
S = *Severity* (Tingkat Keparahan)

O = *Occurrence* (Frekuensi Kegagalan)

D = *Detection* (Kemampuan Deteksi)

2. Metode Diagram Pareto

Prinsip Diagram Pareto digunakan untuk menentukan prioritas permasalahan berdasarkan faktor yang memiliki frekuensi kejadian terbesar. Hasil analisis Pareto digunakan sebagai dasar dalam menentukan faktor utama yang akan dianalisis lebih lanjut menggunakan *Fishbone* Diagram dan *5 Why Analysis*. Kerangka diagram pareto yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Kerangka Diagram Pareto

3. Metode *Fishbone* Diagram

Fishbone diagram digunakan untuk mengidentifikasi faktor-faktor penyebab yang berkontribusi terhadap faktor dominan hasil analisis Pareto (Putu et al. 2022). Penyusunan diagram dilakukan berdasarkan hasil observasi lapangan, wawancara dengan pihak terkait, serta data historis kebocoran *flowline*.

Faktor penyebab kebocoran dikelompokkan berdasarkan beberapa kategori, yaitu manusia (*man*), metode (*method*), material (*material*), dan lingkungan (*environment*). Pengelompokan tersebut bertujuan untuk mengetahui hubungan antara permasalahan utama dengan berbagai faktor yang memengaruhinya secara sistematis.

4. Metode 5 Why Analysis

Metode 5 *Why Analysis* digunakan untuk menggali akar penyebab dari faktor penyebab yang telah diperoleh melalui *fishbone* diagram. Metode ini dilakukan dengan memberikan pertanyaan "mengapa" secara berulang hingga ditemukan penyebab mendasar dari suatu kegagalan. Pada penelitian ini, 5 *Why Analysis* digunakan untuk menganalisis penyebab utama kebocoran jalur *flowline* sehingga dapat diketahui faktor yang menjadi akar permasalahan dan menjadi dasar dalam penyusunan rekomendasi perbaikan.

5. Metode Root Cause Analysis (RCA)

Root Cause Analysis (RCA) merupakan metode utama yang digunakan dalam penelitian ini untuk mengidentifikasi akar penyebab kebocoran jalur *flowline* pada sumur SGT-1 PT. XYZ. RCA dilakukan dengan mengintegrasikan hasil analisis Diagram Pareto, *Fishbone* Diagram, dan 5 *Why Analysis*. Melalui pendekatan RCA, faktor penyebab kebocoran dianalisis secara sistematis untuk menentukan penyebab utama kegagalan sistem perpipaan serta menghasilkan rekomendasi tindakan pencegahan yang sesuai untuk meningkatkan keandalan jalur *flowline* (Jonathan et al. 2025).

D. HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Analisis Risiko Kebocoran Menggunakan FMEA

Berdasarkan hasil observasi lapangan, wawancara, dokumentasi, data historis kebocoran, serta laporan inspeksi dan pemeliharaan, diperoleh enam mode kegagalan pada proses penyaluran fluida melalui jalur *flowline*. Mode kegagalan tersebut terdiri atas kebocoran akibat korosi, umur pipa, retak material atau kerusakan *elbow*, benturan alat berat, *human error*, dan kerusakan *valve*. Setiap mode kegagalan dianalisis berdasarkan efek kegagalan, penyebab, sistem pengendalian yang telah diterapkan, serta nilai *Severity*, *Occurrence*, dan *Detection*. Hasil penilaian tersebut digunakan untuk menentukan nilai *Risk Priority Number* dan urutan prioritas risiko. Hasil analisis FMEA ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Analisis FMEA Kebocoran Jalur Flowline

