Diagnosis Kegagalan Bearing Forced Draft Fan Berbasis MultiTeknologi

Bambang Pratowo, Riza Muhida, Muhammad Riza, Erry Yulian T Adesta, Indra Surya, Zein Muhamad, Kunarto, Harjono Saputro, Mulyana, Ais Sabastian Prayogi

Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Bandar Lampung,
Bandar Lampung, 35143, Indonesia
Email: Bambang.pratowo@ubl.ac.id
Email: ais.sabastian@gmail.com

Abstrak. Penelitian ini bertujuan mendiagnosis indikasi kegagalan bearing pada Forced Draft Fan 4 FCA200 di PLTU Bukit Asam melalui integrasi pemantauan vibrasi, termografi inframerah, dan ultrasound. Pengambilan data dilakukan secara berkala pada kondisi operasi relatif stabil selama 17 kali pengukuran, dengan membandingkan kondisi Bearing 1 dan Bearing 2 serta memvalidasi hasil pemantauan melalui inspeksi setelah pembongkaran. Hasil menunjukkan bahwa nilai vibrasi rata-rata Bearing 2 mencapai 5,00 mm/s dan nilai maksimum 7,52 mm/s, sedangkan Bearing 1 rata-rata 1,50 mm/s; temperatur rata-rata Bearing 2 sebesar 100,06 °C dibandingkan 71,41 °C pada Bearing 1, dengan selisih temperatur rata-rata 28,65 °C. Nilai ultrasound rata-rata Bearing 2 sebesar 61,88 dB dibandingkan 52,35 dB pada Bearing 1 dan tetap lebih tinggi setelah tindakan greasing, sedangkan inspeksi pascapembongkaran menemukan grease mengeras serta adanya indikasi keausan pada outer ring. Temuan lintas-teknologi tersebut menunjukkan bahwa Bearing 2 mengalami degradasi yang konsisten dengan masalah pelumasan dan kelonggaran mekanis, sehingga direkomendasikan untuk ditindaklanjuti melalui inspeksi dan penggantian terencana pada periode outage.

Kata kunci. Bantalan; pemeliharaan prediktif; analisis getaran; termografi inframerah; ultrasonik; pemantauan kondisi.

1 Pendahuluan

Energi listrik merupakan infrastruktur strategis bagi keberlanjutan kegiatan industri, sehingga keandalan peralatan pembangkit menjadi bagian penting dari pengelolaan operasi. Pada pembangkit termal, peralatan bantu seperti Forced Draft Fan (FD Fan) berperan memasok udara pembakaran ke furnace dan harus beroperasi secara stabil agar proses pembakaran berlangsung sesuai kebutuhan. Karena beroperasi secara kontinu dan melibatkan komponen berputar, FD Fan memiliki potensi mengalami degradasi mekanis, terutama pada bearing sebagai elemen penumpu poros. Kondisi bearing yang memburuk dapat meningkatkan getaran dan temperatur serta menimbulkan gangguan operasi apabila tidak terdeteksi pada tahap awal. Oleh karena itu,

pemantauan kondisi berbasis data diperlukan untuk mendukung keputusan pemeliharaan yang lebih tepat waktu [1], [2].

Condition monitoring pada mesin berputar umumnya memanfaatkan sinyal vibrasi sebagai indikator utama karena perubahan amplitudo dan karakteristik spektrum dapat memberikan informasi mengenai kondisi komponen. Kajian terbaru menunjukkan bahwa analisis vibrasi merupakan teknik non-invasif yang luas digunakan untuk deteksi dan diagnosis kerusakan pada mesin berputar, sementara analisis domain frekuensi dapat membantu mengidentifikasi karakteristik kerusakan bearing secara lebih spesifik [3], [4]. ISO 20816-3:2022 menyediakan kerangka evaluasi pengukuran vibrasi pada mesin industri yang dilakukan secara *_in-situ_* pada kondisi operasi normal, tetapi standar tersebut menekankan evaluasi tingkat vibrasi dan tidak secara langsung menggantikan diagnosis spesifik kerusakan bearing [5]. Dengan demikian, penggunaan nilai tren saja perlu dilengkapi dengan informasi spektrum dan kondisi operasi. Pendekatan tersebut penting agar klasifikasi kondisi tidak semata-mata didasarkan pada satu ambang numerik.

