

ANALISIS KINERJA DAN PEMELIHARAAN MESIN DENGAN METODE AVAILABILITY DAN FMEA PADA PT. XYZ

MACHINE PERFORMANCE AND MAINTENANCE ANALYSIS WITH AVAILABILITY AND FMEA METHODS AT PT. XYZ

Andhika Maulana¹, Moch. Nuruddin²

Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Gresik, Indonesia
6112^{1,2,3}

Andikabeang6@gmail.com

ABSTRACT

PT. XYZ is an industry engaged in the gas industry. This company uses many machines that are very influential for the smooth production. Therefore, preventive maintenance is very necessary for the machines used, so it is necessary to understand data-based maintenance management and risk and analysis for machine performance. PT. xyz has implemented a preventive maintenance program as part of an asset management strategy and increased operational efficiency. PT xyz also sets 98% for machine work downtime so that preventive maintenance must be appropriate so that machine performance is not disrupted. The machine that is being considered is the LAR TANKER FILL PUMP because this machine affects production. LAR TANKER FILL PUMP often experiences damage to the Mechanical seal. There are 2 methods that can be done in controlling inventory, namely AVAILABILITY and FAILURE MODE AND EFFECT ANALYSIS (FMEA).

Keywords: Availability, FMEA, LAR Tanker Fill Pump

ABSTRAK

PT. XYZ merupakan industri bergerak pada industri gas. PT ini menggunakan banyak mesin yang sangat berpengaruh untuk kelancaran produksi. Maka dari itu preventif maintenance sangat diperlukan untuk mesin mesin yang digunakan maka diperlukan pemahaman terhadap manajemen pemeliharaan berbasis data dan risiko dan analisis untuk kinerja mesin. PT. xyz telah menerapkan program pemeliharaan preventif sebagai bagian dari strategi pengelolaan aset dan peningkatan efisiensi operasional. PT xyz juga menetapkan 98% untuk downtime kerja mesin sehingga preventif harus tepat agar kinerja mesin tidak terganggu. Mesin yang diperhatikan adalah LAR TANKER FILL PUMP karena mesin ini berpengaruh pada produksi. LAR TANKER FILL PUMP sering mengalami kerusakan pada Mechanical seal. Ada 2 metode yang dapat dilakukan dalam mengendalikan persediaan yaitu AVAILABILITY dan FAILURE MODE AND EFFECT ANALYSIS (FMEA).

Kata Kunci : Availability, FMEA, LAR Tanker Fill Pump.

PENDAHULUAN

Pemeliharaan adalah aktivitas yang dilakukan untuk menjaga dan memperbaiki kondisi mesin dan peralatan agar tetap dalam kondisi optimal dan siap digunakan. Pemeliharaan memiliki peranan penting dalam menjamin kelancaran proses produksi, terutama pada industri berbasis teknologi seperti industri gas.(Assauri, 2004).

Sementara itu, tantangan utama yang kerap dihadapi oleh perusahaan adalah waktu untuk melakukan preventive maintenance (Puspitasari et al., 2021) dalam Jurnal Teknologi dan Sistem Industri menunjukkan bahwa penerapan preventive

maintenance yang teratur mampu menurunkan tingkat kerusakan mesin hingga 30% dan membantu menstabilkan proses produksi.

Preventive maintenance adalah jenis pemeliharaan yang dilakukan secara rutin sesuai jadwal tertentu agar mesin tidak mengalami kerusakan mendadak, preventive maintenance adalah tindakan perawatan yang dilakukan secara sistematis, berdasarkan waktu atau penggunaan tertentu, guna menghindari kegagalan alat atau sistem. Dalam praktiknya, Preventive maintenance mencakup kegiatan inspeksi, pelumasan,

penggantian komponen aus, dan pengujian berkala (Wahyudi., 2010).