No	Failure Mode	Potential Effect	Potential Cause	S	O	D	RPN
1	Kebocoran akibat korosi	Kehilangan fluida dan pencemaran lingkungan	Korosi internal atau eksternal	9	9	6	486
2	Kebocoran akibat umur pipa	Penurunan integritas pipa	Penuaan dan degradasi material	8	8	6	384
3	Retak material atau kerusakan <i>elbow</i>	Penurunan aliran dan gangguan operasional	<i>Fatigue</i> dan kualitas pengelasan	8	5	5	200
4	Kebocoran akibat benturan alat berat	Kebocoran mendadak	Aktivitas alat berat di sekitar jalur	9	3	5	135
5	Kebocoran akibat <i>human error</i>	Kehilangan fluida dan potensi kecelakaan	Kesalahan operasional	8	2	6	96
6	Kebocoran akibat <i>valve</i> patah	Gangguan operasi penyaluran fluida	Kerusakan mekanis	7	3	4	84

Berdasarkan Tabel 4, kebocoran akibat korosi memperoleh nilai RPN tertinggi sebesar 486 yang berasal dari nilai *Severity* 9, *Occurrence* 9, dan *Detection* 6. Nilai *Severity* yang tinggi

menunjukkan bahwa kegagalan akibat korosi dapat menimbulkan dampak serius berupa kehilangan fluida, pencemaran lingkungan, gangguan produksi, dan peningkatan risiko keselamatan kerja. Nilai *Occurrence* 9 menunjukkan bahwa korosi memiliki kemungkinan kejadian yang tinggi dibandingkan mode kegagalan lainnya. Sementara itu, nilai *Detection* 6 menunjukkan bahwa sistem pengendalian yang diterapkan belum mampu mendeteksi penurunan kondisi pipa secara optimal sebelum kebocoran terjadi.

Pengendalian korosi yang dilakukan saat ini masih berupa pemasangan *clamp* setelah kebocoran ditemukan. Pengendalian tersebut bersifat korektif karena dilakukan setelah kegagalan terjadi. Pemasangan *clamp* dapat menghentikan kebocoran sementara, tetapi belum menghilangkan penyebab degradasi material. Oleh karena itu, diperlukan pengendalian preventif melalui inspeksi ketebalan pipa, evaluasi kondisi *coating*, pemantauan laju korosi, dan pengendalian kondisi lingkungan di sekitar jalur *flowline*.

Kebocoran akibat umur pipa menempati peringkat kedua dengan nilai RPN sebesar 384. Nilai tersebut berasal dari *Severity* 8, *Occurrence* 8, dan *Detection* 6. Umur operasi yang panjang menyebabkan material mengalami penurunan sifat mekanis dan ketebalan dinding secara bertahap. Risiko menjadi lebih tinggi karena penggantian pipa masih dilakukan setelah kebocoran terjadi. Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem pemeliharaan belum sepenuhnya menggunakan pendekatan berbasis kondisi material. Penggantian *flowline* perlu mempertimbangkan umur operasi, riwayat kebocoran, hasil inspeksi ketebalan, kondisi lingkungan, dan tingkat degradasi material.

Retak material atau kerusakan *elbow* memperoleh nilai RPN sebesar 200 dan menempati peringkat ketiga. Mode kegagalan ini dapat dipengaruhi oleh beban berulang, getaran, perubahan tekanan, kualitas pengelasan, dan kondisi sambungan. Kerusakan pada bagian *elbow* perlu mendapat perhatian karena bagian tersebut mengalami perubahan arah aliran yang dapat meningkatkan tegangan lokal dan mempercepat degradasi material. Pengendalian dapat dilakukan melalui pemeriksaan sambungan, peningkatan kualitas pengelasan, pemeriksaan tanpa merusak, serta pemantauan getaran pada bagian yang dianggap kritis.

