



Mitigasi Risiko Terhadap Penyaluran *Crude Oil* Melalui *Pipeline* Menggunakan Metode Fmea dan Rca di PT. XYZ

Risk Mitigation for Crude Oil Distribution Through Pipeline Using Fmea and RCA Methods at PT. XYZ

^{1)*} **Dany Alrasyid**, ²⁾ **Oksil Venriza**

¹² Politeknik Energi dan Mineral AKAMIGAS, Indonesia

Email: ¹danyalasyid14@gmail.com, ²oksil.venriza@esdm.go.id

*Correspondence: *Dany Alrasyid*

DOI:

10.59141/comserva.v4i7.2606

ABSTRAK

Sistem perpipaan telah terbukti sangat efektif dan efisien dalam mengalirkan produk minyak dan gas dalam industri minyak dan gas bumi, terutama untuk jarak yang jauh melalui laut dan darat, dengan metode distribusi utamanya adalah sistem perpipaan. Untuk mengalirkan produk minyak dan gas, sistem perpipaan dianggap lebih efisien dan efektif dalam hal kapasitas dan jarak tempuh. Di PT. XYZ, proses distribusi minyak mentah menggunakan infrastruktur jalur pipa. Namun, bahaya dan risiko yang mungkin terjadi, seperti kebocoran, tumpahan, dan ledakan dapat mengakibatkan kerugian besar jika terjadi kegagalan pada jalur pipa. Oleh karena itu, pentingnya identifikasi risiko pada jaringan pipa produk menjadi sangat signifikan. Untuk mengurangi risiko kerusakan pada pipa penyaluran, metode Failure Mode Effect Analysis (FMEA) digunakan untuk mengidentifikasi risiko, dan penentuan strategi perbaikan dengan metode Root Cause Analysis (RCA). Berdasarkan metode FMEA nilai bobot RPN tertinggi sebesar 367,03 yaitu risiko tekanan berlebih pada pipa, peringkat kedua yaitu risiko korosi pada pipa dengan nilai RPN sebesar 295,3, dan peringkat ketiga yaitu risiko kegagalan sistem pengawasan dan pemeliharaan. Adapun usulan perbaikan pada risiko tekanan berlebih pada pipa yaitu penambahan katup Pelepas tekanan (pressure relief valve) yang berguna membuang tekanan berlebih pada pipa, risiko korosi pada pipa yaitu penggunaan inhibitor korosi yang berguna menetralkan asam, dan pelapisan epoksi, risiko kegagalan sistem pengawasan dan pemeliharaan yaitu pelatihan dan peningkatan kompetensi untuk tim inspeksi dan pemeliharaan.

Kata kunci: Pipeline, minyak mentah, Failure Mode Effect Analysis (FMEA), RootCause Analysis (RCA).

ABSTRACT

The pipeline system has proven to be highly effective and efficient in transporting oil and gas products in the oil and gas industry, especially for long distances both offshore and onshore, with the primary distribution method being the pipeline system. In PT. XYZ, the distribution process of crude oil utilizes pipeline infrastructure. However, potential hazards and risks such as leaks, spills, and explosions could result in significant losses if there is a failure in the pipe-line network. Therefore, the importance of identifying risks in the product pipeline network becomes highly significant. To reduce the risk of damage to distribution pipelines, the

Failure Mode Effect Analysis (FMEA) method is used to identify risks, and weighting criteria and improvement strategies are determined using the Root Cause Analysis (RCA) method. Based on the FMEA method, the highest RPN value is 367.03, which corresponds to the risk of excessive pressure in the pipeline. The second highest risk is pipeline corrosion, with an RPN value of 295.3, and the third highest is the risk of failure in the monitoring and maintenance system. The proposed improvements for the risk of excessive pressure in the pipeline include the addition of pressure relief valves, which are useful for releasing excess pressure from the pipeline. To address the risk of pipeline corrosion, the use of corrosion inhibitors to neutralize acids and the application of epoxy coatings are recommended. For the risk of failure in the monitoring and maintenance system, it is suggested to provide training and enhance the competency of the inspection and maintenance teams.

Keywords: Pipeline, Crude oil, Failure Mode Effect Analysis (FMEA), Root Cause Analysis (RCA).

