

DETEKSI CACAT BANTALAN GELINDING DENGAN ANALISIS SPEKTRUM VIBRASI: STUDI KASUS DI PERUSAHAAN PETROKIMIA

F. Luthfie¹, Triyono¹, dan Soeharsono¹

¹Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik Industri, Universitas Trisakti

E-mail: luthfie.fadjar@gmail.com

Abstrak-- Bantalan gelinding adalah komponen terpenting permesinan berputar dan harus mampu mempertahankan prestasi kerjanya dalam kondisi yang baik dan harus kukuh menahan beban saat beroperasi dengan minim gesekan. Ketika bantalan gelinding mengalami kerusakan atau gagal fungsi, hal ini akan mengganggu kinerjanya. Kerusakan bisa terjadi pada elemen bantalan gelinding, lintasan dalam atau lintasan luar dan sangkar elemen yang mengikatnya. Paper ini adalah studi kasus yang terjadi pada extruder di perusahaan petrokimia, di mana bantalan gelinding seri SKF-22334C yang dipasang mengalami kerusakan berulang dalam waktu yang relatif singkat. Agar kerusakan tidak terulang lagi, diperlukan analisis vibrasi yang komprehensif. Tujuan utama analisis ini adalah untuk mengetahui lebih detail tentang kerusakan bantalan gelinding dengan menggunakan analisis spektrum vibrasi. Spektrum vibrasi didapatkan dari hasil pengukuran karakteristik bantalan gelinding dalam domain waktu atau frekuensi, pada arah radial. Semakin besar spektrum vibrasi, semakin parah kerusakan atau cacat bantalan gelinding. Metode penelitian yang digunakan adalah mengumpulkan data vibrasi dalam kurun waktu 7 bulan dan analisis menggunakan perangkat lunak shock pulse method (SPM) serta olah data dengan CondMaster. Torsi beban yang diijinkan 1.818.133 kgf.mm, sedangkan perhitungan torsi beban aktual yang terjadi 3.905.866,67 kgf.mm. Hasil analisis mengisyaratkan kerusakan atau cacat bantalan gelinding dikarenakan oleh beban lebih yang bekerja secara cyclic.

Kata kunci: Bantalan gelinding, kerusakan bantalan gelinding, spektrum vibrasi, cacat bantalan gelinding, shock pulse method (SPM)

Abstract-- Rolling bearings is the most important components of rotating machinery and must be able to maintain its performance in good condition and must be strong enough to withstand loads when operating with minimal friction. When rolling bearings are damaged or malfunction, this will disrupt their performance. Damage can occur in rolling element bearing (REB), inner or outer raceways and cages. This paper is a case study that occurred in an extruder at a petrochemical company, where the SKF-22334C series rolling bearings installed and experienced repeated damage in a relatively short time. So that damage does not happen again, a comprehensive vibration analysis is needed. The main aim of this analysis is to find out more details about the bearing failures by using vibration's spectrum analysis. The spectrum is obtained from the results of measuring the characteristics of rolling bearing in the time or frequency domains, in the radial direction. The greater the vibration spectrum, the more severe the bearing defects. The research method used was collecting vibration data over a period of 7 months and performed analyzing by using shock pulse method (SPM) software and processing the data by applying CondMaster. The allowed load torque is 1,818,133 kgf.mm, while the actual calculated load torque is 3,905,866.67 kgf.mm. The result indicates that the bearing defect is caused by cyclic in overload.

Keywords: Rolling bearings, Rolling bearings damage, Vibration spectrum, Rolling bearing defects, Shock pulse methods (SPM)

1. PENDAHULUAN

Bantalan gelinding adalah elemen penting yang difungsikan untuk menopang poros atau rotor pada permesinan yang berputar. Maksud dan tujuannya adalah agar energi tidak banyak hilang saat beroperasi dengan minim gesekan antar benda padat yang menggelinding secara relatif [1]. Prestasi kerja bantalan gelinding harus tetap dipertahankan

dalam kondisi sehat. Oleh karena itu ahli teknik (*engineer*) harus mampu memilihnya sesuai aplikasi kerjanya.

Paper ini membahas studi kasus tentang kegagalan bantalan gelinding yang dipasangkan pada *extruder* LCM-270G di perusahaan petrokimia, karena terjadi kegagalan berulang pada 5 tahun terakhir yang berakibat berhentinya pabrik tanpa

perencanaan yang memadai (*unplanned shutdown*). Banyak aspek kerugian yang diderita akibat kegagalan ini, antara lain, ekonomi yang berdampak pada isu finansial negatif dan kesempatan produksi. Secara komprehensif belum ada laporan-laporan khusus yang membahas apa penyebab kegagalannya. Dampak lebih serius adalah cadangan produksi menipis dan biaya perawatan membengkak [2]. Oleh karena itu, sangat penting bantalan gelinding beroperasi dalam kondisi prima.

