Journal of Innovative and Creativity
Journal Homepage: https://joecy.org/index.php/joecy
e-mail: journaljoecy@gmail.com

Faculty of Education
University of Pahlawan Tuanku Tambusai
ISSN 2775-771X (Online)
ISSN 2962-570X (Printed)
5 (2) 2025, Page: 4700-4715

Analisis Kerusakan Bearing Mesin Gerinda Berdiri melalui Spektrum Getaran dengan FFT Menggunakan Sensor MPU9250

Muhammad Farhan[1], Primawati[2], Delima Yanti Sari[3], Wanda Afnison[4], Resti Apriliyanti[5]
[1,2,3,4]Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Negeri Padang,
[5]Department of Informatics, Faculty of Engineering, Universitas Negeri Padang
Corresponding Author: Wardatus Solikhah, e-mail: wardatussetiyawan28@gmail.com

Published: May, 2025

ABSTRAK

Kerusakan pada bearing merupakan salah satu penyebab utama terganggunya performa mesin rotasi seperti mesin gerinda berdiri, terutama di lingkungan pendidikan vokasi yang masih menerapkan sistem pemeliharaan konvensional. Kerusakan yang tidak terdeteksi dini dapat menghambat jalannya praktikum dan mengurangi efektivitas proses pembelajaran. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kondisi bearing pada mesin gerinda berdiri melalui pendekatan pemeliharaan prediktif berbasis analisis getaran. Pengambilan data dilakukan menggunakan sensor akselerometer MPU9250 yang dipasang pada titik pengukuran horizontal, vertikal, dan aksial. Data getaran dikumpulkan dalam bentuk *time waveform* sebanyak 252.000 sampel selama 10 menit dengan laju pengambilan 420 sampel per detik. Data tersebut kemudian diolah menggunakan metode *Fast Fourier Transform* (FFT) melalui program Python untuk mendapatkan spektrum frekuensi. Hasil analisis menunjukkan adanya puncak amplitudo signifikan pada frekuensi dua kali Fundamental Train Frequency (2×FTF), yang mengindikasikan terjadinya kerusakan pada *cage bearing*. Temuan ini membuktikan bahwa analisis getaran dengan metode FFT mampu mengidentifikasi jenis kerusakan *bearing* secara spesifik. Penelitian ini membuktikan potensi penggunaan sensor *low-cost* dan metode pemrosesan sinyal digital sebagai solusi deteksi dini dalam strategi *predictive maintenance*, sekaligus mendukung penerapan teknologi industri ke dalam lingkungan pendidikan teknik.

Kata kunci: analisis getaran; *Fast Fourier Transform*; MPU9250; *bearing*; *predictive maintenance*

ABSTRACT

Bearing failure is one of the main causes of performance degradation in rotating machinery such as pedestal grinding machines, especially in vocational education environments that still rely on conventional maintenance systems. Undetected damage can hinder practicum activities and reduce the effectiveness of the learning process. This study aims to analyze the condition of bearings on a pedestal grinding machine using a predictive maintenance approach based on vibration analysis. Vibration data were collected using an MPU9250 accelerometer sensor installed in the horizontal, vertical, and axial directions. A total of 252,000 time waveform samples were recorded over 10 minutes with a sampling rate of 420 samples per second. The data were processed using the Fast Fourier Transform (FFT) method via Python to obtain the frequency spectrum. The results show a significant amplitude peak at twice the Fundamental Train Frequency (2×FTF), indicating damage to the bearing cage. These findings demonstrate that vibration analysis using FFT can identify specific types of bearing faults. This study highlights the potential of low-cost sensors combined with digital signal processing methods as a viable solution for early detection in predictive maintenance strategies, and supports the integration of industrial technology into technical education settings.