PENDAHULUAN

Sistem perpipaan telah terbukti sangat efektif dan efisien dalam mengalirkan produk minyak dan gas dalam industri minyak dan gas bumi, terutama untuk jarak yang jauh melalui laut dan darat. Namun, jalur pipa yang berbeda dapat menyebabkan risiko keselamatan seperti kebocoran, tumpahan, ledakan, dan pencemaran lingkungan. Faktor internal, seperti korosi, dan eksternal, seperti iklim dan interaksi dengan masyarakat sekitar, memengaruhi berbagai masalah ini.

Di Indonesia, terdapat beberapa peristiwa yang berkaitan dengan pipa transmisi minyak mentah dalam tujuh tahun terakhir, salah satunya terjadi pada akhir Maret 2018 ketika pipa penyalur minyak mentah berukuran 20 inci dan ketebalan 12 mm bocor ke kilang PT. Pertamina RU V di Balikpapan dari Lawe-Lawe. Faktor-faktor eksternal diduga bertanggung jawab atas kegagalan pipa tersebut, termasuk kekurangan perawatan dan inspeksi pipa yang cukup, kekurangan sistem pemantauan pipa otomatis, dan kekurangan sistem peringatan dini. Lima nelayan tewas dan lingkungan Teluk Balikpapan terpengaruh oleh kebocoran minyak mentah ini. Sekitar 7.000 hektar tanah terpengaruh oleh tumpahan minyak, dengan panjang pantai sekitar 60 kilometer antara Kota Balikpapan dan Penajam Paser Utara.

Mengingat efek besar yang disebabkan oleh risiko kegagalan pada pipa transmisi minyak mentah, seperti yang ditunjukkan dalam kasus sebelumnya, Singkatnya, sangat penting untuk memahami semua bahaya yang mungkin terjadi di tempat kerja. Anda juga harus tahu prosedur yang berlaku, alasan kecelakaan kerja, dan cara mengurangi risiko. Untuk mengidentifikasi dan mengklasifikasikan faktor penyebab kejadian mencegah dan menanggulangi risiko pada pipa penyaluran, pengelolaan risiko harus dilakukan dengan metode seperti *Root Cause Analysis* (RCA) dan Analisis Mode dan Efek Kegagalan (FMEA). Metode terstruktur FMEA menemukan dan mencegah sebanyak mungkin mode kegagalan. Metode FMEA digunakan untuk menilai risiko dan pengaruh terhadap penurunan kualitas pipa berdasarkan penelitian-penelitian terdahulu.

Root Cause Analysis (RCA) bertujuan untuk mengidentifikasi dan mengklasifikasikan masalah dasar yang bertanggung jawab atas peristiwa tertentu. Dari penjelasan di atas, penulis memutuskan untuk mengambil judul Mitigasi Risiko Terhadap Penyaluran *Crude Oil* Melalui *Pipeline* Menggunakan Metode FMEA dan RCA di PT. XYZ sebagai judul penelitian untuk Tugas Kerja Wajib Tingkat III tahun

2024.

METODE PENELITIAN

A. Jenis Penelitian

Dalam penelitian deskriptif ini, penulis menggunakan pendekatan kuantitatif. Metode deskriptif digunakan untuk mencari akar masalah dengan menilai FMEA dan RCA. Penelitian ini akan menemukan cara terbaik untuk mengurangi risiko penurunan kualitas pipa selama proses penyaluran.

B. Subjek Penelitian

Subjek dalam judul ini merujuk kepada PT. XYZ. PT. XYZ merupakan subjek yang akan mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mengelola risiko- risiko yang terkait dengan analisis efekmode kegagalan (FMEA) dan proses *Root Cause Analysis* (RCA) untuk menyalurkan crude oil melalui *pipeline*.

C. Objek Penelitian

Fokus penelitian ini adalah pengoptimalan pipa penyaluran PT. XYZ. Dalam penulisan ini, pipa penyaluran dioptimalkan terkait dengan kualitas material. Dengan menggunakan metode *Failure Mode Effect Analysis* (FMEA), penulis menemukan risiko yang disebabkan oleh kerusakan pipa saat penyaluran produk. Setelah itu dilakukan pembobotan kriteria dan strategi perbaikan yang harus dilakukan oleh perusahaan menggunakan metode *Root Cause Analysis* (RCA).

