



Analisis dan Usulan Perawatan Pompa *Booster Propylene* Menggunakan *Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)* Di PT. XX

Beny Nurcahyo^{1*}, Tri Budi Prasetyo², Budi Susanto³

^{1, 2, 3} Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Cirebon, Indonesia
Email penulis pertama: nurcahyobenyo@gmail.com^{1*}, tri.budi@umc.co.id², budi.susanto@umc.co.id³

Abstract

essential for maintaining continuous feed in polypropylene production. This study aims to determine priority disturbances, assess failure risks, identify contributing factors, and develop maintenance recommendations for pumps P-300A, P-300B, and P-300C. Historical disturbance data from 2023–2025 were analyzed using a Pareto chart based on unplanned maintenance downtime, followed by Failure Mode and Effect Analysis (FMEA). Failure causes were identified through interviews, field observations, and a 6M Fishbone Diagram, while maintenance recommendations were developed from existing-maintenance evaluation and 5WIH analysis. Twelve respondents consisting of operators, maintenance technicians, and engineering personnel assessed Severity, Occurrence, and Detection using a 1–10 scale. The results identified 24 disturbance events with 200 hours of unplanned maintenance downtime. Four disturbances accounted for 170 hours or 85% of total downtime: excessive vibration, high motor temperature, mechanical seal leakage, and propylene fluid leakage. The highest RPN was excessive vibration at 314.82, followed by propylene fluid leakage at 237.82, mechanical seal leakage at 231.90, and high motor temperature at 201.44. The main recommendations are weekly vibration monitoring, routine impeller cleaning during pump disassembly, strengthened sealing-system inspection, and reducing the bearing lubrication interval from three months to one month.

Keywords: *booster pump, propylene, FMEA; RPN, fishbone, maintenance, reliability*

Abstrak

Keandalan sistem pompa booster feed propylene penting untuk menjaga kontinuitas suplai bahan baku pada proses produksi polypropylene. Penelitian ini bertujuan menentukan gangguan prioritas, menilai risiko kegagalan, mengidentifikasi faktor penyebab, dan menyusun usulan perawatan pada P-300A, P-300B, dan P-300C. Data historis gangguan periode 2023–2025 dianalisis menggunakan diagram Pareto berbasis unplanned maintenance downtime, kemudian gangguan prioritas dinilai dengan Failure Mode and Effect Analysis (FMEA). Faktor penyebab diidentifikasi melalui wawancara, observasi, dan Fishbone Diagram 6M, sedangkan usulan perawatan disusun melalui evaluasi maintenance existing dan analisis 5WIH. Sebanyak 12 responden yang terdiri atas operator, teknisi maintenance, dan engineering memberikan penilaian Severity, Occurrence, dan Detection pada skala 1–10. Hasil menunjukkan 24 kejadian gangguan dengan total 200 jam unplanned maintenance downtime. Empat gangguan menyumbang 170 jam atau 85% downtime, yaitu vibrasi berlebih, temperatur motor tinggi, kebocoran mechanical seal, dan kebocoran fluida *propylene*. RPN tertinggi adalah vibrasi berlebih sebesar 314,82, diikuti kebocoran fluida propylene 237,82, kebocoran mechanical seal 231,90, dan temperatur motor tinggi 201,44. Usulan utama meliputi vibration monitoring mingguan, routine cleaning impeller saat pembongkaran, penguatan inspeksi sistem sealing, dan penyesuaian interval pelumasan bearing dari tiga bulan menjadi satu bulan.

Kata kunci: : pompa booster, FMEA, RPN, *fishbone*, maintenance, reliability

Copyright (c) 2023 Nama Penulis

✉ Corresponding author:

Email Address: nurcahyobenyo@gmail.com *

Received tanggal bulan tahun, Accepted tanggal bulan tahun, Published tanggal bulan tahun

PENDAHULUAN

Industri petrokimia merupakan industri proses yang membutuhkan kontinuitas operasi dan keandalan peralatan untuk menjaga stabilitas produksi. Pada sistem produksi polypropylene, propylene cair harus disuplai dari fasilitas penyimpanan menuju unit proses melalui sistem booster feed propylene. Pompa booster menjadi peralatan penting karena perubahan kondisi aliran, tekanan, atau ketersediaan

pompa dapat meningkatkan beban operasi dan kebutuhan pemeliharaan. Pendekatan condition monitoring pada pompa sentrifugal juga semakin banyak digunakan untuk mengenali perubahan kondisi sebelum berkembang menjadi kegagalan yang lebih serius [1], [2]. Karakteristik pompa sentrifugal dan sistem penyekat poros dalam lingkungan petrokimia juga perlu dipahami dengan mengacu pada API 610 dan API 682 [14], [15].