Karakter *extruder* ini unik, dengan tanpa mengubah komponen-komponen penting, dipacu dengan eskalasi kapasitas 40% lebih tinggi dari standar pabrikan 10 ton/jam. Beberapa parameter penting bisa dianalisis untuk mendapatkan akar masalah kegagalan bantalan gelinding. Salah satu metode yang paling banyak digunakan adalah analisis spektrum yang dihasilkan oleh pengukuran vibrasi [3], di mana sinyal-sinyal vibrasi ditangkap dalam arah vertikal, horizontal dan aksial [4]. Spektrum bisa berwujud BPFO, BPF1 atau BSF. Tujuan *paper* ini adalah untuk mengetahui penyebab utama kerusakan atau gagal fungsi bantalan gelinding, agar kerusakannya tidak terulang lagi, sekaligus penerapan *condition monitoring* menjadi program unggulan tim pemeliharaan prediktif (*predictive maintenance*).

BPFO adalah *ball pass frequency outer* atau frekuensi kegagalan yang terjadi pada lintasan luar; BPF1 adalah *ball pass frequency inner* atau frekuensi kegagalan yang terjadi pada lintasan dalam. Secara fisik berhubungan dengan jumlah *REB* yang melewati suatu titik tertentu pada lintasan luar/dalam setiap kali poros melakukan putaran penuh. BSF adalah *ball spin frequency* atau frekuensi kegagalan yang terjadi pada *REB*.

Kecepatan mesin, *RPM* (*revolution per minute*) adalah sangat penting dalam hal pengambilan data vibrasi. Bila kecepatan mesin berubah-ubah, maka hasil spektrumnya akan distorsi [5]. Beberapa penelitian sebelumnya, hanya membahas kegagalan bantalan gelinding dengan tanpa mendapat beban berat, yang melebihi kapasitasnya. Penelitian tentang cacat bantalan gelinding yang sengaja dibuat cacat pada lintasan dalam (*inner raceway*) menghasilkan spektrum berhimpit pada frekuensi 1XRPM [6].

Dengan menganalisis spektrum, cacat lokal bantalan gelinding yang terjadi pada lintasan dalam, menghasilkan kelipatan frekuensi BPF1 yang harmonik lebih kecil dibandingkan lintasan luar [7], karena sempitnya akses pelumas menuju *REB*. Oleh karena itu, cacat lokal bantalan gelinding didominasi terjadi pada lintasan dalam.

Beban lebih disertai *cyclic* secara nyata mengakibatkan kelonggaran terkadang sampai melewati batas toleransi yang diizinkan. sehingga menyebabkan harmonik berulang (*multiple harmonic*) [8]. Kelonggaran ini terjadi karena benturan/kontak antara benda berputar dan diam oleh sebab beban radial [9]. Benturan juga memperburuk secara cepat fungsi bantalan gelinding yang bekerja dengan kecepatan gelinding yang rendah, lantaran lapisan film berangsur-angsur hilang [10]. Maka, semakin lama *cyclic* berlangsung, semakin memperburuk kondisi bantalan gelinding. Semakin buruk kondisi bantalan gelinding, semakin tinggi temperatur kerjanya.

Teknologi pelumasan modern telah dikaji di dalam konsep tribologi. Lebih luas lagi tribologi adalah ilmu pengetahuan yang mengupas masalah gesekan (*friction*) dan keausan (*wear*). Pada mekanisme permesinan, dengan pelumasan yang benar dan tepat pada bantalan gelinding, di samping akan mengurangi gesekan dan keausan, dapat juga menjaga temperatur kerja [11]. Kuantitas pelumas menentukan ketebalan lapisan film pelumasan. Semakin tipis lapisan film, semakin cepat terjadi kemerosotan fungsi hingga terjadi kontak logam-ke-logam. Pada titik ekstrem, hilangnya pelumas pada permukaan akan menyerap tenaga/energi mesin hampir 20% [12]. Maka, bisa diprediksi akibat lanjutan adalah kerusakan fatal hingga cacat permanen pada bantalan gelinding.