D. Sumber Data

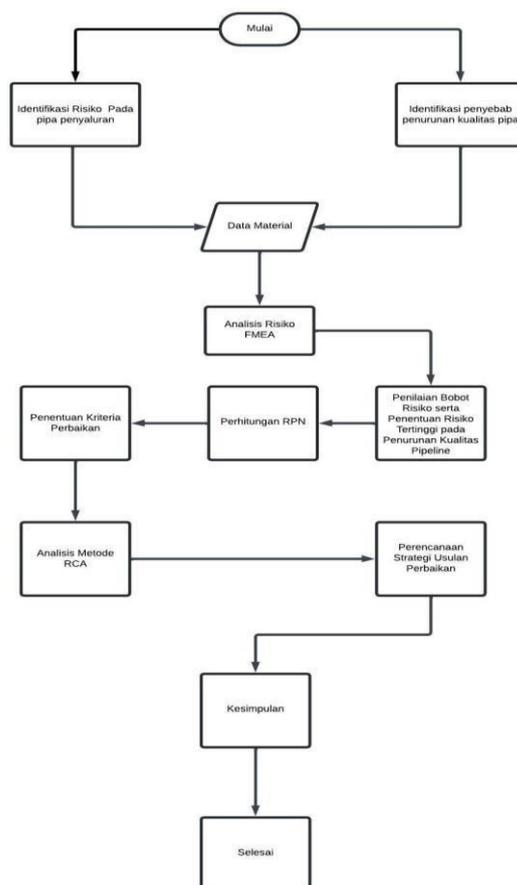
Basis atau lokasi sumber data yang digunakan dalam penelitian ini. Data primer dan sekunder adalah dua kategori sumber data.

E. Teknik Pengumpulan Data

Penelitian ini menggunakan metode data data penelitian agar dapat mendukung kegiatan penulisan, dalam pengumpulan data terdapat dua Teknik metode pengumpulan data yang akanditeliti. Penelitian ini menggunakan dua pendekatan untuk mengumpulkan data: studi pustaka dan studi lapangan. Peneliti membaca literatur yang relevan dengan topik permasalahan untuk memperoleh data sekunder guna menunjang data primer dari hasil observasi lapangan. Beberapa literatur yang diambil bersumber dari arsip *Daily Report Inspection*, Jurnal, dan studiliteratur lainnya.

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Diagram *Fishbone*



Gambar 1. Diagram *Fishbone*

Dimulai dengan masalah banyaknya pipa yang rusak dan data yang menunjukkan penyebab kerusakan pipa, diagram ini menunjukkan langkah-langkah penyelesaian masalah penyaluran pipa di PT XYZ. Metode Failure Mode Effect Analysis (FMEA) dan Root Cause Analysis (RCA) digunakan untuk menyelesaikan masalah ini. Selain itu, informasi yang telah dikumpulkan digunakan untuk menghitung tingkat risiko terbesar yang berpotensi menyebabkan cacat material. Setelah itu, metode RCA digunakan untuk mencari cara untuk meningkatkan.

B. Kondisi Existing Penyaluran Crude Oil Menggunakan Pipa

Proses penyaluran minyak menggunakan pipa melibatkan beberapa tahapan dan komponen penting yang dirancang untuk memastikan pengiriman minyak mentah atau produk minyak jadi secara efisien dan aman. Berikut adalah langkah-langkah umum dalam proses tersebut:

1. Ekstraksi dan Pengumpulan Minyak

Minyak mentah diambil dari sumur minyak dan dikumpulkan di stasiun pengumpulan. Di sini, minyak mentah dipisahkan dari air dan gas melalui proses pemisahan awal.

2. Pemrosesan Awal

Minyak mentah yang telah dipisahkan dari air dan gas kemudian diproses lebih lanjut untuk menghilangkan kotoran. Setelah itu, minyak disimpan sementara dalam tangki penyimpanan sebelum dialirkan ke pipa utama.