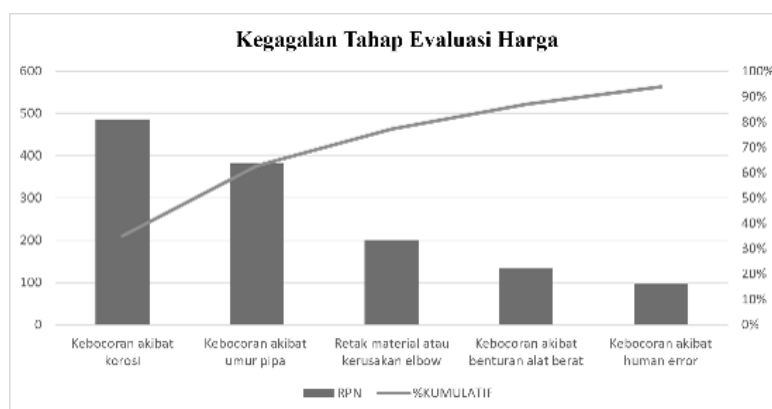
Benturan alat berat memperoleh nilai RPN sebesar 135. Meskipun nilai *Occurrence* relatif rendah, mode kegagalan ini memiliki nilai *Severity* 9 karena benturan dapat menyebabkan kerusakan mendadak dan kebocoran dalam skala besar. Pengendalian risiko dapat dilakukan melalui pemasangan *barrier*, penandaan jalur pipa, pembatasan akses alat berat, dan koordinasi sebelum pekerjaan dilakukan di sekitar jalur *flowline*.

Human error memperoleh nilai RPN sebesar 96. Kesalahan dapat terjadi dalam pelaksanaan operasi, inspeksi, pelaporan kondisi, atau penanganan awal kebocoran. Meskipun frekuensi kejadiannya relatif rendah, dampaknya dapat mencakup kehilangan fluida dan risiko kecelakaan. Upaya pengendalian perlu mencakup pelatihan operator, sosialisasi prosedur kerja, evaluasi kepatuhan terhadap SOP, dan peningkatan pengawasan kegiatan operasi.

Kerusakan *valve* memperoleh nilai RPN terendah sebesar 84. Kerusakan tersebut dapat disebabkan oleh penurunan kondisi mekanis, keausan, korosi, atau pemeliharaan yang belum optimal. Walaupun memiliki nilai RPN paling rendah, kerusakan *valve* tetap perlu dikendalikan karena dapat mengganggu proses pengaturan dan penghentian aliran. Pengendalian dapat dilakukan melalui inspeksi fungsi, pelumasan, pemeriksaan kebocoran, dan penggantian komponen berdasarkan kondisi aktual.

2. Analisis Faktor Dominan Menggunakan Diagram Pareto

Nilai RPN hasil analisis FMEA diurutkan dari nilai tertinggi hingga terendah dan disajikan dalam Diagram Pareto pada Gambar 3.

