

Analisis Kerusakan Roller Bearing pada Blower Induced Draft Fan Boiler Takuma pada Pabrik Kelapa Sawit XYZ

Firman Paniroi Simarmata^{1*}, Tomi Abdilah², & Suardi³

^{1,2,3}) Program Studi Teknik Mesin, Universitas Tjut Nyak Dhien, Medan, Indonesia

*Email: firmanpsimarmata@yahoo.co.id

ABSTRACT

A steam boiler is an energy conversion device that converts water into steam by heating it. The steam produced can drive a turbine, which converts the steam's thermal energy into mechanical energy. This mechanical energy is subsequently used to operate a generator. The boiler can operate properly with the support of several components, one of which is the fan, which provides thrust and air suction during combustion, thereby enhancing the performance of the power generation system. Fans are utilised to increase the efficiency of power plants by maximising thrust at the fuel inlet channel, reducing fuel consumption, and promoting complete combustion. Without a fan, achieving the boiler's thermal efficiency would be difficult. The Induced Draft Fan is a type of centrifugal blower whose rotating shaft is supported by roller bearings, which are prone to problems and failures. Damage to the roller bearing in the Induced Draft Fan will affect the blower's performance; therefore, the author conducted an analysis of roller bearing failure on the Induced Draft Fan of the Takuma Boiler. The research method used is qualitative analysis, namely a study based on the systematic relationship between the variables under investigation. The aim of the analysis is to interpret the relationship among variables so that they can be used to answer the problems formulated in the study. The variables examined in this research are bearing vibration and bearing lubrication. The vibration data of the roller bearing on the Induced Draft Fan of the Takuma Boiler are as follows: outer axial position = 32.5 mm/s, inner axial position = 37.6 mm/s, outer vertical position = 15.8 mm/s, inner vertical position = 33.6 mm/s, outer horizontal position = 13.1 mm/s, and inner horizontal position = 49.9 mm/s. These values exceed the threshold limits of 7.10 mm/s and 11.20 mm/s (based on ISO 10816-1 vibration standards). Thus, the high vibration levels of the roller bearing in the Induced Draft Fan of the Takuma Boiler are the main factor causing premature bearing failure.

Keywords: Boiler, Blower, Induced Draft Fan, Roller Bearing

PENDAHULUAN

Ketel uap (boiler) merupakan jantung dari industri pengolahan kelapa sawit, karena berfungsi sebagai sumber utama pembangkit energi listrik sekaligus penggerak berbagai mesin proses produksi. Boiler bekerja sebagai mesin konversi energi yang mengubah air menjadi uap melalui proses pemanasan. Uap bertekanan tinggi tersebut kemudian digunakan untuk menggerakkan turbin, yang selanjutnya mengonversi energi termal dari uap menjadi energi mekanik. Energi mekanik inilah yang diteruskan untuk menggerakkan generator sehingga dapat menghasilkan energi listrik yang mendukung kelancaran seluruh aktivitas operasional pabrik kelapa sawit [1,2].

Agar boiler mampu bekerja secara optimal, dibutuhkan kinerja sistem pendukung yang saling terintegrasi, salah satunya adalah fan (kipas) yang berperan penting dalam mekanisme suplai dan pengaturan aliran udara selama proses pembakaran. Fan memberikan daya dorong dan daya hisap udara sehingga proses pembakaran di dalam ruang bakar dapat berlangsung sempurna. Tanpa adanya fan, efisiensi termal boiler akan sulit dicapai karena pencampuran bahan bakar dengan udara tidak optimal. Kebutuhan turbulensi dan suplai oksigen untuk pembakaran sempurna tidak hanya mengandalkan udara primer, tetapi juga memerlukan udara sekunder. Oleh sebab itu, sistem pembakaran pada boiler didukung oleh beberapa jenis fan, seperti Primary Air Fan (PAF), Forced Draft Fan (FDF), dan Induced Draft Fan (IDF), yang masing-masing memiliki fungsi spesifik untuk memastikan proses pembakaran berlangsung efisien, stabil, dan berkelanjutan [3,4].