Selain vibrasi, termografi inframerah dapat digunakan sebagai teknik non-kontak untuk mengidentifikasi anomali temperatur pada komponen berputar. Penelitian pada bearing menunjukkan bahwa citra dan distribusi temperatur dapat digunakan untuk membedakan kondisi kesehatan bearing, termasuk mendeteksi indikasi kerusakan pada *_outer race_* [6], [7]. Kenaikan temperatur tidak selalu menunjukkan satu penyebab tunggal karena dapat dipengaruhi oleh pelumasan, gesekan, beban, kondisi pemasangan, maupun lingkungan pengukuran. Oleh sebab itu, temperatur sebaiknya dianalisis secara komparatif terhadap komponen sejenis dan terhadap tren pengukuran sebelumnya. Pendekatan komparatif tersebut lebih sesuai untuk penelitian lapangan karena kondisi operasi aktual dapat berubah sepanjang periode pengamatan.

Teknologi ultrasound atau pengukuran gelombang ultrasonik juga dapat melengkapi vibrasi dan termografi, terutama untuk memantau fenomena gesekan serta kondisi pelumasan. Penelitian eksperimental menunjukkan bahwa respons ultrasonik dapat digunakan untuk pemantauan kondisi bearing dan memiliki potensi sebagai sumber informasi tambahan dalam sistem *condition monitoring* [8]. Pemilihan beberapa teknik pengukuran secara terpadu dapat meningkatkan kualitas diagnosis karena setiap teknologi menangkap gejala fisik yang berbeda. Literatur mengenai pemilihan teknik *condition monitoring* juga menekankan bahwa kombinasi teknik perlu disesuaikan dengan jenis mesin, mode kegagalan, kondisi operasi, dan tujuan keputusan pemeliharaan [9]. Dengan demikian, integrasi data vibrasi, termografi, dan ultrasound menjadi pendekatan yang rasional untuk meningkatkan keyakinan diagnosis di lapangan.

Permasalahan penelitian ini adalah adanya perbedaan kondisi antara Bearing 1 dan Bearing 2 pada FD Fan 4 FCA200 yang perlu ditelusuri secara sistematis hingga ke akar masalah. Penelitian terdahulu banyak membahas satu teknik diagnosis atau menggunakan data eksperimen terkontrol, sedangkan data lapangan pada peralatan pembangkit menghadapi variasi operasi dan keterbatasan pengukuran. Penelitian ini menawarkan pendekatan integratif dengan menggabungkan tren vibrasi, temperatur termografi, tingkat ultrasound, serta bukti inspeksi setelah pembongkaran bearing. Nilai tambah penelitian terletak pada penggunaan bukti lintas-teknologi untuk menghubungkan indikasi awal dengan kondisi fisik komponen sehingga rekomendasi

pemeliharaan dapat dibuat berdasarkan kondisi aktual. Tujuan akhirnya adalah menentukan indikasi mode kegagalan Bearing 2 dan merumuskan rekomendasi tindak lanjut yang dapat diterapkan dalam perencanaan *predictive maintenance* dan **maintenance outage** [2], [9], [10].

