

ANALISIS KEANDALAN POMPA PADA SISTEM PERPIPAAN MENGGUNAKAN METODE *RELIABILITY BLOCK DIAGRAM* DAN *FAULT TREE ANALYSIS*

*Arie Rifky Irawan¹, Yusuf Umardani², Gunawan Dwi Haryadi²

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, S.H., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

*E-mail: arierifky138@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis keandalan pompa pada sistem perpipaan untuk distribusi BBM dengan menggunakan metode *Reliability Block Diagram* (RBD) dan *Fault Tree Analysis* (FTA). Analisis dilakukan untuk mengidentifikasi komponen kritis, menghitung nilai *Probability of Failure* (PoF), serta menentukan tingkat risiko melalui *Risk Based Inspection* (RBI). Hasil analisis menunjukkan bahwa beberapa *basic event* memiliki nilai PoF tertinggi, yaitu *mechanical seal* sebesar 0,2540 ($\approx 25,40\%$), *bearing* sebesar 0,1983 ($\approx 19,83\%$), serta motor penggerak pompa sebesar 0,1840 ($\approx 18,40\%$). Sementara itu, perhitungan *intermediate event* menunjukkan bahwa kegagalan mekanis pompa menjadi kontribusi dominan dengan PoF mencapai 0,4216. Nilai PoF untuk *top event* kegagalan sistem pompa diperoleh sebesar 0,5634, menunjukkan bahwa lebih dari 56% kemungkinan kegagalan dipicu oleh akumulasi kegagalan pada subsistem motor, *seal*, *bearing*, pelumasan, dan sistem kontrol. Hasil *risk assessment* menggunakan *risk level justification* memperlihatkan bahwa komponen dengan risiko tertinggi adalah *mechanical seal*, *bearing*, dan *impeller*, yang dikategorikan dalam *level High Risk*, sehingga memerlukan interval inspeksi lebih sering dan strategi mitigasi prioritas. Temuan ini menegaskan bahwa pendekatan RBD dan FTA efektif dalam mengidentifikasi jalur kegagalan dominan serta mendukung penentuan strategi RBI yang lebih tepat pada pompa.

Kata Kunci: *fault tree analysis; probability of failure; reliability block diagram; risk based inspection*

Abstract

This study aims to analyze the reliability of the pump in a fuel distribution pipeline system using the Reliability Block Diagram (RBD) and Fault Tree Analysis (FTA). The analysis focuses on identifying critical components, calculating the Probability of Failure (PoF), and determining risk levels through a Risk Based Inspection (RBI) approach. The results show that several basic events have the highest PoF values, namely the mechanical seal at 0.2540 ($\approx 25.40\%$), the bearing at 0.1983 ($\approx 19.83\%$), and the pump drive motor at 0.1840 ($\approx 18.40\%$). Furthermore, the intermediate event analysis indicates that mechanical pump failure contributes predominantly, with a PoF of 0.4216. The top event PoF for the overall pump system failure is obtained at 0.5634, indicating that more than 56% of potential failure originates from accumulated failures in the motor, seal, bearing, lubrication system, and control subsystem. Risk assessment using risk level justification shows that the highest risk components are the mechanical seal, bearing, and impeller, all classified as High Risk, requiring shorter inspection intervals and prioritized mitigation strategies. These findings confirm that the RBD and FTA approaches are effective in identifying dominant failure paths and support the development of a more accurate RBI strategy for the pump.

Keywords: *fault tree analysis; probability of failure; reliability block diagram; risk based inspection*

1. Pendahuluan

Distribusi bahan bakar minyak (BBM) melalui sistem perpipaan memegang peranan penting dalam menjaga ketahanan energi nasional karena mampu menjamin efisiensi, keselamatan, dan kontinuitas pasokan. Dalam sistem ini, pompa booster berfungsi meningkatkan dan menjaga tekanan fluida agar aliran BBM tetap stabil sepanjang jalur distribusi. Keandalan pompa booster menjadi faktor krusial karena kegagalan komponen utama dapat mengganggu operasi distribusi dan meningkatkan biaya pemeliharaan [1].

Impeller merupakan komponen utama pompa booster yang bekerja di bawah kombinasi beban rotasi, tekanan fluida, dan gaya sentrifugal, sehingga keandalan strukturalnya sangat dipengaruhi oleh material yang digunakan. Dalam konteks distribusi BBM melalui sistem perpipaan dan *booster pump*, metode seperti *Reliability Block Diagram* (RBD) dan *Fault Tree Analysis* (FTA) sangat penting untuk mendukung keandalan, keselamatan, dan efisiensi operasional. Kedua metode ini secara luas diterapkan dalam industri minyak dan gas untuk memperkuat keandalan sistem transportasi fluida melalui pendekatan yang terstruktur dan berbasis risiko [2].