Induced Draft Fan merupakan salah satu jenis blower sentrifugal yang berfungsi menghisap gas

hasil pembakaran dan mengalirkannya menuju cerobong untuk menjaga tekanan negatif di dalam ruang bakar. Performa IDF sangat bergantung pada komponen pendukungnya, khususnya bantalan (bearing) sebagai penopang poros fan. Roller bearing yang digunakan pada IDF harus mampu bekerja pada putaran tinggi, temperatur yang bervariasi, serta beban dinamis yang cukup besar. Ketika bantalan mengalami masalah atau trouble, seperti kerusakan mekanis, keausan, atau kegagalan pelumasan, hal tersebut akan langsung mempengaruhi stabilitas putaran, menurunkan efisiensi blower, dan bahkan berpotensi menghentikan operasi boiler secara keseluruhan [5].

Mengingat peran IDF yang sangat vital dalam menjaga kontinuitas proses pembakaran, maka kerusakan pada roller bearing menjadi isu teknis yang tidak dapat diabaikan. Atas dasar inilah penulis melakukan analisis terhadap kerusakan roller bearing pada Induced Draft Fan Boiler Takuma di Pabrik Kelapa Sawit, dengan tujuan untuk mengetahui penyebab kerusakan, dampaknya terhadap performa sistem pembakaran, serta langkah perbaikan atau pencegahan agar kejadian serupa dapat diminimalkan di masa mendatang [6,7].

Bantalan (Bearing)

Bearing (bantalan) merupakan elemen mesin yang berfungsi untuk menopang poros yang menerima beban sehingga poros dapat berputar atau bergerak bolak-balik dengan halus, stabil, aman, dan memiliki umur pakai yang lebih lama. Bantalan dirancang harus cukup kuat dan kokoh agar poros maupun elemen mesin yang terhubung dengannya dapat bekerja secara optimal [8].

Dalam ilmu mekanika, bearing berperan untuk membatasi dan mengarahkan gerak relatif antara dua komponen mesin atau lebih, sehingga komponen tersebut tetap bergerak sesuai jalur yang diinginkan. Bearing menjaga poros agar tetap berputar terhadap sumbunya atau, pada mekanisme tertentu, memastikan komponen yang bergerak linear tetap berada pada lintasannya.

Fungsi utama bearing adalah sebagai berikut [9]:

1. Mengurangi gesekan, panas, dan keausan antar bagian mesin yang bergerak.
2. Menahan beban yang bekerja pada poros (shaft) dan mesin.
3. Mampu menahan beban radial dan beban aksial (thrust load).
4. Menjaga ketelitian (toleransi) posisi dan kekencangan komponen yang ditumpu.
5. Mempermudah proses perawatan dan penggantian komponen sehingga menurunkan biaya operasional.

Klasifikasi Bearing

Bearing dapat diklasifikasikan berdasarkan arah beban yang diterima serta cara bantalan mengatasi gesekan akibat gerakan relatif terhadap poros [10,11], yaitu:

1. Bantalan radial (Radial Bearing)
Dirancang untuk menahan beban yang bekerja dalam arah radial atau tegak lurus terhadap poros.
2. Bantalan aksial (Thrust Bearing)
Menahan beban yang bekerja dalam arah aksial atau sejajar dengan sumbu poros.
3. Bantalan kombinasi
Mampu menahan beban gabungan, yaitu beban radial dan aksial.

Perhitungan Umur Bantalan Menggunakan Katalog

Secara sederhana perhitungan umur bearing dapat dilakukan dengan menggunakan rumus dari ISO 281:1990 berikut:

$$L_{10} = (C/P)^p \quad (1)$$

Keterangan:

L_{10} = Basic rating life (at 90% reliability) millions of revolutions

C = Basic dynamic load rating, kN

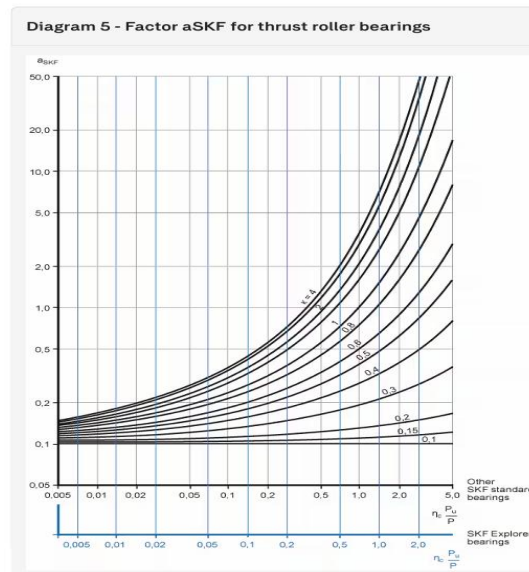
P = Equivalent dynamic bearing load, kN

p = Exponent of the life equation, 3 for ball bearings, 10/3 for roller bearings

Namun formula di atas tidak mempertimbangkan faktor lubrikasi, derajat kontaminasi, misalignment, dan lainnya. SKF memperkenalkan formula pendekatan untuk memperkirakan umur

bearing dengan formula berikut:

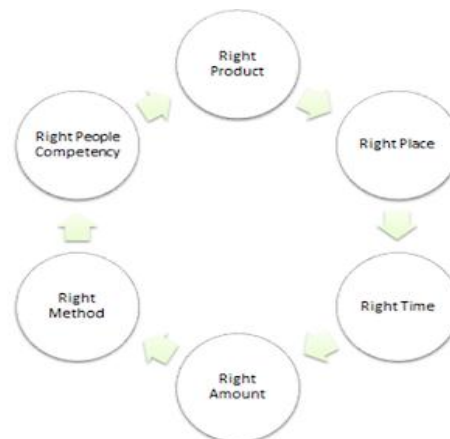
$$L_{10} = a_1 \cdot a_{SKF} \cdot (C/P)^p \tag{2}$$



Gambar 1. Diagram factor aSKF for thrust roller bearings [12]

Minyak Gemuk Bantalan (Bearing)

Grease merupakan salah satu jenis pelumas. Umumnya, grease digunakan untuk melumasi rolling bearing, chasis, pin & bushing sampai dengan wire rope. Grease berkualitas tinggi tentu akan memberikan proteksi yang baik sehingga komponen bisa mencapai bahkan melebihi batas usia pemakaian yang telah didesain. Apakah ada grease terbaik untuk bearing dan aplikasi lainnya? Pada dasarnya grease dan semua pelumas lainnya terlebih dahulu melewati tahapan pengujian dan pengembangan oleh tim R&D tiap pabrikan. Grease yang dijual di pasaran telah diuji terlebih dahulu di lab menurut standard industri yang berlaku. Dalam pengembangan produk, beberapa brand juga melakukan kerja sama dengan pabrikan unit untuk mendapatkan persetujuan penggunaan produk pada unit tersebut. Ketika teman-teman membeli produk grease, spesifikasi standar industrinya bisa dilihat pada lembar data sheet. Pastikan teman-teman membeli produk asli dan dari distributor resminya, ya, untuk memastikan keaslian produk. Produk-produk grease ada tingkatan kualitasnya. Dilihat dari sisi base oil-nya ada yang mineral dan sintetik, kemudian dari segi jenis thickener-nya, ada calcium, lithium, polyurea dan lain sebagainya. Kesimpulannya, semua produk grease sebenarnya bagus, bila tepat aplikasi. Dalam aplikasi grease, ada salah satu pendekatan yang dilakukan dan dikenal dengan sebutan 6R. Perhatikan cycle berikut [13].