Sistem yang diteliti terdiri atas P-300A, P-300B, dan P-300C yang dioperasikan secara redundan. Dalam kondisi normal, dua pompa beroperasi dan satu pompa berada pada kondisi standby. Konfigurasi tersebut memungkinkan proses tetap berjalan ketika salah satu pompa dikeluarkan dari operasi untuk perbaikan, tetapi gangguan berulang tetap meningkatkan ketidaktersediaan peralatan dan beban pemeliharaan. Selama periode 2023–2025 terdapat 24 kejadian gangguan dengan total 200 jam unplanned maintenance downtime.

Data historis menunjukkan bahwa gangguan tidak hanya berasal dari satu kelompok komponen. Gangguan yang tercatat meliputi vibrasi berlebih, temperatur motor tinggi, kebocoran mechanical seal, kebocoran fluida propylene, laju alir tidak stabil, arus motor tinggi, pompa berhenti tiba-tiba, suara operasi tidak normal, dan kegagalan instrumentasi. Kondisi ini menunjukkan perlunya metode yang mampu menggabungkan data historis dengan penilaian risiko dan informasi lapangan. FMEA dapat digunakan untuk mengidentifikasi failure mode, failure effect, failure cause, serta memprioritaskan risiko menggunakan Severity, Occurrence, dan Detection [3], [4].

Penelitian FMEA berkembang dari pendekatan RPN konvensional menuju berbagai pengembangan berbasis fuzzy dan multi-criteria karena penilaian ahli memiliki unsur subjektivitas [5], [6]. Namun, FMEA konvensional tetap relevan untuk penelitian terapan ketika tujuan utama adalah memperoleh prioritas risiko yang mudah ditelusuri dan dapat diterjemahkan langsung menjadi tindakan pemeliharaan. Pada penelitian ini, FMEA tidak berdiri sendiri, tetapi didahului Pareto berbasis downtime dan dilanjutkan Fishbone, evaluasi maintenance existing, serta 5W1H.

Kontribusi praktis penelitian ini adalah menghubungkan prioritas downtime dengan prioritas risiko FMEA dan kondisi maintenance existing pada sistem pompa booster feed propylene di industri petrokimia. Dengan alur tersebut, hasil analisis tidak berhenti pada nilai RPN, tetapi diterjemahkan menjadi penguatan aktivitas pemeliharaan yang spesifik terhadap failure mode prioritas. Tujuan penelitian adalah: (1) menentukan gangguan prioritas berdasarkan kontribusi unplanned maintenance downtime; (2) menentukan tingkat risiko melalui FMEA; (3) mengidentifikasi faktor penyebab melalui Fishbone; dan (4) menyusun usulan perawatan berdasarkan maintenance gap dan 5W1H.

METODE

Penelitian dilakukan pada sistem Pompa Booster Feed Propylene P-300A, P-300B, dan P-300C di PT. XX. Data historis gangguan mencakup periode 2023–2025, sedangkan penelitian lapangan dilaksanakan pada 5 Oktober sampai 16 Desember 2025. Sistem dianalisis sebagai satu kesatuan dan tidak dilakukan perhitungan risiko terpisah untuk setiap tag number pompa. Downtime yang digunakan

adalah unplanned maintenance downtime, yaitu waktu ketidaktersediaan pompa akibat gangguan dan tindakan pemeliharaan tidak terencana; downtime tersebut tidak diperlakukan sebagai production downtime karena selama periode pengamatan tidak terdapat penghentian proses produksi akibat satu unit pompa.

