

Analisis Kegagalan Shaft Sealing Boiler Feed Pump Turbine Menggunakan Metode FMEA dan FTA untuk Perumusan Strategi Preventive Maintenance

Dewa Hernanda Marcellino¹, Arifia Ekayuliana^{1*}, Paulus Sukusno¹, Cecep Slamet Abadi¹, Adi Syuriadi¹

¹Program Studi Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta

¹Jln. Prof. DR. G.A. Siwabessy, Kukusan, Kecamatan Beji, Kota Depok, Jawa Barat 16425, Indonesia

E-mail: dewa.hernanda.marcellino.tn22@mhs.w.pnj.ac.id¹, arifia.ekayuliana@mesin.pnj.ac.id¹,
paulus.sukusno@mesin.pnj.ac.id¹, cecep.slametabadi@mesin.pnj.ac.id¹, adi.syuriadi@mesin.pnj.ac.id¹

Abstrak

Info Naskah:

Naskah masuk:

Direvisi:

Diterima:

Boiler Feed Pump Turbine (BFPT) merupakan komponen vital pembangkit listrik tenaga uap yang menyuplai air umpan bertekanan tinggi ke boiler. Kegagalan sistem shaft sealing, khususnya mechanical seal, menyebabkan kebocoran fluida, meningkatnya downtime tidak terencana, serta menurunnya keandalan pembangkit. Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi mode kegagalan sistem shaft sealing BFPT, menentukan prioritas risiko, menganalisis akar penyebab kegagalan, dan merumuskan strategi preventive maintenance yang lebih efektif. Metode yang digunakan adalah Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) berbasis data work order dan expert judgment, dilanjutkan Risk-based FMEA (RFMEA) serta Fault Tree Analysis (FTA). Hasil penelitian menunjukkan kebocoran mechanical seal merupakan mode kegagalan paling kritis dengan nilai RPN 72. Analisis FTA mengidentifikasi sembilan basic event; vibrasi berlebih, erosi pump discharge cover, filter tersumbat, heat exchanger tidak efektif, serta ketidaksesuaian dimensi dan material O-ring terkonfirmasi sebagai penyebab dominan. Strategi preventive maintenance berbasis akar penyebab direkomendasikan untuk meningkatkan keandalan BFPT dan mencegah kegagalan serupa terulang.

Abstract

Keywords:

FMEA;

FTA;

boiler feed pump turbine;

mechanical seal;

preventive maintenance

Boiler Feed Pump Turbine (BFPT) is a critical component of a steam power plant that supplies high-pressure feedwater to the boiler. Failure of the shaft sealing system, particularly the mechanical seal, causes fluid leakage, increased unplanned downtime, and reduced plant reliability. This study aims to identify the failure modes of the BFPT shaft sealing system, determine risk priorities, analyze the root causes of failure, and formulate a more effective preventive maintenance strategy. Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) based on work order records and expert judgment was applied, followed by Risk-based FMEA (RFMEA) and Fault Tree Analysis (FTA). The results show that mechanical seal leakage is the most critical failure mode with an RPN of 72. The FTA identified nine basic events; excessive vibration, pump discharge cover erosion, clogged filters, an ineffective heat exchanger, and improper O-ring dimensions and materials were confirmed as the dominant causes. A root-cause-based preventive maintenance strategy is recommended to improve BFPT reliability.

*Penulis korespondensi:

Arifia Ekayuliana

E-mail:

1. Pendahuluan

Peralatan berputar (rotating equipment) merupakan komponen vital dalam sistem pembangkitan listrik karena berperan langsung dalam proses konversi energi dan distribusi fluida kerja. Pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), salah satu peralatan berputar yang memiliki peran kritis adalah Boiler Feed Pump Turbine (BFPT), yaitu pompa sentrifugal multistage yang digerakkan oleh turbin uap dan berfungsi mengalirkan air umpan dari deaerator menuju boiler pada tekanan tinggi. BFPT beroperasi dengan konfigurasi 2×50% kapasitas pembangkit, sehingga kerusakan pada satu unit BFPT dapat menyebabkan penurunan beban dari 640 MW menjadi 370 MW. Keandalan BFPT dengan demikian menjadi faktor kunci dalam menjaga ketersediaan sistem pembangkitan.

