

ANALISIS KEANDALAN KOMPONEN KRITIS *ELECTRICAL SUBMERSIBLE PUMP* MENGGUNAKAN METODE *RELIABILITY BLOCK DIAGRAM* DAN *FAULT TREE ANALYSIS*

*Nabiel Nausal Putra¹, Gunawan Dwi Haryadi², Yusuf Umardani²

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

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

*E-mail: nabielnausal@students.undip.ac.id

Abstrak

Electrical Submersible Pump (ESP) merupakan peralatan penting dalam sistem drainase dan pengendalian banjir karena mampu memindahkan fluida berkapasitas besar. Kegagalan komponen ESP dapat menghentikan proses pemompaan dan meningkatkan waktu henti, sehingga diperlukan analisis keandalan untuk menentukan komponen kritis dan prioritas inspeksi. Penelitian ini menggunakan metode Reliability Block Diagram (RBD), Fault Tree Analysis (FTA), Probability of Failure (PoF), Risk Level Justification (RLJ), dan Risk Based Inspection (RBI). Data penelitian terdiri atas 346 catatan harian breakdown dari enam unit ESP dengan total waktu henti 8.304 jam, yang dikelompokkan menjadi sembilan kejadian kegagalan aktual. Hasil analisis menunjukkan bahwa Pump 2 merupakan unit paling kritis dengan waktu henti 2.520 jam (30,35% dari total). Melalui RBD dan FTA, komponen kritis yang teridentifikasi meliputi bearing assembly, shaft/joint shaft, dan impeller, dengan bearing assembly memiliki PoF tertinggi sebesar 0,3960 dan keandalan 0,6040 pada horizon operasi 720 jam. Berdasarkan Risk Level Justification, ketiga komponen tersebut dikategorikan dalam risiko tinggi hingga kritis. Strategi RBI yang direkomendasikan berfokus pada pemantauan kondisi operasi, inspeksi komponen rotating, pengendalian debris, dan penyediaan spare part kritis guna menekan waktu henti dan meningkatkan keandalan operasi ESP.

Kata kunci: *electrical submersible pump; fault tree analysis; keandalan; reliability block diagram; risk based inspection; risk level justification*

Abstract

Electrical Submersible Pump (ESP) is a critical piece of equipment in drainage systems and flood control operations, owing to its capability to transfer large volumes of fluid. Component failures within an ESP system can halt pumping operations and substantially increase downtime, thereby necessitating a comprehensive reliability analysis to identify critical components and establish inspection priorities. This study employs five analytical methods, namely Reliability Block Diagram (RBD), Fault Tree Analysis (FTA), Probability of Failure (PoF), Risk Level Justification (RLJ), and Risk Based Inspection (RBI). The research dataset comprises 346 daily breakdown records collected from six ESP units, accumulating a total downtime of 8,304 hours, which were subsequently classified into nine actual failure events. The analysis reveals that Pump 2 constitutes the most critical unit, accounting for 2,520 hours of downtime, equivalent to 30.35% of the total. Through RBD and FTA, the critical components identified include the bearing assembly, shaft/joint shaft, and impeller, with the bearing assembly exhibiting the highest PoF value of 0.3960 and a corresponding reliability of 0.6040 at an operational horizon of 720 hours. Based on the Risk Level Justification, all three components are classified under the high-risk category. Consequently, the recommended RBI strategy prioritizes operational condition monitoring, rotating component inspection, debris control, and the provision of critical spare parts, with the overarching objective of minimizing downtime and enhancing the overall operational reliability of the ESP system.

Keywords: *electrical submersible pump; fault tree analysis; reliability; reliability block diagram; risk based inspection; risk level justification*

1. Pendahuluan

Electrical Submersible Pump (ESP) merupakan peralatan vital dalam sistem drainase dan pengendalian banjir karena kemampuannya memindahkan fluida dalam kapasitas besar secara kontinu. Berbeda dengan pompa konvensional,

ESP dirancang untuk beroperasi secara terendam sehingga cocok digunakan pada stasiun pompa drainase perkotaan yang memerlukan keandalan tinggi sepanjang musim hujan. Peran ESP dalam menjaga kapasitas pompa drainase menjadi semakin krusial seiring meningkatnya intensitas curah hujan dan risiko banjir di berbagai kota besar di Indonesia.

