

ANALISIS EFISIENSI PENGGANTIAN LOWER BEARING PADA UNIT AIR FAN COOLER (AFC) MELALUI OPTIMALISASI REFURBISHMENT DAN PENGEMBANGAN SPECIAL TOOLS DI PT. DONGGI SENORO LNG

ANALYSIS OF LOWER BEARING REPLACEMENT EFFICIENCY IN AIR FAN COOLER (AFC) UNITS THROUGH REFURBISHMENT OPTIMIZATION AND SPECIAL TOOL DEVELOPMENT AT PT. DONGGI SENORO LNG

Ilham Amir¹, Muhammad Arham², Muh. Rais³, Irwan Syarif⁴, Andi Nur Putri⁵

^{1,2}Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik dan Informatika, Universitas Patria Artha

³Program Studi Teknik Informatika, Fakultas Teknik dan Informatika, Universitas Patria Artha

Email: ilham.amir1705@gmail.com¹, muh.arham@patria-artha.ac.id²,

muh.raisazisnawawi@gmail.com³, firaysnawri@gmail.com⁴, khaulahputri@gmail.com⁵

ABSTRAK

Penelitian ini dilaksanakan di PT Donggi Senoro LNG (DSLNG), Sulawesi Tengah, yang menghadapi permasalahan tingginya frekuensi kerusakan *lower bearing* pada unit *Air Fan Cooler* (AFC). Kerusakan tersebut menyebabkan peningkatan biaya pemeliharaan, *downtime* peralatan, serta berpotensi menurunkan keandalan proses produksi LNG. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efektivitas strategi *refurbishment lower bearing* dan pengembangan *special tools* dalam meningkatkan efisiensi pemeliharaan melalui penurunan biaya perbaikan dan *Mean Time to Repair* (MTTR). Metode penelitian yang digunakan adalah kuantitatif deskriptif dengan memanfaatkan data historis *Computerized Maintenance Management System* (CMMS) selama periode 2017–2025. Data penelitian mencakup 38 kasus kerusakan *lower bearing* pada 94-unit AFC yang dianalisis berdasarkan parameter biaya pemeliharaan, waktu perbaikan, dan data *condition monitoring* berupa getaran dan *noise*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa implementasi *refurbishment lower bearing* dan penggunaan *special tools* mampu menurunkan total biaya pemeliharaan dari Rp2.668.343.396 menjadi Rp378.217.164 atau sebesar 85,83%. Selain itu, nilai MTTR menurun drastis dari 87,46 jam menjadi 5,56 jam atau sebesar 93,64%. Hasil *condition monitoring* juga menunjukkan penurunan tingkat getaran dari kondisi kritis menuju zona aman berdasarkan standar ISO 10816, dengan nilai getaran akhir berada pada kisaran 0,52–0,74 mm/s RMS. Berdasarkan hasil penelitian dapat disimpulkan bahwa strategi *refurbishment lower bearing* dan penggunaan *special tools* efektif dalam meningkatkan keandalan, mengurangi *downtime*, serta menekan biaya pemeliharaan pada unit AFC. Pendekatan ini dapat dijadikan alternatif strategi pemeliharaan berbasis *Reliability-Centered Maintenance* (RCM) untuk meningkatkan efisiensi operasional pada industri migas.

Kata Kunci: AFC, Refurbishment, Special Tools, MTTR, Cost Saving, RCM

ABSTRACT

This research was conducted at PT Donggi Senoro LNG (DSLNG), Central Sulawesi, which faces the problem of a high frequency of lower bearing failures in Air Fan Cooler (AFC) units. These failures increase maintenance costs, equipment downtime, and potentially reduce the reliability of the LNG production process. This study aims to analyze the effectiveness of lower bearing refurbishment strategies and the development of special

