JURNAL OPTIMALISASI
Teknik Industri
Journal homepage : http://jurnal.utu.ac.id/joptimalisasi
E - ISSN - 2502 - 0501
P - ISSN - 2477 - 5479

Identifikasi Penyebab Kerusakan Mesin Pompa pada Sistem Distribusi Air PDAM Menggunakan FMEA dan LTA

Heri Tri Irawan[1*], Iing Pamungkas[2], Abdiel Khaleil Akmal[3], T.M. Azis Pandria[4], Sofiyanurriyanti[5] Hasnita[6], Azhar[7]

[12345]*Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Teuku Umar*
Jl. Alue Peunyareng, Aceh Barat, 23615, Indonesia
[6]*Akademi Komunitas Negeri Aceh Barat*
Komplek STTU Alue Peunyareng, Aceh Barat, 23681, Indonesia
[7]*Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Teuku Umar*
Jl. Alue Peunyareng, Aceh Barat, 23615, Indonesia

*Corresponding author: heritriirawan@utu.ac.id

ARTICLE INFO

Received: 28-09-2024
Revision: 30-10-2024
Accepted: 31-10-2024

Keywords:
Water Distribution
Pumping Machine
Damage
FMEA
LTA

ABSTRACT

The existence of a Regional Drinking Water Company (PDAM) is very important in maintaining the continuity of the clean water treatment process running smoothly and well. Maintenance of clean water distribution machines and equipment is a matter that requires attention because damage to one of the machines or equipment can cause a cessation of processing activities which results in losses for companies and services. Damage to the water distribution machine in PDAM Tirta Mountala is unavoidable and this happens frequently. This happens because the damage is not properly identified, either in preventive maintenance or in anticipating appropriate action. The purpose of this study is to identify the cause of the damage and propose maintenance actions on the clean water distribution pump machine in PDAM Tirta Montala Aceh Besar. The failure mode and effect analysis (FMEA) and logic tree analysis (LTA) approaches are used to anticipate this. FMEA is an approach used to identify and analyze potential failures and their consequences. Meanwhile, LTA aims to prioritize each damage mode and carry out reviews and functions, malfunctions so that the damage mode status is not the same. There are eighteen water distribution pump components with the highest damage frequency. Based on the results of the FMEA, five components with the highest RPN or the highest risk were obtained, namely the vane, stuffing box, bearing bracket support, shaft and bearing components. The five components were then analyzed through LTA and maintenance tasks with several proposed actions including repair, component replacement, welding, thermography, and re-measurement with a vibration meter.

1. PENDAHULUAN

Air bersih merupakan kebutuhan mendasar yang dibutuhkan oleh masyarakat, dan penggunaannya dalam berbagai hal seperti untuk keperluan mandi, cuci, memasak dan kebutuan esensial lainnya menjadikan air tidak dapat dipisahkan dari kehidupan masyarakat. Keberadaan perusahaan daerah air minum (PDAM) menjadi krusial dalam menjaga keberlangsungan proses pengolahan air bersih tetap berjalan dengan lancar dan baik [1]. Perawatan mesin distribusi air bersih dan peralatannya sangat penting karena kerusakan salah satu mesin atau peralatan dapat menyebabkan penundaan kegiatan pengolahan, yang dapat merugikan bisnis dan layanan. Mesin dan peralatannya harus memiliki ketersediaan (*availability)* tinggi agar proses produksi dan pengolahan air berjalan lancar [2], dimana standar

availability perusahaan multinasional harus bernilai diatas 90% [3]. Agar perawatan dapat berjalan lancar, kebijakan perawatan dan ketersediaan komponen mesin sangat penting [4]. Perbandingan waktu yang dibutuhkan alat untuk digunakan sesuai dengan fungsinya terhadap total waktu yang tersedia untuk beroperasi dikenal sebagai *availability* [5-6].