Data primer diperoleh melalui observasi, wawancara semi-terstruktur, dan kuesioner FMEA. Responden berjumlah 12 orang, terdiri atas 4 operator, 4 teknisi maintenance, dan 4 personel engineering. Data sekunder meliputi histori gangguan, histori pemeliharaan, dokumen preventive maintenance, laporan inspeksi, dan data teknis pompa. Penggunaan beberapa sumber data dilakukan untuk meningkatkan konsistensi identifikasi failure mode dan faktor penyebab.

Tahapan analisis terdiri atas empat bagian. Pertama, seluruh gangguan dikelompokkan berdasarkan jenis dan dihitung total unplanned maintenance downtime. Kedua, Diagram Pareto digunakan untuk menentukan gangguan yang memberikan kontribusi terbesar terhadap downtime. Ketiga, empat gangguan prioritas dinilai menggunakan FMEA. Nilai Severity, Occurrence, dan Detection diperoleh dari penilaian responden dengan skala 1–10, kemudian dihitung menggunakan persamaan:

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

Keempat, failure mode prioritas dianalisis melalui wawancara 5W1H dan dikelompokkan dalam kategori 6M (Man, Machine, Method, Material, Measurement, dan Environment) untuk penyusunan Fishbone Diagram. Hasilnya dibandingkan dengan maintenance existing untuk mengidentifikasi maintenance gap. Unsur How dari 5W1H kemudian digunakan untuk menyusun tindakan perawatan yang dapat memperkuat pengendalian terhadap gangguan prioritas.



Gambar 1. Alur analisis penelitian

HASIL DAN DISKUSI

Karakteristik Gangguan dan Downtime

Selama 2023-2025 terdapat 24 kejadian gangguan dengan total 200 jam unplanned maintenance downtime. Gangguan tersebar pada ketiga pompa, dengan P-300C memiliki akumulasi downtime terbesar, yaitu 94 jam, diikuti P-300B sebesar 64 jam dan P-300A sebesar 42 jam. Karena konfigurasi operasi bersifat redundan, besarnya downtime unit tidak secara langsung menunjukkan bahwa proses produksi berhenti; nilai tersebut merepresentasikan ketidaktersediaan peralatan dan waktu pemeliharaan tidak terencana.

Tabel 1. Rekapitulasi gangguan berdasarkan pompa, 2023-2025

Pompa	Jumlah kejadian	Downtime (jam)	Kontribusi (%)
P-300A	4	42	21.0

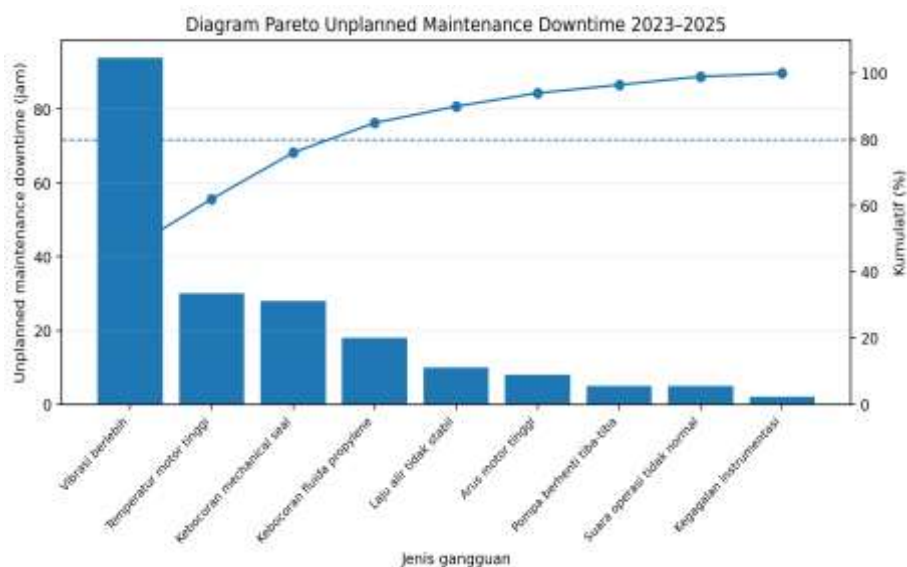
Pompa	Jumlah kejadian	Downtime (jam)	Kontribusi (%)
P-300B	10	64	32.0
P-300C	10	94	47.0
Total	24	200	100.0