2. Metode Penelitian

Metode analisis vibrasi bantalan gelinding yang sangat populer dalam domain frekuensi adalah paling banyak dipraktikkan, karena hampir 100% dinamika perubahan mempengaruhi kegagalan mesin [13]. Dalam banyak hal domain frekuensi memberikan informasi lebih rinci dibandingkan domain waktu. Informasi tentang cacat bantalan gelinding terjadi, di antaranya ketidakseimbangan, ketidaksejajaran, eksentrik, cacat lokal, akan menghasilkan vibrasi lebih tinggi dari kondisi normal [14],

artinya spektrumnya pun akan lebih tinggi pada frekuensi tertentu (tetap). Pada penelitian ini dilakukan di perusahaan petrokimia rentang waktu Desember 2019 hingga Juli 2020.

Frekuensi bantalan gelinding bisa didapatkan secara teoritis, antara lain dengan kalkulasi sebagai berikut [15]

$$BPFO (Hz) = S \left(\frac{N}{2} \right) \left(1 - \frac{B}{P} \cos \theta \right) \quad (1)$$

$$BPFI (Hz) = S \left(\frac{N}{2} \right) \left(1 + \frac{B}{P} \cos \theta \right) \quad (2)$$

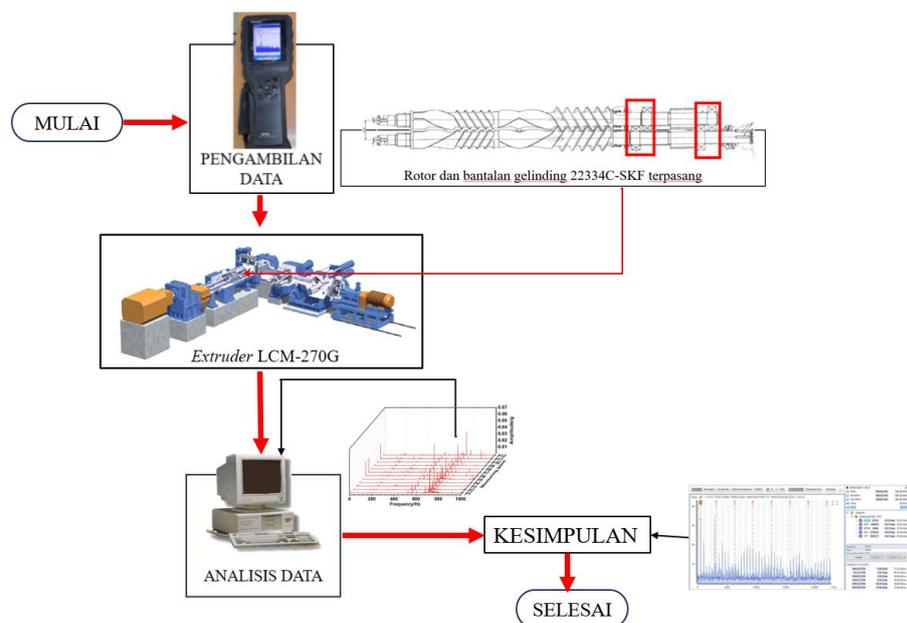
$$BSF (Hz) = S \left(\frac{P}{2B} \right) \left(1 - \frac{B^2}{P^2} \cos^2 \theta \right) \quad (3)$$

Di mana, S adalah kecepatan [rpm], N adalah jumlah buah bantalan gelinding, B adalah diameter REB [mm], P adalah diameter $pitch$ [mm], dan θ adalah sudut kontak.

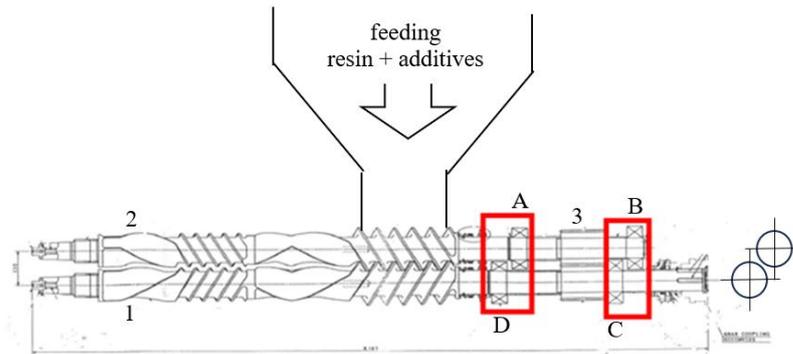
Kasus gagal fungsi bantalan gelinding pada extruder LCM-270G dimulai dari ada suara liar (noise) di sekitar mesin. Dengan menggunakan alat vibration meter, shock pulse method (SPM) data vibrasi mesin diambil. Secara sederhana alur metodologi analisis kegagalan bantalan, seperti pada Gambar 1. Pengambilan data pada posisi radial tepat di atas rumah bantalan gelinding, dimana bantalan gelinding terpasang pada rotor.