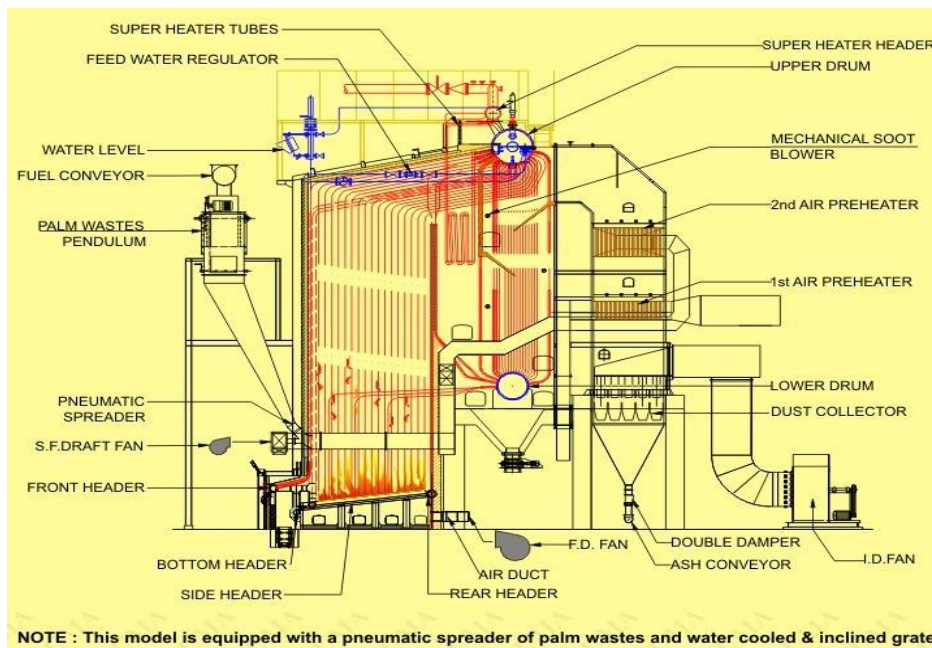
Gambar 2. Cycle efisiensi grease dengan pendekatan 6 R [14]

Prinsip Kerja Ketel Uap (Boiler)

Boiler yang digunakan untuk pembangkit uap di pembangkit listrik ini merupakan tipe pipa air, terdiri dari steam drum di bagian atas dan mud drum berada di bagian bawah. Dua buah drum tersebut terhubung dengan pipa-pipa jenis pipa riser dan pipa downcomer yang merupakan pipa pembangkit uap yang menerima energi panas dari dapur dan gas buang. Pembangkitan uap air di tampung di steam drum atas sebagai uap jenuh dan untuk membuat uap air menjadi superheat atau panas lanjut digunakan superheater. Untuk pengendalian tekanan dapur supaya vacuum (-5 s.d -10 mmHg) dalam instalasi boiler ini digunakan jenis balanced draft pressure dengan bantuan IDF (blower penghisap) dan FDF (blower penghembus) [4]. Sistem grate (rangka bakar) menggunakan model vibrating grate/reciprocating grate untuk mengadaptasi perubahan bahan bakar biomass yang memiliki kadar air yang tinggi. Untuk mempertahankan suhu rangka bakar pada suhu di bawah 600°C, disarankan melakukan penambahan alat berupa water cooled grate system [5]. Beberapa kajian dan penerapan best practices menunjukkan bahwa kandungan alkali dan kalium (K), di dalam bahan bakar biomass sangat berpotensi menimbulkan kerusakan terhadap alat-alat penukar panas seperti superheater, air preheater, economizer akibat munculnya partikel-partikel aerosol dan aglomerasi fly ash yang berpotensi menimbulkan slagging, fouling dan korosi [6].



Gambar 3. Water Tube Boiler[7;15]



Gambar 4. Design Water Tube Boiler [8,15]

METODE PENELITIAN

Jenis Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode penelitian kualitatif, yaitu metode yang bertujuan memahami fenomena teknis yang terjadi pada roller bearing Induced Draft Fan (IDF) melalui pengamatan langsung, wawancara, interpretasi data vibrasi, serta analisis kondisi fisik bearing. Metode kualitatif dipilih karena fokus penelitian bukan pada pengujian statistik atau perhitungan matematis, tetapi pada pemahaman mendalam mengenai proses terjadinya kerusakan, hubungan antar variabel teknis, serta interpretasi data kondisi mesin