Ketidaktersediaan peralatan dapat menyebabkan waktu perbaikan yang panjang (*overhaul*), perawatan pencegahan (*preventive*), dan perawatan koreksi (*corrective*) [7]. *Downtime* adalah jumlah waktu di mana alat atau fasilitas tidak dapat digunakan atau dioperasikan. *Downtime* yang lebih kecil berarti lebih banyak *availability. Availability* yang tinggi tergantung pada faktor-faktor seperti keandalan komponen atau peralatan, cara penggunaannya, dan perawatannya [8]. PDAM Tirta Montala adalah salah satu perusahaan daerah milik Kabupaten Aceh Besar yang bergerak dalam produksi dan distribusi air bersih. Kerusakan mesin distribusi air pada PDAM Tirta Montala tidak dapat dihindari dan hal tersebut sering terjadi. Hal tersebut terjadi kerena kerusakan tidak teridentifikasi dengan baik, baik secara perawatan pencegahan maupun antisipasi dengan tindakan yang tepat [9-10].

Pendekatan *failure mode and effect analysis* (FMEA) dan *logic tree analysis* (LTA) dapat digunakan untuk mengantisipasi hal tersebut. FMEA adalah metode yang digunakan untuk mengidentifikasi dan mengevaluasi kemungkinan kegagalan dan konsekuensi untuk membantu merencanakan proses yang ada secara efektif dan mencegah kerugian dan kegagalan proses yang tidak diinginkan [11-12]. Sedangkan tujuan LTA adalah untuk memprioritaskan setiap mode kerusakan dan melakukan tinjauan dan fungsi; kegagalan fungsi menyebabkan status mode kerusakan berbeda. Dengan menjawab pertanyaan-pertanyaan yang telah disediakan, LTA dapat mengetahui mode kerusakan mana yang paling penting. [13-14]. FMEA dan LTA telah banyak diaplikasikan untuk mengidentifikasikan berbagai kerusakan yaitu kerusakan pada mesin *aphalt mixing plant* [15], transmisi otomatis [15], mesin packer semen [17], jembatan timbang [18], mesin *overhead crane* [19], dan mesin *blowing* [20].

Tujuan penelitian ini yaitu mengidentifikasi penyebab kerusakan dan mengusulkan tindakan perawatan pada mesin pompa distribusi air bersih di PDAM Tirta Montala, Aceh Besar.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian dilakukan di PDAM Tirta Montala Kabupaten Aceh Besar. Objek penelitian yaitu pada mesin pompa yang beroperasi untuk mendistribusikan air keseluruhan pelanggan di Kabupaten Aceh Besar. Data primer dan sekunder dikumpulkan untuk mengidentifikasi penyebab kerusakan pada mesin pompa distribusi dan membuat saran untuk mengurangi kerusakan. Data primer diperoleh melalui observasi, wawancara, dan dokumentasi secara langsung. Data sekunder diperoleh untuk mendukung data primer yang telah dikumpulkan mengenai perawatan mesin pompa. Data sekunder diperoleh dari data historis perusahaan dan artikel penelitian yang relevan. Data yang dibutuhkan meliputi data historis tentang kerusakan mesin pompa yang menjadi subjek penelitian serta data historis tentang pendukung mesin yang terkait.

Metode yang digunakan dalam mengidentifikasi penyebab kerusakan mesin pompa distribusi air yaitu *failure mode and effect analysis* (FMEA) dan *logic tree analysis* (LTA). Sebelum dilakukan penyusunan FMEA dan LTA, terlebih dahulu dapat dilihat skema atau SOP pergantian komponen pada PDAM Tirta Montala pada Gambar 1. Adapun yang dilakukan dalam penelitian ini untuk tahapan pengolahan yaitu sebagai berikut.

a. Menyusun mode dari FMEA dan nilai RPN
   Tahap FMEA yaitu mengevaluasi faktor-faktor yang menyebabkan kegagalan fungsi pada bagian mesin yang diteliti. Kegagalan fungsi ini akan ditampilkan dalam bentuk matriks. [11]. FMEA dianalisis dengan menentukan fungsi dari item, mode kegagalan, dampak kegagalan dan tindakan pencegahan [12]. Kemudian penilaian digunakan menggunakan tiga faktor risiko, yaitu kejadian (O), pendeteksian (D), dan tingkat keparahan (S), dan setiap faktor risiko akan diindikasikan dalam bentuk *Risk Priority Number* (RPN). Tiga parameter masukan diberikan skala 1 sampai dengan 10 poin.
b. Menyusun dan menganalisa melalui LTA
   Penyusunan LTA merupakan tahapan yang dilakukan secara kualitatif. Tujuan tahap ini adalah untuk memprioritaskan setiap mode kerusakan dan meninjau fungsi, sehingga status mode kerusakan tidak sama dengan kegagalan fungsi. [13]. Setelah LTA disusun, daftar tindakan yang dapat dilakukan untuk tiap mode kerusakan akan dibuat untuk memungkinkan pemilihan tindakan yang efektif (*maintenance task*) [14].