Kegagalan yang sering terjadi pada BFPT adalah kegagalan sistem shaft sealing yang berfungsi mencegah kebocoran fluida kerja dari ruang bertekanan tinggi di sekitar poros pompa. Mechanical seal bekerja dengan memanfaatkan kontak dua permukaan penyekat (seal face) yang gaya tekannya dijaga oleh pegas dan tekanan fluida, sedangkan O-ring elastomer berperan sebagai penyekat sekunder yang keandalannya sangat dipengaruhi temperatur operasi, tekanan fluida, dan kompatibilitas material [1], [2]. Kegagalan pada sistem ini mengakibatkan kebocoran fluida, penurunan performa pompa, peningkatan biaya perawatan, hingga risiko keselamatan.

Sejumlah penelitian terdahulu telah mengkaji kegagalan pompa dan sistem penyekatnya. Analisis vibrasi telah terbukti efektif sebagai indikator kondisi mesin berputar, termasuk untuk mendeteksi kerusakan bearing, misalignment, dan unbalance [3], [4], [5]. Studi mengenai penuaan O-ring menunjukkan bahwa paparan temperatur tinggi dalam jangka panjang dapat menyebabkan perubahan sifat material elastomer dan memengaruhi kemampuan seal dalam mempertahankan kedekatan [6], [7]. Pada sisi metode, Fault Tree Analysis (FTA) dapat digunakan untuk mengidentifikasi dan memetakan hubungan sebab-akibat dari kegagalan pada sistem teknik yang kompleks [8]. Penerapan FMEA pada pompa sentrifugal juga dapat digunakan untuk mengidentifikasi mode kegagalan dan menentukan prioritas tindakan perawatan berdasarkan tingkat risiko kegagalan [9]. Integrasi FMEA dan FTA selanjutnya dapat digunakan untuk menghubungkan mode kegagalan dengan penyebab dasar yang berkontribusi terhadap terjadinya kegagalan [8].

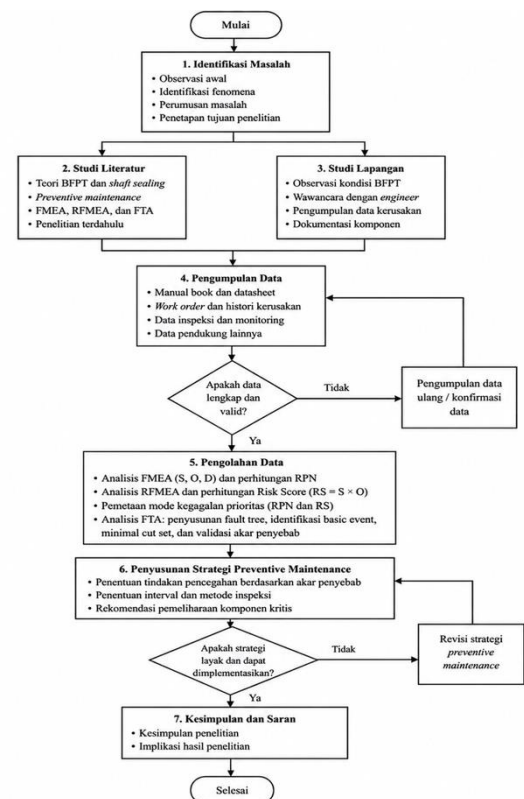
Penelitian-penelitian tersebut umumnya menerapkan FMEA atau FTA secara terpisah dan belum memvalidasi akar penyebab dengan bukti kerusakan aktual di lapangan. Penelitian ini mengintegrasikan FMEA, Risk-based FMEA (RFMEA) dengan diagram scatter RPN vs Risk Score, dan FTA yang diverifikasi menggunakan bukti kerusakan lapangan pada BFPT. Tujuan penelitian ini adalah mengidentifikasi mode kegagalan sistem shaft sealing BFPT beserta prioritas risikonya, menganalisis akar penyebab kegagalan yang paling kritis berdasarkan nilai RPN dan Risk Score, serta merumuskan strategi preventive maintenance yang lebih komprehensif guna mencegah terulangnya kegagalan serupa.