Keywords: *vibration analysis; Fast Fourier Transform; MPU9250; bearing; predictive maintenance*

© The Author(s). 2021 Open Access This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. To view a copy of this licence, visit http://creativecommons.org/licenses/by/4.0

PENDAHULUAN

Efisiensi operasional mesin menjadi faktor penting dalam menunjang produktivitas di era Industri 4.0, termasuk di dunia pendidikan vokasi yang menekankan kompetensi teknis melalui praktik langsung (Feri Febrian Syah & Endi Permata, 2023). Dalam konteks laboratorium teknik, keandalan mesin praktik sangat berperan terhadap kelancaran pembelajaran. Namun, hingga kini masih banyak laboratorium teknik di perguruan tinggi yang menerapkan metode pemeliharaan konvensional seperti breakdown maintenance dan preventive maintenance, yang bersifat reaktif dan belum mampu mendeteksi potensi kerusakan sejak dini (Eddy et al., 2017). Hal ini juga terjadi di Laboratorium Fabrikasi Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Negeri Padang, yang masih menggunakan sistem pemeliharaan tersebut untuk peralatan praktik, termasuk mesin gerinda berdiri.

Mesin gerinda berdiri yang digunakan di laboratorium tersebut merupakan unit tua yang diproduksi pada tahun 1938. Mesin ini terdiri dari motor induksi tiga fasa, poros, roda gerinda, dan bearing sebagai komponen utama yang menopang putaran (Ilham & Adzikra, 2024). Bearing memiliki peran penting dalam menjaga kestabilan rotasi dan sangat rentan terhadap kerusakan akibat keausan, pelumasan buruk, atau usia pakai (Hakim, 2021). Sayangnya, tidak ada sistem pemantauan kondisi bearing secara berkala di laboratorium, sehingga kerusakan sering tidak terdeteksi hingga menimbulkan gangguan operasional.

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, dibutuhkan pendekatan pemeliharaan yang lebih adaptif seperti predictive maintenance. Salah satu teknik utama dalam strategi ini adalah analisis getaran, yang terbukti mampu mendeteksi kerusakan mekanis pada tahap awal (Antoni et al., 2024). Arah pengukuran getaran—horizontal, vertikal, dan aksial—juga berpengaruh terhadap sensitivitas deteksi kerusakan (SPM, 2024). Setelah data getaran diperoleh, nilai Root Mean Square (RMS) digunakan sebagai indikator awal tingkat keparahan getaran, dan dievaluasi berdasarkan standar ISO 10816-3 (Amrullah, 2019; Nemani et al., 2022). Namun, karena nilai RMS bersifat umum, diperlukan analisis lanjutan menggunakan transformasi domain frekuensi.

Fast Fourier Transform (FFT) merupakan metode yang umum digunakan untuk mengubah data getaran dari domain waktu ke domain frekuensi. Dengan metode ini, komponen frekuensi dominan yang mengindikasikan jenis kerusakan spesifik pada bearing dapat diidentifikasi (Zhao et al., 2024). Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini dilakukan untuk mendeteksi dini kerusakan bearing pada mesin gerinda berdiri menggunakan analisis spektrum frekuensi melalui metode FFT.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kondisi bearing pada mesin gerinda berdiri melalui pendekatan predictive maintenance berbasis getaran, serta mengidentifikasi jenis kerusakan spesifik berdasarkan hasil transformasi frekuensi. Hasil penelitian ini diharapkan dapat mendukung peningkatan keandalan alat praktik di laboratorium dan memperkenalkan teknologi monitoring kondisi ke lingkungan pendidikan vokasi secara lebih aplikatif.

METODE PENELITIAN

Lokasi dan Objek Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium Fabrikasi, Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Padang. Metode yang digunakan adalah studi eksperimental dengan pendekatan analisis getaran berbasis transformasi *Fourier* cepat atau *Fast Fourier Transform* (FFT) untuk mendeteksi kerusakan *bearing* pada mesin gerinda berdiri dengan sistem transmisi *pulley* dan *belt* yang digunakan dalam kegiatan praktikum.