Gambar 1. SOP penggantian komponen pada PDAM Tirta Montala

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Metode FMEA dan LTA digunakan dalam penelitian ini untuk mengidentifikasi penyebab kerusakan mesin pompa distribusi air bersih pada PDAM Tirta Montala Aceh Besar. Kerusakan yang diidentifikasi merupakan merupakan kerusakan bulan Januari hingga juni 2023. Penjelasan fungsi beberapa komponen yang diidentifikasi sering mengalami kerusakan di waktu tersebut antara lain sebagai berikut.

a. *Stufing box* berguna untuk mencegah kebocoran pada daerah ketika poros pompa menembus *casing.*
b. *Packing* biasanya terbuat dari asbes atau teflon dan berfungsi untuk mencegah cairan dari *casing* pompa keluar melalui poros.
c. *Shaft* berfungsi untuk meneruskan momen puntir dari penggerak selama operasi dan menempatkan *impeller* dan komponen berputar lainnya di tempatnya.
d. Pada pompa *multi stage*, *shaft sleeve* dapat berfungsi sebagai *leakage joint, internal bearing, interstage sleever, atau distance sleever*, selain itu untuk melindungi poros dari korosi, erosi, dan keausan pada *stuffing box*.
e. *Vane* yang merupakan sudut dari *impeller* berfungsi sebagai tempat lalulintas cairan pada *impeller.*
f. *Casing* berfungsi sebagai pelindung elemen yang berputar, tempat diffusor (*guide vane*) berada, tempat *inlet* dan *outlet nozzel*, dan tempat memberikan arah aliran *impeller*. Ini juga berfungsi sebagai tempat mengubah energi kecepatan cairan menjadi energi dinamis *(single stage).*
g. *Eye of impeller* merupakan bagian sisi masuk yang terletak pada arah isap *impeller*.
h. *Impeller* berfungsi merubah energi mekanis dari pompa menjadi energi kecepatan pada cairan yang dipompakan secara kontinu. Akibatnya, cairan pada sisi isap terus menerus masuk, mengisi ruang yang terisi oleh perpindahan cairan yang masuk sebelumnya.
i. *Casing wear ring* mengurangi celah antara *impeller* dan *casing* untuk meminimalkan kebocoran cairan yang melewati bagian depan dan belakang *impeller*.
j. *Discharge nozzle* berfungsi sebagai saluran keluar air dalam pompa.
k. *Suction flange/nozzle* berfungsi sebagai saluran untuk menghisap air ke dalam pompa.
l. *Pump feet* (*support*) berfungsi sebagai kedudukan pompa
m. *Bearing bracket* berfungsi menahan dan menumpu beban *bearing* supaya poros dapat terus berputar, baik dalam menahan beban *radial* ataupun *axial*.
n. *Vent plug* sebagai saluran untuk memasukkan pelumas dan saluran untuk mengeluarkan uap panas pada pelumas.
o. *Bearing cover* berfungsi sebagai rumah dan penutup *bearing.*
p. *Bearing bracket support* sebagai pendukung *bearing cover* dan *bearing bracket.*
q. *Mechanical seal/gland packing* berfungsi untuk memproteksi air agar tidak keluar atau bocor dari volut, sehingga mengurangi daya hisap pompa
r. *Bearing* memungkinkan poros berputar dengan lancar dan tetap pada tempatnya, mengurangi kerugian gesek, dan menumpu dan menahan beban proses.