2. Metode

Penelitian ini merupakan penelitian deskriptif kuantitatif dengan pendekatan analitis. Data primer diperoleh melalui observasi lapangan serta wawancara terstruktur dengan kepala pemeliharaan dan empat teknisi mekanik senior, sedangkan data sekunder berupa data work order dan maintenance log periode 2020–2025, manual book, serta dokumen histori kerusakan BFPT. Objek penelitian adalah BFPT B tipe MDG405F, yaitu pompa sentrifugal multistage bertekanan tinggi dengan penyekat jenis cartridge mechanical seal, yang mengalami kegagalan sistem shaft sealing berupa kerusakan mechanical seal, degradasi O-ring, dan erosi pada area seal chamber. Spesifikasi pompa pada kondisi rated diperlihatkan pada Tabel 1, sedangkan tahapan penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.

Tabel 1. Spesifikasi BFPT sisi pompa (kondisi rated)

Item	Satuan	Nilai
Model	-	MDG405F
Temperatur masuk	°C	174,5
Tekanan masuk	MPa	2,457
Laju alir masuk	m ³ /h	1333
Head	m	2054
Efisiensi	%	81,5
Putaran	r/min	5350
Tekanan keluar	MPa	20,37
Daya poros	kW	7910
Tipe seal	-	Mechanical seal
Penggerak	-	Turbin uap



Gambar 1. Diagram alir penelitian

2.1 Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)

FMEA merupakan metode penilaian risiko proaktif yang banyak digunakan di industri [11], [10]. Setiap mode kegagalan dievaluasi berdasarkan tiga parameter, yaitu Severity (S) yang menyatakan tingkat keparahan dampak, Occurrence (O) yang menyatakan frekuensi kejadian, dan Detection (D) yang menyatakan kemampuan pendeteksian kegagalan, masing-masing dengan skala 1–10. Penilaian dilakukan berdasarkan expert judgment yang didukung data historis gangguan. Ketiga parameter dikombinasikan menjadi Risk Priority Number (RPN) sesuai Persamaan (1). Semakin tinggi nilai RPN, semakin tinggi prioritas penanganan mode kegagalan tersebut.

RPN = S × O × D (1)

2.2 Risk-based FMEA (RFMEA)

RFMEA digunakan sebagai pengembangan FMEA untuk menentukan Risk Score (RS) dari setiap mode kegagalan berdasarkan kombinasi keparahan dampak dan kemungkinan kejadian sesuai Persamaan (2). Nilai RPN dan RS selanjutnya dibandingkan menggunakan diagram scatter plot RPN vs RS untuk menentukan mode kegagalan yang masuk kategori kritikal, yaitu mode kegagalan dengan RPN di atas critical value dan RS di atas ambang minimum, sehingga analisis lanjutan dapat difokuskan pada risiko paling tinggi.

RS = S × O (2)

2.3 Fault Tree Analysis (FTA)

FTA merupakan metode analisis deduktif untuk mengidentifikasi penyebab kegagalan sistem yang digambarkan dalam bentuk pohon kegagalan menggunakan simbol kejadian dan gerbang logika AND dan OR [12]. Analisis dimulai dari kegagalan utama (top event) dan ditelusuri hingga diperoleh kejadian dasar (basic event). Hubungan logika pada pohon kegagalan disederhanakan menggunakan aljabar Boolean untuk memperoleh minimal cut set, yaitu kombinasi terkecil basic event yang masih mampu menyebabkan top event. Integrasi FMEA dan FTA untuk analisis risiko dan pencegahan kegagalan mengacu pada kerangka yang telah divalidasi pada penelitian sebelumnya [13].