Penentuan Gangguan Prioritas dengan Pareto

Analisis Pareto pada penelitian ini menggunakan kontribusi unplanned maintenance downtime sebagai dasar pemilihan gangguan prioritas. Hasil pengelompokan menunjukkan vibrasi berlebih memberikan kontribusi terbesar, yaitu 94 jam atau 47% dari total downtime. Selanjutnya temperatur motor tinggi sebesar 30 jam, kebocoran mechanical seal 28 jam, dan kebocoran fluida propylene 18 jam. Keempat gangguan tersebut secara kumulatif mencapai 170 jam atau 85% dari total downtime.

Tabel 2. Pareto unplanned maintenance downtime sistem pompa

No.	Jenis gangguan	Downtime (jam)	%	% kumulatif
1	Vibrasi berlebih	94	47.0	47.0
2	Temperatur motor tinggi	30	15.0	62.0
3	Kebocoran mechanical seal	28	14.0	76.0
4	Kebocoran fluida propylene	18	9.0	85.0
5	Laju alir tidak stabil	10	5.0	90.0
6	Arus motor tinggi	8	4.0	94.0
7	Pompa berhenti tiba-tiba	5	2.5	96.5
8	Suara operasi tidak normal	5	2.5	99.0
9	Kegagalan instrumentasi	2	1.0	100.0



Gambar 2. Diagram Pareto unplanned maintenance downtime 2023–2025

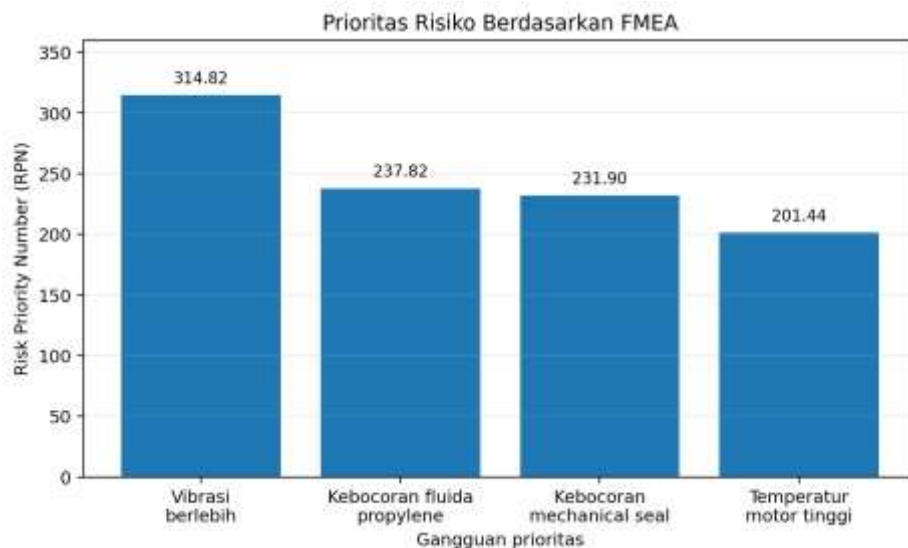
Hasil Pareto menunjukkan bahwa pengendalian empat gangguan pertama berpotensi memberikan pengaruh terbesar terhadap pengurangan ketidaktersediaan peralatan. Temuan ini menjadi dasar pemilihan objek FMEA. Penggunaan downtime sebagai basis Pareto juga memberikan konteks yang lebih relevan terhadap pemeliharaan dibandingkan hanya menggunakan jumlah kejadian, karena satu gangguan dengan frekuensi lebih rendah dapat menghasilkan waktu perbaikan yang lebih panjang.

Penilaian Risiko FMEA

Empat gangguan prioritas selanjutnya dinilai berdasarkan Severity, Occurrence, dan Detection oleh 12 responden. Hasil rata-rata menunjukkan bahwa vibrasi berlebih mempunyai nilai Severity 8,00, Occurrence 6,75, dan Detection 5,83. Kombinasi ketiga parameter tersebut menghasilkan RPN 314,82 dan menjadi risiko tertinggi. Kebocoran fluida propylene memperoleh RPN 237,82, kebocoran mechanical seal 231,90, dan temperatur motor tinggi 201,44.