tools in improving maintenance efficiency by reducing repair costs and Mean Time to Repair (MTTR). The research method used is descriptive quantitative, utilizing historical data from the Computerized Maintenance Management System (CMMS) for the period 2017–2025. The research data includes 38 cases of lower bearing failure in 94 AFC units, analyzed based on parameters such as maintenance costs, repair time, and condition monitoring data in the form of vibration and noise. The results showed that the implementation of lower bearing refurbishment and the use of special tools reduced total maintenance costs from Rp2,668,343,396 to Rp378,217,164, or 85.83%. Furthermore, the MTTR value decreased from 87.46 hours to 5.56 hours, or 93.64%. Condition monitoring results also showed a decrease in vibration levels from critical conditions to the safe zone based on the ISO 10816 standard, with final vibration values in the range of 0.52–0.74 mm/s RMS. Based on the results, it can be concluded that the lower bearing refurbishment strategy and the use of special tools are effective in increasing reliability, reducing downtime, and reducing maintenance costs in the AFC unit. This approach can be used as an alternative to a Reliability-Centered Maintenance (RCM) based maintenance strategy to improve operational efficiency in the LNG industry.

Keywords: AFC, Refurbishment, Special Tools, MTTR, Cost Saving, RCM

I. PENDAHULUAN

Luwuk Banggai, yang terletak di provinsi Sulawesi Tengah, merupakan lokasi fasilitas utama PT. Donggi Senoro LNG (DSLNG). Sebagai salah satu pengembang Liquefied Natural Gas (LNG) berkapasitas 2 juta ton per tahun, fasilitas ini memiliki peran vital dalam sektor energi nasional. Salah satu komponen integral dalam proses operasional kilang adalah Air Fan Cooler (AFC), sebuah penukar panas berpendingin udara (ACHE) yang berfungsi mendinginkan fluida proses (seperti *lean amine*, *refrigerant*, dan gas alam) sebelum proses pencairan. Keandalan unit AFC sangat krusial; kegagalan pada sistem pendingin ini secara langsung akan menghambat proses pencairan gas dan berdampak pada kapasitas produksi LNG.

Berdasarkan tinjauan di lapangan, PT. DSLNG mengoperasikan 94-unit AFC. Data yang dikumpulkan dari *Computerized Maintenance Management System* (CMMS) menunjukkan tren permasalahan yang persisten pada komponen *lower bearing* (bantalan bawah). *Lower*

bearing tersebut mengalami frekuensi kerusakan yang tinggi, rata-rata sekitar 4-6 kali setahun per unit. Kerusakan ini memaksa perusahaan mengeluarkan biaya penggantian rata-rata sebesar Rp130 juta per unit. Jika diakumulasikan, pengeluaran untuk *lower bearing* mencapai Rp1,1 hingga 1,5 miliar setiap tahunnya.

Lebih jauh, analisis data CMMS periode 2022–2024 mengungkap bahwa nilai *Mean Time Between Failures* (MTBF) aktual pada komponen ini hanya berkisar 1500–2000 jam. Angka ini berada sangat jauh di bawah rekomendasi *Original Equipment Manufacturer* (OEM) yang memproyeksikan MTBF di atas 5000 jam. Tingginya frekuensi penggantian ini tidak hanya membengkakkan anggaran pemeliharaan (*maintenance cost*) secara drastis, tetapi juga menciptakan *downtime* yang lama. Waktu henti produksi menjadi semakin panjang akibat ketiadaan alat khusus (*special tools*) yang ergonomis, di mana teknisi harus menggunakan metode ekstraksi manual yang berisiko tinggi terhadap keselamatan kerja

(safety).

Beberapa penelitian terdahulu telah berupaya mengatasi tantangan pemeliharaan *bearing*. Nuruzzaman (2024) [1] membuktikan bahwa perbaikan sistem poros dan *bearing* mampu meningkatkan efisiensi dari 51% menjadi 74,3%. Namun, studi tersebut belum mengaitkan dampak finansial jangka panjang dan reduksi *Mean Time to Repair* (MTTR). Burhan (2024) [2] menggunakan *Critical Path Method* (CPM) untuk efisiensi penggantian *bearing*, namun mengabaikan faktor deteksi dini kerusakan melalui *condition monitoring* (vibrasi dan *noise*). Di sisi lain, penelitian Suwanto (2023) [3] dan Simbolon (2023) [4] menyoroti redesain komponen dan manajemen inventaris, tetapi tidak membahas integrasi konsep *refurbishment* secara komprehensif pada skala industri berat seperti LNG.