Metode Pengumpulan Data

1. Observasi Lapangan
Peneliti melakukan pengamatan langsung terhadap roller bearing pada Induced Draft Fan. Observasi mencakup kondisi fisik bearing, suhu operasi, tingkat kebisingan, kebocoran pelumas, dan tanda-tanda kerusakan lainnya. Observasi ini membantu mengidentifikasi gejala awal kerusakan sebelum dilakukan pengukuran vibrasi.
2. Wawancara
Wawancara dilakukan dengan operator harian, teknisi pemeliharaan, dan supervisor boiler untuk memperoleh informasi mengenai, Riwayat kerusakan bearing, Frekuensi perawatan, Penggunaan pelumas, Kondisi operasi blower. Metode ini membantu memperoleh data yang tidak terlihat dari observasi.
3. Dokumentasi
Dokumentasi berupa foto, gambar teknik, dan rekaman pengukuran vibrasi digunakan untuk memperjelas hasil penelitian. Foto kerusakan fisik bearing juga menjadi bukti pendukung analisis.
4. Studi Pustaka
Peneliti membaca dan mempelajari literatur mengenai bearing, getaran mesin, serta teori kerusakan untuk memperkuat landasan teori. Studi ini membantu menghubungkan gejala kerusakan dengan teori permesinan

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisa Getaran (Vibrasi) Bearing

Bantalan radial (radial bearing) berfungsi untuk menopang poros induce fan agar berputar tanpa gesekan yang berlebihan dan gerakan putar yang terarah. Bantalan radial juga membatasi gerak relatif agar dua komponen mengalami kegagalan yang berakibat pada kerusakan komponen lainnya. Kegagalan disebabkan oleh terjadinya getaran (vibrasi) melebihi batas toleransi maka terjadi rubbing antara bagian yang berputar dan bagian yang diam. Getaran (vibrasi) juga dapat menyebabkan kerusakan pada poros, seal dan bearing. Pada umumnya sensor vibrasi ditempatkan pada bearing metal. Sensor ini mengukur besarnya vibrasi dan mengirim signal listrik yang sebanding dengan dengan gerak aksial poros. Sinyal diterima oleh vibrasi recorder yang mengindikasikan nilai penyimpangan aksial dalam gerakan poros. Walaupun setiap rotor induce draft fan mempunyai batas toleransi yang berbeda, namun nilai vibrasi pada operasi normal pada umumnya kurang dari 3 mils (seperseribu inchi). Instrumen ini mengukur gerakan aksial (axial vibration) dari poros yang relatif terhadap rumah bantalan (bearing housing).

Pengukuran kerusakan elemen-elemen pada bantalan radial dapat dilakukan dengan mengukur getaran yang ditimbulkan berupa sinyal frekuensi ketika bantalan tersebut berputar. Pengukur getaran pada bantalan dengan menggunakan alat ukur vibrasi. Kerusakan yang terjadi pada bantalalan gelinding meliputi kerusakan pada rangka (cage), ring luar (outer ring), ring dalam (inner ring) dan elemen gelinding (balls). Bantalan roller yang digunakan pada penelitian ini merk : SKF, Nomor seri bantalan: 22222 EK/C3, Tipe bantalan : Spherical roller bearing, Diameter dalam : 110 mm, Diameter luar : 200 mm, Lebar : 53 mm, Rating beban dinamik: 572 KN, Rating beban static: 640 KN, Putaran : 3000 r/min.

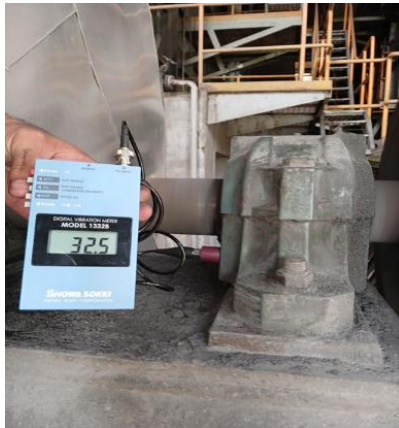
Data Vibrasi Bantalan

Variabel pertama untuk menganalisa kerusakan roller bearing pada blower induce draft fan boiler Takuma perlu dikumpulkan data getaran bearing. Berdasarkan data operasi vibrasi bantalan dilapangan diperoleh.