Data vibrasi satu-per-satu diunggah ke dalam komputer dengan bantuan perangkat lunak CondMaster. Dilengkapi dengan filter, datavibrasi diekstrak untuk dianalisis karakter vibrasinya.

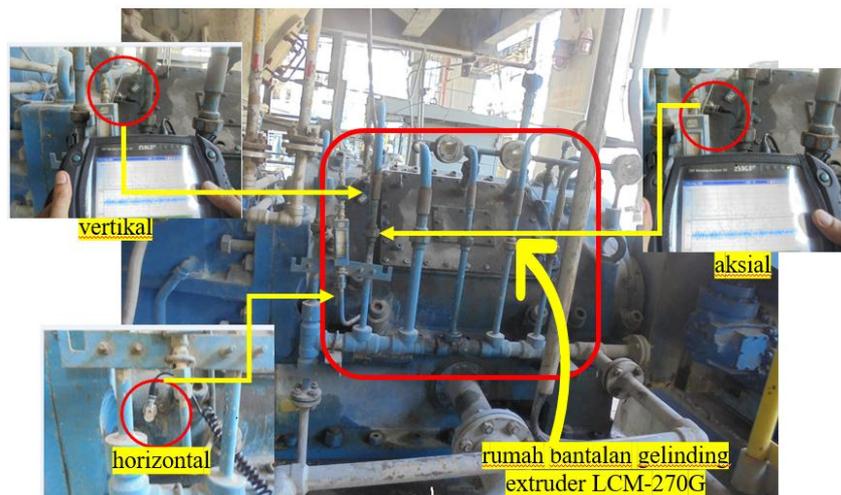
Keluarannya (output) berupa grafik dan spektogram yang menjelaskan lebih lanjut tentang frekuensi, amplitudo dan sifat vibrasi. Pada kasus ini data vibrasi diambil saat beban puncak 14 ton/jam.



Gambar 1. Alur metode penelitian



Gambar 2. Konstruksi bantalan gelinding (kotak merah) yang terpasang pada rotor

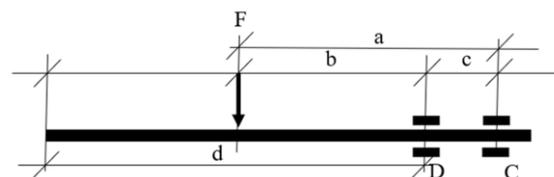


Gambar 3. Posisi akselerator saat pengambilan data di lapangan

Konstruksi rotor *extruder* LCM-270G seperti ditampakkan pada Gambar 2, secara sederhana susunan *rotor* (1) berfungsi sebagai *rotor* penggerak yang dihubungkan langsung dengan motor *drive*. Sepasang *timing gear* (3) meneruskan daya dan putaran ke *rotor* (2) dengan rasio 1:1 [16]. Dua pasang bantalan gelinding seri 22334C ditandai dengan A, B, C dan D. Bantalan gelinding D telah mengalami gagal fungsi 2 kali dalam kurun waktu 5 tahun dan hanya bantalan ini yang dilakukan penelitian.

Posisi pengambilan data di lapangan seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Pada setiap posisi, dibutuhkan waktu 2 menit atau sampai data yang masuk dianggap stabil. Identifikasi diperlukan agar tidak ada kesalahan data. Untuk mencegah *error* saat pemindahan data, maka diambil langkah setiap selesai pengambilan data mesin krusial, langsung dilakukan pemindahan ke komputer untuk analisis lebih lanjut dan detail.

Langkah berikutnya adalah menguji kerusakan bantalan gelinding karena beban lebih. Secara sederhana mekanika strukturnya seperti pada Gambar 4. Gaya yang bekerja diasumsikan merata di sepanjang *pedestal* tanpa tumpuan, sehingga bantalan yang lebih dulu mengalami kemerosotan fungsi (*deterioration*) adalah bantalan gelinding D.