Tabel 3. Hasil penilaian FMEA gangguan prioritas

Prioritas	Failure mode	S	O	D	RPN
1	Vibrasi berlebih	8.00	6.75	5.83	314.82
2	Kebocoran fluida propylene	8.00	5.17	5.75	237.82
3	Kebocoran mechanical seal	7.83	5.08	5.83	231.90
4	Temperatur motor tinggi	7.67	5.17	5.08	201.44



Gambar 3. Prioritas risiko berdasarkan RPN

Nilai RPN memperlihatkan bahwa vibrasi berlebih perlu menjadi fokus utama penguatan pemeliharaan. Tingginya RPN tidak hanya dipengaruhi oleh frekuensi gangguan, tetapi juga oleh konsekuensi dan kemampuan deteksi. Hal ini penting karena dua failure mode dapat memiliki frekuensi yang berbeda tetapi tetap memperoleh prioritas tinggi apabila dampaknya besar atau relatif sulit dideteksi. Pada penelitian ini, RPN konvensional dipertahankan karena sederhana dan mudah diterapkan di lingkungan maintenance, namun keterbatasan RPN misalnya kombinasi S, O, dan D yang berbeda dapat menghasilkan RPN sama perlu dipertimbangkan dalam penelitian lanjutan [5], [6].

Faktor Penyebab Gangguan Prioritas

Tabel 4. Ringkasan faktor penyebab berdasarkan Fishbone 6M

Gangguan	Faktor utama	Faktor pendukung
Vibrasi berlebih	Machine: misalignment, unbalance, bearing, mechanical looseness, coupling	Method/Measurement/Environment: alignment dan vibration monitoring belum optimal; baseplate/foundation, anchor bolt, piping/support
Kebocoran fluida propylene	Machine: mechanical seal, shaft/sleeve, gasket, flange/fitting, perpipaan	Method/Man/Measurement: pemasangan dan inspeksi sealing belum cukup terarah; pemeriksaan titik kritis dan pencatatan indikasi perlu diperkuat
Kebocoran mechanical seal	Machine: seal, shaft/sleeve, gasket, komponen sealing	Method/Man/Material: pemasangan, kebersihan seal face, pemeriksaan pascapekerjaan, dan kesesuaian material perlu diperkuat
Temperatur motor tinggi	Machine: bearing motor, pendinginan, beban, alignment, komponen internal	Method/Measurement/Environment: monitoring temperatur, pembersihan pendinginan, pelumasan, dan kondisi ventilasi perlu diperkuat

Pada vibrasi berlebih, faktor Machine yang paling menonjol adalah misalignment, unbalance, kondisi bearing, mechanical looseness, dan coupling. Misalignment dapat berkaitan dengan ketidakselarasan shaft dan coupling serta perubahan posisi relatif motor-pompa; unbalance dapat dipengaruhi kondisi rotating part dan deposit pada impeller; sedangkan bearing dapat mengalami degradasi akibat keausan, pelumasan yang tidak optimal, atau kontaminasi. Faktor lingkungan juga mencakup kondisi baseplate/foundation, anchor bolt, dan beban piping/support.

Kebocoran fluida propylene berkaitan dengan kemampuan sistem sealing dan jalur fluida mempertahankan propylene di dalam sistem. Kondisi mechanical seal, shaft/sleeve, gasket, flange, fitting, dan sambungan perpipaan menjadi titik penting pemeriksaan. Kebocoran mechanical seal mempunyai karakter yang lebih spesifik karena berhubungan langsung dengan seal face, shaft/sleeve, kebersihan permukaan, proses pemasangan, dan pemeriksaan setelah pekerjaan.

Temperatur motor tinggi berkaitan dengan bearing motor, sistem pendinginan, beban pompa, alignment motor-pompa, kondisi komponen internal motor, dan efektivitas monitoring. Bearing yang mengalami degradasi atau pelumasan yang tidak optimal dapat meningkatkan gesekan, sedangkan pendinginan yang kurang efektif menyebabkan panas terakumulasi. Temuan tersebut konsisten dengan kebutuhan condition monitoring untuk mengenali perubahan kondisi pompa dan penggerak secara dini [1], [2].