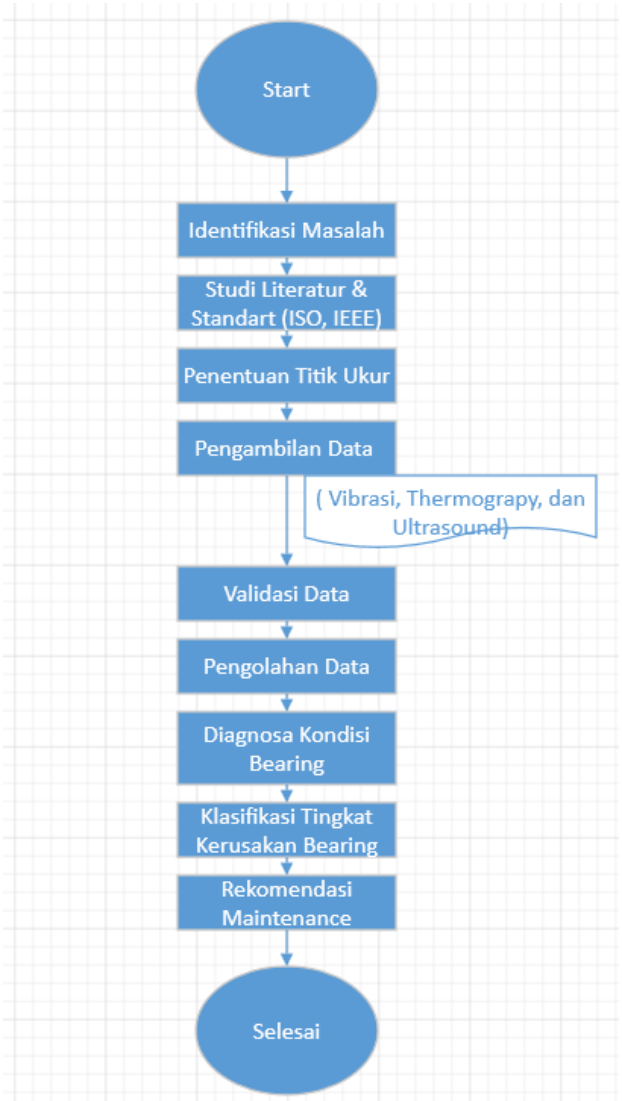
2 Material dan Metode Penelitian

2.1. Alat dan Bahan

Objek penelitian adalah Forced Draft Fan 4 FCA200 Unit 4 PLTU Bukit Asam, khususnya bearing pada sisi journal fan. Pengukuran dilakukan pada kondisi operasi normal dan beban relatif stabil untuk mengurangi pengaruh transien saat start-up atau shutdown terhadap data pemantauan. Instrumen yang digunakan meliputi Portable Vibration Meter berbasis Vib Expert untuk pengukuran vibrasi, kamera termografi FLIR T640 dengan rentang temperatur -40 °C sampai 650 °C untuk pemetaan temperatur permukaan, dan Sonochek Ultrasonic untuk mendeteksi indikasi energi akustik berfrekuensi tinggi pada bearing. Pengukuran dilakukan pada titik bearing yang sama secara berulang agar data antarwaktu dapat dibandingkan. Selain data kondisi operasi, inspeksi visual setelah pembongkaran digunakan sebagai verifikasi lapangan terhadap indikasi yang diperoleh dari tiga teknik pemantauan.

2.2. Metode

Penelitian menggunakan pendekatan studi kasus eksperimental berbasis condition monitoring dengan pengambilan data berkala. Tahapan penelitian meliputi identifikasi masalah, studi literatur dan standar, penentuan titik ukur, pengambilan data vibrasi, termografi, dan ultrasound, validasi data, pengolahan tren, diagnosis kondisi bearing, klasifikasi tingkat degradasi, serta penyusunan rekomendasi pemeliharaan. Pengukuran dilakukan ketika FD Fan berada pada kondisi operasi normal dan tidak sedang mengalami perubahan kondisi transien. Untuk menjaga konsistensi, posisi pengukuran dan kondisi pengamatan dipertahankan semirip mungkin pada setiap periode pengambilan data. Hasil ketiga teknologi kemudian dibandingkan dan dikorelasikan dengan temuan inspeksi pascapembongkaran.



Gambar 1. Diagram alir penelitian.

2.3. Prosedur Pengujian

Prosedur pengujian diawali dengan mengidentifikasi potensi kegagalan bearing dan meninjau histori kerusakan. Selanjutnya parameter operasi FD Fan diamati, termasuk memastikan unit berada pada kondisi normal dan pengaturan solenoid valve berada pada kondisi yang relatif sama selama pengukuran. Data vibrasi dicatat pada arah horizontal, vertikal, dan aksial, sedangkan termografi dilakukan dengan memastikan fokus citra memadai dan ultrasound diukur pada titik bearing yang sama. Setelah data diperoleh, dilakukan pemeriksaan konsistensi, pembuatan grafik tren, dan perbandingan

antara Bearing 1 dan Bearing 2. Diagnosis akhir tidak hanya didasarkan pada satu parameter, tetapi pada kesesuaian pola antar-teknologi dan hasil inspeksi fisik.

Tabel 1. Parameter pengukuran kondisi bearing.

TECHNOLOGY	MEASUREMENT POINT	PRIMARY OUTPUT
Vibration	Horizontal, vertical, axial	RMS vibration and spectrum
Infrared thermography	Bearing housing surface	Surface temperature and trend
Ultrasound	Same bearing location	Ultrasonic level (dB)