Selanjuntya di identifikasi menggunakan metode FMEA yang didasarkan pada penemuan, pengaturan dan pengurangan kegagalan atau kesalahan, dan telah digunakan di berbagai jenis industri [15]. FMEA dapat digunakan untuk berbagai sistem produksi yang berbasis mesin yang terdisi dari sistem komponen mekanik dan elektrik yang kompleks. FMEA menggunakan tiga faktor risiko untuk mengidentifikasi mode kegagalan, yaitu kejadian (O), pendeteksian (D), dan tingkat keparahan (S). Setiap faktor risiko akan diindikasikan dalam bentuk *Risk Priority Number* (RPN). Tiga parameter input diberi peringkat pada skala 10 poin. Terdapat delapan belas komponen pompa yang sering mengalami gangguan atau kerusakan akan dinilai dengan menggunakan RPN. Mode kegagalan, penyebab kegagalan, dan efek kegagalan komponen pompa akan diidentifikasi terlebih dahulu. Tabel 1 menunjukkan mode kegagalan, dampak

kegagalan dan tindakan pencegahan, Tabel 2 menunjukkan RPN komponen pompa yang mengalami kerusakan, dan Gambar 2 menunjukkan level dari RPN tertinggi hingga terendah.

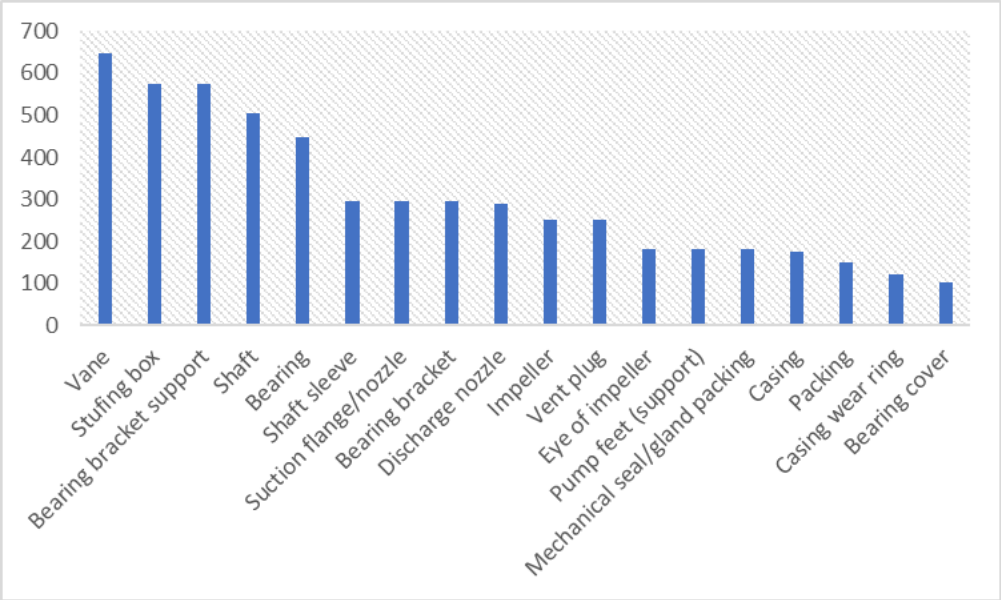
Tabel 1. Mode kegagalan, dampak kegagalan dan tindakan pencegahan komponen mesin pompa yang mengalami kerusakan