Evaluasi Maintenance Existing dan Maintenance Gap

Evaluasi menunjukkan bahwa sebagian besar faktor penyebab telah memiliki aktivitas pemeliharaan existing. Dengan demikian, maintenance gap tidak berarti bahwa maintenance sebelumnya tidak dilakukan, melainkan menunjukkan adanya aspek yang masih dapat diperkuat dari sisi frekuensi, cakupan, dan metode pemeriksaan. Pada vibrasi berlebih, vibration monitoring telah dilakukan bulanan, tetapi belum cukup responsif terhadap prioritas risiko dan belum terdapat routine cleaning impeller dengan interval atau pemicu kondisi yang jelas.

Pada gangguan kebocoran fluida propylene dan mechanical seal, pemeriksaan seal, shaft/sleeve, gasket, dan sambungan telah tersedia, tetapi perlu diperkuat agar titik kritis sealing diperiksa secara lebih terarah, terutama setelah pemasangan atau penggantian komponen. Pada temperatur motor tinggi, pelumasan bearing dilakukan setiap tiga bulan; hasil analisis menunjukkan interval tersebut perlu dievaluasi dan diusulkan menjadi satu bulan dengan tetap mempertimbangkan kondisi bearing, pelumas, dan hasil monitoring.

Tabel 5. Evaluasi maintenance existing dan maintenance gap

Gangguan	Maintenance existing	Maintenance gap	Penguatan
Vibrasi berlebih	Vibration monitoring bulanan; inspeksi rotating parts tersedia	Frekuensi monitoring; belum ada routine cleaning impeller yang terstruktur	Monitoring mingguan; cleaning saat pembongkaran/berdasarkan kondisi
Kebocoran fluida propylene	Seal, shaft/sleeve, gasket dan sambungan diperiksa	Cakupan dan ketajaman inspeksi sealing/titik kritis	Inspeksi sealing dan jalur fluida lebih terarah; verifikasi pascapekerjaan
Kebocoran mechanical seal	Pemeriksaan seal dan komponen pendukung tersedia	Pemeriksaan terencana terhadap seal, shaft/sleeve, gasket dan hasil pemasangan	Penguatan inspeksi dan pemeriksaan pascapenggantian
Temperatur motor tinggi	Pemeriksaan motor, bearing dan pelumasan; interval 3 bulan	Kesesuaian interval pelumasan dan efektivitas monitoring	Pelumasan 1 bulan; monitoring temperatur dan pemeriksaan pendinginan

Usulan Perawatan Berbasis Risiko

Usulan perawatan disusun berdasarkan urutan RPN, faktor penyebab, dan maintenance gap. Prioritas pertama adalah vibrasi berlebih. Vibration monitoring diusulkan ditingkatkan dari satu bulan

menjadi satu minggu untuk mempercepat deteksi perubahan kondisi. Pemeriksaan alignment motor-pompa, bearing, coupling, mechanical looseness, dan rotating part perlu diperkuat. Routine cleaning impeller dilakukan ketika pompa sudah dibongkar untuk inspeksi internal atau pekerjaan maintenance lain sehingga tidak memerlukan pembongkaran khusus.

Prioritas kedua adalah kebocoran fluida propylene. Pemeriksaan diarahkan pada mechanical seal, shaft/sleeve, gasket, fitting, flange, dan sambungan perpipaan. Setelah pemasangan atau penggantian komponen sealing, pemeriksaan ulang perlu dilakukan untuk memastikan tidak terdapat indikasi kebocoran. Prioritas ketiga adalah kebocoran mechanical seal, dengan fokus pada kondisi seal face, shaft/sleeve, gasket, kebersihan permukaan, dan kualitas pemasangan.