Spesifikasi Motor

Spesifikasi motor penggerak utama diidentifikasi sebelum proses pengambilan data untuk menentukan klasifikasi sesuai ISO 10816-1, sebagai acuan dalam evaluasi tingkat getaran. Rincian spesifikasinya disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi Motor

Parameter	**Nilai**	**Keterangan**
Daya	1,5 Kw	Sesuai nameplate
Tegangan	380 V	Tiga fasa
Kecepatan Putar	1400 RPM	Sesuai nameplate
Kecepatan Putar Spindle	2300 RPM	Sesuai nameplate
Frekuensi	50 Hz	Frekuensi normal
Pondasi	*Rigid*	Pondasi permanen

Berdasarkan tabel 1, motor ini dikategorikan ke dalam Grup I dengan pondasi *rigid* menurut standar ISO 10816-1.

Spesifikasi *Bearing*

Untuk mendukung diagnosis berbasis frekuensi, parameter geometris dari *bearing* NF208 disajikan pada Tabel 2. Spesifikasi *bearing* ini diperoleh dari katalog resmi produsen bearing yang sesuai dengan tipe dan dimensi standar internasional, guna memastikan keakuratan dalam perhitungan karakteristik frekuensi kerusakan. Nilai-nilai ini digunakan dalam perhitungan frekuensi karakteristik kerusakan *bearing*.

Tabel 2. Spesifikasi *Bearing*

Parameter	Spesifikasi	Keterangan
Tipe *bearing*	NF208	Spherical Roller Bearing
Tipe bola *bearing*	*Angular contact ball bearing*	Standar katalog
Jumlah bola (n)	13	Standar katalog
Diameter bola (d)	10 mm	Ukuran katalog
Diameter pitch (D)	60 mm	Perkiraan dari desain bearing
Sudut kontak (°)	0°	Diasumsikan radial

Konfigurasi Sensor

Sensor akselerometer yang digunakan adalah MPU9250, yang dipasang pada sisi luar *casing* mesin, tepat di dekat batu gerinda pada bagian *bearing* yang terhubung dengan *pulley* penggerak. Pengambilan data dilakukan pada tiga arah pengukuran, yaitu horizontal, vertikal, dan aksial. Masing-masing arah diukur secara bergantian selama 10 menit menggunakan Arduino Mega 2560 sebagai mikrokontroler. Gambar 1 menunjukkan ilustrasi posisi pemasangan sensor pada objek penelitian.



Gambar 1: Posisi Pemasangan Sensor MPU9250 di Mesin Gerinda

Konfigurasi teknis dari sensor MPU9250 yang digunakan dalam pengukuran disajikan secara rinci pada Tabel 3, meliputi protokol komunikasi, rentang akselerasi, dan frekuensi sampling.

Tabel 3. Konfigurasi Sensor MPU9250

Parameter	Nilai	Keterangan
Protokol komunikasi	I2C	Koneksi dua kabel SDA & SCL
Rentang akselerasi	±2g	Dikonfigurasi via registrasi sensor
Frekuensi sampling	420 Hz	Disesuaikan dengan kebutuhan FFT

Filter digital	Low-pass	Menggunakan fitur bawaan sensor
Mode pembacaan	Langsung	Tanpa menggunakan FIFO

Konfigurasi sensor MPU9250 seperti yang ditunjukkan dalam Tabel 3 memungkinkan akuisisi data getaran dengan ketelitian dan kecepatan yang memadai. Frekuensi sampling sebesar 420 Hz dipilih agar sesuai dengan kebutuhan transformasi FFT, dan penggunaan low-pass filter bawaan membantu mengurangi noise sinyal. Pengaturan rentang akselerasi ±2g memberikan sensitivitas tinggi dalam pengukuran vibrasi mesin.

Kondisi Komponen *Bearing* Saat Penggantian

Pada saat proses penggantian *bearing*, komponen yang diganti terbatas pada bagian dalam (*inner race*), bola, dan *cage bearing*, sementara bagian luar (*outer race*) tetap menggunakan komponen lama. Keputusan ini mengikuti kondisi aktual mesin gerinda berdiri di laboratorium, di mana *outer race* sulit dilepas tanpa membongkar struktur *casing* utama. Kondisi ini juga merefleksikan praktik penggantian parsial yang sering terjadi di lingkungan bengkel atau industri kecil. Meskipun tidak dilakukan pengukuran langsung terhadap keausan *outer race*, keberadaan komponen lama ini dicatat sebagai bagian dari sistem, karena dapat memengaruhi hasil getaran pada kondisi *bearing* baru.