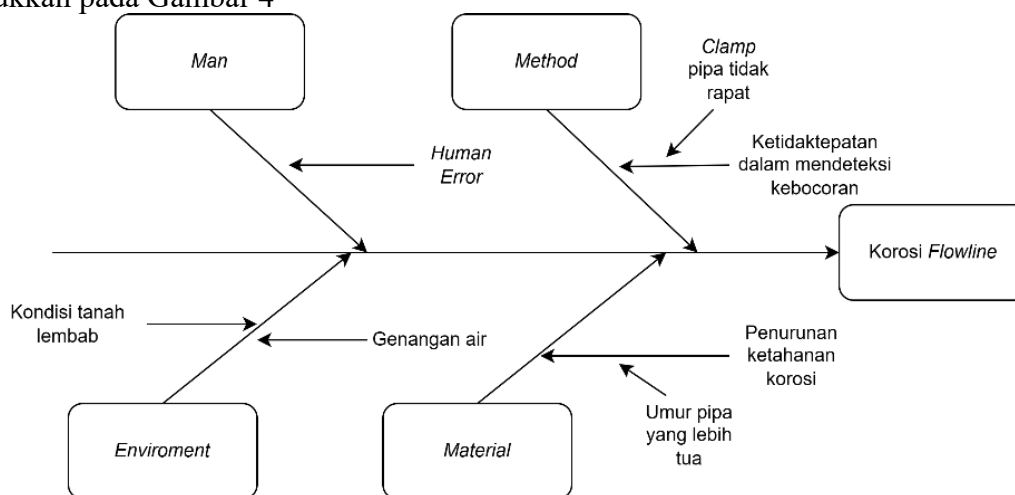


Gambar 3. Diagram Pareto

Berdasarkan Gambar 3, korosi memiliki nilai RPN tertinggi sebesar 486, diikuti umur pipa sebesar 384 dan retak material atau *elbow* sebesar 200. Selanjutnya, benturan alat berat memperoleh RPN 135, *human error* 96, dan *valve* patah 84. Korosi dipilih sebagai prioritas utama karena memiliki tingkat risiko tertinggi, sehingga dianalisis lebih lanjut menggunakan Diagram *Fishbone*, *5 Why Analysis*, dan *Root Cause Analysis*.

3. Analisis Penyebab Kebocoran Menggunakan *Fishbone Diagram*

Berdasarkan hasil analisis FMEA dan Diagram Pareto didapatkan nilai RPN, kebocoran akibat korosi merupakan mode kegagalan dengan tingkat risiko tertinggi, yaitu memiliki nilai RPN sebesar 486. Oleh karena itu, dilakukan analisis menggunakan *Fishbone Diagram* untuk mengidentifikasi faktor-faktor yang berkontribusi terhadap terjadinya korosi pada jalur *flowline*. Faktor penyebab dikelompokkan berdasarkan aspek lingkungan, metode, material, dan manusia. Hasil identifikasi penyebab kebocoran akibat korosi pada jalur *flowline* ditunjukkan pada Gambar 4



Gambar 4. Fishbone Korosi

Berdasarkan Gambar 4, korosi pada jalur *flowline* dipengaruhi oleh empat faktor utama. Faktor lingkungan meliputi genangan air dan kondisi tanah lembab yang mempercepat korosi eksternal. Faktor metode berkaitan dengan inspeksi dan pemeliharaan yang belum dilakukan secara optimal sehingga indikasi awal kerusakan tidak terdeteksi. Faktor material meliputi umur operasi, penurunan ketahanan material, dan penipisan dinding pipa. Faktor manusia berkaitan dengan pelaksanaan inspeksi, pemantauan, dan pemeliharaan yang belum dilakukan secara konsisten.

Berdasarkan hasil analisis *Fishbone Diagram*, faktor lingkungan, material, dan metode menjadi faktor utama yang berkontribusi terhadap korosi. Faktor-faktor tersebut selanjutnya dianalisis menggunakan *5 Why Analysis* untuk menentukan akar penyebab kebocoran.

4. Penentuan Akar Penyebab Menggunakan 5 *Why Analysis*

Setelah analisis *Fishbone Diagram*, faktor penyebab korosi dianalisis lebih lanjut menggunakan 5 *Why Analysis*. Metode ini digunakan untuk menelusuri hubungan sebab akibat secara bertahap hingga ditemukan penyebab mendasar kebocoran pada jalur *flowline*. Hasil analisis ditunjukkan pada Tabel 5 berikut ini:

Tabel 5. Analisis 5 *Why*

Tahapan	Analisis Penyebab
Why 1	Kebocoran terjadi karena ketebalan dinding pipa mengalami penurunan.
Why 2	Penurunan ketebalan terjadi akibat korosi eksternal pada permukaan pipa.
Why 3	Korosi eksternal terjadi karena pipa terpapar genangan air dan tanah lembap.
Why 4	Paparan air berlangsung karena kondisi drainase di sekitar jalur <i>flowline</i> belum optimal.
Why 5	Korosi berkembang hingga menyebabkan kebocoran karena umur operasi <i>flowline</i> yang panjang serta inspeksi dan pemeliharaan belum mampu mendeteksi degradasi material sejak tahap awal.