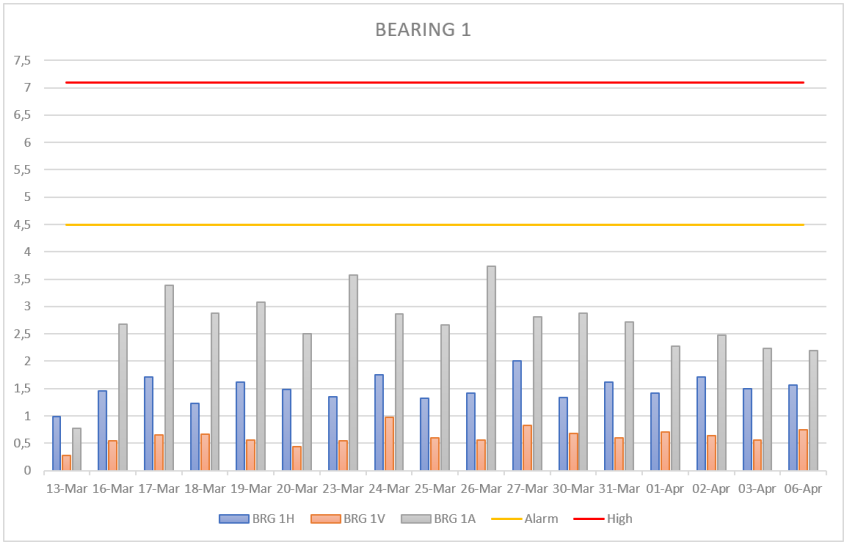
3 Hasil dan Pembahasan

3.1. Hasil Analisis Vibrasi

Data vibrasi diperoleh dari 17 kali pengukuran pada 13 Maret sampai 6 April dengan kondisi operasi yang relatif stabil. Tabel 2 memperlihatkan bahwa amplitudo vibrasi Bearing 1 berada pada rentang 0,99–2,01 mm/s, sedangkan Bearing 2 berada pada rentang 3,29–7,52 mm/s. Nilai rata-rata Bearing 1 sebesar 1,50 mm/s dan Bearing 2 sebesar 5,00 mm/s, sehingga level rata-rata Bearing 2 sekitar 3,34 kali lebih tinggi daripada Bearing 1. Nilai maksimum Bearing 2 sebesar 7,52 mm/s tercatat pada 19 Maret dan menjadi indikator yang perlu ditindaklanjuti, terutama karena beberapa pengukuran berikutnya tetap berada pada tingkat yang relatif tinggi. Dalam penelitian ini, batas 4,5–7,1 mm/s yang digunakan untuk klasifikasi operasional diperlakukan sebagai batas monitoring internal/plant, sedangkan ISO 20816-3:2022 digunakan sebagai kerangka evaluasi vibrasi dan tidak dianggap sebagai ambang diagnosis bearing yang universal [5].

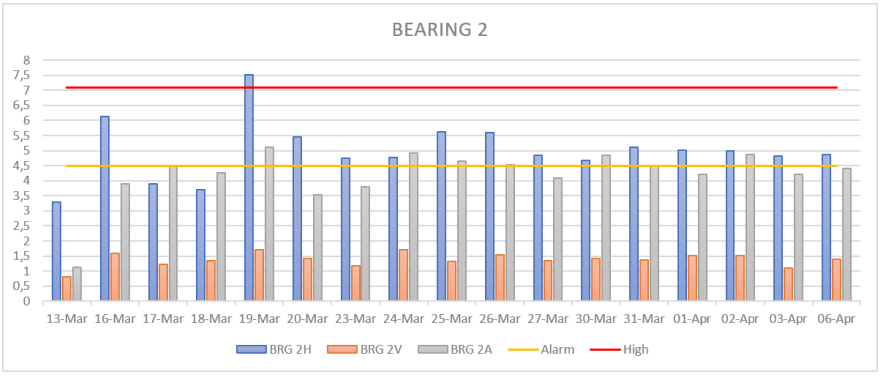
Tabel 2. Vibration measurement data.

No	Tanggal Pengukuran	PIC	Unit	Komponen	BRG 1H	BRG 1V	BRG 1A	BRG 2H	BRG 2V	BRG 2A
1	13-Mar	CBM	4	4 FCA200	0,99	0,27	0,77	3,29	0,82	1,13
2	16-Mar	CBM	4	4 FCA200	1,45	0,54	2,68	6,13	1,59	3,89
3	17-Mar	CBM	4	4 FCA200	1,71	0,65	3,39	3,9	1,23	4,51
4	18-Mar	CBM	4	4 FCA200	1,23	0,66	2,88	3,71	1,34	4,25
5	19-Mar	CBM	4	4 FCA200	1,62	0,56	3,08	7,52	1,71	5,11
6	20-Mar	CBM	4	4 FCA200	1,48	0,44	2,5	5,46	1,42	3,53
7	23-Mar	CBM	4	4 FCA200	1,35	0,55	3,58	4,75	1,18	3,81
8	24-Mar	CBM	4	4 FCA200	1,75	0,97	2,87	4,78	1,71	4,91
9	25-Mar	CBM	4	4 FCA200	1,32	0,6	2,66	5,62	1,33	4,64
10	26-Mar	CBM	4	4 FCA200	1,41	0,56	3,73	5,6	1,55	4,52
11	27-Mar	CBM	4	4 FCA200	2,01	0,82	2,81	4,84	1,34	4,09
12	30-Mar	CBM	4	4 FCA200	1,34	0,68	2,88	4,67	1,43	4,85
13	31-Mar	CBM	4	4 FCA200	1,62	0,6	2,72	5,11	1,37	4,51
14	01-Apr	CBM	4	4 FCA200	1,42	0,71	2,28	5,01	1,52	4,21
15	02-Apr	CBM	4	4 FCA200	1,71	0,64	2,48	4,99	1,51	4,87
16	03-Apr	CBM	4	4 FCA200	1,5	0,56	2,24	4,81	1,11	4,21
17	06-Apr	CBM	4	4 FCA200	1,57	0,75	2,19	4,88	1,39	4,42



Gambar 2. Tren vibrasi Bearing 1.