Pengumpulan dan Konversi Data Getaran

Berdasarkan prinsip konversi satuan percepatan, nilai percepatan getaran yang diperoleh dari sensor awalnya berada dalam satuan g, sehingga diperlukan konversi ke satuan internasional yaitu m/s^2. Rumus yang digunakan dalam konversi ini mengacu pada hukum dasar mekanika (Liao & He, 2025):

$$\alpha_{\frac{m}{s^2}} = a_g \times 9{,}81 \quad (1)$$

Dengan:

α_{m/s^2} : Percepatan dalam satuan meter per detik kuadrat (m/s^2)

a_g : Percepatan dalam satuan gravitasi bumi (g)

9,81 : Nilai percepatan gravitasi bumi (m/s^2)

Time Waveform

Data percepatan hasil konversi tersebut kemudian divisualisasikan menggunakan bahasa pemrograman *Python* dalam bentuk grafik *time waveform*. Visualisasi ini bertujuan untuk melihat karakteristik getaran awal dan pola dinamik sebelum dilakukan analisis di domain frekuensi.

***Root Mean Square* dan ISO 10816-1**

Untuk menghitung tingkat keparahan getaran secara kuantitatif, dilakukan pendekatan *Root Mean Square* (RMS) terhadap sinyal kecepatan getaran. Karena data asli dari sensor diperoleh dalam bentuk percepatan (g), maka langkah pertama adalah mengonversinya ke satuan internasional m/s². Selanjutnya, data percepatan tersebut diintegrasikan secara numerik terhadap waktu untuk memperoleh data kecepatan getaran dalam satuan m/s. Selanjutnya, data percepatan tersebut diintegrasikan secara numerik terhadap waktu untuk memperoleh data kecepatan getaran dalam satuan m/s. Proses ini mengikuti persamaan berikut:

$$v_i = v_{i-1} + a_i \times \Delta_t \qquad 2$$

Dengan:

vi : Kecepatan pada titik waktu ke-i (m/s)

ai : Percepatan pada titik waktu ke-i (m/s²)

Δt : Interval waktu antar data (1/f_s)

Setelah memperoleh sinyal kecepatan, nilai RMS dihitung menggunakan rumus berikut:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x_i^2} \qquad (2)$$

Dengan:

RMS : Nilai akar rata-rata kuadrat getaran (mm/s)

xi : Data getaran ke-i

N : Jumlah sampel data

Berdasarkan perhitungan nilai RMS yang diperoleh pada masing-masing arah pengukuran, hasil tersebut kemudian dibandingkan dengan batas ambang getaran pada mesin berdasarkan ukuran, jenis, dan pondasi mesin yang ditetapkan dalam standar ISO 10816-1.

Tabel 4. Klasifikasi Mesin menurut ISO 10816-1

Kelas	**Keterangan**
Kelas 1	Mesin kecil dengan daya < 15 kW
Kelas 2	Motor listrik berdaya antara 15-75 kW
Kelas 3	Mesin besar dengan pondasi kaku

Kelas 4	Mesin besar dengan pondasi lunak (misalnya turbin gas atau generator besar)

Berdasarkan klasifikasi tersebut, masing-masing kelas mesin memiliki ambang batas nilai RMS yang digunakan untuk menentukan kondisi getaran mesin. Zona-zona ini dikelompokkan dalam empat kategori utama, yaitu baik (*Good*), cukup (*Satisfactory*), tidak stabil (*Unsatisfactory*), dan berbahaya *Unacceotable*), sebagaimana ditunjukkan dalam tabel berikut.