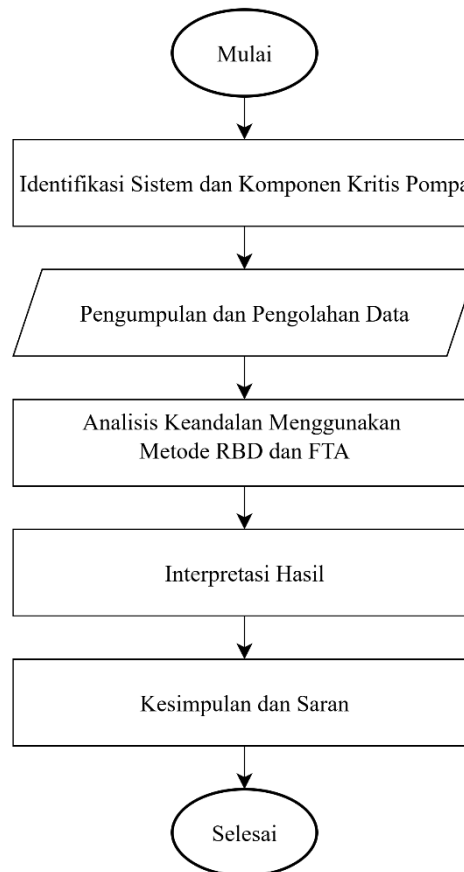
Komponen utama pompa, yaitu *impeller*, memiliki peran penting dalam mempertahankan kinerja sistem namun rentan terhadap kegagalan akibat beban operasional, kavitasi, dan keausan. Oleh karena itu, analisis keandalan menggunakan parameter seperti MTBF, MTTF, dan *failure rate* serta metode *Reliability Block Diagram* (RBD)

diperlukan untuk mengidentifikasi komponen kritis, menghitung probabilitas keberhasilan sistem, dan mendukung strategi pemeliharaan yang efektif guna memastikan keandalan dan keberlanjutan distribusi BBM [3].

2. Bahan dan Metode Penelitian

2.1 Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode *Reliability Block Diagram* (RBD) dan *Fault Tree Analysis* (FTA) untuk menganalisis keandalan pompa berdasarkan data historis kegagalan dan waktu operasi. Parameter keandalan seperti MTTF, MTBF, dan *failure rate* dihitung untuk mengetahui tingkat keandalan sistem dan penyebab kegagalan utama.

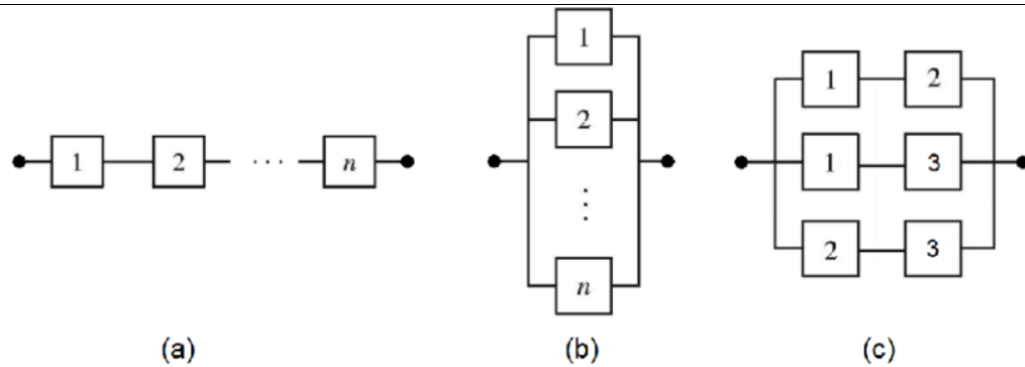


Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Metode yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari tiga teknik utama:

1. *Reliability Block Diagram* (RBD)