3. Stasiun Pompa

Minyak dari tangki penyimpanan dipompa ke jaringan pipa utama melalui stasiun pompa. Stasiun-stasiun pompa ini ditempatkan di berbagai titik sepanjang jalur pipa untuk mempertahankan tekanan minyak dan memastikan aliran yang terus menerus.

4. Jalur Pipa Utama

Minyak mengalir melalui pipa utama yang biasanya terbuat dari baja atau bahan tahan korosi lainnya. Pipa ini bisa berdiameter besar dan membentang hingga ratusan atau ribuan kilometer, tergantung pada jarak antara sumur minyak dan titik distribusi.

5. Monitoring dan Kontrol

Selama aliran melalui pipa, sistem SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) digunakan untuk memantau dan mengendalikan aliran minyak. Sistem ini mencakup berbagai sensor yang memonitor tekanan, suhu, dan laju aliran minyak di sepanjang pipa. Data dari sensor-sensor ini dikirim ke pusat kontrol untuk memastikan operasi berjalan lancar dan mendeteksi kebocoran atau masalah lainnya.

6. Stasiun Pengurangan Tekanan dan Penyaringan

Di beberapa titik sepanjang jalur pipa, minyak mungkin perlu melalui stasiun pengurangan tekanan atau penyaringan untuk memastikan bahwa kualitas dan tekanan minyak tetap sesuai standar sebelum mencapai tujuan akhir.

7. Terminal Penyimpanan dan Distribusi

Setelah sampai di terminal penyimpanan, minyak disimpan dalam tangki besar. Dari sini, minyak didistribusikan lebih lanjut melalui pipa tambahan, truk tangki, atau kapal tanker ke kilang atau langsung ke pasar.

8. Penerimaan di Kilang

Jika minyak mentah dikirim ke kilang, proses lebih lanjut dilakukan untuk memurnikan dan mengolah minyak menjadi berbagai produk jadi seperti bensin, diesel, dan bahan bakar jet.

C. Evaluasi pipa penyaluran

Pipa penyaluran minyak adalah sistem pipa yang digunakan untuk mengangkut minyak mentah atau produk olahan minyak (seperti bensin, diesel, dan minyak tanah) dari lokasi produksi atau penyimpanan ke tempat tujuan seperti kilang, terminal distribusi, atau fasilitas penyimpanan. Pipa penyaluran minyak adalah bagian kritis dari infrastruktur energi, memastikan minyak dan produk sampai dengan tepat waktu. Oleh karena itu, PT XYZ harus mengoptimalkan fasilitas penyalurannya untuk memastikan bahwa pipa tetap aman dan tidak mengalami kerusakan. Oleh karena itu, dibutuhkan strategi untuk mengoptimalkan proses dan mencegah kerusakan pipa. Penelitian ini akan melakukan optimalisasi pipa penyaluran dengan memilih strategi yang dapat digunakan untuk upaya perbaikan pipa setelah meneliti risiko kerusakan pipa. Kerusakan pipa penyaluran adalah masalah PT

XYZ. Beberapa penyebab masalah ini telah diidentifikasi melalui penelitian risiko. Tantangan dalam pipa penyaluran meliputi korosi pada pipa, terjadinya tekanan yang berlebih didalam pipa akibat aliran fluida yang tidakberaturan, kurangnya perlindungan terhadap cuaca seperti hujan dan panas, kesalahan selama proses instalasi seperti sambungan yang tidak tepat atau kesalahan pengelasan, serta kelalaian dalam pengawasan pada pipa. Akibatnya, optimalisasi gudang diperlukan. *Mode Effect Analysis* (FMEA) dan RCA dapat digunakan untuk mengurangi risiko penurunan kualitas material pipa selama proses penyaluran.