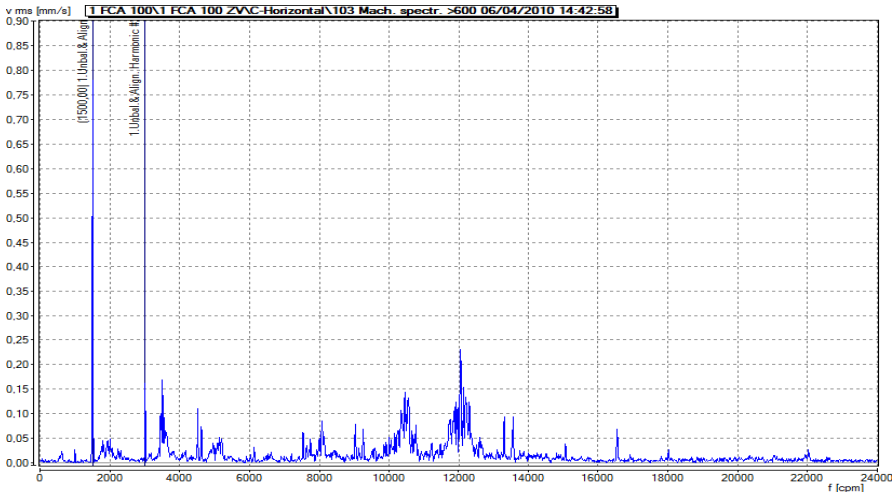
Tren Bearing 1 menunjukkan kondisi yang relatif stabil dengan amplitudo rendah sepanjang periode pengamatan. Nilai maksimum 2,01 mm/s terjadi pada 27 Maret dan tidak menunjukkan pola kenaikan berkelanjutan setelah titik tersebut. Pola ini memberikan pembanding penting terhadap Bearing 2 karena kedua bearing berada pada mesin dan lingkungan operasi yang sama. Perbedaan yang konsisten antara kedua bearing memperkuat dugaan bahwa sumber anomali lebih terlokalisasi pada Bearing 2 daripada berasal dari perubahan umum kondisi operasi FD Fan. Oleh karena itu, Bearing 1 dapat digunakan sebagai referensi relatif untuk mengevaluasi perubahan kondisi Bearing 2.



Gambar 3. Tren vibrasi Bearing 2.

Bearing 2 menunjukkan variasi amplitudo yang lebih tinggi dibandingkan Bearing 1, dengan nilai maksimum 7,52 mm/s dan beberapa titik pengukuran berada di atas 5 mm/s. Kondisi ini menunjukkan adanya degradasi yang lebih nyata dan konsisten dengan kebutuhan investigasi lanjutan menggunakan analisis spektrum. Literatur

menunjukkan bahwa analisis domain frekuensi dapat membantu membedakan karakteristik fault pada bearing dan meningkatkan ketepatan diagnosis dibandingkan hanya menggunakan nilai RMS [3], [4]. Spektrum yang diperoleh pada pengukuran Bearing 2 selanjutnya digunakan sebagai bukti pendukung terhadap indikasi kelonggaran mekanis. Dengan mempertimbangkan tren dan spektrum secara bersamaan, rekomendasi yang paling tepat adalah mempertahankan monitoring sampai tersedia kesempatan outage untuk inspeksi atau penggantian komponen.



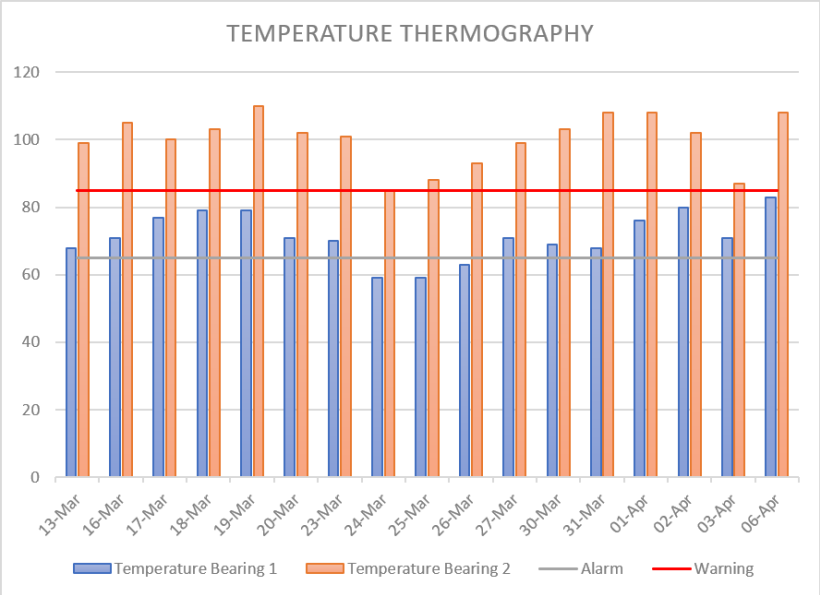
Gambar 4. Spektrum vibrasi Bearing 2.