Kebocoran terjadi akibat penurunan ketebalan dinding pipa yang dipicu oleh korosi eksternal. Korosi berkembang karena paparan genangan air, tanah lembap, umur operasi yang panjang, serta sistem inspeksi dan pemeliharaan yang belum optimal. Hasil tersebut selanjutnya digunakan untuk menetapkan akar penyebab melalui *Root Cause Analysis*.

5. Rekomendasi Perbaikan Berdasarkan FMEA dan *Root Cause Analysis* (RCA)

Berdasarkan hasil analisis FMEA, Diagram Pareto, *Fishbone Diagram*, dan 5 *Why Analysis*, korosi menjadi mode kegagalan dengan nilai RPN tertinggi sebesar 486. Hasil analisis akar penyebab menunjukkan bahwa korosi eksternal dipengaruhi oleh kondisi lingkungan berupa genangan air dan tanah lembap, umur operasi *flowline* yang panjang, penurunan ketahanan material, serta sistem inspeksi dan pemeliharaan yang belum optimal. Oleh karena itu, rekomendasi perbaikan disusun berdasarkan urutan prioritas nilai RPN dan akar penyebab yang telah diidentifikasi.

Tabel 6. Rekomendasi Perbaikan

Prioritas	Mode Kegagalan	RPN	Rekomendasi Perbaikan
1	Korosi	486	Inspeksi ketebalan pipa, perbaikan <i>coating</i> , <i>monitoring</i> korosi, dan perbaikan drainase
2	Umur pipa	384	Penggantian <i>flowline</i> berdasarkan umur, kondisi aktual, dan hasil inspeksi
3	Retak material atau elbow	200	Peningkatan kualitas <i>welding</i> , pemeriksaan sambungan, dan <i>monitoring</i> getaran
4	Benturan alat berat	135	Pemasangan <i>barrier</i> dan penandaan jalur <i>flowline</i>
5	Human error	96	Pelatihan operator dan evaluasi kepatuhan terhadap SOP
6	Valve patah	84	Inspeksi dan pemeliharaan <i>valve</i> secara berkala

Berdasarkan Tabel 6, prioritas utama perbaikan diarahkan pada kebocoran akibat korosi karena memiliki nilai RPN tertinggi sebesar 486. Tindakan yang disarankan meliputi inspeksi ketebalan pipa, perbaikan *coating*, pemantauan korosi, serta perbaikan sistem drainase. Rekomendasi tersebut sesuai dengan hasil analisis akar penyebab yang menunjukkan bahwa korosi dipengaruhi oleh genangan air, kondisi tanah lembap, umur operasi *flowline*, dan sistem inspeksi yang belum optimal.

Prioritas berikutnya adalah kebocoran akibat umur pipa dengan nilai RPN sebesar 384 dan kerusakan material atau *elbow* sebesar 200. Perbaikan diarahkan pada penggantian *flowline* berdasarkan kondisi aktual dan hasil inspeksi, peningkatan kualitas pengelasan, pemeriksaan sambungan, serta pemantauan getaran. Sementara itu, risiko akibat benturan alat berat, *human error*, dan kerusakan *valve* dikendalikan melalui pemasangan *barrier*, pelatihan operator, evaluasi kepatuhan terhadap SOP, serta pemeliharaan *valve* secara berkala.

Rekomendasi perbaikan tidak hanya berfokus pada penanganan setelah kebocoran terjadi, tetapi diarahkan pada tindakan preventif berdasarkan tingkat risiko dan akar penyebab kegagalan. Integrasi FMEA dan RCA membantu perusahaan menentukan tindakan perbaikan secara lebih terukur, terarah, dan sesuai dengan prioritas risiko pada jalur *flowline*.

E. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian mengenai analisis penyebab kebocoran jalur *flowline* pada sumur SGT-1 PT. XYZ, dapat disimpulkan bahwa terdapat enam mode kegagalan yang berpotensi menyebabkan terjadinya kebocoran, yaitu korosi, umur pipa, retak material atau kerusakan *elbow*, benturan alat berat, *human error*, dan kerusakan *valve*. Hasil analisis menggunakan metode FMEA menunjukkan bahwa korosi merupakan mode kegagalan dengan tingkat risiko tertinggi berdasarkan nilai *Risk Priority Number* (RPN) sebesar 486, sehingga menjadi prioritas utama untuk dilakukan pengendalian dan perbaikan.