Kegagalan komponen ESP dapat menghentikan proses pemompaan dan secara langsung meningkatkan risiko banjir. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan sistematis untuk mengidentifikasi komponen yang paling rentan, menghitung probabilitas kegagalan, dan menyusun strategi inspeksi berbasis risiko. Dalam konteks ini, metode Reliability Block Diagram (RBD) dan Fault Tree Analysis (FTA) menjadi alat analisis yang tepat untuk memetakan jalur keberhasilan dan kegagalan sistem secara kuantitatif.

Penelitian sebelumnya yang relevan antara lain dilakukan oleh Irawan et al. [1] yang menggunakan RBD dan FTA pada sistem perpipaan, serta Carnevali et al. [2] yang mengembangkan pustaka evaluasi RBD yang efisien untuk sistem kompleks. Fakher et al. [3] secara khusus meninjau mekanisme kegagalan ESP beserta tindakan mitigasinya, sedangkan Chen et al. [4] mengembangkan sistem pemantauan berbasis sensor cerdas untuk pompa sentrifugal. Penelitian ini melengkapi literatur yang ada dengan menerapkan pendekatan terintegrasi RBD–FTA–RBI pada data operasional nyata dari enam unit ESP di stasiun pompa drainase.

Tujuan penelitian ini adalah (1) mengidentifikasi unit dan komponen ESP paling kritis menggunakan RBD, (2) memetakan jalur kegagalan menggunakan FTA, (3) menghitung PoF dan keandalan komponen pada horizon operasi 720 jam, (4) menentukan tingkat risiko melalui Risk Level Justification (RLJ), serta (5) menyusun strategi inspeksi berbasis risiko menggunakan Risk Based Inspection (RBI).

2. Bahan dan Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan data operasional berupa 346 catatan harian breakdown dari enam unit ESP (Pump 1 hingga Pump 6) di stasiun pompa drainase, mencakup periode Januari hingga Mei 2026. Total waktu henti yang terekam adalah 8.304 jam, yang kemudian dikelompokkan menjadi sembilan kejadian kegagalan aktual berdasarkan problem description, komponen yang terlibat, dan periode waktu henti. Tahapan analisis dilakukan secara berurutan sebagai berikut:

Reliability Block Diagram (RBD). RBD disusun untuk memetakan hubungan fungsional antar komponen ESP dalam konfigurasi seri. Komponen utama yang dimodelkan meliputi panel kontrol/daya, motor listrik, mechanical seal, bearing assembly, shaft/joint shaft, impeller, casing/wear ring, dan saluran keluar. Pada konfigurasi seri, keandalan sistem dihitung sebagai perkalian keandalan seluruh blok komponen:

$$R_{\text{sistem}} = R_1 \times R_2 \times \dots \times R_n$$

Fault Tree Analysis (FTA). FTA digunakan untuk menguraikan jalur kegagalan dari top event (kegagalan fungsi operasional Pump 2) menuju basic event menggunakan gerbang logika OR. Tiga intermediate event yang diidentifikasi adalah kegagalan subsistem bearing-shaft, kegagalan hidrolik/impeller, dan pemanjangan downtime akibat faktor maintainability dan logistik.

Probability of Failure (PoF) dan Reliability. Perhitungan menggunakan model distribusi eksponensial dengan asumsi laju kegagalan konstan (λ). Failure rate dihitung dari jumlah kegagalan (n) dibagi total waktu pengamatan (T), yaitu $\lambda = n/T$. Nilai keandalan pada horizon evaluasi t dihitung sebagai $R(t) = e^{-\lambda t}$, dan $PoF(t) = 1 - R(t)$. Interval evaluasi ditetapkan 720 jam (± 1 bulan operasi).

Risk Level Justification (RLJ). Tingkat risiko ditentukan berdasarkan matriks 5×5 yang menggabungkan probability score (berdasarkan nilai PoF) dan consequence score (berdasarkan durasi downtime per event). Risk score = probability score × consequence score, dengan kategori: Rendah (1–4), Sedang (5–8), Tinggi (9–14), dan Kritis (15–25).

Risk Based Inspection (RBI). Strategi inspeksi disusun berdasarkan prioritas risiko, dengan komponen berkategori Kritis mendapat frekuensi inspeksi lebih tinggi, metode deteksi lebih canggih, dan prioritas penyediaan spare part. Referensi utama yang digunakan adalah API RP 580 dan API RP 581 [5,6].