Velocity Severity		**Velocity Range Limits and Machine Classes**			
				Large Machines	
mm/s RMS	**in/s Peak**	**Small Machines Class I**	**Medium Machines Class II**	**Rigid Supports Class III**	**Less Rigid Supports Class IV**
0.28	**0.02**	**Good**	**Good**	**Good**	**Good**
0.45	**0.03**				
0.71	**0.04**				
1.12	**0.06**	**Satisfactory**			
1.80	**0.10**		**Satisfactory**		
2.80	**0.16**	**Unsatisfactory (alert)**		**Satisfactory**	**Satisfactory**
4.50	**0.25**		**Unsatisfactory (alert)**	**Unsatisfactory (alert)**	
7.10	**0.40**	**Unacceptable (danger)**			**Unsatisfactory (alert)**
11.20	**0.62**		**Unacceptable (danger)**	**Unacceptable (danger)**	
18.00	**1.00**				**Unacceptable (danger)**
28.00	**1.56**				
45.00	**2.51**				

Gambar 3. Ambang Nilai RMS Getaran Menurut ISO 10816-1 – Kelas I

Apabila nilai RMS hasil pengukuran berada dalam Zona C atau D, maka mesin dianggap berada dalam kondisi tidak stabil atau bahkan berbahaya. Dalam konteks ini, diperlukan analisis lanjutan pada domain frekuensi menggunakan transformasi Fourier cepat (FFT) untuk mengidentifikasi sumber spesifik gangguan getaran.

Penentuan Frekuensi Maksimum Analisis (Teorema *Nyquist*)

Penentuan batas frekuensi maksimum analisis getaran mengikuti Teorema *Nyquist* (Nyquist, 1928), yang menyatakan bahwa frekuensi maksimum yang dapat dianalisis secara akurat adalah setengah dari laju pengambilan sampel (*sampling rate*). Dengan demikian:

$$f_{maks} = \frac{f_s}{2} = \frac{420}{2} = 210\ Hz$$

Dengan:

f_{maks} : Frekuensi maksimum analisis (Hz)

f_s : Frekuensi sampling (Hz)

Transformasi FFT ke Domain Frekuensi

Transformasi sinyal dari domain waktu ke domain frekuensi dilakukan menggunakan metode *Fast Fourier Transform* (FFT) yang diimplementasikan melalui pustaka *scipy.fft* dalam bahasa pemrograman *Python*. Metode FFT berfungsi untuk mengubah data getaran dalam bentuk *time-domain* menjadi spektrum frekuensi yang merepresentasikan kandungan frekuensi dominan dari sinyal getaran tersebut (contoh pendekatan serupa dapat ditemukan dalam Smith, 2003). Rumus dasar FFT dituliskan sebagai berikut:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \times e^{-j2\pi kn/N}$$

Dengan:

$X(k)$: Nilai transformasi pada frekuensi ke-k

$x(n)$: Data waktu ke-n

N : Jumlah total data

j : Bilangan imajiner

e : Basis logaritma natural

Perhitungan Frekuensi Karakteristik *Bearing*

Spektrum hasil transformasi ini akan digunakan untuk mengidentifikasi kemungkinan kerusakan berdasarkan frekuensi karakteristik *bearing*. Berdasarkan literatur teknik mesin (misalnya Harris, 2001), perhitungan frekuensi karakteristik kerusakan pada *bearing* dilakukan dengan menggunakan rumus-rumus yang mengacu pada parameter geometri *bearing* sebagaimana tercantum dalam Tabel 2. Sebelum dilakukan perhitungan, frekuensi rotasi poros (*fr*) dihitung terlebih dahulu dari nilai kecepatan putar motor menggunakan persamaan 3.

$$fr = \frac{RPM}{60} = \frac{2300}{60} = 33{,}33\ Hz$$

Dengan:

RPM : Kecepatan putar motor (revolusi per menit)

f_r : Frekuensi rotasi poros (Hz)