Gambar 4. Mekanika Struktur

Distribusi beban pada bantalan gelinding D, sebagai berikut:

$$F_{tot} = F_1 + F_2 \tag{4}$$

$$F_1 = \frac{a}{c} K \tag{5}$$

$$M_a = F * b = (K + m)b \tag{6}$$

$$M_b = 974,000 H/n \tag{7}$$

Di mana, C adalah identitas bantalan gelinding 1, D adalah identitas bantalan gelinding 2, F adalah gaya beban rata-rata pada jarak d [kgf]. Lebih lanjut, a adalah jarak senter antara bantalan gelinding C dan pusat gaya F [mm], b adalah jarak senter antara bantalan gelinding D dan pusat gaya F [mm], c adalah jarak antara senter bantalan gelinding C dan D [mm], dan d adalah jarak antara senter bantalan gelinding D dan ujung rotor [mm]. Sedangkan massa rotor m adalah 2.120 kg, Ma adalah torsi pembebanan saat beroperasi [kgf.mm], Mb adalah torsi yang diaplikasikan [kgf.mm], H adalah daya yang ditransmisikan [kW], n adalah kecepatan [min-1] dan K adalah massa saat beroperasi sebesar 14.000 kgf.

Umur bantalan gelinding diformulasikan [17], [18]:

$$L_{10} = \frac{10^6}{60 n} \left(\frac{C_R}{P_A} \right)^p \tag{8}$$

Di mana L_{10} adalah umur bantalan gelinding untuk masa keandalan 90%, n adalah putaran mesin [min⁻¹], C_R adalah peringkat beban dasar [kgf], P_A adalah gaya tangensial pada bantalan [kgf], dan nilai $p = 10$ (untuk *ball bearing*) dan $p = 10/3$ (untuk *roller bearing*).

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Analisis Spektrum Vibrasi

Pabrikasi *extruder* merekomendasikan bantalan gelinding sesuai kapasitas desain awal 10 ton/jam. Pemasangannya merujuk pada prosedur yang diterbitkan oleh pabrik. Tipe bantalan yang diteliti ditunjukkan pada Tabel 1 dan spesifikasi *extruder* LCM-270G seperti pada Tabel 2.

Tabel 1. Spesifikasi bantalan gelinding

Item	Unit	Value
Nama bantalan		SKF-22334C
Pabrikasi		Jepang
Diameter Dalam	mm	170
Diameter luar	mm	360
Lebar	mm	120
Cage type		Brass
Seal / Shield		Open Type
Toleransi	micron	Standard (30)
Peringkat	Beban kN	1500

Dinamis			
Peringkat	Beban	kN	2110
Statis			

Tabel 2. Spesifikasi *extruder*

Nama Mesin	<i>Extruder</i> LCM-270G
Susunan Rotor	Diagonal
Penggerak Utama	Motor A/C 2,8 MW
Transmisi	<i>Gear Coupling</i>
Kecepatan Putar / Rasio	Motor: 1500 rpm; <i>Extruder</i> : 500 rpm; Rasio: 1/3

Spektrum BPFO

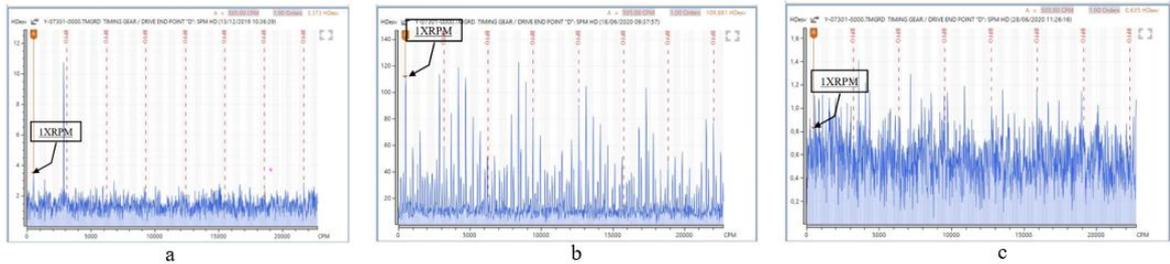
Analisis spektrum Gambar 5. Frekuensi 3126,4 Hz terjadi pada 6,19XRPM dengan tinggi amplitudo 5,34 HD (5a). 1XRPM tinggi amplitudo 109,88, 2XRPM dan 3XRPM tidak ada wujudnya (5b). Ada harmonik, tetapi tidak mengindikasikan ada cacat lintasan luar. Amplitudo terlihat sangat kecil, setelah penggantian bantalan gelinding (5c).