D. Efek Pipa Penyaluran Pada Risiko Kerja

Resiko yang terkait dengan pipa penyaluran termasuk risiko individu, teknik, dan sarana dan fasilitas yang kurang. Tabel 1 di bawah ini menunjukkan faktor-faktor yang berpotensi menyebabkan kerusakan pipa:

Tabel 1. Resiko Penyaluran Pipa

No	Resiko Pipa Penyaluran
1.	Korosi pada pipa
2.	Tekanan berlebih yang terjadi pada pipa
3.	Pengaruh lingkungan
4.	Kegagalan sistem pengawasan dan pemeliharaan

Berdasarkan tabel di atas, dapat disimpulkan bahwa sistem penyaluran PT XYZ memiliki 4 (empat) variable resiko pipa penyaluran. Resiko pada pipa penyaluran pertama ialah adanya korosi pada pipa yang terjadi akibat adanya kandungan hidrogen, sulfur, oksigen, dan nitrogen menyebabkan penipisan pada material pipa dimana saat pipa tersebut semakin menipis akhirnya akan mengalami kebocoran pada pipa tersebut. Resiko pipa penyaluran yang kedua ialah terjadinya tekanan yang berlebih pada pipa. Tekanan yangberlebihan didalam pipa bisa menyebabkan kebocoran. Ini bisa terjadi jika pipa tidak dirancang untuk menahan tekanan yang digunakan atau jika ada lonjakan tekanan tiba-tiba. Resiko penyaluran ketiga adalah pengaruh lingkungan seperti gempa bumi, tanah longsor, atau pergeseran tanah dapat menyebabkan pipa bergeser, retak, bahkan pecah. Resiko pada pipa penyaluran keempat adalah kegagalan sistem pengawasan dan pemeliharaan seperti inspeksi tidak memadai atau tidak melakukan inspeksi secara rutin dan mendetail dapat membuat masalah kecil berkembang menjadi kerusakan besar, dan pemeliharaan yang buruk atau kurangnya perawatan preventif dan perbaikan tepat waktu dapat mempercepat penurunan kualitas pada pipa penyaluran.

E. Pengukuran Risiko Penyaluran

Pengukuran resiko pipa penyaluran ini menggunakan metode FMEA (*Failure Mode And Effect Analysis*) serta akan dilakukan pembobotan dengan *Risk Priority Number* (RPN) yang didapatkan dari perkalian nilai *severity*, *occurance*, *detection*. Resiko dengan nilai RPN tertinggi menjadi prioritas dalam penanganan resiko tersebut.

Tablel 2 di bawah ini menunjukkan perhitungan nilai RPN. Perhitungan ini dilakukan untuk menentukan resiko prioritas yang harus ditangani dan untuk menentukan hasil RPN dengan nilai tertinggi untuk menentukan prioritas yang harus segera ditangani. Nilai RPN juga

diperalingkingkan dari nilai tertinggi ke nilai terendah:

Tabel 2. Perhitungan Nilai RPN

Resiko	Masalah yang timbul	O	Akibat	S	Kontrol yang dilakukan	D
Korosi pada pipa	Adanya kandungan hidrogen, sulfur, oksigen, dan nitrogen pada minyak mentah	7	Berkaratnya pipa penyaluran menyebabkan kontaminasi minyak dengan partikel-partikel karat	6,75	Pelapis anti korosi seperti bitumen bumi, cat anti korosi terbuat dari korosi	6,25
Tekanan berlebih pada pipa	Terjadinya penyok pada pipa penyaluran	7,25	Rusaknya estetika dan kemungkinan kualitas serta fungsional pipa berkurang	6,75	Penambahan katup pelepas tekanan (<i>pressure relief Valve</i>)	7,5
Faktor Lingkungan	Terjadinya bencana gempa bumi disekitar pipa penyaluran	7	Retak/patahnya pipa yang menyebabkan kebocoran	6	Menempatkan pipa penyaluran yang tidak rawan bencana alam	5,5
Kegagalan sistem pengawasan dan pemeliharaan	Tidak ada pengawasan dan pemeliharaan yang maksimal dari pekerja	6	Tidak terdeteksinya kerusakan pada pipa penyaluran	7,25	Pelatihan pengawas dan pekerja pemeliharaan pipa	6

Setelah memperoleh nilai severity, occurrence, dan detection dari masing-masing bobot, perkalian dari masing-masing bobot dilakukan untuk menghasilkan nilai RPN berikut:

Tabel 3. Perhitungan Nilai RPN

No	Cause Of Failure	S	O	D	RPN	Peringkat
1	Korosi pada pipa	6,75	7	6,25	295,3	2
2	Tekanan berlebih pada pipa	6,75	7,25	7,5	367,03	1
3	Pengaruh Lingkungan	6	7	5,5	231	4
4	Kegagalan sistem Pengawasan dan pemeliharaan	7,25	6	6	261	3