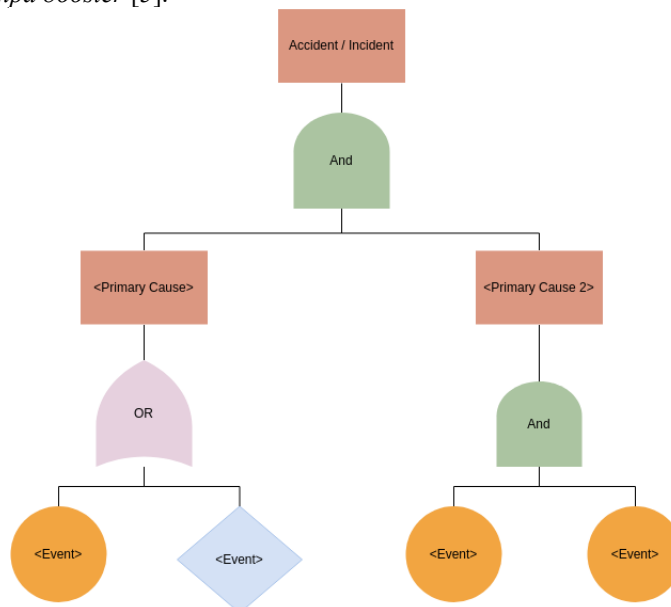
RBD digunakan untuk memodelkan keandalan sistem dengan menggambarkan hubungan antar komponen dalam bentuk blok. Setiap komponen diwakili oleh sebuah blok yang mengalirkan energi atau daya, dan keandalan sistem dihitung berdasarkan keandalan individu komponen. Penelitian ini memanfaatkan RBD untuk menganalisis dan mengidentifikasi komponen-komponen kritis dalam pompa *booster* [4].



Gambar 2. Reliability block diagram (a) series (b) Parallel (c) Two out of three

2. Fault Tree Analysis (FTA)

FTA adalah teknik analisis deduktif yang digunakan untuk mengidentifikasi penyebab kegagalan utama (top event) pada suatu sistem. Dengan menggunakan FTA, kita dapat menggali hubungan logis antar kegagalan dasar yang dapat menyebabkan kerusakan pada sistem. Metode ini juga memungkinkan kita untuk menghitung probabilitas kegagalan setiap komponen dalam *pompa booster* [5].



Gambar 3. Fault Tree Analysis

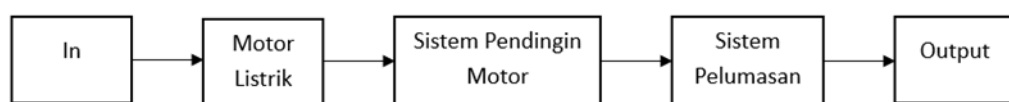
3. Risk Based Inspection (RBI)

Setelah mengidentifikasi komponen-komponen kritis dan tingkat risikonya, strategi risk based inspection (RBI) digunakan untuk mengoptimalkan jadwal inspeksi dan pemeliharaan. Komponen dengan PoF (*Probability of Failure*) tinggi akan diprioritaskan untuk inspeksi lebih sering, sementara komponen dengan PoF rendah dapat dijadwalkan inspeksi secara berkala namun dengan frekuensi yang lebih rendah [6].

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Reliability Block Diagram (RBD)

Reliability Block Diagram (RBD) digunakan untuk memodelkan keandalan sistem secara grafis, dengan menggambarkan setiap komponen utama dalam sistem serta hubungan antar komponen tersebut. Dalam konteks sistem perpipaan, RBD menggambarkan bagaimana berbagai sub-sistem yang terlibat dalam pengelolaan komponen pompa saling berinteraksi untuk memastikan operasional yang aman dan efisien [7].



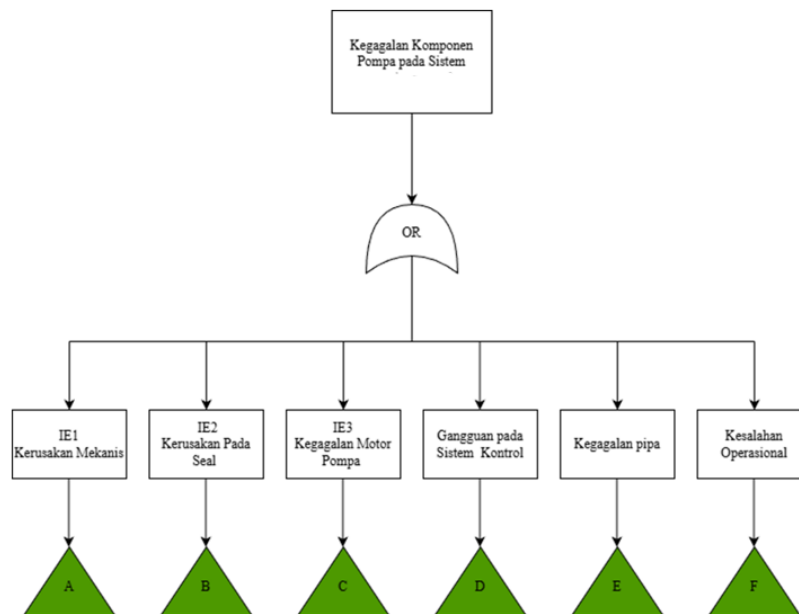
Gambar 4. Reliability Block Diagram Motor Penggerak Pompa

Motor penggerak berfungsi sebagai sumber tenaga utama yang memutar pompa. Keandalan motor menentukan kemampuan pompa dalam mempertahankan tekanan dan laju aliran fluida. Subkomponennya meliputi motor listrik, sistem pendinginan motor, dan sistem pelumasan.