Spektrum BPFI

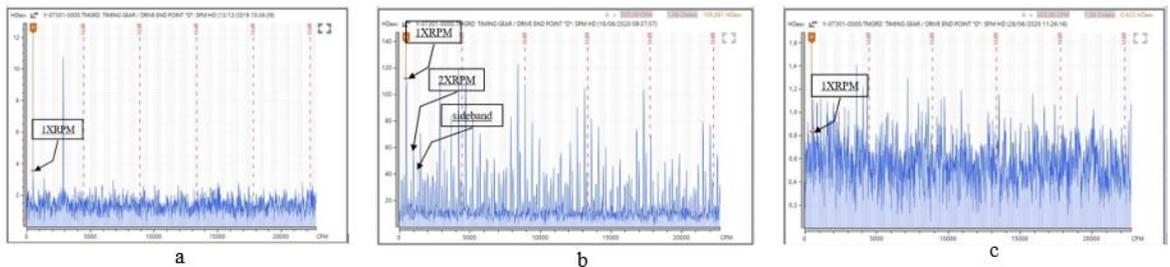
Analisis spektrum Gambar 6. Frekuensi 4448,54 Hz, terjadi pada 8,81XRPM dengan tinggi amplitudo 4,47 HD (6a). 1XRPM tinggi amplitudo 109,88 HD, 1XRPM dan 2XRPM tampak jelas (6b). Ada harmonik, didominasi tepat pada puncak amplitudo. Diduga ada cacat lokal pada lintasan dalam. Ciri-ciri spektrumnya identik sama dengan "Typical Bearing Defect and Spectrum Identification", [19]. Amplitudo terlihat sangat kecil, setelah penggantian bantalan gelinding (6c).

Spektrum BSF

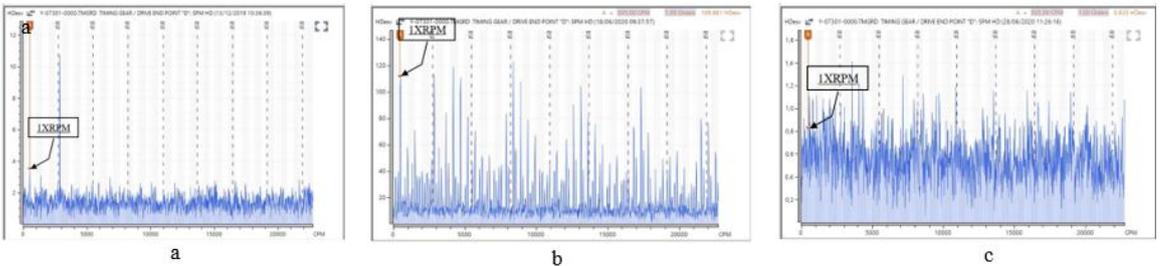
Analisis spektrum Gambar 7. Frekuensi 2736,09 Hz, terjadi pada 5,42XRPM dengan tinggi amplitudo 5,65 HD (7a). 1X RPM tinggi amplitudo 109,88 HD, 1XRPM dan 2X RPM tidak tampak jelas (7b). Ada harmonik, tetapi tidak mengindikasikan ada cacat REB. Amplitudo terlihat sangat kecil, setelah penggantian bantalan gelinding (7c). Amplitudo tinggi pada frekuensi yang tepat atau berhimpit mendekati BPFI pada bantalan gelinding mengisyaratkan ada cacat lokal pada lintasan dalam. Cacat ini mempunyai karakter yang selalu disertai amplitudo *sideband* pada kelipatan kecepatannya (harmoniknya). Akibat modulasi frekuensi harmonik, amplitudo *sideband* terkadang mendekati BPFI, hanya berbeda tingginya. Adanya *sideband* inilah sehingga dipastikan pada lintasan dalam telah terjadi bentukan cacat. Pada kasus bantalan gelinding seri SKF-22334C, spektrum *envelope* terlihat nyata.



Gambar 5. Spektrum BPFO



Gambar 6. Spektrum BPF1



Gambar 7. Spektrum BSF

Merujuk pada “*Typical Bearing Defects and Spectral Identification*” spektrum BPF1 (6b) tampak 1XRPM dan 2XRPM terlihat jelas, maka dipastikan ada cacat lokal pada lintasan dalam. Perbedaan spektrum-spektrumnya dirangkum dalam spektrogram *waterfall* pada Gambar 8, dimana ada perbedaan sangat tajam antara kondisi bantalan gelinding saat mengalami gagal fungsi dan kondisi baru. Hasil analisis terbukti dengan adanya cacat lokal bantalan gelinding pada lintasan dalam, ditunjukkan pada Gambar 9.

3.2. Analisis Beban Lebih

Investigasi selanjutnya adalah menghitung beban aktual saat beroperasi pada kapasitas *extruder* 14 ton/jam, dengan waktu tinggal (*residence time*) di dalam *rotor* diasumsikan sama dengan desain inisial kapasitas. Secara sederhana mekanika strukturnya seperti pada Gambar 4. Gaya yang bekerja diasumsikan merata di sepanjang *pedestal* tanpa tumpuan, sehingga bantalan yang lebih dulu mengalami

kemerosotan fungsi (*deterioration*) adalah bantalan gelinding D.