Prioritas keempat adalah temperatur motor tinggi. Tindakan yang diusulkan meliputi monitoring temperatur, pemeriksaan bearing motor, sistem pendinginan dan ventilasi, kondisi beban, alignment motor-pompa, dan kondisi komponen motor. Interval pelumasan bearing yang sebelumnya tiga bulan diusulkan menjadi satu bulan sebagai penguatan preventive maintenance, kemudian dievaluasi berdasarkan kondisi aktual.

Tabel 6. Usulan perawatan berdasarkan prioritas risiko

Prioritas	Gangguan	Dasar	Tindakan utama	Pelaksana
1	Vibrasi berlebih	RPN 314,82	Monitoring vibrasi mingguan; alignment; inspeksi bearing/coupling; cek looseness; cleaning impeller saat pembongkaran	Operator + Maintenance/ Engineering
2	Kebocoran fluida propylene	RPN 237,82	Inspeksi mechanical seal, shaft/sleeve, gasket, fitting, flange dan piping; verifikasi pascapekerjaan	Operator + Maintenance
3	Kebocoran mechanical seal	RPN 231,90	Inspeksi seal, shaft/sleeve, gasket dan komponen sealing; pemeriksaan hasil pemasangan/penggantian	Maintenance
4	Temperatur motor tinggi	RPN 201,44	Monitoring temperatur; pelumasan bearing bulanan; cek cooling/ventilasi; beban; alignment; motor	Operator + Maintenance/Engineering

Implikasi Praktis dan Keterbatasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pendekatan FMEA lebih berguna ketika nilai risiko dihubungkan dengan kondisi maintenance existing. Dalam konteks pompa booster yang memiliki

redundansi, prioritas pemeliharaan sebaiknya tidak hanya mempertimbangkan apakah proses berhenti, tetapi juga ketidaktersediaan unit, frekuensi gangguan, kemampuan deteksi, dan potensi degradasi komponen. Penguatan monitoring mingguan pada vibrasi dapat meningkatkan kualitas data kondisi dan mendukung keputusan berbasis kondisi.

Penelitian memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, FMEA menggunakan RPN konvensional dan penilaian ahli sehingga masih memiliki unsur subjektivitas. Kedua, jumlah responden terbatas pada 12 personel yang terkait langsung dengan sistem. Ketiga, usulan perawatan belum diimplementasikan sehingga pengurangan downtime dan perubahan RPN belum dapat divalidasi secara empiris. Keempat, penelitian belum memasukkan analisis biaya, MTBF/MTTR, atau optimasi interval secara kuantitatif. Keterbatasan tersebut dapat menjadi arah pengembangan melalui fuzzy FMEA, RCM, condition monitoring berbasis tren, dan evaluasi before-after [5], [7], [8].

KESIMPULAN

1. Periode 2023–2025 mencatat 24 kejadian gangguan pada P-300A, P-300B, dan P-300C dengan total 200 jam unplanned maintenance downtime. Empat gangguan vibrasi berlebih, temperatur motor tinggi, kebocoran mechanical seal, dan kebocoran fluida propylene menyumbang 170 jam atau 85% downtime sehingga ditetapkan sebagai gangguan prioritas.
2. FMEA menunjukkan vibrasi berlebih sebagai risiko tertinggi dengan RPN 314,82, diikuti kebocoran fluida propylene 237,82, kebocoran mechanical seal 231,90, dan temperatur motor tinggi 201,44. Hasil tersebut menunjukkan bahwa prioritas pemeliharaan tidak cukup ditentukan oleh frekuensi kejadian, tetapi perlu mempertimbangkan dampak dan kemampuan deteksi.
3. Faktor penyebab utama yang teridentifikasi meliputi misalignment, unbalance, bearing, coupling, mechanical looseness, kondisi mechanical seal, shaft/sleeve, gasket, sambungan perpipaan, beban motor, sistem pendinginan, dan alignment motor-pompa. Faktor-faktor tersebut dipengaruhi pula oleh metode pemeriksaan, ketelitian personel, material, pengukuran, dan kondisi lingkungan.
4. Usulan perawatan diarahkan pada peningkatan vibration monitoring dari bulanan menjadi mingguan, routine cleaning impeller saat pembongkaran, penguatan inspeksi mechanical seal dan komponen sealing, verifikasi pascapekerjaan, serta penyesuaian interval pelumasan bearing dari tiga bulan menjadi satu bulan. Implementasi perlu dievaluasi dengan membandingkan frekuensi gangguan dan downtime sebelum dan sesudah penerapan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Cirebon, serta pihak PT. XX dan seluruh personel yang memberikan akses data, informasi operasi, pemeliharaan, wawancara, dan penilaian FMEA dalam penelitian ini.