No.	Komponen	Mode Kegagalan	Dampak Kegagalan	Tindakan pencegahan
1	*Stuffing box*	Retak, korosi dan pecah	Pompa tidak/gagal bekerja, pompa *downtime*	Pengelasan, pengecatan, perbaikan, penggantian
2	*Packing*	Bocor	Kerja pompa tidak maksimal, lingkungan menjadi basah, menyebabkan korosi	Penggatian, diberi perekat
3	*Shaft*	Patah dan retak	Pompa tidak/gagal bekerja, berakibat komponen lain gagal, pompa *downtime*	Penggantian
4	*Shaft sleeve*	Aus dan korosi	Berakibat *main shaft* pompa cepat dan mudah korosi	Penggantian
5	*Vane*	Korosi, aus, dan pecah	Air tidak dapat didistribusikan karena pompa tidak berfungsi, pompa *downtime*	Penggantian
6	*Casing*	Retak dan pecah	Tekanan dan kapasitas pompa berkurang atau menurun	Penggantian
7	*Eye of impeller*	Cacat atau pecah	Air mengalami penurunan aliran, suara gesekan/geseran	Penggantian
8	*Impeller*	Aus, pecah, dan cacat	Vibrasi, bunyi gesekan/geseran, tekanan dan kapasiras aliran air menurun	Penggantian
9	*Casing wear ring*	Aus	Poros dan *impeller* cepat mengalami korosi dan aus	Penggantian
10	*Discharge nozzle*	Retak dan pecah	*Losses* pada aliran air	Penggantian, pengelasan
11	*Suction flange/nozzle*	Retak dan pecah	Daya hisap pompa turun, kavitasi	Penggantian, pengelasan
12	*Pump feet (support)*	Retak serta patah	Vibrasi, pompa *misalignment*	Penggantian, pengelasan
13	*Bearing bracket*	Retak, aus dan pecah	Vibrasi, gangguan, aus, panas	Penggantian
14	*Vent plug*	Patah	Keluarnya oli dari tempatnya	Penggantian
15	*Bearing cover*	Retak	Aus pada *bearing*	Penggantian
16	*Bearing bracket support*	Retak dan pecah	Pompa berhenti beroperasi, vibrasi, *misaligement*, panas	Penggantian
17	*Mechanical seal /gland packing*	Bocor	Turunnya tekanan air dan kapasitas aliran	Penggantian, perbaikan, modifikasi
18	*Bearing*	Aus, cacat, *ball bearing* terlepas dari pengikatnya, dan terjadinya kikisan dan geseran	Vibrasi, *heat*, pompa menurun secara putaran dan daya, gangguan	Penggantian

Tabel 2. *Risk priority number* (RPN) komponen mesin pompa

No	Komponen	*Severity*	*Occurrence*	*Detection*	RPN
1	*Stufing box*	8	9	8	576
2	*Packing*	6	5	5	150
3	*Shaft*	7	9	8	504
4	*Shaft sleeve*	6	7	7	294
5	*Vane*	8	9	9	648
6	*Casing*	5	7	5	175
7	*Eye of impeller*	6	6	5	180
8	*Impeller*	6	7	6	252

9	*Casing wear ring*	5	4	6	120
10	*Discharge nozzle*	8	6	6	288
11	*Suction flange/nozzle*	7	7	6	294
12	*Pump feet (support)*	6	5	6	180
13	*Bearing bracket*	7	7	6	294
14	*Vent plug*	6	7	6	252
15	*Bearing cover*	5	5	4	100
16	*Bearing bracket support*	8	9	8	576
17	*Mechanical seal/gland packing*	5	6	6	180
18	*Bearing*	8	8	7	448



Gambar 2. Level RPN komponen pompa

Setelah dilakukan evaluasi RPN, nilai tertinggi terlihat jelas pada Gambar 2. Delapan belas komponen tersebut menjadi perhatian utama mengingat tingginya dampak yang dapat terjadi pada sistem distribusi air bersih, terutama pada pompa jika komponen tersebut mengalami kegagalan. Langkah selanjutnya adalah menganalisis luaran FMEA, dimana mode kegagalan bergantung pada tingkat keparahan, kejadian, dan deteksi. RPN dikategorikan menjadi tiga tingkat risiko, yaitu risiko rendah, risiko sedang dan risiko tinggi. Gambar 2 menunjukkan RPN tertinggi hingga terendah di setiap komponen pompa, di mana luaran FMEA akan dilakukan analisis lebih lanjut pada beberapa komponen pompa yang memiliki risiko tinggi atau tingkat kekritisan tinggi, seperti *vane* (648), *stufing box* (576), *bearing bracket support* (576), *shaft* (504) dan *bearing* (448). Masalah ini harus diperhatikan untuk mengurangi risiko pada sistem distribusi air.

Kemudian kelima komponen dengan RPN tertinggi akan ditangani tindakan perawatannya dengan LTA. Setiap komponen akan diberikan pertanyaan yang telah disediakan berdasarkan LTA, dan selanjutnya dilakukan penyeleksian *maintenance task* (tugas perawatan) berdasarkan karakteristik kegagalan, pengaruh dan risiko yang ditimbulkan akibat kegagalan yang terjadi. Adapun tindakan perawatan berdasarkan LTA dan penyeleksian *maintenance task* ditunjukkan pada Tabel 3 dan 4.