Terdapat celah penelitian (*research gap*) di mana belum ada studi yang secara terstruktur menganalisis integrasi data historis CMMS, analisis getaran (*vibration*), fabrikasi *special tools*, dan optimalisasi *refurbishment* untuk mengatasi kerusakan *lower bearing* AFC di fasilitas LNG. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk (1) mengidentifikasi akar masalah teknis (*root cause*) kerusakan *lower bearing* AFC, (2) mengevaluasi keandalan indikator getaran mekanis dan kebisingan sebagai peringatan dini, serta (3) mengukur efisiensi strategi perbaikan melalui metode *refurbishment* dan penerapan *special tools* terhadap penghematan biaya (*cost saving*) dan reduksi MTTR.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Air Fan Cooler (AFC) merupakan salah satu jenis *Air Cooled Heat Exchanger* (ACHE) yang digunakan untuk membuang panas dari fluida proses dengan memanfaatkan udara atmosfer sebagai media pendingin. Menurut Ni'mah (2023), AFC bekerja melalui mekanisme perpindahan panas konveksi pada permukaan tabung bersirip sehingga mampu menjaga kestabilan temperatur fluida proses pada industri migas dan LNG. Pada fasilitas LNG, AFC berperan penting dalam proses pendinginan *lean amine*, *refrigerant*, dan gas alam sebelum memasuki tahapan pencairan.

Bearing merupakan komponen mekanis yang berfungsi menopang poros sekaligus mengurangi gesekan antara bagian yang bergerak. Menurut Pravitasari (2020), *lower bearing* berfungsi menjaga kestabilan putaran poros sehingga beban radial dan aksial dapat didistribusikan secara optimal. Kegagalan *bearing* dapat menyebabkan peningkatan getaran, kebisingan, konsumsi energi, serta *downtime* peralatan.

Achmad (2024) menjelaskan bahwa sekitar 36% kegagalan *bearing* disebabkan oleh sistem pelumasan yang tidak memadai, sedangkan Kumar (2022) menyatakan bahwa pemasangan *bearing* yang tidak tepat dapat meningkatkan beban dinamis dan mempercepat kerusakan. Selain itu, Tetora (2023) menegaskan bahwa vibrasi merupakan indikator penting untuk mendeteksi kondisi peralatan berputar, khususnya pada kasus *unbalance* dan *misalignment*.

Dalam kegiatan pemeliharaan industri LNG, Wijaya (2025) menyebutkan

bahwa strategi pemeliharaan diarahkan untuk menjamin keandalan, keselamatan, dan efisiensi operasional fasilitas produksi. Pendekatan *Reliability-Centered Maintenance* (RCM) digunakan untuk menentukan tindakan pemeliharaan yang paling efektif berdasarkan tingkat risiko kegagalan peralatan. Oleh karena itu, pemanfaatan data *condition monitoring* seperti vibrasi dan *noise* menjadi bagian penting dalam proses pengambilan keputusan pemeliharaan.

Refurbishment merupakan metode perbaikan komponen dengan memanfaatkan kembali bagian yang masih layak guna sehingga biaya pengadaan dapat ditekan tanpa mengurangi fungsi teknisnya. Burhan (2024) menunjukkan bahwa optimalisasi proses perbaikan mampu meningkatkan efisiensi pekerjaan pemeliharaan, sedangkan Nuruzzaman (2024) membuktikan bahwa perbaikan sistem bearing dapat meningkatkan keandalan operasi peralatan. Pengembangan *special tools* juga berperan dalam mengurangi waktu pembongkaran dan pemasangan komponen sehingga nilai *Mean Time to Repair* (MTTR) dapat ditekan secara signifikan.

Berdasarkan kajian teoritis tersebut, penelitian ini mengintegrasikan konsep *condition monitoring*, *refurbishment* *lower bearing*, dan pengembangan *special tools* sebagai strategi peningkatan efisiensi pemeliharaan AFC pada industri LNG.

III. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif deskriptif-evaluatif dengan pendekatan studi kasus (*case study*). Lokasi penelitian adalah di

kilang PT. Donggi Senoro LNG, Luwuk Banggai, Sulawesi Tengah. Pengumpulan dan analisis data historis ditarik dari pangkalan data *Computerized Maintenance Management System* (CMMS) yang merekam seluruh aktivitas pemeliharaan preventif, korektif, dan prediktif pada periode tahun 2017 hingga 2025.