Hasil analisis lanjutan menggunakan Diagram Fishbone, *5 Why Analysis*, dan *Root Cause Analysis* (RCA) menunjukkan bahwa penyebab utama kebocoran akibat korosi berasal dari kombinasi faktor umur operasi *flowline* yang panjang, kondisi lingkungan berupa genangan air dan tanah lembap, penurunan ketahanan material, serta belum optimalnya kegiatan inspeksi dan pemeliharaan. Temuan tersebut menunjukkan bahwa kebocoran tidak hanya disebabkan oleh faktor teknis material, tetapi juga dipengaruhi oleh faktor lingkungan dan sistem pengelolaan pemeliharaan.

Rekomendasi perbaikan yang dapat diterapkan meliputi pelaksanaan inspeksi ketebalan pipa secara berkala, peningkatan perlindungan *coating*, pengendalian sistem drainase di sekitar jalur *flowline*, pemantauan laju korosi, serta evaluasi penggantian pipa berdasarkan kondisi aktual dan umur operasi. Integrasi metode FMEA dan RCA dalam penelitian ini memberikan pendekatan yang lebih komprehensif karena mampu menghubungkan tingkat prioritas risiko dengan akar penyebab kegagalan, sehingga dapat mendukung pengambilan keputusan pemeliharaan yang lebih efektif.

Penelitian ini memiliki keterbatasan karena analisis dilakukan berdasarkan data historis kebocoran, hasil observasi lapangan, dan informasi dari pihak terkait pada satu lokasi penelitian, sehingga hasil penelitian belum menggambarkan seluruh variasi kondisi sistem *flowline* pada fasilitas minyak dan gas lainnya. Selain itu, penelitian belum melakukan analisis kuantitatif terhadap laju korosi, sisa umur pipa (*remaining life assessment*), maupun evaluasi keekonomian terhadap alternatif perbaikan yang diberikan. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya dapat mempertimbangkan pengujian teknis material, analisis umur sisa pipa, serta pendekatan biaya manfaat untuk menghasilkan strategi mitigasi risiko yang lebih optimal.

DAFTAR PUSTAKA

- Arvanitoyannis, I. S., & Varzakas, T. H. (2021). Application of failure mode and effect analysis (FMEA) in risk assessment and quality management systems. *Safety Science*, 140, 105298.
- Askari, M., Aliofkhazraei, M., & Afroukhteh, S. (2019). A comprehensive review on internal corrosion and cracking of oil and gas pipelines. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 71, 102971.