Tabel 3. Tindakan perawatan berdasarkan *logic tree analysis* (LTA)

Komponen yang dirawat	**Apakah pengawasan dapat mengidentifikasi mode kegagalan?**	**Apakah biasanya ada cukup waktu untuk memperingatkan agar dapat mengambil tindakan?**	**Apakah ada metode pengawasan tambahan yang tersedia?**	**Apakah dapat dengan yakin memprediksi kegagalan?**	**Apakah kinerja seperti awal dapat dimiliki dengan pembaruan atau perbaikan?**	**Apakah penggantian item dapat mengembalikan fungsi sama seperti awal?**	**Apakah mode kegagalan tersembunyi?**	**Apakah ada pekerjaan menemukan kegagalan atau pengujian kinerja yang dapat mengungkapkan masalah?**	**Apakah kegagalan menimbulkan risiko keselamatan atau lingkungan, pelanggaran, atau kecelakaan?**	**Apakah mendesain ulang dapat meng-untungkan?**
Stuffing box	Ya	Ya	Ya	Tidak	Ya	Ya	Ya	Ya	Tidak	Ya
Shaft	Tidak	Ya	Ya	Tidak	Ya	Ya	Ya	Ya	Tidak	Ya
Vane	Tidak	Ya	Ya	Tidak	Ya	Ya	Tidak	Ya	Tidak	Ya
Bearing bracket support	Tidak	Ya	Tidak	Tidak	Ya	Ya	Ya	Ya	Tidak	Ya
Bearing	Ya	Ya	Tidak	Tidak	Ya	Ya	Ya	Ya	Tidak	Ya

Tabel 4. Penyeleksian *maintenance task*

Mode kegagalan	Karakteristik kegagalan	H/E (1) Tersembunyi/ Jelas	Pengaruh (2)			Karakteristik Resiko (3)			Tugas Pilihan (4)			
			Lokal	Kegagalan fungsional	Akhir	Kerumitan	Kemungkinan yang terjadi	Resiko yang terjadi	Tindakan yang diusulkan	Kemungkinan yang diperkirakan	Resiko yang diper-kirakan	Penem-patan
Komponen: *stuffing box*												
Retak, korosi, pecah	Panas, putaran motor berat, bunyi geseran dan bergetar ekstrim	H dan E	-	Pompa tidak dapat berfungsi	Pecah	-	Terkadang	High	Penggantian *stuffing box,* penggantian dan pengelasan *bearing, dan vibrationmeter*	Jauh dari yang di rencanakan	Medium	-
Komponen: *shaft*												
Aus, bengkok, patah	Putaran pompa berat, bunyi geseran dan bergetar ekstrim.	H dan E	-	Kinerja pompa menurun	Pompa berhenti beroperasi	-	Terkadang	High	Perbaikan, *housing*, penggantian *bearing, impeller* dan *seal, dan vibrationmeter*	Jauh dari yang di rencanakan	Medium	-
Komponen: *vane*												
Aus, pecah, retak	Bergetar, bunyi geseran dan penurunan tekanan	H dan E	-	Pompa tidak dapat berfungsi	Pompa berhenti beroperasi	-	Terkadang	High	Penggantian *impeller dan vibrationmeter*	Perlu di rencanakan	Medium	-
Komponen: *Bearing bracket support*												
Patah	Bergetar	H dan E	Bunyi suara berisik	Kegagalan poros pada pompa, *seal* bocor	Pompa berhenti beroperasi	-	Terkadang	Medium	Perbaikan, pengelasan dan penggantian	Jauh dari yang di rencanakan	Medium	-
Komponen: *Bearing*												
Aus, korosi, rusak	Bergetar	H dan E	Bunyi suara berisik dan geseran	Kinerja pompa menurun	Pompa berhenti beroperasi	-	Terkadang	High	Penggantian, melakukan *thermography* dan *vibrationmeter*	Jauh dari yang di rencanakan	High	-

Berdasarkan hasil LTA dan *maintenance task* terhadap komponen/peralatan pompa yang memiliki RPN tertinggi atau yang memiliki risiko tertinggi, diusulkan tindakan perawatan diantaranya.