Populasi dalam penelitian ini adalah keseluruhan 94-unit *Air Fan Cooler* (AFC) yang beroperasi. Sampel penelitian ditetapkan secara *purposive* berdasarkan catatan *Work Order* (WO) yang lengkap, menghasilkan 38 kasus kerusakan dan penggantian spesifik pada komponen *lower bearing*. Data yang dikumpulkan meliputi riwayat kerusakan (*Work Order History*), laporan waktu henti (*Downtime Report*), laporan biaya suku cadang dan upah (*Cost Report*), serta laporan pemantauan kondisi (*Condition Monitoring / ConMon*) yang mengukur tingkat vibrasi (*vibration report*) dan kebisingan (*Noise*).

Pengukuran efektivitas dianalisis menggunakan dua indikator utama dari pendekatan *Total Productive Maintenance* (TPM), yaitu penghematan biaya (*cost saving*) dan efisiensi *Mean Time To Repair* (MTTR). Untuk menilai tingkat getaran mekanis, penelitian ini mengacu pada parameter evaluasi vibrasi global ISO 10816-3 (untuk mesin rotasional). Evaluasi kondisi bearing dibagi menjadi zona aman (Zona A), zona batas (Zona B/C), dan zona bahaya/trip (Zona D > 7,1 mm/s RMS).

3.1 Persamaan Matematis Efisiensi

Perhitungan waktu rata-rata perbaikan atau *Mean Time to Repair*

(MTTR) diformulasikan sebagai berikut:

$$MTTR = \frac{\text{(Total Waktu Perbaikan)}}{\text{(Jumlah Kasus)}}$$

Untuk mengukur efisiensi atau persentase penghematan biaya pemeliharaan (ηC), digunakan rumus perbandingan biaya sebelum dan sesudah implementasi:

$$\eta C = \frac{[C_{\text{Sebelum}} - C_{\text{Sesudah}}]}{C_{\text{Sebelum}}} \times 100\%$$

Di mana C_{Sebelum} adalah harga suku cadang original ditambah upah teknisi (Waktu x Pekerja x Upah/Jam), sedangkan C_{Sesudah} adalah harga material *refurbishment* ditambah upah teknisi yang jauh lebih efisien.

Efisiensi pengurangan waktu kerja teknis (ηt) dihitung menggunakan persamaan:

$$\eta t = \frac{[t_{\text{Sebelum}} - t_{\text{Sesudah}}]}{t_{\text{Sebelum}}} \times 100\%$$

Di mana t_{Sebelum} adalah waktu MTTR sebelum adanya inovasi *special tools*, dan t_{Sesudah} adalah MTTR pasca implementasi inovasi di lapangan.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini mendeskripsikan secara mendalam akar penyebab masalah yang teridentifikasi, tahapan implementasi alat dan perbaikan, hingga dampak kuantitatifnya terhadap indikator QCDSME (*Quality, Cost, Delivery, Safety, Morale, Environment*).

4.1 Root Cause Analysis & Condition Monitoring

Berdasarkan analisis kerusakan (*Root Cause Analysis/RCA*) pada 38 kasus yang terdata di CMMS, ditemukan beberapa faktor destruktif utama. Faktor tersebut meliputi *misalignment* puli motor, tegangan V-belt yang tidak sesuai, kontaminasi *grease* oleh debu dan partikel logam (menyebabkan gesekan

berlebih/*overheating*), ketidakseimbangan mekanis rotor, hingga deformasi (perubahan bentuk) pada *housing bearing*.

Indikator kerusakan paling awal terekam melalui instrumen *condition monitoring*. Kerusakan fisik pada bola bantalan (*ball bearing*) menghasilkan spektrum vibrasi dengan puncak dominan pada frekuensi 66,25 Hz, yang sesuai dengan karakteristik matematis *Ball Pass Frequency Inner Race* (BPFI). Sebelum dilakukan perbaikan, nilai getaran arah vertikal (Ver) menyentuh angka 4,606 mm/s RMS dan arah horizontal (Hor) mencapai 5,520 mm/s RMS. Kondisi ini masuk dalam ambang alarm kritis (Zona C/D) berdasarkan ISO 10816, yang disertai oleh anomali kebisingan (*noise decibel* tinggi > 50 dB) berupa suara mendecit/berderit akibat gesekan V-belt dan *inner race*.