REFERENSI

- [1] L. Chen, L. Wei, Y. Wang, J. Wang, and W. Li, "Monitoring and predictive maintenance of centrifugal pumps based on smart sensors," *Sensors*, vol. 22, no. 6, 2022, doi: 10.3390/s22062106.
- [2] A. Eaton, W. H. Ahmed, and M. Hassan, "Evaluating the performance degradation of centrifugal pumps using the principal component analysis," *Journal of Pressure Vessel Technology*, vol. 144, no. 2, 2022, doi: 10.1115/1.4052522.
- [3] L. Ouyang, "Survey of FMEA methods with improvement on performance inconsistency," *Quality and Reliability Engineering International*, 2022, doi: 10.1002/qre.3059.
- [4] Y. Liu and Y. Tang, "Managing uncertainty of expert's assessment in FMEA with the belief divergence measure," *Scientific Reports*, vol. 12, 6812, 2022, doi: 10.1038/s41598-022-10828-2.
- [5] O. M. Testik and E. T. Unlu, "Fuzzy FMEA in risk assessment for test and calibration laboratories," *Quality and Reliability Engineering International*, vol. 39, no. 2, pp. 575–589, 2023, doi: 10.1002/qre.3198.
- [6] Q. Shi, Y. Hu, and G. Yan, "A novel FMEA approach based on probabilistic linguistic best-worst method and TOPSIS with application to marine diesel fuel injection system," *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, vol. 45, no. 3, pp. 3835–3854, 2023, doi: 10.3233/JIFS-230870.
- [7] G. Kharmanda, J. Shao, H. Al Sakkaf, F. Bouretoua, and B. Almahriji, "An overview of reliability centered maintenance using failure mode and effect analysis," *Incertitudes et fiabilité des systèmes multiphysiques*, vol. 7, no. 2, 2023, doi: 10.21494/ISTE.OP.2023.1045.
- [8] V. Sisodia, D. Ganesan, S. Salunkhe, R. Čep, and E. Abouel Nasr, "Failure mode identification and effects analysis of mobile X-ray machine using selected MADM techniques," *Scientific Reports*, vol. 15, 24534, 2025, doi: 10.1038/s41598-025-09518-6.
- [9] W. Song and J. Zheng, "A new approach to risk assessment in failure mode and effect analysis based on engineering textual data," *Quality Engineering*, vol. 36, no. 4, pp. 805–823, 2024, doi: 10.1080/08982112.2024.2304815.
- [10] N. Firdaus and H. Ab-Samat, "Maintenance strategies and energy efficiency: A review," *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, vol. 29, no. 3, pp. 640–665, 2023.
- [11] D. Sanchez-Londono, G. Barbieri, and L. Fumagalli, "Smart retrofitting in maintenance: A systematic literature review," *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 34, no. 1, pp. 1–19, 2023, doi: 10.1007/s10845-022-02002-2.
- [12] K. Antosz, M. Jasiulewicz-Kaczmarek, R. Waszkowski, and J. Machado, "Application of Lean Six Sigma for sustainable maintenance: Case study," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 55, pp. 181–186, 2022.
- [13] P. H. Tsarouhas and T. Varzakas, "An analytical approach of overall equipment effectiveness on a traditional Greek feta-cheese production line," *International Journal of Productivity and Quality Management*, vol. 36, no. 4, pp. 459–477, 2022, doi: 10.1504/IJPQM.2022.124903.

- [14] American Petroleum Institute, API Standard 610: Centrifugal Pumps for Petroleum, Petrochemical and Natural Gas Industries, 12th ed. Washington, DC, USA: API, 2021.
- [15] American Petroleum Institute, API Standard 682: Pumps—Shaft Sealing Systems for Centrifugal and Rotary Pumps, 4th ed. Washington, DC, USA: API, 2022.