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Riwayat Gangguan BFPT

Berdasarkan hasil observasi visual, area shaft sealing system BFPT menunjukkan kerusakan berupa kebocoran fluida feedwater dan kondisi tidak normal pada pump discharge cover. Rekapitulasi data work order dan maintenance log periode 2020–2025 menghasilkan 28 kejadian gangguan yang terklasifikasi pada enam kelompok komponen sebagaimana diperlihatkan pada Tabel 2. Data tersebut menjadi landasan empiris identifikasi mode kegagalan aktual di lapangan.

Tabel 2. Histori kerusakan BFPT periode 2020–2025

Komponen	Frekuensi	Failure Mode
Bearing	3	Vibrasi/temperatur tinggi
Mechanical seal	3	Bocor/temperatur tinggi
Valve venting	1	Bocor/leakage out

Komponen	Frekuensi	Failure Mode
Magnetic filter	6	Kotor/tersumbat
Oil lube system	14	Oli kurang/terkontaminasi
Turning gear	1	Patah

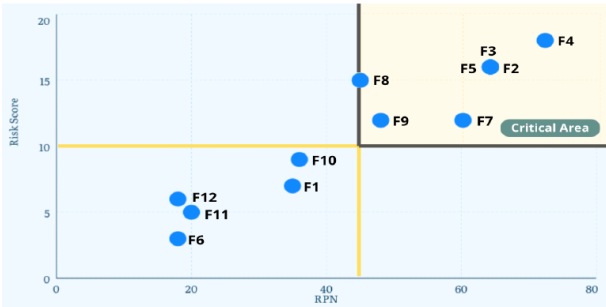
3.2 Hasil Analisis FMEA dan RFMEA

Analisis FMEA mengidentifikasi 12 mode kegagalan (F1–F12) pada komponen bearing, mechanical seal, valve venting, sistem lube oil, magnetic filter, dan turning gear. Nilai critical value RPN diperoleh dari rasio total RPN terhadap jumlah risiko, yaitu 544/12 = 45,33. Terdapat tujuh mode kegagalan dengan RPN di atas nilai kritis tersebut. Analisis dilanjutkan dengan perhitungan Risk Score untuk setiap mode kegagalan; rekapitulasi mode kegagalan kritikal beserta nilai S, O, D, RPN, dan RS diperlihatkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Mode kegagalan kritikal hasil FMEA–RFMEA

Kode	Mode kegagalan	S	O	D	RPN	RS
F4	Kebocoran fluida pada mechanical seal	9	2	4	72	18
F2	Vibrasi bearing BFPT tinggi	8	2	3	64	16
F3	Temperatur bearing BFPT tinggi	8	2	3	64	16
F5	Temperatur mechanical seal tinggi	8	2	3	64	16
F7	Kontaminasi air pada sistem pelumasan	6	2	5	60	12
F9	Filter lube oil kotor/tersumbat	3	4	4	48	12
F8	Lube oil low pressure	5	3	3	45	15

Perbandingan RPN dan RS divisualisasikan pada diagram scatter plot Gambar 2 dengan batas RPN 45,33 dan RS minimal 10. Delapan mode kegagalan berada pada kategori kritikal; tujuh di antaranya berada di dalam critical area, sedangkan F8 berada pada batas antara kategori kritikal dan tidak kritikal. Mode kegagalan kebocoran fluida pada mechanical seal (F4) memiliki nilai RPN (72) dan RS (18) tertinggi. Mengingat kegagalan tersebut dapat memicu serangkaian kegagalan lanjutan hingga kerusakan total BFPT, kebocoran fluida pada mechanical seal ditetapkan sebagai top event pada analisis FTA.