4.2 Implementasi Refurbishment dan Special Tools

Untuk mengeliminasi permasalahan secara holistik tanpa membebani biaya *capex* (*Capital Expenditure*), tim *maintenance* merancang 7 set alat fabrikasi mandiri (*Special Tools*). Alat tersebut di antaranya adalah: (1) *Pulley Adjuster*, (2) *Pulley Holder*, (3) *Lock Nut*, (4) *Lower Bearing Tracker*, (5) *Taper Lock Pusher*, (6) *Lock Washer*, dan (7) *Ring Spacer*.

Penggunaan alat-alat ini mengeliminasi kebutuhan memukul paksa komponen menggunakan palu godam, yang mana selain tidak presisi, berisiko tinggi mencederai pekerja, serta merusak poros utama. Bersamaan dengan itu, alih-alih membeli rumah bantalan (*bearing housing*) original yang harus

diimpor utuh dari Italia, dilakukan metode refurbishment menggunakan material lokal. Material berupa baja paduan ASTM A532 (*Roundbar 7 Inch*) dan komponen elemen *bearing universal Spherical SKF 22315EK* dikalibrasi dan dibubut untuk membuat *housing bearing* yang jauh lebih tangguh (*heavy-duty*) terhadap suhu panas dan beban statis.

3.3 Analisis Penurunan Waktu Perbaikan (MTTR)

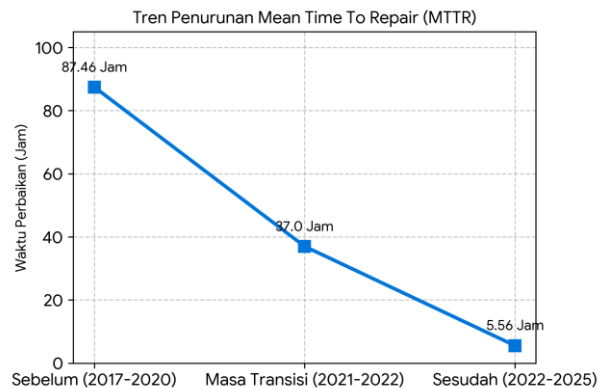
Data instalasi lapangan menunjukkan lonjakan efisiensi waktu yang fenomenal. Penelitian membagi rentang waktu ke dalam tiga fase: Fase Sebelum Implementasi (2017-2020), Fase Transisi/Trial (2021-2022), dan Fase Pasca-Implementasi Penuh (2022-2025).

Tabel 1. Tren Penurunan Waktu MTTR per Fase

Fase Implementasi	Total Jam	Kasus	MTTR (Jam)
Sebelum (2017-2020)	1.137	13	87,46
Transisi (2021-2022)	259	7	37,00
Sesudah (2022-2025)	100	18	5,56

Seperti yang tercantum pada Tabel 1 dan divisualisasikan pada Gambar 1, rata-rata MTTR pada fase awal sangat tinggi (87,46 jam) karena proses pembongkaran yang tradisional. Dengan penerapan 7 *special tools*, prosedur pelepasan puli dan pemasangan bearing menjadi sangat presisi dan cepat. Nilai MTTR turun menjadi hanya 5,56 jam. Persentase penurunan efisiensi waktu (ηt) mencapai 93,64%. Waktu henti

produksi berkurang drastis sehingga target operasional kilang dapat terjaga.



Gambar 1. Grafik Penurunan Signifikan MTTR

3.4 Analisis Efisiensi Biaya (Cost Saving)

Fokus utama dari optimalisasi *Brownfield* ini adalah menekan pembengkakan biaya. Pembelian *spare part original* dari Italia menghabiskan dana Rp132.677.000 per unit (termasuk pajak dan asuransi). Melalui strategi *refurbishment* lokal, biaya material (pembelian raw material besi ASTM dan *Spherical bearing SKF*) hanya memakan dana Rp17.916.378 per unit.