Untung melancarkan proses preventif maintenance itu Availability. Dalam konteks sistem pemeliharaan, Availability atau ketersediaan adalah salah satu indikator penting yang digunakan untuk mengukur seberapa sering suatu mesin atau peralatan berada dalam kondisi siap digunakan. Semakin tinggi nilai Availability, maka semakin baik pula keandalan sistem dalam mendukung proses produksi

Availability adalah persentase waktu ketika suatu sistem atau peralatan berada dalam kondisi operasional selama periode tertentu, dibandingkan dengan total waktu yang tersedia. Indikator ini sangat krusial dalam perencanaan pemeliharaan karena menunjukkan sejauh mana efektivitas dari preventif maintenance yang diterapkan (Dhillon., 2002)

Pemeliharaan berbasis risiko menjadi kebutuhan mendesak. Pendekatan ini memprioritaskan peralatan berdasarkan tingkat risiko kegagalan dan dampaknya, memungkinkan alokasi sumber daya perawatan yang lebih optimal dan terfokus pada komponen yang paling kritis. Dengan demikian, perusahaan dapat mengurangi unplanned downtime dan mengoptimalkan biaya pemeliharaan dengan lebih efektif.

Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) dipilih sebagai metodologi yang paling sesuai untuk menganalisis LAR tanker fill pump karena kemampuannya yang sistematis dalam mengidentifikasi mode kegagalan potensial, penyebabnya, dan dampaknya.

Metode ini sangat cocok diterapkan pada unit seperti LAR tanker fill pump yang memiliki karakteristik kompleks, termasuk berbagai mode kegagalan (mekanis, termal, dan terkait tekanan), konsekuensi kegagalan yang tinggi, serta operasional pada kondisi kriogenik. FMEA memungkinkan identifikasi fungsi penting sistem, analisis mode kegagalan. Hasil FMEA akan menjadi dasar yang kuat untuk merancang strategi pemeliharaan yang

tepat dan proaktif, mencegah kerusakan sebelum terjadi, serta meningkatkan keandalan dan ketersediaan alat secara signifikan.

Menemukan bahwa kebocoran mechanical seal memiliki RPN tertinggi dalam lingkungan industri kimia, sehingga menjadi fokus utama dalam tindakan perbaikan. Dengan demikian, penerapan FMEA pada analisis kebocoran mechanical seal, LAR tanker fill pump tidak hanya tepat secara metodologis, tetapi juga didukung oleh temuan empiris di berbagai konteks industri. (Safitri et al., 2024)

Hal tersebut menjadi dasar penting dalam pelaksanaan penelitian lanjutan terkait analisis kinerja dan pemeliharaan mesin menggunakan metode Availability dan FMEA. Melalui penerapan dan perhitungan yang efektif.

Dengan demikian, diharapkan PT. XYZ berpotensi meningkatkan tingkat produktivitas, menekan biaya produksi, serta memastikan efisiensi operasional yang lebih optimal (Lestari Fitriana & Rustandi, 2023).

METODE

Penelitian ini dilaksanakan di sebuah Perusahaan, dengan fokus utama menganalisis kinerja mesin, khususnya mesin LAR tanker fill pump, mesin ini adalah mesin ini berpengaruh pada produksi perusahaan. Peneliti mengadopsi pendekatan penelitian kuantitatif. Metode penelitian ini mencakup beberapa proses perbandingan kondisi kerusakan pertahun dan melihat analisis tentang resiko dan keandalan. Pendekatan pengambilan data dilakukan melalui observasi langsung terhadap objek penelitian, guna memperoleh pemahaman yang akurat mengenai kondisi aktual tentang mesin yang diteliti. Guna menentukan hasil perhitungan yang dicari untuk mengetahui hasilnya, dua pendekatan dianalisis pada tahap pengelolaan data, yakni *Availability* dan *Failure Mode and effect analysis (FMEA)*, masing-masing dengan

menggunakan mekanisme dan tujuan yang berbeda dalam pengendalian persediaan. Berikut rumus perhitungan sesuai dengan Kebijakan Perusahaan:

a. Rumus perhitungan Availability

$$availability = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \times 100\% \dots 1$$

b. Rumus *Mean Time Between Failure* (MTBF)

$$MTBF = \frac{\text{Total jam operasional}}{\text{Total kerusakan}} \dots 2$$

c. Rumus *Mean Time To Repair* (MTTR)

$$MTTR = \frac{\text{Total waktu perbaikan}}{\text{Total kerusakan}} \dots 3$$

d. Rumus *mode and effect analysis* (FMEA)

$$RPN = S \times O \times D \dots 4$$

Metode Availability

Teknik *Availability*
Pendekatan ini untuk persentase waktu ketika suatu sistem atau peralatan berada dalam kondisi operasional selama periode tertentu, dibandingkan dengan total waktu yang tersedia. (Dhillon, 2024)

a. Metode *Availability*

Dimanfaatkan untuk mengidentifikasi perhitungan efektivitas mesin, dengan tujuan menganalisis kinerja mesin. Dalam konteks sistem pemeliharaan, *availability* atau ketersediaan adalah salah satu indikator penting yang digunakan untuk mengukur seberapa sering suatu mesin atau peralatan berada dalam kondisi siap digunakan. Perusahaan telah menetapkan 98% untuk kesiapan suatu mesin dalam kondisi siap. Dalam penerapan metode *Availability* adalah penetapan perhitungan yang tepat.

$$Availability = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \times 100\% \dots 5$$

Keterangan:

MTBF = Mean Time Between Failure (Jam)

MTTR = Mean Time Between Failure (%)

Metode FMEA (Failure Mode And Effect Analysis)

Metode Failure Mode And Effect Analysis (FMEA) merupakan metode yang banyak digunakan dalam manajemen pemeliharaan modern untuk mengidentifikasi, menganalisis, serta memprioritaskan potensi kegagalan pada suatu system. Metode ini bertujuan untuk mengevaluasi mode kegagalan (*failure mode*), penyebab terjadinya kegagalan (*failure cause*), dan dampak yang ditimbulkan (*failure effect*) terhadap performa system, sehingga dapat ditentukan Langkah pencegahan maupun perbaikan yang tepat (Dhillon, 2016).

FMEA menggunakan pendekatan terstruktur dengan menilai tiga parameter utama, yaitu tingkat keparahan (*severity*), frekuensi terjadinya (*occurrence*), dan kemampuan deteksi (*detection*). Ketiga parameter ini kemudian dikombinasikan menjadi *Risk Priority Number* (RPN) yang berfungsi sebagai dasar dalam menentukan prioritas tindakan pemeliharaan. (Stamatis., 2003). FMEA digunakan untuk menganalisis kegagalan berulang pada unit LOX *tanker fill pump*, khususnya pada komponen *mechanical seal*, agar strategi pemeliharaan yang efektif dapat dirancang. Manfaat yang diperoleh tidak hanya dari sisi teknis berupa identifikasi akar penyebab masalah dan fokus pada komponen prioritas, tetapi juga dari sisi operasional dengan berkurangnya frekuensi kerusakan tak terduga, serta dari sisi bisnis melalui penghematan biaya pemeliharaan, pengurangan kerugian akibat kebocoran produk kriogenik, dan peningkatan keselamatan kerja. (campbell & Reyes-Picknell, 2025). Analisis menggunakan pendekatan JIT dapat dihitung sesuai dengan prosedur yang dijabarkan berikut:

Langkah – Langkah Implementasi FMEA

Proses implementasi FMEA melibatkan serangkaian tahapan sistematis untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan

memitigasi potensi kegagalan (Hartono et al, 2021). Tahapan meliputi:

1. Identifikasi sistem dan fungsi: Menentukan objek yang dianalisis, misalnya unit LAR *tanker fill pump*, serta mendefinisikan fungsi utamanya dalam proses industri. Langkah ini penting untuk menetapkan batas analisis agar sesuai dengan sistem yang diamati.
2. Identifikasi failure mode: Menguraikan berbagai bentuk potensi kegagalan pada komponen. Contoh dalam penelitian ini adalah kebocoran pada *mechanical seal*, getaran berlebih, atau aus pada *bearing*.
3. Analisis *failure effect*: Menilai dampak dari kegagalan yang mungkin terjadi terhadap sistem dan proses. Misalnya, terhentinya distribusi oksigen cair, potensi kehilangan produk, serta meningkatnya risiko keselamatan kerja.
4. Identifikasi *failure cause*: Menentukan penyebab dari setiap mode kegagalan, seperti pelumasan yang tidak optimal, keausan material, kesalahan prosedur operasi, atau vibrasi berlebihan.
5. Penilaian risiko: Memberikan skor pada tiga parameter utama: *Severity* (S) → tingkat keparahan dampak kegagalan. *Occurrence* (O) → frekuensi terjadinya kegagalan. *Detection* (D) → kemampuan mendeteksi kegagalan sebelum terjadi. Nilai ini kemudian dikalikan untuk memperoleh *Risk Priority Number* (RPN), yang menjadi indikator prioritas perbaikan.
6. Menentukan prioritas perbaikan: Mode kegagalan diurutkan berdasarkan nilai RPN tertinggi agar tindakan perbaikan lebih terarah pada risiko yang paling kritis. (Moubray, 1997)
7. Kriteria penilaian S, O, D
Severity (S) mengukur tingkat keparahan dampak atau konsekuensi dari suatu mode kegagalan terhadap sistem, keselamatan, lingkungan, dan kepuasan pelanggan. Skala penilaian severity berkisar dari 1 hingga 10, di mana nilai yang lebih tinggi menunjukkan dampak yang lebih parah.

Tabel 1. Skala Penelitian Severity

Skor	Kriteria
1	Tidak berpengaruh / tidak berdampak pada kualitas produk
2-3	Pengaruh buruk ringan
4-6	Penurunan kualitas dalam batas toleransi
7-8	Penerunan kualita tinggi di luar batas wajar
9-10	Pengaruh buruj sangat tinggi, berdampak besar pada kualitas lain

Occurrence (O) mengukur frekuensi atau probabilitas terjadinya suatu penyebab kegagalan. Penilaian ini didasarkan pada data historis kegagalan, pengalaman operasional, dan penilaian ahli. Skala penilaian *Occurrence* berkisar dari 1 hingga 10, di mana nilai yang lebih tinggi menunjukkan frekuensi kejadian yang lebih tinggi.

Tabel 2. Skala penilaian Occurrence

Skor	Kriteria
1	Tidak mungkin menyebabkan kegagalan
2-3	Jarang terjadi
4-6	Mungkin terjadi
7-8	Sering terjadi
9-10	Pasti akan terjadi

Detection (D) mengukur kemampuan control atau sistem yang ada untuk mendeteksi penyebab atau mode kegagalan sebelum kegagalan tersebut mencapai pengguna atau menyebabkan dampak yang tidak diinginkan. Skala penilaian *Detection* berkisar dari 1 hingga 10, dimana nilai yang lebih tingi menunjukkan kemampuan deteksi yang lebih rendah.

Tabel 3. Skala penilaian Occurrence

Skor	Kriteria
------	----------

1	Sangat efektif, tidak mungkin muncul lagi
2-3	Kemungkinan sangat rendah
4-6	Terkadang masih mungkin terjadi
7-8	Penyebab masih tinggi, pengendalian kurang efektif
9-10	Sangat tinggi, tidak efektif, akan selalu terjadi

HASIL DAN PEMBAHASAN

Unit mesin yang menjadi preventive maintenancing yang berpengaruh terhadap distribusi, banyak mesin termasuk salah satunya LAR tanker fill pump tetapi masih ada kerusakan yang sering terjadi pada unit kerja tersebut unit kerja ini berpengaruh terhadap produksi. Terdapat 11 kerusakan termasuk hal yang bisa dikatakan sering mengalami kerusakan dan unit kerja ini adalah unit yang berpengaruh terhadap distribusi