1. Vibrasi pada posisi aksial *bearing* bagian luar = 32.5 mm/s (Gambar 5)
2. Vibrasi pada posisi aksial bearing bagian dalam = 37.6 mm/s (Gambar 6)
3. Vibrasi pada posisi vertikal *bearing* bagian luar = 15.8 mm/s (Gambar 7)

Tabel 1. Data Vibrasi *Roller Bearing Induce Draft Fan*

Posisi Vibrasi <i>Bearing</i>	Bagian Luar (mm/s)	Bagian Dalam (mm/s)
Axial	32,5	37,6
Vertikal	15,8	33,6
Horizontal	13,1	49,5



Gambar 5. Vibrasi pada posisi aksial bearing Bagian luar



Gambar 6. Vibrasi pada posisi aksial *bearing* bagian dalam



Gambar 7. Vibrasi pada posisi vertikal *bearing* bagian luar

Berdasarkan standard ISO 10816-1 untuk standar getaran (vibrasi) yang dapat dijadikan sebagai acuan adalah sebagai berikut:

Tabel 2. Standard ISO 10816-1 getaran (vibrasi *bearing*)

VIBRATION SEVERITY PER ISO 10816-1						
Machine	Class I		Class II	Class III	Class IV	
	in/s	mm/s	Small Machines	Medium Machines	Large Rigid Foundation	Large Soft Foundation
Vibration Velocity Vrms	0.01	0.28				
	0.02	0.45				
	0.03	0.71			GOOD	
	0.04	1.12				
	0.07	1.80				
	0.11	2.80			SATISFACTORY	
	0.18	4.50				
	0.28	7.10			UNSATISFACTORY	
	0.44	11.20				
	0.70	18.00				
	1.10	28.00			UNACCEPTABLE	
1.77	45.90					

Analisis Pelumasan *Bearing*

Sistem pelumasan pada *roller bearing* bekerja secara hidrodinamis dimana tahapan kerja terbagi menjadi tiga kondisi. Kondisi pertama yaitu shaft belum berputar dimana lapisan pelumas akan cenderung terangkat teratas karena tekanan poros. Kondisi kedua yaitu fase permulaan atau *start up* dimana poros baru berputar dan mengakibatkan pelumas bergerak menyelimuti *bearing*. Pada tahap ini pelumas telah mampu memberikan lapisan batas antara poros dan *bearing* serta membuat poros condong bergeser ke arah kiri apabila bergerak berlawanan arah jarum jam. Tahap selanjutnya yaitu fase *steady* dimana poros telah bergerak secara stabil dan pelumasan akan mengakibatkan poros cenderung bergeser ke arah kanan apabila poros berputar berlawanan arah jarum jam.



Gambar 8. Kondisi Pelumasan Grease Roller Bearing

Pelumasan grease roller bearing induce draft fan dalam kondisi kotor, yaitu poros rumah bearing dipenuhi kotoran debu hasil pembakaran boiler dan tumpahan kelebihan minyak grease. Gambar 4.10 diatas menunjukkan bahwa ada kesalahan pada pemakaian minyak grease yang tidak sesuai dengan petunjuk pemakaian dari manual book roller bearing. Kondisi ini jauh dari kerja ideal bearing sebab bila bearing dan rumah bearing dipenuhi minyak grease maka akan menghambat kinerja bearing. Jika bearing dan rumah bearing dipenuhi minyak grease yang berlebihan, akan mengakibatkan beberapa masalah serius.