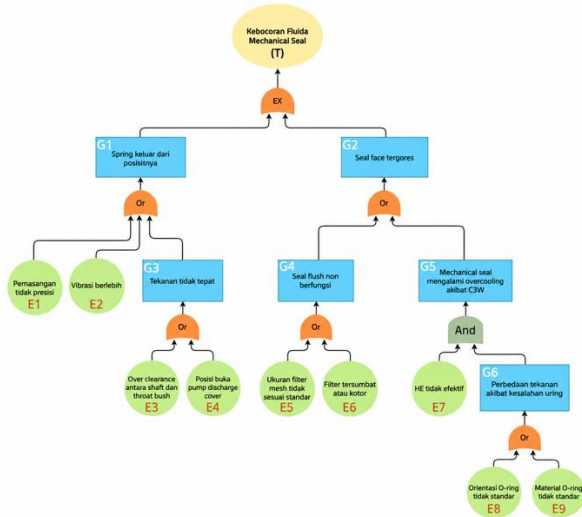


Gambar 2. Diagram scatter plot RPN vs Risk Score

3.3 Analisis FTA dan Minimal Cut Set

Struktur pohon kegagalan hasil analisis diperlihatkan pada Gambar 3. Top event kebocoran mechanical seal diuraikan menjadi dua jalur kegagalan utama yang dihubungkan gerbang OR, yaitu spring keluar dari

dudukannya (G1) dan seal face tergerus (G2). G1 dipengaruhi oleh pemasangan mechanical seal tidak presisi (E1), vibrasi berlebih (E2), dan tekanan fluida tinggi (G3) yang bersumber dari over clearance antara shaft dan throat bush (E3) atau erosi pump discharge cover (E4). G2 dipengaruhi oleh berkurangnya aliran seal flush (G4) akibat ukuran filter mesh tidak sesuai standar (E5) atau filter tersumbat (E6), serta overheating mechanical seal di atas 85 °C (G5). Gerbang AND pada G5 menunjukkan overheating hanya terjadi apabila heat exchanger tidak efektif (E7) terjadi bersamaan dengan kebocoran feedwater akibat kerusakan O-ring (G6) yang disebabkan dimensi O-ring tidak standar (E8) atau material O-ring tidak standar (E9).



Gambar 3. Diagram FTA kebocoran fluida mechanical seal

Temuan ini menunjukkan bahwa FTA dapat digunakan untuk menelusuri hubungan antara top event dan basic event secara sistematis [8].

Tabel 4. Minimal cut set (MCS)

MCS	Keterangan
{E1}	Pemasangan tidak presisi
{E2}	Vibrasi berlebih
{E3}	Over clearance shaft–throat bush
{E4}	Erosi pump discharge cover
{E5}	Ukuran filter mesh tidak sesuai
{E6}	Filter tersumbat
{E7, E8}	HE tidak efektif dan dimensi O-ring tidak sesuai
{E7, E9}	HE tidak efektif dan material O-ring tidak sesuai

3.4 Validasi Basic Event Berdasarkan Bukti Lapangan

Hasil FTA diverifikasi dengan mencocokkan basic event terhadap data operasional, dokumentasi inspeksi, dan foto kerusakan. Basic event E2 terverifikasi dari data monitoring kondisi yang menunjukkan kenaikan vibrasi radial bearing hingga 83,545 μm , jauh melampaui nilai operasi normal; getaran berlebih tersebut menggeser spring dari dudukannya sehingga tekanan kontak seal face menjadi tidak merata. Basic event E4 terverifikasi dari inspeksi visual berupa alur erosi pada permukaan seal chamber di sekitar shaft sleeve akibat aliran feedwater bertekanan tinggi yang terus-

menerus melewati celah shaft–throat bush, sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 4.