- Bouti, A., & Kadi, D. A. (2022). A state-of-the-art review of failure mode and effects analysis methodologies. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 39(5), 1125–1148.
- Chusnah, A. U., & Cahyana, A. S. (2024). Pengendalian Kualitas Produk Griller Menggunakan Failure Mode Effect and Analysis (FMEA) dan Root Cause Analysis (RCA). *Jurnal Optimalisasi*, 10(1), 156-166.
- International Electrotechnical Commission. (2018). *IEC 60812:2018 Failure modes and effects analysis (FMEA and FMECA)*. Geneva: International Electrotechnical Commission.
- Johansson, E. J. E., Andersen, N., & van Dijk, P. V. D. P. (2025). End-to-End Survey Productivity in Engineering Construction: Modeling Time-to-Decision Under Accuracy Constraints. *Techne: Journal of Engineering, Technology and Industrial Applications*, 1(1), 97-111.
- Khan, F., Yarveisy, R., & Abbassi, R. (2021). Risk-based pipeline integrity management: A roadmap for resilient pipelines. *Journal of Pipeline Science and Engineering*, 1(1), 74–87.
- Kim, K. O., & Zuo, M. J. (2018). General model for the risk priority number in failure mode and effects analysis. *Reliability Engineering & System Safety*, 169, 321–329.
- Kusuma, P. L. (2024). *Analisis Pengendalian Risiko Kegagalan Proses Pada Pekerjaan RIG dengan Metode Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) dan Fault Tree Analysis (FTA) PT. XYZ* (Doctoral dissertation, Universitas Islam Indonesia).
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.08.010>
- Nasrazadani, S., & Akhtar, M. A. (2018). Failure analysis of API 5L (Grade B) oil field separator flowline pipe. *Engineering Failure Analysis*, 89, 220–229.
- Oktovia, T., Wiyatno, T. N., & Anisah, F. A. F. (2026). Analisis Penyebab Dan Usulan Perbaikan Cacat Silver Pada Proses Injection Molding Dengan Metode Root Cause Analysis (RCA) Dan Failure Mode and Effect Analysis (FMEA). *Jurnal Teknologi dan Manajemen Industri Terapan*, 5(3), 1237-1245.
- Rausand, M. (2021). *Risk assessment: Theory, methods, and applications*. Hoboken: Wiley.
- Rizki, M., & Saputra, A. (2022). Analisa Risiko Supply Chain Management dengan Metode Grey Failure Mode and Effect Analysis dan Root Cause Analysis di PT Pertamina Fuel Terminal Meulaboh. *Jurnal Serambi Engineering*, 7(1), 2783-2790.
- Saekan, M., & Ismiyah, E. (2026). Analisis Pengendalian Kualitas Produk Tas Ransel Menggunakan Metode FMEA dan RCA:(Studi Kasus: CV. SMY). *Jurnal Teknologi dan Manajemen Industri Terapan*, 5(1), 585-595.
- Silvianita, P. D. (2025). *Manajemen Risiko Pada Anjungan Minyak*. Yogyakarta: Andi.
- Susendi, N., Suparman, A., & Sopyan, I. (2021). Kajian Metode Root Cause Analysis yang Digunakan dalam Manajemen Risiko di Industri Farmasi. *Majalah Farmasetika*, 6(4), 310-321.
- Syamikha, K. D., & Islami, M. C. P. A. (2025). Penggunaan Metode Fuzzy Failure Mode and Effect Analysis Pada Hasil Inspeksi Proteksi Katodik PT PGAS Solution Area Bekasi. *Jurnal Serambi Engineering*, 10(1).
- Wang, J., Huang, X., Qi, W., Zhang, C., Zhao, Y., Dai, Y., Zhang, T., & Wang, F. (2020). Corrosion failure analysis of the 45-degree elbow in a natural gas gathering pipeline by experimental and numerical simulation. *Engineering Failure Analysis*, 118, 104889.
- Wasim, M., & Djukic, M. B. (2022). External corrosion of oil and gas pipelines: A review of failure mechanisms and predictive preventions. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 100, 104467. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2022.104467>

- Yanti, I. D., & Bukhori, A. A. (2025, December). Identifikasi Dan Penanganan Kebocoran Plastik Inner Menggunakan Metode Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) Pada Lini Pengemasan Tepung Tapioka. In *Prosiding Seminar Nasional Multi Disiplin Ilmu (SENADIMU)* (Vol. 2, No. 1, pp. 134-145).
- Zani, F. R., & Supriyanto, H. (2021, October). Analisis Perbaikan Proses Pengemasan Menggunakan Metode Root Cause Analysis Dan Failure Mode and Effect Analysis Dalam Upaya Meningkatkan Kualitas Produk Pada CV. XYZ. In *Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi Terapan* (Vol. 9, No. 1, pp. 140-146).
- Zhang, W. Z. W., & Chen, L. C. L. (2025). Wireless Structural Monitoring Under Real-World Constraints: Quantifying the Impact of Data Loss and Time Synchronization Errors on Damage Detectability. *Techne: Journal of Engineering, Technology and Industrial Applications*, 1(1), 112-123.