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Gambaran Umum Data dan Identifikasi Unit Kritis

Data breakdown dari enam unit ESP mencatat total 346 entri harian dengan total waktu henti 8.304 jam. Setelah pengelompokan, diperoleh sembilan kejadian kegagalan aktual. Rekapitulasi per unit ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Rekapitulasi downtime per unit ESP

Unit	Event	Downtime (jam)	Kontribusi (%)
Pump 1	1	1.128	13,58
Pump 2	2	2.520	30,35
Pump 3	2	1.896	22,83
Pump 4	1	960	11,56
Pump 5	2	888	10,69

Pump 6	1	912	10,98
Total	9	8.304	100

Pump 2 menjadi unit paling kritis dengan *downtime* 2.520 jam (30,35% dari total). Dominasi ini disebabkan oleh dua *event* kegagalan berskala besar: *impeller* patah selama 648 jam dan *detached of cutless bearing* selama 1.872 jam. Berdasarkan hasil ini, Pump 2 ditetapkan sebagai objek utama analisis RBD dan FTA. Berdasarkan keterlibatan komponen pada seluruh fleet, *bearing assembly* terlibat dalam 9 *event* (8.304 jam *downtime*), *shaft group* dalam 8 *event*, dan *impeller* dalam 5 *event*. Data ini menjadi dasar penetapan komponen kritis dalam analisis selanjutnya.

3.2 Reliability Block Diagram (RBD)

RBD untuk Pump 2 disusun dalam konfigurasi seri dengan delapan blok komponen. Konfigurasi seri dipilih karena kegagalan salah satu komponen utama secara langsung menghentikan fungsi pemompaan. Analisis kuantitatif difokuskan pada tiga komponen dengan bukti kegagalan, yaitu *bearing assembly*, *shaft/joint shaft*, dan *impeller*. Tabel 2 menyajikan hasil perhitungan keandalan komponen pada horizon 720 jam.

Tabel 2. Keandalan komponen Pump 2 pada horizon 720 jam (RBD)

Komponen	n	λ (failure/jam)	MTBF (jam)	R(720)	PoF(720)
Motor Listrik	0	0,000000	–	1,0000	0,0000
Mechanical Seal	0	0,000000	–	1,0000	0,0000
Bearing Assembly	2	0,000700	1.428	0,6040	0,3960
Shaft/Joint Shaft	1	0,000350	2.856	0,7772	0,2228
Impeller	1	0,000350	2.856	0,7772	0,2228
Casing/Wear Ring	0	0,000000	–	1,0000	0,0000

Reliability sistem seri untuk komponen yang mengalami kegagalan dihitung sebagai:

$$R_{\text{seri}} = 0,6040 \times 0,7772 \times 0,7772 = 0,3648$$

Nilai ini merupakan estimasi konservatif berbasis komponen, sedangkan estimasi berbasis event sistem menghasilkan $R(720) = 0,6040$. Rentang estimasi antara 0,3648 dan 0,6040 menunjukkan bahwa Pump 2 beroperasi pada zona keandalan yang perlu ditingkatkan, terutama melalui perbaikan kondisi *bearing assembly* sebagai blok paling lemah dalam sistem.

3.3 Fault Tree Analysis (FTA)

Top event FTA ditetapkan sebagai kegagalan Pump 2 menjalankan fungsi pemompaan. Melalui gerbang OR, top event diturunkan menjadi tiga intermediate event: (ET1) kegagalan subsistem bearing-shaft, (ET2) kegagalan hidrolik/impeller, dan (ET3) pemanjangan downtime akibat maintainability dan logistik. Tabel 3 merangkum kode event beserta bukti empirisnya.

Tabel 3. Keterangan kode Fault Tree Analysis Pump 2

Kode	Event	Jenis	Bukti Data
TE1	Kegagalan fungsi operasional ESP Pump 2	Top event	2 event downtime, total 2.520 jam
ET1	Kegagalan subsistem bearing dan shaft	Intermediate	Detached of cutless bearing (78 hari)
ET2	Kegagalan hidrolik / impeller	Intermediate	Impeller patah (27 hari)
ET3	Downtime memanjang: maintainability & logistik	Intermediate	Waiting impeller, workshop KSB
A	Detached of cutless bearing	Basic event	Event 2 Pump 2
B	Joint shaft/bottom shaft deform atau patah	Basic event	Sparepart event 2: joint shaft
C	Misalignment dan clearance tidak sesuai	Basic event	Tidak tercatat eksplisit
D	Impeller patah	Basic event	Event 1 Pump 2
E	Impeller jammed oleh debris	Basic event	Tidak tercatat eksplisit
F	Unbalance, fatigue, atau hydraulic shock	Basic event	Penyebab potensial

G	Waiting impeller / lead time spare part	Basic event	Remark event 1
H	Perbaikan di workshop eksternal	Basic event	Workshop KSB, event 2
I	Proses dismantle dan pengiriman tertunda	Basic event	Pengiriman ke Workshop KSB

FTA memperjelas bahwa durasi *downtime* yang panjang pada Pump 2 tidak hanya disebabkan oleh kegagalan fisik komponen, tetapi juga oleh faktor *maintainability* seperti waktu tunggu *spare part* dan penggunaan workshop eksternal. Perbedaan antara penyebab fisik (ET1, ET2) dan faktor pemanjangan pemulihan (ET3) penting dalam menetapkan prioritas mitigasi [7,8].