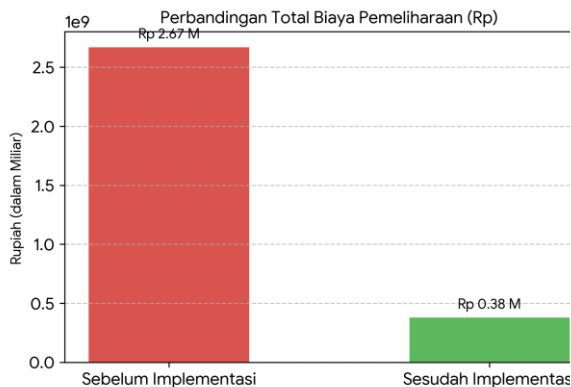
Dengan memperhitungkan upah teknisi per jam yang merujuk pada standar regional (Rp54.913 - Rp82.370/jam bergantung pada eskalasi inflasi tahunan), biaya total yang direkam oleh sistem CMMS untuk 38 insiden dikalkulasi.

Tabel 2. Total Penghematan Biaya Pemeliharaan

Keterangan Analisis	Nilai (Rupiah)
Total Biaya Sebelum (13 Kasus + upah)	Rp 2.668.343.396
Total Biaya Sesudah (25)	Rp 378.217.164

Kasus Transisi/Final)	
Total Cost Saving (Penghematan)	Rp 2.290.126.232
Persentase Efisiensi Biaya (ηC)	85,83%

Hasil analisis efisiensi menunjukkan, pemotongan pengeluaran pemeliharaan mencapai nilai absolut Rp2.290.126.232. Dengan persentase penghematan sebesar 85,83%, inisiatif ini sangat layak dan mempresentasikan bentuk nyata dari implementasi prinsip manajemen biaya berbasis RCM. Visualisasi pada Gambar 2 mempertegas besarnya celah (gap) biaya yang berhasil dipangkas.



Gambar 2. Grafik Komparasi Biaya Pemeliharaan

3.5 Evaluasi Kinerja (QCDSME)

Strategi pemeliharaan ini turut diukur dampaknya terhadap indikator komprehensif QCDSME. Kualitas (*Quality*) pendinginan LNG terjaga karena getaran kembali stabil (Zona A: 0,529 - 0,645 mm/s RMS). Biaya (*Cost*) terpotong 85,83%. Pengiriman (*Delivery*)/*Availability* meningkat tajam karena downtime terpotong. Keselamatan (*Safety*) terjamin karena

teknisi tidak lagi terpapar risiko pembongkaran mekanis paksa berkat hadirnya *Special Tools*. Moral (*Morale*) karyawan lapangan membaik karena pekerjaan menjadi terstandar, ringan, dan jelas (SOP MOC baru). Lingkungan (*Environment*) diuntungkan dengan berkurangnya limbah logam impor sekali buang, memanfaatkan konsep ekonomi sirkular dalam pabrikasi.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan analisis empiris dari 38 data historis CMMS di fasilitas PT Donggi Senoro LNG, dapat ditarik beberapa kesimpulan kunci:

1. Akar penyebab tingginya frekuensi kegagalan *lower bearing* didominasi oleh *misalignment*, tegangan *V-belt abnormal*, serta degradasi sistem pelumasan, yang termanifestasi dalam pola spektrum vibrasi dominan di frekuensi 66,25 Hz (BPFI) pada amplitudo kritis Zona C-D (ISO 10816).
2. Implementasi optimalisasi perbaikan melalui komponen *refurbishment* berbahan baja ASTM lokal dan penerapan 7 set *Special Tools* secara mutlak efektif menekan angka kerugian perusahaan.
3. *Mean Time to Repair* (MTTR) berhasil direduksi secara radikal sebesar 93,64%, dari baseline 87,46 jam menjadi 5,56 jam per insiden perbaikan. Kecepatan ini secara langsung memitigasi krisis ketersediaan fasilitas (*availability*) dan mengamankan target produksi LNG.
4. Terjadi efisiensi pembiayaan pemeliharaan (*Cost Saving*) yang masif mencapai 85,83%, mencetak margin penghematan lebih dari Rp2,2 Miliar.