a. Komponen *stufing box* dengan karakteristik kegagalan panas, putaran motor berat, bunyi geser dan bergetar ekstrim, diusulkan tindakannya berupa penggantian *stufing box,* penggantian dan pengelasan *bearing,* dan *vibration meter*.
b. Komponen *shaft* dengan karakteristik kegagalan putaran pompa berat, bunyi geser dan bergetar ekstrim, diusulkan tindakannya berupa perbaikan, *housing*, penggantian *bearing*, *impeller*, penggantian *seal,* dan *vibration meter.*
c. Komponen *vane* dengan karakteristik kegagalan bergetar, bunyi geseran dan penurunan tekanan, diusulkan tindakannya berupa penggantian *impeller* dan *vibration meter.*
d. Komponen *bearing bracket support* dengan karakteristik kegagalan bergetar, diusulkan tindakannya berupa perbaikan, pengelasan dan penggantian.
e. Komponen *bearing* dengan karakteristik kegagalan bergetar, diusulkan tindakannya berupa penggantian, *thermography,* dan *vibration meter.*

4. KESIMPULAN

Perawatan mesin distribusi air bersih dan peralatannya pada PDAM Tirta Montala Aceh Besar merupakan hal yang perlu diperhatikan karena kerusakan pada satu mesin atau peralatan dapat menghentikan proses pengolahan, menyebabkan kerugian pada bisnis dan layanan. Kerusakan mesin distribusi air tidak dapat dihindari dan hal tersebut sering terjadi. Hal tersebut terjadi kerena kerusakan tidak teridentifikasi dengan baik, baik secara perawatan pencegahan maupun antisipasi dengan tindakan yang tepat. Pendekatan *failure mode and effect analysis* (FMEA) dan *logic tree analysis* (LTA) dapat digunakan untuk mengantisipasi hal tersebut. Berdasarkan hasil observasi dan data sekunder, terdapat delapan belas komponen pompa distribusi air dengan frekuensi kerusakan tertinggi. Hasil FMEA, diperoleh lima komponen dengan RPN tertinggi atau dengan risiko tertinggi, yaitu komponen *vane, stufing box, bearing bracket support, shaft* dan *bearing.* Kelima komponen tersebut kemudian di analisis melalui LTA dan *maintenance task*. Beberapa karakteristik kegagalan ditemukan diantaranya panas, putaran motor berat, bunyi geser, bergetar ekstrim, putaran pompa berat, dan penurunan tekanan. Adapun beberapa usulan tindakan diantaranya berupa perbaikan, penggantian komponen, pengelasan, *thermography*, dan pengukuran ulang dengan *vibration meter*.

REFERENCES

[1] Irawan, H. T., Pamungkas, I., & Arhami, A. Analisis Lean Services untuk Mengurangi Waste pada Perusahaan Daerah Air Minum (PDAM) Tirta Montala Aceh Besar. *Jurnal Optimalisasi*. 2020; 4(2): 70-77.

[2] Gopalakrishnan, M., Skoogh, A., Salonen, A., & Asp, M. Machine criticality assessment for productivity improvement: Smart maintenance decision support. *International Journal of Productivity and Performance Management*. 2019; 68(5): 858-878.

[3] Liu, C., Zhu, H., Tang, D., Nie, Q., Zhou, T., Wang, L., & Song, Y. Probing an intelligent predictive maintenance approach with deep learning and augmented reality for machine tools in IoT-enabled manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2022; 77: 102357.

[4] Pamungkas, I., Irawan, H. T., & Hasnita, H. (2023). Penggunaan Teknik Evaluasi Keandalan Mesin Pada Berbagai Industri di Indonesia: Literature Review. *VOCATECH: Vocational Education and Technology Journal*, *5*(1), 22-32.

[5] Ghaleb, M., Taghipour, S., Sharifi, M., & Zolfagharinia, H. Integrated production and maintenance scheduling for a single degrading machine with deterioration-based failures. *Computers & Industrial Engineering*. 2020; 143: 106432.