Spektrum Bearing 2 memperlihatkan komponen frekuensi yang digunakan sebagai dasar interpretasi indikasi kelonggaran mekanis pada sistem bearing. Namun, diagnosis *mechanical looseness* tidak seharusnya hanya didasarkan pada satu puncak spektrum tanpa mempertimbangkan konfigurasi mesin, kecepatan putar, kondisi dudukan, dan histori pengukuran. Karena itu, penelitian ini menggunakan pendekatan konfirmasi silang dengan termografi, ultrasound, dan inspeksi pascapembongkaran. Pendekatan tersebut sejalan dengan prinsip condition monitoring yang menempatkan data sensor sebagai dasar diagnosis yang harus dikaitkan dengan konteks mesin dan mode kegagalannya [1], [9]. Hasil inspeksi fisik pada bagian selanjutnya memberikan bukti tambahan yang memperkuat interpretasi tersebut.

3.2. Hasil Analisis Termografi Inframerah

Pengukuran termografi menunjukkan perbedaan temperatur yang konsisten antara kedua bearing selama 17 kali pengamatan. Temperatur Bearing 1 berada pada rentang 59–83 °C dengan rata-rata 71,41 °C, sedangkan Bearing 2 berada pada rentang 85–110 °C dengan rata-rata 100,06 °C. Selisih temperatur rata-rata mencapai 28,65 °C dan selisih maksimum mencapai 40 °C, sehingga anomali pada Bearing 2 tidak hanya muncul pada satu titik waktu. Setelah tindakan greasing pada 24 Maret, temperatur Bearing 2 turun dari 101 °C menjadi 85 °C, tetapi kemudian meningkat kembali hingga 108 °C

pada akhir periode pengamatan. Pola penurunan sementara kemudian kenaikan kembali mengindikasikan bahwa pelumasan dapat memengaruhi temperatur, tetapi tidak sepenuhnya menghilangkan penyebab degradasi.



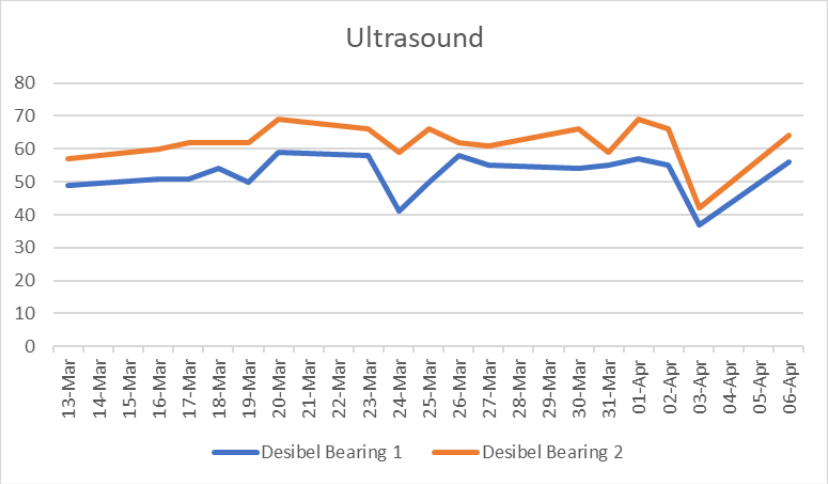
Gambar 5. Tren temperatur termografi bearing.

Kenaikan temperatur pada Bearing 2 dapat berkaitan dengan peningkatan gesekan, degradasi pelumas, kondisi pemasangan, atau kerusakan mekanis, sehingga temperatur tidak dapat digunakan secara tunggal untuk menentukan akar masalah. Penelitian mengenai termografi bearing menunjukkan bahwa informasi temperatur dan citra termal memiliki potensi untuk menilai kondisi kesehatan bearing secara non-kontak [6], [7]. Dalam konteks penelitian ini, bukti terpenting adalah konsistensi perbedaan temperatur terhadap Bearing 1 serta respons setelah greasing. Jika temperatur kembali meningkat setelah pelumasan, maka pemeriksaan fisik terhadap kondisi grease, bearing, housing, dan kesesuaian pemasangan menjadi lebih penting daripada sekadar menambah pelumas. Dengan demikian, hasil termografi memperkuat kebutuhan inspeksi terencana pada Bearing 2.