Analisis Penggunaan Minyak *Grease*

Memahami rekomendasi pemakaian minyak grease sesuai manual book roller bearing sangat penting karena bearing dapat beroperasi dalam rentang temperatur, kecepatan dan beban yang sesuai spesifikasi. Setiap bearing dirancang untuk kondisi operasi tertentu. Grease yang direkomendasikan memiliki viskositas, konsistensi dan zat aditif yang sesuai untuk memberikan pelumasan optimal pada kondisi tersebut. Manual book untuk pemakaian minyak grease memberikan panduan kapan dan seberapa banyak grease yang harus ditambahkan atau diganti. Mengikuti jadwal ini mencegah over-greasing yang dapat meningkatkan torsi dan temperatur operasi. Penggunaan grease yang salah dapat menyebabkan keausan prematur, overheating atau

bahkan kegagalan mendadak. Berdasarkan data dilapangan minyak grease yang digunakan adalah Grease SKF GMT 3 dengan spesifikasi sebagai berikut:

Tabel 3. Spesifikasi Minyak Grease SKF

Spesifikasi Grease	Keterangan
Brand	SKF
National Lubricating Grade Institute (NLGI)	3
Base Oil	Mineral oil
Thickner	Lithium Soap
Viscosity	40 °C 125 mm ² /s / 100 °C, 12 mm ² /s
Aplication	Bearings >100 mm (3.9 in.) size

Solusi Dan Tindakan

Dari beberapa analisis di atas tentang kerusakan *roller bearing induce fan boiler Takuma* maka penulis memberikan saran dan masukan untuk solusi dari masalah kerusakan *roller bearing induce fan*:

1. Hentikan operasi *blower induce draft fan* untuk inspeksi *roller bearing*.
2. Periksa kondisi *bearing* secara visual.
3. Lakukan penggantian *bearing* jika diperlukan.
4. Periksa *alignment motor – fan*.
5. Lakukan rekondisi / perbaikan pada *impeller*.
6. Pastikan sistem pelumasan berfungsi dengan baik.
7. Kencangkan semua baut dan koneksi.

Gunakan jumlah minyak *grease* yang tepat sesuai spesifikasi pabrikan, biasanya hanya mengisi 1/3 hingga 1/2 volume ruang *bearing* dan lakukan *regreasing* secara berkala dengan jumlah dan metode yang sesuai

KESIMPULAN

Hasil analisis menunjukkan bahwa kerusakan roller bearing pada Blower Induced Draft Fan terutama disebabkan oleh tingginya getaran yang jauh melampaui ambang batas standar ISO 10816-1. Getaran tinggi ini muncul akibat ketidakseimbangan impeller (unbalance) yang disebabkan oleh blade yang terkikis dan penumpukan debu, serta kerusakan internal bearing. Kondisi bearing juga ditemukan kotor dan terkontaminasi debu, ditambah penggunaan grease yang tidak sesuai rekomendasi (menggunakan NLGI 3, seharusnya NLGI 2), sehingga mengganggu kinerja pelumasan dan mempercepat kerusakan bearing.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. Saferi, Sulaeman, and O. Defra Wanda, "Failure Analysis of Induced Draft Fan Bearing in PT Semen Padang Using The RCM Method," *J. Tek. Mesin*, vol. 13, no. 1, pp. 19–26, 2023, doi: 10.21063/jtm.2023.v13.i1.19-26.
- [2] R. I. Pratiwi, R. Junaidi, and A. Meidinariasty, "Pembuatan Grease Dari Palm Fatty Acid Distillte (PFAD) dengan Variasi Komposisi Base Oil, Thickening Agent dan Asam Asetat Sebagai Zat Aditif," *J. Serambi Eng.*, vol. 8, no. 4, pp. 7002–7009, 2023, doi: 10.32672/jse.v8i4.6767.
- [3] T. Mw, "Perencanaan Ketel Uap untuk Kebutuhan Turbin Uap dengan Tekanan 50 Bar , Temperatur 450 o C , dan Daya," vol. 02, no. 01, pp. 21–30, 2021.
- [4] G.F.(Jerry) Gilman, *Boiler Control Systems Engineering*, Second Edition, 2010, International Society Of Automation 67 Alexander Drive, United State Of America.
- [5] Mohammad Haikal Abdurraziq and Reza Setiawan, "Analisis Pengaruh Uap Boiler Pipa Api Kapasitas 6 Ton Pada Proses Produksi V-Belt di PT XYZ," *J. Pendidik. Tek. Mesin Undiksha*, vol. 11, no. 2, pp. 134–145, 2023, doi: 10.23887/jptm.v11i2.62040.
- [6] P. F. Wulandari, D. Lutfiananda, and K. Sumada, "Unjuk Kerja Dan Efisiensi Turbin Uap