[6] Pamungkas, I., Irawan, H. T., Sofiyanurriyanti, S., Putra, G., Kasmawati, K., & Muzakir, M. (2023, February). Simulation of reliability and availability of boiler critical components using Monte Carlo approach. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2482, No. 1). AIP Publishing.

[7] Velmurugan, K., Saravanasankar, S., & Bathrinath, S. Smart maintenance management approach: Critical review of present practices and future trends in SMEs 4.0. *Materials Today: Proceedings*. 2022; 62: 2988-2995.

[8] Zhang, L., Deng, Q., Zhao, Y., Fan, Q., Liu, X., & Gong, G. Joint optimization of demand-side operational utility and manufacture-side energy consumption in a distributed parallel machine environment. *Computers & Industrial Engineering*. 2022; 164: 107863.

[9] Pamungkas, I., Irawan, H. T., & Pandria, T. A. (2021). Implementasi Preventive Maintenance untuk Meningkatkan Keandalan pada Komponen Kritis Boiler di Pembangkit Listrik Tenaga Uap. *VOCATECH: Vocational Education and Technology Journal*, *2*(2), 73-79.

[10] Pamungkas, I., & Irawan, H. T. (2020). Strategi Pengurangan Risiko Kerusakan Pada Komponen Kritis Boiler di Industri Pembangkit Listrik. *Jurnal Optimalisasi*, *6*(1), 86-95.

[11] Wu, Z., Liu, W., & Nie, W. Literature review and prospect of the development and application of FMEA in manufacturing industry. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021;112: 1409-1436.

[12] Akmal, A. K., Pamungkas, I., & Irawan, H. T. (2024). Identification of Damage in Press Stations Using the Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) Method at PT. Beurata Subur Persada. *Jurnal Inotera*, *9*(1), 204-211.

[13] Waghen, K., & Ouali, M. S. Interpretable logic tree analysis: A data-driven fault tree methodology for causality analysis. *Expert Systems with Applications*. 2019; 136: 376-391.

[14] Muzakir, M., Ayob, A. F., Irawan, H. T., Pamungkas, I., Pandria, T. M. A., Fitriadi, F., ... & Syarifuddin, S. (2023, March). Defect analysis to improve quality of traditional shipbuilding processes in West Aceh District, Indonesia. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2484, No. 1). AIP Publishing.

[15] Handjoyo, D. K. S., Susanto, N., & Susanty, A. Identifikasi Penyebab Kerusakan Mesin Asphalt Mixing Plant (AMP) PT Puri Sakti Perkasa Menggunakan Metode FMEA dan LTA. *Industrial Engineering Online Journal*. 2019; 6(4).

[16] Sodikin, J., & Jati, U. S. Analisa Kerusakan Transmisi Otomatis dengan Metode Failures Mode and Effects Analysis (FMEA) dan Logic Tree Anaysis (LTA). *Accurate: Journal of Mechanical Engineering and Science*. 2022; 3(1): 13-21.

[17] Fitriadi, R., & Setiawan, B. Analisa Penyebab Kerusakan Mesin Packer Semen Di Tuban IV Dengan Pendekatan FMEA dan LTA. 2015.

[18] Rohmat, R. Analisis Kerusakan Jembatan Timbang Unit 1 di PT. Iglas Gresik dengan Menggunakan Metode FMEA dan LTA. *JUSTI (Jurnal Sistem dan Teknik Industri)*. 2022; 3(1): 106-117.

[19] Sulistyo, A. B., & Muhlis, S. Optimasi Perawatan Mesin Overhead Crane pada PT KNSS dengan Metode Reliaiblity Centered Maintenance (RCM) dan Failure Mode and Effect Analysis (FMEA). *Jurnal Intent: Jurnal Industri dan Teknologi Terpadu*. 2022; 5(2): 27-35.

[20] Fatma, E., & Febriyanti, D. Analisis efektivitas mesin produksi menggunakan pendekatan Failure and Mode Effect Analysis dan Logic Tree analysis. *Journal of Industrial Engineering and Management Systems*. 2018; 11(1): 39-47.

[21] Pamungkas, I., Irawan, H. T., & Saputra, A. Risk and reliability analysis on critical components of boiler in steam power plant. International Conference on Industrial and Manufacturing Engineering. Medan. 2020; 1003(1): 012048.