Tabel 2. Pemesanan dan pemakaian biji kopi selama 1 tahun

Jenis Biaya	Jumlah/Tahun
16/03/2021	17/03/2021
10/09/2021	11/09/2021
16/12/2021	17/12/2021
09/02/2022	10/02/2022
15/03/2022	16/03/2022
23/06/2022	24/03/2022
12/08/2022	13/08/2022
30/09/2022	01/10/2022
05/10/2022	06/10/2022
09/11/2023	10/11/2023
09/01/2024	10/01/2024

Data Perhitungan Metode Availability

Perhitungan data yang diperoleh untuk unit Lar Tanker Fill Pump mengalami 11 kali kerusakan. Data operasional yang digunakan :

a. Data kerusakan tahun 2021

- Total jam operasional mesin pada tahun 2021 = 2190 jam
- Jumlah kerusakan = 3 kali

• Maka

$$MTBF = \frac{\text{Total jam operasional}}{\text{Total kerusakan}} = \frac{2190}{3} = 730 \text{ jam}$$

• Total kerusakan pada tahun 2021 = 3

• Waktu perbaikan kerusakan = 3 jam

• Total waktu perbaikan = 3 kerusakan x 3 jam = 9jam

$$MTTR = \frac{\text{Total waktu perbaikan}}{\text{Total kerusakan}} = \frac{9 \text{ jam}}{3 \text{ kerusakan}} = 3 \text{ jam}$$

Sehingga Availability dihitung :

$$\text{Availability} = \frac{730}{730 + 3} \times 100\% = \frac{730}{733} \times 100\% = 99,56\%$$

Tabel 3. Ringkasan perhitungan availability 2021

Parameter	Nilai	Satuan
Total jam operasional	2190	Jam
Jumlah kerusakan	3	Kali
MTBF	730	Jam (rata rata waktu antara kerusakan)
MTTR	3	Jam (rata rata waktu antara perbaikan)
Availability	99,59%	% (presentase waktu siap operasi)

b. Data kerusakan tahun 2022

Terdapat 6 kerusakan pada tahun 2022 dan setiap kerusakan memerlukan waktu 3 jam untuk perbaikan

Tabel 3. Ringkasan perhitungan availability 2022

S	Nilai	Satuan
Total jam operasional	2190	Jam
Jumlah kerusakan	6	Kali
MTBF	365	Jam (rata rata waktu antara kerusakan)
MTTR	6	Jam (rata rata waktu antara perbaikan)
Availability	98,39%	% (presentase waktu siap operasi)

c. Data kerusakan tahun 2023

Terdapat 1 kerusakan pada tahun 2023 dan setiap kerusakan memerlukan waktu 1 jam untuk perbaikan

Tabel 4. Ringkasan Perhitungan Availability 2023

Parameter	Nilai	Satuan
Total jam operasional	2190	Jam
Jumlah kerusakan	6	Kali
MTBF	365	Jam (rata rata waktu antara kerusakan)
MTTR	6	Jam (rata rata waktu antara perbaikan)
Availability	98,39%	% (presentase waktu siap operasi)

d. Data kerusakan tahun 2024

Terdapat 1 kerusakan pada tahun 2023 dan setiap kerusakan memerlukan waktu 1 jam untuk perbaikan

Tabel 5. Ringkasan perhitungan availability 2024

Parameter	Nilai	Satuan
Total jam operasional	2190	Jam
Jumlah kerusakan	6	Kali
MTBF	365	Jam (rata rata waktu antara kerusakan)
MTTR	6	Jam (rata rata waktu antara perbaikan)
Availability	98,39%	% (presentase waktu siap operasi)

Data perhitungan FMEA

1. Data komponen

Tabel 6. Data mode kegagalan komponen

No	Mode kegagalan
----	----------------

1	Kebocoran <i>seal</i> dan keausan ring <i>seal</i> , produk <i>liquid oxygen</i> akan keluar dari poros yang berputar
---	---