- Dan Generator (Tg-65) Pada Pembangkit Listrik Unit Sistem Utilitas Departemen Produksi Iiia Pt Petrokimia Gresik,” *SINERGI POLMED J. Ilm. Tek. Mesin*, vol. 4, no. 1, pp. 67–74, 2023, doi: 10.51510/sinergipolmed.v4i1.1036.
- [7] I. B. Rahardja, E. Abinanda, and A. L. Siregar, “Water Tube Boiler Pabrik Kelapa Sawit Kapasitas 45 Ton/Jam,” *J. Citra Widya Edukasi*, vol. 14, no. 1, pp. 39–54, 2022, [Online]. Available: https://journal.cwe.ac.id/index.php/jurnal_citrawidyaedukasi/article/view/269
- [8] R. Hafis Ghifari, Nazaruddin, M. Nur, M. Isnaini Hadiyul Umam, and Suherman, “Performance Efficiency Analysis of Water Tube Boiler Machine Using Input Output Method and Fmea,” *J. Perangkat Lunak*, vol. 7, no. 1, pp. 32–44, 2025, doi: 10.32520/jupel.v7i1.3759.
- [9] M. Hasudungan Baringbing and I. Nazaruddin Sinaga, “Analisis Efisiensi Water Tube Boiler Menggunakan Metode Langsung Di PT. Toba Pulp Lestari, Tbk Porsea-Sumatera Utara,” *J. Tek. Mesin S-1*, vol. 11, no. 2, pp. 49–68, 2023, [Online]. Available: <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/jtm/article/view/39383/29183>
- [10] A. Y. Dewi, A. Effendi, and E. Alfian, “Analisa Sistem Manajemen Pengoperasian Bahan Bakar Boiler,” *RELE (Rekayasa Elektr. dan Energi) J. Tek. Elektro*, vol. 5, no. 1, 2022, doi: 10.30596/rele.v5i1.10789.
- [11] Kasmaniar *et al.*, “Pengembangan Energi Terbarukan Biomassa dari SumberPertanian, Perkebunan dan Hasil Hutan: KajianPengembangan dan Kendalanya,” *J. Serambi Eng.*, vol. 8, no. 1, pp. 4957–4964, 2023, [Online]. Available: <https://doi.org/10.32672/jse.v8i1.5668>
- [12] H. Saruhan, S. Saridemir, A. Çiçek, and I. Uygur, “Vibration analysis of rolling element bearings defects,” *J. Appl. Res. Technol.*, vol. 12, no. 3, pp. 384–395, 2014, doi: 10.1016/S1665-6423(14)71620-7.
- [13] P. Wang, H. Xu, Y. Yang, H. Ma, D. He, and X. Zhao, “Dynamic characteristics of ball bearing-coupling-rotor system with angular misalignment fault,” *Nonlinear Dyn.*, vol. 108, no. 4, pp. 3391–3415, 2021, doi: 10.1007/s11071-022-07451-1.
- [14] H. Hirani, D. Jangra, and K. N. Sidh, “Experimental Analysis of Chemically Degraded Lubricant’s Impact on Spur Gear Wear,” *Lubricants*, vol. 11, no. 5, 2023, doi: 10.3390/lubricants11050201.
- [15] S. N. Hidayatulloh, M. Tauviquirrahman, and ..., “Analisis Pengaruh Rectangular Texture Terhadap Performa Journal Bearing Dengan Pelumas Oli Menggunakan Metode 3D ...,” *J. Tek. ...*, vol. 11, no. 4, pp. 37–42, 2023, [Online]. Available: <https://ejournal3.undip.ac.id/index.php/jtm/article/view/41853%0Ahttps://ejournal3.undip.ac.id/index.php/jtm/article/download/41853/30372>