Adapun saran operasional yang diajukan adalah perlunya standarisasi

prosedur ini ke dalam pedoman mutu (*Quality Manual*) sebagai bagian permanen dari *Reliability-Centered Maintenance* (RCM). Pemantauan (*Condition Monitoring*) berbasis ISO 10816 harus terus dipantau melalui *dashboard* terpusat. Ketika ambang getaran melampaui alarm peringatan 2,8 mm/s RMS (Zona B), sistem harus secara otomatis menghasilkan *Work Order* (WO) inspeksi dini.

REFERENSI

- [1] Nuruzzaman, Md. (2024). *Porous silica nanocarriers: Advances in structural orientation and modification to develop sustainable pesticide delivery systems*. ACS Agricultural Science & Technology, 4, 144–172.
- [2] Burhan, A. (2024). *Analisis karakteristik perpindahan panas pada sistem kondensor tipe shell-and-tube* (Tesis). Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- [3] Suwanto, A. L. (2023). *Redesain komponen reclaimer 32A-RE1* (Skripsi). Politeknik Negeri Jakarta.
- [4] Simbolon, O., & Sanusi, A. A. (2023). *Efisiensi pengolahan persediaan bearing dengan metode EOQ*. Jurnal Sosial dan Sains.
- [5] Amir, I. (2026). *Analisis Efisiensi Penggantian Lower Bearing pada Unit Air Fan Cooler (AFC) Melalui Optimalisasi Refurbishment dan Pengembangan Special Tools di PT. Donggi Senoro LNG*. Skripsi, Universitas Patria Artha, Makassar.
- [6] ISO 10816-3. (2014). *Mechanical vibration — Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts*.
- [7] ISO 21250-2. (2020). *Acoustics — Noise testing standards for rolling bearings*.
- [8] PT. Donggi Senoro LNG. (2025). *Data Historis Computerized Maintenance Management System (CMMS) 2017-2025*. Internal Document.
- [9] Jacobs, G., & Plogmann, M. (2023). *Advanced damage diagnosis for rolling bearings in industrial applications*. Springer Nature.
- [10] Tedjokusumo, S. N., & Darmawan, Z. (2025). *Strategi optimalisasi perawatan mesin produksi dengan pendekatan autonomous maintenance*. Jurnal Rekayasa Sistem & Manajemen Industri, 2(4).
- [11] Kumar, R. (2022). *Rolling element bearings: Damage analysis and maintenance practices*. Industrial Press.
- [12] Ni'mah, K. P., Fitriah, F., & Sari, D. A. (2023). *Performance of an air-cooled heat exchanger in a separation unit based on fouling factor and pressure drop*. Reka Buana, 8(2), 128–139.
- [13] Sari, D. A. (2021). *Air-cooled heat exchanger (ACHE): Prinsip kerja, konstruksi, dan optimasi desain*. PT Tensor.
- [14] Sesana, R., Bafaro, M. A., Filos, I. P., Uva, A., & Rizzo, S. (2024). *Experimental and statistical study on noise generated by bearing defects*. ASTM.
- [15] Simbolon, O., & Sanusi, A. A. (2023). *Efisiensi pengolahan persediaan bearing dengan metode EOQ*. Jurnal Sosial dan Sains.
- [16] Tim PKM Lalampa. (2023). *Menurunkan biaya penggantian lower bearing di unit air fan cooler*. Makalah TKMP Nasional XXVII.
- [17] Wijaya, M., et al. (2025). *Metodologi penelitian kombinasi pendekatan kuantitatif, kualitatif, dan mixed methods*. PT Media Penerbit Indonesia.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan apresiasi dan terima kasih yang mendalam kepada istri tercinta, anak, dan orang tua atas doa dan dukungan tanpa henti. Ucapan terima kasih juga ditujukan kepada Bapak Ir. Muhammad Arham, S.Pd., M.T. dan Ir. Muh. Rais, S.T, M.T., selaku pembimbing yang memberikan atas masukan, kritik, dan saran yang sangat berharga selama proses ujian dan penyempurnaan karya ilmiah ini.