3.3. Hasil Analisis Ultrasound

Hasil pengukuran ultrasound memperlihatkan bahwa level Bearing 2 secara umum lebih tinggi dibandingkan Bearing 1. Rata-rata level Bearing 1 adalah 52,35 dB, sedangkan Bearing 2 mencapai 61,88 dB, dengan selisih rata-rata sekitar 9,53 dB. Nilai tertinggi Bearing 2 mencapai 69 dB, sementara nilai terendah 42 dB terjadi pada 3 April setelah periode sebelumnya dilakukan greasing. Data tersebut menunjukkan adanya variasi kondisi pelumasan dan/atau gesekan internal yang perlu dibaca bersama tren

vibrasi dan temperatur. Karena respons ultrasound sangat dipengaruhi oleh posisi sensor, kondisi permukaan, dan karakteristik alat, interpretasi dalam penelitian ini menggunakan perbandingan antar-bearing dan tren waktu, bukan ambang dB universal [8].



Gambar 6. Tren level ultrasound bearing.

Nilai ultrasound yang lebih tinggi pada Bearing 2 menunjukkan bahwa komponen tersebut menghasilkan energi akustik yang lebih besar dibandingkan Bearing 1 selama sebagian besar periode pengamatan. Kondisi ini konsisten dengan hipotesis adanya peningkatan gesekan atau gangguan pelumasan, tetapi belum cukup untuk menetapkan jenis kerusakan tanpa bukti tambahan. Studi mengenai pemantauan bearing dengan ultrasound menunjukkan bahwa sinyal ultrasonik dapat digunakan sebagai informasi pendukung untuk kondisi pelumasan dan deteksi kondisi bearing [8]. Dalam penelitian ini, penurunan sesaat setelah greasing kemudian diikuti kenaikan kembali memberikan indikasi bahwa perbaikan pelumasan saja belum menyelesaikan sumber masalah. Oleh karena itu, ultrasound berfungsi paling kuat sebagai teknologi konfirmasi ketika dibaca bersama vibrasi, temperatur, dan inspeksi fisik.

3.4. Integrasi Multi-Teknologi

Integrasi hasil menunjukkan pola yang saling mendukung antara ketiga teknologi pemantauan. Vibrasi mengidentifikasi peningkatan amplitudo dan indikasi kelonggaran mekanis pada Bearing 2, termografi menunjukkan temperatur yang secara konsisten lebih tinggi, sedangkan ultrasound menunjukkan level akustik yang lebih tinggi dan respons sementara terhadap greasing. Ketiga indikator tersebut mengarah pada satu komponen yang sama sehingga meningkatkan keyakinan bahwa anomali bukan sekadar variasi pengukuran. Literatur condition-based maintenance menekankan pentingnya pemanfaatan informasi kondisi aktual untuk menentukan kebutuhan intervensi dan mengurangi ketergantungan pada interval waktu tetap [2], [9]. Dalam kasus ini,

integrasi data digunakan untuk menetapkan prioritas inspeksi Bearing 2 pada periode outage.

Tabel 3. Integrated multi-technology diagnosis.

No	Parameter	Temuan utama	Rekomendasi
1	Vibration	Bearing 2 memiliki rata-rata 5,00 mm/s dan maksimum 7,52 mm/s; spektrum mendukung indikasi kelonggaran mekanis.	Monitoring tren dan inspeksi bearing saat maintenance outage.
2	Infrared thermography	Temperatur Bearing 2 rata-rata 100,06 °C, sekitar 28,65 °C lebih tinggi dari Bearing 1; greasing hanya memberi penurunan sementara.	Periksa kondisi grease, bearing, housing, dan sistem pemasangan.
3	Ultrasound	Level Bearing 2 rata-rata 61,88 dB, lebih tinggi 9,53 dB daripada Bearing 1; nilai kembali meningkat setelah penurunan sementara.	Evaluasi pelumasan dan kondisi mekanis dengan inspeksi langsung.
4	Visual inspection	Grease mengeras dan terdapat area aus gelap pada outer ring setelah pembongkaran.	Jadwalkan penggantian/repair bearing dan evaluasi penyebab kontaminasi atau looseness.