2. Data penyebab kegagalan komponen

Nama komponen	Penyebab kegagalan
<i>Mechanical seal</i>	1. Keausan 2. Tergerus 3. Tekanan berlebih pada sistem pompa 4. Getaran berlebih akibat kerusakan <i>bearing</i> 5. Kualitas <i>seal</i> kurang baik

3. Penilaian S, O, D FMEA

Penilaian Severity (S), Occurrence (O), dan Detection (D) dalam penelitian ini dilakukan melalui proses wawancara terstruktur dengan beberapa pihak yang terlibat langsung dalam operasional dan pemeliharaan unit LOX tanker fill pump, yaitu Production Engineering, Operator Filling, Maintenance Supervisor, dan Maintenance Technician.

a. Penentuan nilai S, O, D FMEA

Tabel 8. Data Penentuan Nilai S,O,D

Komponen	S	Keterangan
<i>Mechanical seal</i>	9	Nilai <i>severity</i> sebesar 9 karena dampaknya sangat serius terhadap sistem maupun keselamatan kerja. Kebocoran dan kegagalan pompa dapat menyebabkan kehilangan produk oksigen cair, gangguan distribusi ke pelanggan, risiko keselamatan tinggi karena suhu cairan yang sangat dingin

	dan oksigen dapat mempercepat reaksi oksidasi
O	Keterangan
8	<p>Nilai occurrence sebesar 8 menandakan bahwa kegagalan tersebut terjadi cukup sering dalam periode pengamatan. Berdasarkan data historis <i>maintenance</i> pompa pengisian oksigen cair mengalami kebocoran berulang yang menyebabkan waktu <i>downtime</i> signifikan dalam beberapa tahun terakhir, penggantian <i>seal</i> atau <i>fitting</i> yang tidak tahan lama, kondisi operasi yang ekstrem (suhu rendah, tekanan tinggi) yang mempercepat degradasi komponen. Meskipun sudah dilakukan <i>preventive maintenance</i> kegagalan ini masih sering berulang, sehingga nilainya tinggi.</p>
D	Keterangan
8	<p>Nilai <i>detection</i> sebesar 8 menunjukkan bahwa kemungkinan kegagalan terdeteksi sebelum terjadi sangat rendah. Dalam sistem pompa ini deteksi kebocoran umumnya</p>

hanya bisa dilakukan setelah kebocoran tampak secara visual, sistem monitoring belum sepenuhnya terintegrasi secara *predictive* untuk mendeteksi perubahan tekanan atau temperature yang menandakan kebocoran dini, inspeksi rutin dilakukan manual sehingga ada jeda waktu antara awal kerusakan dan penanganannya. Karena itu, kemampuan sistem untuk mendeteksi potensi kegagalan sebelum terjadi masih terbatas, sehingga nilai 8 dianggap tepat.

b. Perhitungan nilai RPN

Tabel 9. Perkalian Nilai S,O,D

No	Komponen	S	O	D	RPN
1	<i>Mechanical seal</i>	9	8	8	12 kali

Severity (S) = 9, menandakan dampak kegagalan sangat tinggi terhadap sistem, keselamatan, dan lingkungan.

Occurrence (O) = 8, menunjukkan frekuensi kejadian kebocoran cukup sering.

Detection (D) = 8, berarti kemampuan sistem mendeteksi kegagalan masih kurang efektif.

Nilai RPN dihitung dengan mengalikan ketiga parameter tersebut:
 $RPN = Severity \times Occurrence \times Detection$
 $= 9 \times 8 \times 8 = 576$

Nilai RPN 576 ini menunjukkan risiko yang sangat tinggi sehingga kebocoran *mechanical seal* menjadi prioritas utama

untuk tindakan pemeliharaan dan mitigasi risiko.