Berdasarkan perhitungan RPN diatas bahwasannya pipa penyaluran yang memiliki tekanan yang berlebih merupakan resiko tertinggi, karena disebabkan kelonjakan aliran tinggi yang tiba-tiba sehingga terjadinya penyok pada pipa yang mengakibatkan rusaknya estetika dan kemungkinan kualitas serta fungsional pipa berkurang. Selanjutnya peringkat resiko tertinggi kedua yaitu korosi pada pipa. Karena adanya kandungan hidrogen, sulfur, oksigen, dan nitrogen pada minyak mentah.

Kemudian peringkat resiko tertinggi ketiga yaitu kegagalan sistem pengawasan dan pemeliharaan. Kurangnya sistem peralatan yang memadai dan sumber daya manusia dalam pengawasan pipa secara teratur, termasuk pada pekerja pemeliharaan yang kurang pengetahuan tentang pipa menyebabkan pipa mengalami penurunan kualitas.

F. Perencanaan Strategi Usulan Perbaikan dengan Metode RCA (Root Cause Analysis)

Bertujuan untuk menemukan risiko terbesar dalam kegiatan pipa penyaluran, maka analisis data RCA dilakukan. Tujuannya adalah menemukan solusi yang dapat mencegah kejadian berisiko. Sistem pertanyaan "why" dan "what" digunakan dalam pendekatan RCA ini untuk mengidentifikasi faktor penyebab risiko tersebut.

Tabel 4. Rekapitulasi Wawancara

Resiko terbesar yang terjadi	Faktor terjadi resiko	Root Cause Resiko
Tekanan berlebih pada pipa	Karena terjadi tekanan yang berlebih menyebabkan penyok pada pipa	Kurangnya kontrol tekanan pada produk yang melewati pipa penyaluran
Korosi pada pipa	Adanya kandungan hidrogen, sulfur, oksigen, dan nitrogen pada <i>crude oil</i> yang menyebabkan korosi pada pipa penyaluran	Pengaplikasian pelapis anti korosi yang kurang pada pipa penyaluran
Kegagalan sistem pengawasan dan pemeliharaan	Kesalahan tim inspeksi dan tim pemeliharaan pipa penyaluran	Kurangnya sistem pengawasan dan pemeliharaan pada pipa penyaluran

Hasil analisis RCA menunjukkan bahwa ada situasi yang dapat dikendalikan oleh manusia dan situasi yang tidak dapat dikendalikan oleh manusia. Situasi yang tidak dapat dikendalikan oleh manusia termasuk terjadinya korosi pada pipa karena kandungan hidrogen, sulfur, oksigen, dan nitrogen pada *crude oil*. Sedangkan akar permasalahannya yang bisa dikendalikan oleh manusia seperti kegagalan sistem pengawasan dan pemeliharaan pada pipa penyaluran karena kurangnya pengetahuan dan tidak tersedianya pelatihan kompetensi terkait dari Menurut Faktor utama penyebab terjadinya, oleh karena itu, proses pipa penyaluran di perusahaan PT XYZ perlu diperbaiki. Tabel usulan perbaikan proses pipa penyaluran di bawah ini.

Tabel 5. Usulan Perbaikan menggunakan metode RCA

Resiko tertinggi proses Pipa penyaluran	Usulan Perbaikan
Tekanan berlebih pada pipa penyaluran	a. Penambahan katup pelepas tekanan (<i>Pressure Relief Valve</i>) guna membuang tekanan yang berlebih didalam pipa b. Sistem pengawasan dan kontrol tekanan yang diperketat

Korosi pada pipa	<p>a. Penggunaan inhibitor korosi yang berguna menetralkan asam</p> <p>b. Pelapisan dan pelindung seperti pelapisan epoksi yaitu pelapisan pelindung di bagian dalam untuk mencegah kontak langsung dengan zat penyebab korosi</p>
Kegagalan sistem pengawasandan pemeliharaan	<p>a. Pelatihan dan peningkatan kompetensi untuk tim inspeksi dan tim pemeliharaan</p> <p>b. Peningkatan teknologi pengawasan</p>