4 Kesimpulan

Penelitian berhasil mendiagnosis kondisi Bearing 2 pada Forced Draft Fan 4 FCA200 melalui integrasi vibrasi, termografi inframerah, ultrasound, dan inspeksi pascapembongkaran. Analisis vibrasi menunjukkan rata-rata Bearing 2 sebesar 5,00 mm/s dengan nilai maksimum 7,52 mm/s, jauh lebih tinggi daripada rata-rata Bearing 1 sebesar 1,50 mm/s dan didukung indikasi spektrum yang mengarah pada kelonggaran mekanis. Analisis termografi menunjukkan temperatur rata-rata Bearing 2 sebesar 100,06 °C, sedangkan Bearing 1 sebesar 71,41 °C, dengan selisih rata-rata 28,65 °C dan penurunan hanya sementara setelah greasing. Analisis ultrasound menunjukkan rata-rata Bearing 2 sebesar 61,88 dB dibandingkan 52,35 dB pada Bearing 1, sementara inspeksi fisik menemukan grease yang mengeras dan area aus pada outer ring sehingga memperkuat diagnosis adanya degradasi pelumasan dan masalah mekanis. Berdasarkan keseluruhan bukti, Bearing 2 direkomendasikan untuk inspeksi dan tindakan perbaikan atau penggantian terencana pada periode outage, disertai pencatatan baseline pascaperbaikan untuk mendukung pemantauan kondisi berikutnya.

5 Referensi

[1] Ahad Ali and Abdelhakim Abdelhadi, "Condition-Based Monitoring and Maintenance: State of the Art Review," Applied Sciences, vol. 12, no. 2, p. 688, 2022, doi: 10.3390/app12020688.

[2] Marcelo Romanssini, Paulo César C. de Aguirre, Lucas Compassi-Severo, and Alessandro G. Girardi, "A Review on Vibration Monitoring Techniques for Predictive Maintenance of Rotating Machinery," Eng, vol. 4, no. 3, pp. 1797–1817, 2023, doi: 10.3390/eng4030102.

[3] Davood Tahmasbi, Hossein Shirali, Seyyed Sajad Mousavi Nejad Souq, and Mohammadhossein Eslampanah, "Diagnosis and root cause analysis of bearing failure using vibration analysis techniques," Engineering Failure Analysis, vol. 158, p. 107954, 2024, doi: 10.1016/j.engfailanal.2023.107954.

[4] Chirag Mongia, Deepam Goyal, and Shankar Sehgal, "Vibration response-based condition monitoring and fault diagnosis of rotary machinery," Materials Today: Proceedings, vol. 50, pp. 679–683, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2021.04.395.

[5] ISO, "ISO 20816-3:2022, Mechanical vibration—Measurement and evaluation of machine vibration—Part 3: Industrial machinery with a power rating above 15 kW and operating speeds between 120 r/min and 30 000 r/min," International Organization for Standardization, 2022.

[6] Ankush Mehta, "Machine Learning-Based Fault Diagnosis of Self-Aligning Bearings for Rotating Machinery Using Infrared Thermography," Mathematical Problems in Engineering, vol. 2021, Article ID 9947300, 2021, doi: 10.1155/2021/9947300.

[7] Anurag Choudhary, Tauheed Mian, and Shahab Fatima, "Convolutional neural network based bearing fault diagnosis of rotating machine using thermal images," Measurement, vol. 176, p. 109196, 2021, doi: 10.1016/j.measurement.2021.109196.

[8] Bart Scheeren, Miroslaw Lech Kaminski, and Lotfollah Pahlavan, "Evaluation of Ultrasonic Stress Wave Transmission in Cylindrical Roller Bearings for Acoustic Emission Condition Monitoring," Sensors, vol. 22, no. 4, p. 1500, 2022, doi: 10.3390/s22041500.

[9] Anuj Kumar Goel, Gurmeet Singh, and Vallayil Narayana Achutha Naikan, "A Methodology for Selection of Condition Monitoring Techniques for Rotating Machinery," International Journal of Prognostics and Health Management, vol. 13, no. 2, 2022, doi: 10.36001/ijphm.2022.v13i2.3205.

[10] S. Gawde-Prabhudesai, S. Patil, SatishKumar, P. Kamat, K. Kotecha, and A. Abraham, "Multi-fault diagnosis of Industrial Rotating Machines using Data-driven approach: A review of two decades of research," Engineering Applications of Artificial Intelligence, vol. 123, p. 106139, 2023, doi: 10.1016/j.engappai.2023.106139.

[11] Oguzhan Das, Duygu Bagci Das, and Derya Birant, "Machine learning for fault analysis in rotating machinery: A comprehensive review," Heliyon, vol. 9, no. 6, e17584, 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e17584.

[12] Panagiotis Mallioris, Eirini Aivazidou, and Dimitrios Bechtsis, "Predictive maintenance in Industry 4.0: A systematic multi-sector mapping," CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, vol. 50, pp. 80–103, 2024, doi: 10.1016/j.cirpj.2024.02.003.