3.2 Fault Tree Analysis

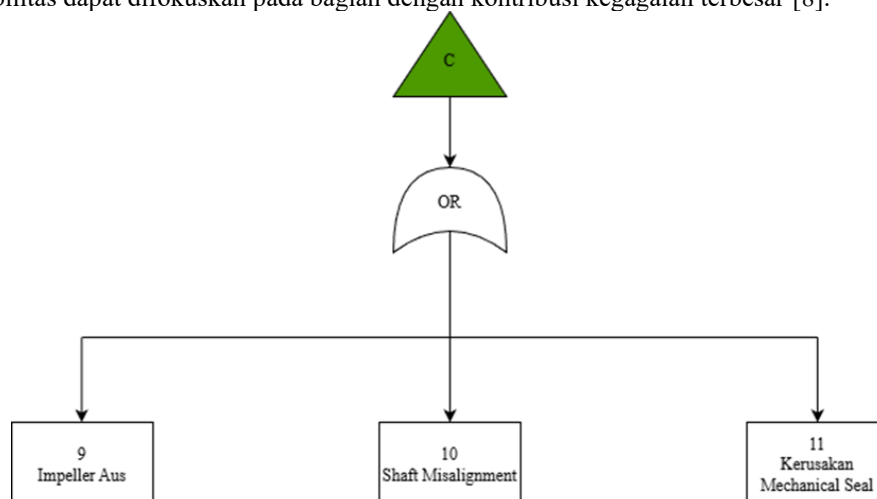
Penyusunan FTD bertujuan untuk menggambarkan hubungan sebab-akibat antara kejadian dasar (*basic event*) yang dapat memicu terjadinya kejadian tingkat menengah (*intermediate event*), hingga akhirnya menyebabkan *top event*, yaitu kegagalan komponen pompa sebagai bagian dari sistem perpipaan.

Model diagram ini membantu memvisualisasikan alur logika kegagalan dan mempermudah proses analisis terhadap akar permasalahan pada sistem.



Gambar 5. Sketsa Fault Tree Diagram (FTD) Komponen Pompa pada Sistem Perpipaan

Gambar 3, menunjukkan hubungan logis antara *intermediate event* dan *basic event* yang berpotensi menyebabkan kegagalan pada komponen pompa di sistem perpipaan. Melalui penyusunan FTD ini, dapat diketahui bahwa kegagalan pompa tidak hanya disebabkan oleh satu faktor tunggal, tetapi merupakan hasil dari beberapa kejadian dasar yang saling berkaitan. Struktur ini juga mempermudah proses penentuan prioritas mitigasi, sehingga tindakan pemeliharaan dan peningkatan reliabilitas dapat difokuskan pada bagian dengan kontribusi kegagalan terbesar [8].



Gambar 6. Sketsa C (Kegagalan Mekanis Pompa)

Gambar 6 memperlihatkan tiga penyebab mendasar dari kegagalan mekanis pompa, yaitu keausan *impeller*, ketidaksejajaran poros, dan kerusakan *mechanical seal*. Ketiga kejadian dasar ini merupakan sumber kegagalan yang

paling sering ditemukan pada operasi pompa dan berpotensi mengganggu performa aliran serta integritas sistem secara keseluruhan [9].

3.3 Risk Based Inspection (RBI)

Risk Based Inspection (RBI) adalah pendekatan sistematis yang digunakan untuk mengelola risiko kegagalan peralatan dengan mengoptimalkan jadwal inspeksi berdasarkan probabilitas dan konsekuensi kegagalan. Dalam konteks sistem perpipaan bertujuan untuk memastikan keandalan sistem meminimalkan biaya perawatan dan risiko keselamatan. Dengan pendekatan ini, komponen-komponen sistem baterai diklasifikasikan berdasarkan *Probability of Failure* (PoF) ke dalam kategori risiko tinggi, sedang, dan rendah. Komponen dengan PoF tinggi, seperti *mechanical seal* dan *bearing wear* serta sistem pendingin, diprioritaskan untuk inspeksi lebih sering guna mencegah kegagalan kritis [10].