Hasil perhitungan, beban yang diizinkan oleh bantalan gelinding 22334C adalah $M_b = 1.818.133 \text{ kgf.mm}$. $M_a = 3.905.866,67 \text{ kgf.mm}$, sehingga: $M_a \gg M_b$ artinya, terjadi kelebihan beban kerja (*overload*). Lebih lanjut, distribusi beban pada bantalan gelinding D adalah posisi yang tidak menguntungkan secara ilmu mekanika.

Standar baku SKF memberikan batasan *load rating* 139.000 kgf, [19] sehingga umur bantalan gelinding bekerja dengan kapasitas produksi normal, secara ideal bisa mencapai 11,34 tahun. Tetapi ketika beroperasi pada kapasitas produksi 40% lebih tinggi, umurnya hanya mencapai 5,478 tahun.

Penelitian-penelitian sebelumnya pada bantalan gelinding dengan pembebanan, ukuran dan kecepatan yang bervariasi terhadap kombinasi arah radial dan aksial, memberikan hasil beban lebih berimplikasi terjadinya kelonggaran (*looseness*) [20].

Penelitian yang lainnya, menghasilkan adanya beban eksternal arah radial dengan ukuran yang lebih besar sangat berpengaruh terhadap REB, sehingga mengakibatkan cacat pada REB [21]. Penelitian yang memadukan laboratorium dan aplikasi dengan pendekatan *design of experiment (DOE)* menyimpulkan pembebanan eksternal mengakibatkan bantalan gelinding cacat pada lintasan luar [22].

4. Kesimpulan

Spektrum vibrasi sangat efektif dan efisien sebagai alat untuk menganalisis cacat lokal pada bantalan gelinding, yang terjadi pada REB, lintasan dalam/luar serta pengikat bantalan (*cage*). Kasus bantalan gelinding pada *extruder* LCM-270G, gagal fungsi sehingga terjadi cacat lintasan dalam akibat kapasitas produksi 40% lebih tinggi.

Umur bantalan gelinding tidak bisa dipastikan, tetapi bisa diprediksi sebelum terjadi kegagalan dengan penerapan perawatan prediktif di mana *condition monitoring* berperan aktif untuk mencegah kemerosotan fungsi bantalan gelinding. Beban *cyclic* berkontribusi sangat dominan menentukan umur bantalan gelinding.

Penggunaan pelumas dan sistem pelumasan yang benar berkontribusi pada umur servis bantalan gelinding lebih lama. Takaran yang tepat dan titik pelumasan sempurna, akan mendinginkan panas bantalan saat operasi, sehingga lapisan film tidak hilang karena beban berat dan putaran rotor yang lambat.

Optimalisasi program-program perawatan prediktif menjadi bagian penting untuk menganalisis bantalan sebelum terjadi gagal fungsi, terutama perhatian khusus pada bantalan gelinding D. Dengan memprediksi umur bantalan gelinding, ada banyak penghematan finansial.

Berdasarkan teori perhitungan umur bantalan gelinding dan untuk menghindari kerusakan mendadak (*breakdown*), sangat baik dilakukan: (1) pengambilan data vibrasi secara rutin oleh tim *condition monitoring* untuk bank data dan sekaligus contoh pelumas untuk dianalisis kandungannya, (2) merumuskan perencanaan penggantian bantalan gelinding mendekati 5 tahun masa servis. Perencanaan *budget* ini tentu

menghemat biaya perawatan, utilitas dan produksi dan (3) memberikan saran kepada Tim *Operations*, memperbaiki prosedur kerja, bilamana menaikkan kapasitas produksi dilakukan secara perlahan terhadap fungsi waktu. Tujuannya adalah untuk menghindari beban kejut yang berdampak serius terhadap fungsi bantalan gelinding.