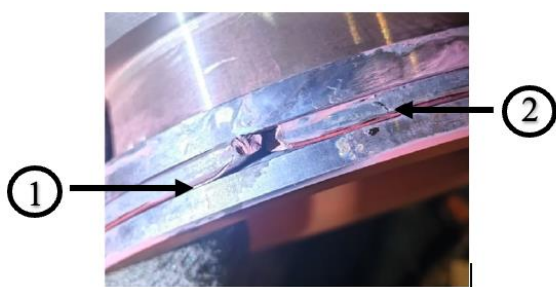
Gambar 4. Erosi pada pump discharge cover

Basic event E6 terverifikasi dari kondisi magnetic filter yang dipenuhi endapan sehingga debit seal flush menurun dan kemampuan pendinginan mechanical seal berkurang. Basic event E7 terverifikasi dari evaluasi konfigurasi sistem seal flushing pada sistem aktual heat exchanger terpasang sebelum magnetic filter sehingga fluida yang masih mengandung partikel logam berpotensi menimbulkan fouling dan menurunkan kemampuan perpindahan panas (Gambar 5).



Gambar 5. Kerusakan Magnetic Filter

Basic event E8 dan E9 terverifikasi dari inspeksi O-ring yang menunjukkan kerusakan extrusion, yaitu material terdorong keluar ke clearance gap hingga robek akibat dimensi tidak sesuai, serta compression set berupa hilangnya elastisitas akibat material tidak sesuai kondisi operasi temperatur tinggi (Gambar 6). Temuan ini sejalan dengan penelitian mengenai perubahan sifat elastomer akibat proses penuaan dan paparan temperatur [6], [7].



Gambar 6. Kerusakan O-ring: (1) extrusion; (2) compression set

3.5 Strategi Preventive Maintenance

Berdasarkan sembilan basic event hasil FTA, dirumuskan strategi preventive maintenance yang berorientasi pada akar penyebab sebagaimana diperlihatkan pada Tabel 5. Strategi tersebut menekankan inspeksi berbasis kondisi terhadap parameter kritis, yaitu vibrasi bearing, kondisi seal chamber, kebersihan magnetic filter, performa heat exchanger, serta verifikasi dimensi dan material O-ring sebelum pemasangan, sehingga potensi kegagalan dapat terdeteksi lebih awal sebelum berkembang menjadi kerusakan serius.

Tabel 5. Strategi preventive maintenance berdasarkan FTA

Basic event	Strategi preventive maintenance
E1 Pemasangan seal tidak presisi	Alignment poros sebelum pemasangan, prosedur sesuai manual pabrikan, verifikasi posisi spring, seal face, dan compression dimension
E2 Vibrasi berlebih	Pengukuran vibrasi berkala, balancing rotor, alignment pompa–turbin, inspeksi bearing bila vibrasi naik
E3 Over clearance shaft–throat bush	Pengukuran clearance saat overhaul sesuai toleransi desain; ganti throat bush bila melebihi batas
E4 Erosi pump discharge cover	Inspeksi visual, pengukuran erosi dengan thickness gauge, repair welding/penggantian bila melewati toleransi
E5 Filter mesh tidak standar	Verifikasi spesifikasi filter sesuai API 682 dan OEM pada setiap penggantian
E6 Filter tersumbat/kotor	Pembersihan/penggantian filter berkala berdasarkan jam operasi dan differential pressure
E7 Heat exchanger tidak efektif	Pembersihan tube berkala, monitoring temperatur inlet–outlet, uji performa saat overhaul
E8 Dimensi O-ring tidak standar	Pemeriksaan ID, OD, dan cross section O-ring sebelum pemasangan
E9 Material O-ring tidak standar	Penggunaan material sesuai temperatur, tekanan, dan karakteristik feedwater; verifikasi material sebelum instalasi

4. Kesimpulan

Hasil integrasi FMEA, RFMEA, dan FTA menunjukkan bahwa kebocoran fluida pada mechanical seal merupakan mode kegagalan paling kritis pada sistem shaft sealing BFPT dengan nilai RPN 72 dan Risk Score 18. Analisis FTA mengidentifikasi sembilan basic event yang menjadi akar penyebab kegagalan, yang menegaskan bahwa kebocoran