SIMPULAN

Mengacu pada hasil analisis, bisa diambil Kesimpulan dari perhitungan availability terjadi flutuasi kinerja mesin setiap tahunnya tahun 2022 menjadi tahun dengan availability terendah (98,38%) karena jumlah kerusakan tertinggi (6 kali). Namun, terjadi perbaikan signifikan di tahun 2023 dan 2024, di mana hanya terjadi 1 kali kerusakan, sehingga availability mencapai angka tertinggi. Penilaian risiko menggunakan metode *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) menunjukkan bahwa mode kegagalan kebocoran *mechanical seal* memiliki nilai *Risk Priority Number* (RPN) sangat tinggi (576), sehingga menjadi prioritas utama dalam pengambilan keputusan dan strategi pemeliharaan berbasis risiko.

DAFTAR PUSTAKA

- Dhillon, B. S. (2002). *Engineering Maintenance: A Modern Approach*. CRC Press.
- Fitriani, D., & Nugroho, A. (2021). Pengaruh Availability terhadap Efisiensi Produksi di Industri Otomotif. *Jurnal Teknik Mesin Terapan*, 9(2), 45–53.
- Kardas, C., & Ismail, A. (2016). Performance Measurement of Preventive Maintenance using OEE. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 6(3), 22–28.
- Puspitasari, N., Wahyuni, S., & Firmansyah, R. (2021). Analisis Efektivitas Preventive Maintenance Terhadap Performa Mesin Produksi. *Jurnal Teknologi dan Sistem Industri*, 9(2), 67–75.
- Putri, R., & Santoso, B. (2022). Evaluasi Sistem Maintenance pada Industri Kimia. *Jurnal Teknik Industri*, 21(1), 45–53.
- Rahman, M. (2020). Analisis Efektivitas Preventive Maintenance pada Industri Manufaktur. *Jurnal Optimasi Sistem Industri*, 18(2), 100–110.
- Sitorus, A., Wijaya, D., & Fadillah, H. (2023). Penerapan Preventive Maintenance dalam Meningkatkan Efisiensi Operasional. *Jurnal Riset Teknik Mesin*, 11(1), 33–40.
- Wijaya, H., Prabowo, T., & Lestari, F. (2022). Analisis Kinerja Sistem Maintenance Menggunakan Availability dan MTBF. *Jurnal Teknologi dan Rekayasa Sistem*, 10(1), 12–20.
- Alsyouf, I. (2007). *The role of maintenance in improving companies' productivity and profitability*. *International Journal of Production Economics*, 105(1), 70–78.
- Bloch, H. P., & Budris, A. R. (2010). *Pump user's handbook: Life extension (3rd ed.)*. Fairmont Press.
- Campbell, J. D., & Reyes-Picknell, J. V. (2015). *Uptime: Strategies for excellence in maintenance management (3rd ed.)*. Productivity Press.
- Dhillon, B. S. (2016). *Engineering maintenance: A modern approach*. CRC Press.
- Emzain, Z. F., Wardhana, Z. G., & Adiwidodo, S. (2024). Implementation of failure mode and effect analysis (FMEA) for centrifugal pump maintenance in water supply distribution system. *Polimesin*, 22(3), 22–30.
- Fadli, F., & Kuni, N. (2025). Perawatan preventive metode FMEA pompa sentrifugal KSB 40-200 pada PT Z. *Applied Mechanical Engineering Journal*, 7(1), 12–20.
- Gupta, G., Kumar, S., & Singh, R. (2021). A novel failure mode effect and criticality analysis (FMECA) using fuzzy rule-based method: Case study of an industrial centrifugal pump. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 27(4), 587–603.
- Kelly, A. (2006). *Maintenance strategy: Business- centred maintenance*.

- Butterworth-Heinemann.* Moubray, J. (1997). *Reliability-centered maintenance. Industrial Press.*
- Perry, R. H., & Green, D. W. (2008). *Perry's chemical engineers' handbook (8th ed.). McGraw-Hill.*