Daftar Pustaka

- [1] A. Harnoy, *Bearing Design in Machinery - Engineering Tribology and Lubrication*. New York USA: Marcel Dekker, Inc, 2002.
- [2] S. Ravande, "Unplanned Downtime Costs More Than You Think," *Forbes Technology Council*, Jersey City, New Jersey., Feb. 22, 2022.
- [3] D. A. Paolo, G. Luigi, F. Alessandro, and M. Stefano, "Performance of Envelope Demodulation for Bearing Damage Detection on CWRU Accelerometric Data: Kurtogram and Traditional Indicators vs. Targeted a Posteriori Band Indicators," *Applied Science*, vol. 11, no. 6262, pp. 1–12, Jul. 2021.
- [4] Suhardjono, "Analisis Sinyal Getaran untuk Menentukan Jenis dan Tingkat Kerusakan Bantalan Bola (Ball Bearing)," *Jurnal Teknik Mesin - ITS*, vol. 7, no. 1, pp. 39–48, Apr. 2005.
- [5] T. Sundstrom, *An Introduction to the SPM HD Method*. Strangnas, Sweden: SPM Instrument AB, 2010.
- [6] T. Wahyudi, Soeharsono, and N. Eddy, "Mendeteksi Kerusakan bantalan dengan Menggunakan Sinyal Vibrasi," *Sinergi*, vol. 20, no. 2, pp. 123–128, Jun. 2016.
- [7] H. Saruhan, S. Saridemir, A. Çiçek, and Uygur, "Vibration Analysis of Rolling Element Bearings Defects ," *Journal of Applied Research and Technology*, vol. 12, pp. 384–395, Jun. 2014.
- [8] Y. Ming, J. Chen, and G. Dong, "Weak Fault Feature Extraction of Rolling Bearing Based on Cyclic Wiener Filter and Envelope Spectrum," *Mech Syst Signal Process*, vol. 2512, pp. 1773–1785, 2011.
- [9] S. Kostić, Z. Đorđević, M. Đorđević, and S. Jovanović, "Analysis of the Influence of Internal Radial Clearance on the Load Distribution of the Rolling Ball Bearing ," *Mobility & Vehicle Mechanics*, vol. 45, no. 2, pp. 15–25, Apr. 2019.
- [10] H. S. Cheng, "Introduction to Lubrication," in *ASM Handbook: Friction, Lubrication and Wear Technology*, 18th

- ed., vol. 1, H. S. Cheng, Ed., P. J. Blau, Ed., USA: ASM International, 1992.
- [11] K. P. Gertzos, P. G. Nikolakopoulos, A. C. Chasalevris, and C. A. Papadopoulos, "Wear Identification in Rotor -Bearing Systems by Measurements of Dynamic Bearing Characteristics," *Comput Struct*, vol. 89, pp. 55–66, 2011.
- [12] R. Ariyansah, D. Mugisidi, and O. Heriyani, *Teknologi Pelumasan*, 1st ed. Kota Solok, Indonesia: PT Mafy Media Literasi Indonesia, 2023.
- [13] L. M. C. LuisMiguelContreras-Medina, R. J. R. Troncoso, E. C. Yepez, J. J. R. Magdaleno, and J. R. M. Almaraz, "FPGA - Based Multiple - Channel Vibration Analyzer for Industrial Applications in Induction Motor Failure Detectionn," *IEEE TRANSACTIONSONINSTRUMENTATIONANDMEASUREMENT*, vol. 59, no. 1, pp. 63–72, Jan. 2010.
- [14] I. Muhlisin and R. Rusyadi, "Vibration Analysis on Rotating Machines using Fast Fourier Transform (FFT)," in *Annual Conference on Management and Information Technology*, Tangerang, Indonesia: Master of Information Technology Department, SGU, 2016, pp. 67–75.
- [15] S. A. McInerny and Y. Dai, "Basic Vibration Signal Processing for Bearing Fault Detection," *IEEE TRANSACTIONS ON EDUCATION*, vol. 46, no. 1, pp. 149–156, Feb. 2003.
- [16] Kobelco Pelletizing Team, "Technical Specification," Kobe, Japan, Apr. 1991.
- [17] PT NSK Bearings Manufacturing Indonesia, *Motion & Control NSK - Rolling Bearing*, 3rd ed. Jakarta: NSK Ltd, 2013.
- [18] Team Koyo JTEK, "Basic Bearing Knowledge," <https://koyo.jtekt.co.jp/en/support/bearing-knowledge/5-7000.html>.
- [19] SKF Team, Gothenburg, Sweden. *SKF Rolling Bearings*, (Oct. 2018).
- [20] A. Dindar, I. Hong, A. Garg, and A. Kahraman, "A Methodology to Measure Power Losses of Rolling Element Bearings under Combined Radial and Axial Loading Conditions," *Tribology Transaction*, pp. 1–34, Jun. 2021.
- [21] R. Tomovic, "Load Calculation of the Most Loaded Rolling Element for a Rolling Bearing with Internal Radial Clearance," *MPDI Applied Science*, vol. 10, no. 6934, pp. 1–18, Oct. 2020.
- [22] F. Immovilli and M. Cocconcelli, "Experimental Investigation of Shaft Radial Load Effect on Bearing Fault Signatures Detection," *IEEE Transaction on Industry Applications*, vol. 0093, no. 9994, pp. 1–9, 2016.