3.4 Probability of Failure dan Reliability Komponen

Rentang observasi Pump 2 berlangsung dari 20 Januari 2026 hingga 18 Mei 2026 (119 hari atau 2.856 jam berbasis kalender). Karena kolom *hour meter* tidak terisi, *operating time* aktual tidak dapat dihitung langsung, sehingga digunakan pendekatan *calendar-based observation time*. Contoh perhitungan untuk *bearing assembly*:

$$\lambda = n/T = 2/2.856 = 0,000700 \text{ /jam}$$

$$R(720) = e^{-(0,000700 \times 720)} = e^{-0,504} = 0,6040$$

$$PoF(720) = 1 - 0,6040 = 0,3960$$

Bearing assembly memiliki PoF tertinggi karena mencatat dua failure event, sedangkan shaft/joint shaft dan impeller masing-masing memiliki satu failure event sehingga keduanya menghasilkan PoF = 0,2228. Meskipun nilai PoF shaft dan impeller sama, konsekuensi downtime keduanya berbeda, sehingga risk level harus ditentukan dengan menggabungkan probability dan consequence [9].

3.5 Risk Level Justification

Risk level ditentukan menggunakan matriks 5×5 yang menggabungkan probability score (berbasis PoF 720 jam) dan consequence score (berbasis durasi downtime per event). Tabel 4 menyajikan hasil klasifikasi risk level untuk komponen kritis Pump 2.

Tabel 4. Hasil Risk Level Justification komponen kritis Pump 2

Komponen	PoF 720 jam	P-score	C-score	Risk Score	Risk Level
Bearing Assembly	0,3960	4	5	20	Kritis
Shaft/Joint Shaft	0,2228	3	5	15	Kritis
Impeller	0,2228	3	4	12	Tinggi
Motor, Seal, Casing, Wear Ring	0,0000*	1*	2-4	2-4	Rendah-Sedang*

Bearing assembly memperoleh risk score tertinggi (20) karena kombinasi PoF yang relatif tinggi (probability score 4) dan konsekuensi downtime terlama (consequence score 5, rata-rata 52,5 hari/event). Shaft/joint shaft berada pada posisi kedua (risk score 15) dengan dampak operasional yang sangat tinggi akibat event detached of cutless bearing selama 78 hari. Impeller menempati posisi ketiga (risk score 12) dengan konsekuensi downtime 27 hari [10,11].

3.6 Strategi Risk Based Inspection (RBI)

Strategi RBI disusun berdasarkan prinsip bahwa komponen dengan risk level lebih tinggi memerlukan intensitas dan frekuensi inspeksi yang lebih besar. Tabel 5 merangkum strategi inspeksi untuk masing-masing komponen.

Tabel 5. Strategi RBI Pump 2 berdasarkan Risk Level

Risk Level	Komponen	Strategi Inspeksi	Metode	Mitigasi
Kritis	Bearing Assembly	Inspeksi mingguan saat musim operasi tinggi; vibration	Vibration analysis, thermal monitoring, visual check saat shutdown	Critical spare: bearing assembly & cutless bearing;
Risk Level	Komponen	Strategi Inspeksi	Metode	Mitigasi
		trending; monitoring temperatur bearing		standar alignment; inspeksi pasca debris
Kritis	Shaft/Joint Shaft	Inspeksi alignment dan run-out setiap overhaul atau setelah indikasi vibrasi abnormal	Dial indicator run-out, straightness check, NDT dye penetrant	Kontrol prosedur assembly; batas toleransi alignment; spare joint shaft
Tinggi	Impeller	Inspeksi visual bulanan atau saat shutdown; cek retak, patah, jammed, erosi	Visual/endoscopic inspection, balancing check, clearance measurement	Program pembersihan intake; kontrol debris; stok impeller
Sedang	Mechanical Seal & Motor	Monitoring bulanan: leakage, insulation resistance, arus, temperatur	Megger test, current signature, thermal check	Seal inspection saat overhaul; proteksi listrik

Inspeksi *bearing assembly* diarahkan pada pengukuran clearance, temperatur, vibrasi, dan abnormal noise untuk mendeteksi keausan maupun gejala *detached cutless bearing*. Data tren lebih informatif daripada pengukuran tunggal karena perubahan dapat dibandingkan terhadap *baseline*. Komponen ini perlu dimasukkan ke dalam *critical spare list* untuk mempersingkat downtime akibat keterlambatan logistik [4,12].