mechanical seal bukan disebabkan faktor tunggal melainkan interaksi mekanisme mekanis, hidrolik, dan termal; enam di antaranya, yaitu vibrasi berlebih, erosi pump discharge cover, filter tersumbat, heat exchanger tidak efektif, serta ketidaksesuaian dimensi dan material O-ring, terkonfirmasi oleh bukti kerusakan lapangan. Strategi preventive maintenance berbasis akar penyebab yang dirumuskan meliputi peningkatan kualitas prosedur pemasangan mechanical seal, pemantauan vibrasi berkala, inspeksi clearance shaft dan throat bush, pemeriksaan discharge cover, pengendalian kualitas filter dan performa heat exchanger, serta verifikasi dimensi dan material O-ring sebelum pemasangan, sehingga diharapkan mampu meningkatkan keandalan BFPT, menekan downtime shaft sealing.

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih Program Studi Sarjana Terapan Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta, serta kepada manajemen dan tim pemeliharaan mekanik PLTU tempat penelitian dilakukan atas dukungan data dan fasilitas selama proses penelitian.

Daftar Pustaka

- [1] A. Kömmling, M. Jaunich, P. Pourmand, D. Wolff, and U. W. Gedde, "Influence of Ageing on Sealability of Elastomeric O-Rings," *Macromolecular Symposia*, vol. 373, p. 1600157, 2017, doi: 10.1002/masy.201600157.
- [2] American Petroleum Institute, API Standard 682: Pumps Shaft Sealing Systems for Centrifugal and Rotary Pumps, 4th ed. Washington, DC: API, 2014.
- [3] S. S. Rao, *Mechanical Vibrations*, 6th ed. Harlow, U.K.: Pearson Education, 2018.
- [4] S. Harbintoro, "Metode keseimbangan bidang tunggal pada proses balancing komponen boiler feed pump rotor," *Metalurgi*, vol. 41, no. 2, pp. 54–63, 2019.
- [5] A. Kusumadewi et al., "Analisa spektrum vibrasi kerusakan bearing pada pompa diesel fire fighting PT PJB UP Muara Tawar," in *Prosiding Seminar Nasional Teknik Mesin Politeknik Negeri Jakarta*, 2021, pp. 737–745.
- [6] A. Kömmling, M. Jaunich, P. Pourmand, D. Wolff, and U. W. Gedde, "Analysis of O-Ring Seal Failure under Static Conditions and Determination of End-of-Lifetime Criterion," *Polymers*, vol. 11, no. 8, p. 1251, 2019, doi: 10.3390/polym11081251.
- [7] L. Bachus and A. Custodio, "Failure analysis of mechanical seals," in *Know and Understand Centrifugal Pumps*. Oxford, U.K.: Elsevier, 2003, pp. 202–225, doi: 10.1016/B978-185617409-1/50015-3.
- [8] M. Shafiee, E. Enjema, and A. Kolios, "An Integrated FTA-FMEA Model for Risk Analysis of Engineering Systems: A Case Study of Subsea Blowout Preventers," *Applied Sciences*, vol. 9, no. 6, p. 1192, 2019, doi: 10.3390/app9061192.
- [9] F. Firmansyah and K. Nadliroh, "Perawatan Preventive Metode FMEA Pompa Sentrifugal KSB 40-200 Pada PT Z," *AME (Aplikasi Mekanika dan Energi): Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, vol. 11, no. 1, pp. 1–5, 2025, doi: 10.32832/ame.v11i1.1217.
- [10] D. H. Stamatis, *Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from Theory to Execution*, 2nd ed. Milwaukee, WI: ASQ Quality Press, 2003.

- [11] N. A. Shebl, B. D. Franklin, and N. Barber, "Failure mode and effects analysis outputs: are they valid?," *BMC Health Services Research*, vol. 12, no. 150, 2012.
- [12] W. E. Vesely, F. F. Goldberg, N. H. Roberts, and D. F. Haasl, *Fault Tree Handbook*, NUREG-0492. Washington, DC: U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1981.
- [13] N. G. Mutlu and S. Altuntas, "Risk analysis for occupational safety and health in the textile industry: Integration of FMEA, FTA, and BIFPET methods," *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 72, pp. 222–240, 2019.