Rumus frekuensi karakteristik *bearing* dihitung sebagai berikut:

$$BPFI = \frac{n}{2} \times fr \times \left(1 + \frac{d}{D}\cos\alpha\right)$$

$$BPFO = \frac{n}{2} \times fr \times \left(1 - \frac{d}{D}\cos\alpha\right)$$

$$BSF = \frac{D}{2d} \times fr \times \left(1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2 cos^2\,\alpha\right)$$

$$FTF = \frac{fr}{2} \times \left(1 - \frac{d}{D}\cos\alpha\right)$$

$$2XFTF = \frac{fr}{2} \times \left(1 - \frac{d}{D}\cos\alpha\right)$$

Dengan:

BPFI	:	*Ball Pass Frequency Inner Race* (Hz)
BPFO	:	*Ball Pass Frequency Outer Race* (Hz)
BSF	:	*Ball Spin Frequency* (Hz)
FTF	:	*Fundamental Train Frequency* (Hz)
n	:	Jumlah bola (*roll*)
fr	:	Frekuensi putaran poros (Hz)
d	:	Diameter bola (mm)
D	:	*Pitch* diameter *bearing* (mm)
α	:	Sudut kontak (°)

Nilai-nilai frekuensi karakteristik tersebut akan dijadikan sebagai referensi utama dalam proses diagnosis kerusakan bearing melalui pencocokan terhadap puncak-puncak spektrum pada hasil transformasi FFT yang akan disajikan pada bab berikutnya. Nilai-nilai frekuensi karakteristik tersebut akan dijadikan sebagai referensi utama dalam proses diagnosis kerusakan bearing melalui pencocokan terhadap puncak-puncak spektrum pada hasil transformasi FFT yang akan disajikan pada bab berikutnya.

HASIL DAN PEMBAHASAN

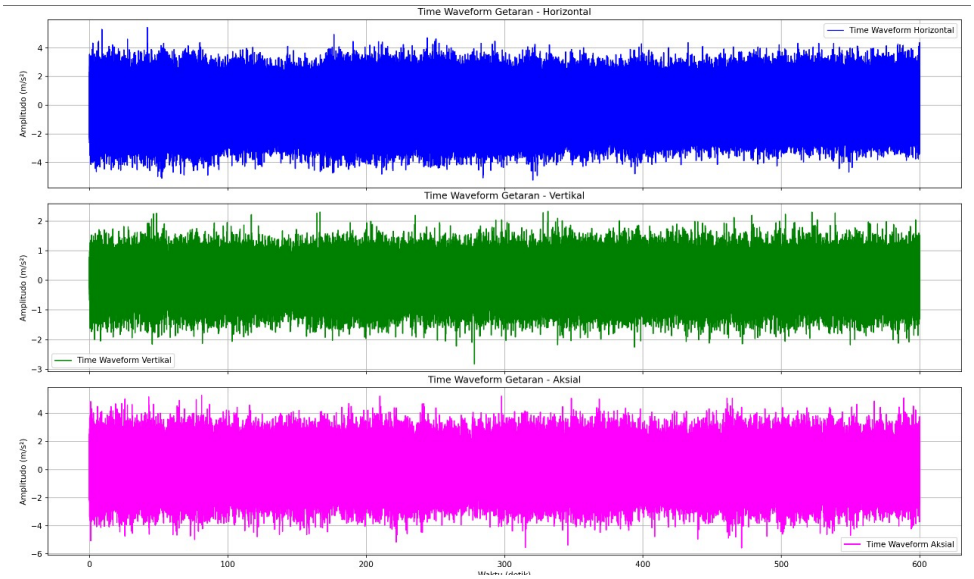
Hasil penelitian ini disajikan berdasarkan analisis getaran yang dilakukan terhadap kondisi bearing lama dan bearing baru pada mesin gerinda berdiri. Data getaran diperoleh dari tiga arah pengukuran—horizontal, vertikal, dan aksial—yang masing-masing direkam selama 10 menit dengan frekuensi sampling sebesar 420 Hz. Hasil pengukuran kemudian diolah dalam domain waktu dan domain frekuensi untuk mengevaluasi kondisi dinamis dari bearing yang diuji.