Rekomendasi untuk perbaikan pipa penyaluran dengan metode RCA termasuk ketika terjadi tekanan berlebih pada pipa penyaluran yaitu penambahan katup pelepas tekanan (Pressure Relief Valve) yang berguna untuk membuang tekanan berlebih yang terjadi di dalam pipa penyaluran kemudian maksimalkan sistem pengawasan dan kontrol tekanan pada pipa penyaluran. Resiko selanjutnya ialah korosi pada pipa dengan usulan perbaikan yaitu penggunaan inhibitor korosi yang berguna menetralkan zat asam yang terkandung didalam pipa penyaluran kemudian pelapisan dan pelindung seperti pelapisan epoksi yang berguna untuk mencegah kontak langsung pipa dengan zat penyebab korosi. Dan resiko terakhir yaitu kegagalan sistem pengawasan dan pemeliharaan pada pipa penyaluran dan usulan perbaikan yaitu diadakannya pelatihan dan peningkatan kompetensi untuk tim inspeksi dan tim pemeliharaan dan penambahan peningkatan teknologi.

KESIMPULAN

Berdasarkan analisis dan pengolahan data dalam penelitian ini, dapat disimpulkan beberapa hal. Pertama, risiko yang ada selama proses penyaluran diidentifikasi melalui empat variabel, yaitu korosi pada pipa, tekanan berlebih pada pipa, pengaruh lingkungan, dan kegagalan sistem pengawasan serta pemeliharaan. Kedua, nilai RPN (Risk Priority Number) yang diperoleh dari pembobotan masing-masing risiko menunjukkan bahwa risiko korosi pada pipa memiliki bobot 295,3, risiko tekanan berlebih pada pipa memiliki bobot tertinggi dengan nilai 367,03, risiko pengaruh lingkungan memiliki bobot 231, dan kegagalan sistem pengawasan serta pemeliharaan memiliki bobot 261. Hal ini menegaskan bahwa metode FMEA mengidentifikasi tekanan berlebih pada pipa sebagai risiko terbesar dengan bobot 367,03. Ketiga, rekomendasi perbaikan menggunakan metode RCA mencakup penambahan katup pelepas tekanan (pressure relief valve) untuk mengurangi tekanan berlebih, penggunaan inhibitor korosi untuk menetralkan asam, pelapisan epoksi untuk mencegah korosi pada pipa, serta pelatihan dan peningkatan kompetensi bagi tim inspeksi dan pemeliharaan.

DAFTAR PUSTAKA

- F. Jonietz et al., "Spin transfer torques in MnSi at ultralow current densities," *Science*, vol. 330, no. 6011, pp. 1648-1651, 2010.
- Sulardi, "Proteksi Pipa Bawah Laut Dengan Metode Articulated Concrete Block Mattresses," *INFO-TEKNIK*, vol. 21, no. 1, pp. 1-14, 2020.
- A. P. Subriadi and N. F. Najwa, "The consistency analysis of failure mode and effect analysis (FMEA) in information technology risk assessment," *Heliyon*, vol. 6, no. 1, p. e03161, 2020, doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e03161.

- R. U. Ikhsan, "Kajian ketebalan dan laju korosi pada hasil pelapisan baja ASTM A53 menggunakan khrome dengan variasi kuat arus dan lama pelapisan," Ph.D. dissertation, Universitas Nahdlatul Ulama Sunan Giri, 2022.
- Z. A. H. Lubis, "Analisa resiko pada reducer pipeline akibat internal corrosion dengan metode RBI," Undergraduate thesis, Program Studi Teknik Kelautan, ITS.
- H. Supomo, *Korosi*, Diktat Kuliah, Surabaya: Jurusan Teknik Perkapalan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2003.
- R. Putri, A. Ridwan, and F. Yulianti, "Perancangan mitigasi risiko pada gudang bahan baku kemasan dengan menggunakan metode Failure Mode and Effect Analysis dan Analytical Hierarchy Process," *Telkatika*, vol. 1, no. 2, pp. 63, 2022.
- J. You, S. Lou, R. Mao, and T. Xu, "An improved FMEA quality risk assessment framework for enterprise data assets," *Journal of Digital Economy*, vol. 1, no. 3, pp. 141-152, 2022.