Risiko	Basic Events
Tinggi	<i>Mechanical seal Failure</i> (42,3%) <i>Bearing Wear</i> (37,8%)
Sedang	<i>Impeller Degradation</i> (21,6%) <i>Shaft Misalignment</i> (17,9%) <i>Motor Overheating</i> (14,8%) <i>Valve Leakage</i> (12,4%) <i>Coupling Problem</i> (11,7%)
Rendah	<i>Lubrication Issue</i> (9,3%) <i>Minor Vibration Instability</i> (5,1%)

Gambar 7. Risiko Kegagalan Setiap Komponen Pompa

4. Kesimpulan

Penelitian ini menggabungkan tiga metode utama *Reliability Block Diagram* (RBD), *Fault Tree Analysis* (FTA), dan *Risk Based Inspection* (RBI) untuk memastikan keandalan sistem pada pompa.

1. *Mechanical seal* (PoF = 0,412)
Mechanical seal berperan penting dalam menjaga kedap fluida pada area *shaft* pompa. Kegagalan komponen ini dapat menyebabkan kebocoran fluida, penurunan tekanan, serta risiko kerusakan pada bearing dan komponen sekitarnya.
2. *Bearing* (PoF = 0,365)
Bearing merupakan elemen penunjang putaran *shaft* yang sangat penting. Kegagalan bearing dapat menimbulkan vibrasi berlebih, panas, penurunan performa pompa, dan bahkan trip unit apabila tidak segera ditangani.
3. *Impeller* (PoF = 0,298)
Impeller menentukan kapasitas dan head pompa. Kerusakan seperti erosi atau korosi menyebabkan penurunan debit, *head loss*, dan potensi kegagalan pompa secara keseluruhan.

5. Daftar Pustaka

- [1] A. Baghban and M. Yousefikhoshbakht, "A mathematical model for planning oil products distribution via pipeline," pp. 42–43, 2022.
- [2] B. Zerouali, Y. Sahraoui, M. Nahal, and A. Chateaneuf, "Reliability-based maintenance optimization of long-distance oil and gas transmission pipeline networks," *Reliab. Eng. Syst. Saf.*, vol. 249, no. December 2023, p. 110236, 2024, doi: 10.1016/j.ress.2024.110236.
- [3] B. Wang *et al.*, "Sustainable crude oil transportation: design optimization for pipelines considering thermal and hydraulic energy consumption," *Chem. Eng. Res. Des.*, vol. 151, pp. 23–39, 2019, doi: 10.1016/j.cherd.2019.07.034.
- [4] J. Taveau, "Risk assessment and land-use planning regulations in France following the AZF disaster," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 23, no. 6, pp. 813–823, 2010, doi: 10.1016/j.jlp.2010.04.003.
- [5] K. M. Zuev and M. Beer, "Reliability of Critical Infrastructure Networks: Challenges," *Resil. Eng. Urban Tunneling*, pp. 71–82, 2018, doi: 10.1061/9780784415139.ch06.
- [6] M. H. Hasan, T. M. I. Mahlia, and H. Nur, "A review on energy scenario and sustainable energy in Indonesia," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 4, pp. 2316–2328, 2012, doi: 10.1016/j.rser.2011.12.007.
- [7] M. Musa, I. Yusuf, M. Liman, and Y. S. Rumu, "A performance measure of centrifugal water pumping

-
- system's reliability, availability, maintainability and dependability," *Int. J. Process Manag. Benchmarking*, vol. 19, no. 3, pp. 320–349, 2025, doi: 10.1504/IJPMB.2025.144329.
- [8] M. Barrere and C. Hankin, "Fault tree analysis: Identifying maximum probability minimal cut sets with MaxSAT," *Proc. - 50th Annu. IEEE/IFIP Int. Conf. Dependable Syst. Networks Suppl. Vol. DSN-S 2020*, vol. 1, pp. 53–54, 2020, doi: 10.1109/DSN-S50200.2020.00029.
- [9] Tim Adams, "Risk, Failure Probability, and Failure Rate," pp. 1–4, 2017, [Online]. Available: <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20120001369.pdf>
- [10] W. Ahmed, O. Hasan, S. Tahar, and M. S. Hamdi, "Towards the formal reliability analysis of oil and gas pipelines," *Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics)*, vol. 8543 LNAI, pp. 30–44, 2014, doi: 10.1007/978-3-319-08434-3_4.