Pengendalian faktor ET3 (maintainability dan logistik) juga menjadi bagian penting strategi RBI. Rekomendasi yang diberikan meliputi review inventory bulanan, penyusunan *critical spare part list*, evaluasi lead time vendor dan workshop, serta pencatatan *hour meter* secara konsisten untuk meningkatkan akurasi perhitungan failure rate pada evaluasi berikutnya [6].

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis keandalan sistem *Electrical Submersible Pump* menggunakan metode RBD, FTA, PoF, RLJ, dan RBI, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

- Pump 2 ditetapkan sebagai unit paling kritis dengan total downtime 2.520 jam (30,35% dari total). Komponen kritis utama yang mendominasi kegagalan pada seluruh fleet adalah bearing assembly, shaft/joint shaft, dan impeller.
- FTA mengidentifikasi dua akar penyebab kegagalan utama pada Pump 2, yaitu impeller patah (648 jam downtime) dan detached of cutless bearing yang menyebabkan kerusakan berantai pada shaft/joint shaft (1.872 jam downtime). Faktor maintainability dan logistik turut memperpanjang durasi pemulihan.
- Bearing assembly memiliki PoF tertinggi sebesar 0,3960 (reliability 0,6040) pada horizon 720 jam, sedangkan shaft/joint shaft dan impeller masing-masing memiliki PoF 0,2228. Berdasarkan RLJ, bearing assembly dan shaft/joint shaft dikategorikan risiko Kritis (risk score 20 dan 15), sedangkan impeller dikategorikan risiko Tinggi (risk score 12).
- Strategi RBI yang direkomendasikan menempatkan bearing assembly dan shaft/joint shaft sebagai prioritas utama melalui pemantauan vibrasi, temperatur, clearance, alignment, dan shaft run-out. Untuk impeller, fokus mitigasi adalah inspeksi visual, debris control, dan evaluasi balancing. Pengendalian logistik spare part menjadi komplemen penting untuk menekan total downtime.

5. Daftar Pustaka

- Irawan AR, Umardani Y, Haryadi GD. Analisis keandalan pompa pada sistem perpipaan menggunakan metode Reliability Block Diagram dan Fault Tree Analysis. *Jurnal Teknik Mesin*. 2026;14(1):119–124.
- Carnevali L, Ciani L, Fantechi A, Gori G, Papini M. An efficient library for reliability block diagram evaluation. *Applied Sciences*. 2021;11(9):4026.
- Fakher S, Khlaifat A, Hossain ME, Nameer H. Rigorous review of electrical submersible pump failure mechanisms and their mitigation measures. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*. 2021;11:3799–3814.

- [4] Chen L, Wei L, Wang Y, Wang J, Li W. Monitoring and predictive maintenance of centrifugal pumps based on smart sensors. *Sensors*. 2022;22(6):2106.
- [5] API RP 580. Elements of a risk-based inspection program. 4th ed. American Petroleum Institute; 2023.
- [6] API RP 581. Risk-based inspection methodology. 4th ed. American Petroleum Institute; 2025.
- [7] Dai Y, Shi W, Yang Y, Xie Z, Zhang Q. Numerical analysis of unsteady internal flow characteristics in a bidirectional axial flow pump. *Sustainability*. 2024;16(1):224.
- [8] Jimenez-Roa LA, Heskes T, Tinga T, Stoelinga MIA. Automatic inference of fault tree models via multi-objective evolutionary algorithms. *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*. 2023;20(4):3317–3327.
- [9] Niloofar P, Lazarova-Molnar S. Collaborative data-driven reliability analysis of multi-state fault trees. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*. 2023;237(5):886–896.
- [10] Liu T, Pan Z, Song G. System reliability evaluation and dynamic optimization based on an improved reliability block diagram. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*. 2024;238(4):704–717.
- [11] Wang S, Zhang L, Yin G. Research on identification of the hydraulic and structural vibration sources in a tubular pumping station. *Journal of Vibration and Control*. 2024;30(15–16):3630–3640.
- [12] Wan Y, Lin S, Gao Y. Pipeline and rotating pump condition monitoring based on sound vibration feature-level fusion. *Machines*. 2024;12(12):921.