Menariknya, hasil awal dari visualisasi sinyal getaran dan analisis RMS menunjukkan bahwa kedua kondisi bearing, baik yang lama maupun yang baru dipasang, sama-sama memperlihatkan pola getaran yang tidak stabil. Temuan ini bertolak belakang dengan ekspektasi awal yang mengasumsikan bahwa bearing baru akan berfungsi sebagai pembanding dalam kondisi ideal. Oleh karena itu, analisis dilakukan secara menyeluruh terhadap kedua kondisi, dengan fokus pada karakteristik spektral serta indikasi kerusakan berdasarkan frekuensi khas yang muncul dalam spektrum hasil transformasi Fourier cepat (FFT).

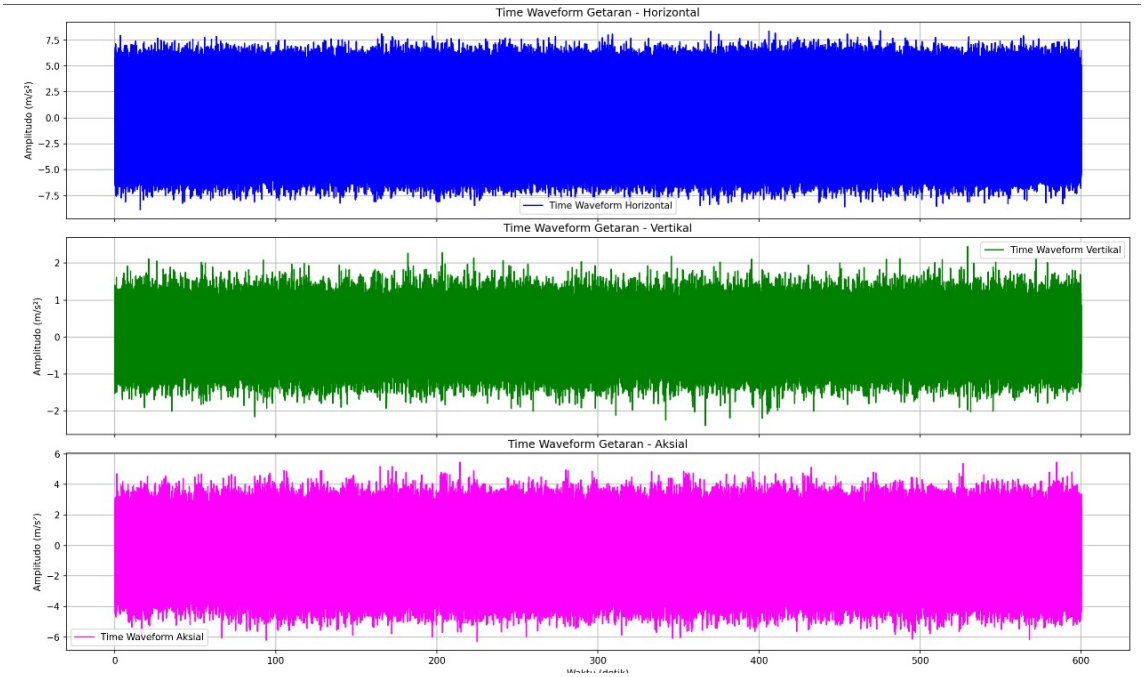
Visualisasi *Time Waveform*

Data percepatan getaran yang telah dikonversi ke dalam satuan m/s² kemudian divisualisasikan dalam domain waktu untuk masing-masing arah pengukuran, baik pada kondisi bearing lama maupun bearing baru. Visualisasi ini digunakan untuk mengamati distribusi amplitudo terhadap waktu sebagai langkah awal dalam memahami karakteristik dinamis sistem.

Gambar 1 menampilkan sinyal getaran pada arah horizontal, vertikal, dan aksial untuk kondisi *bearing* lama. Sedangkan Gambar 2 menunjukkan sinyal pada ketiga arah yang sama untuk kondisi *bearing* baru. Dari kedua visualisasi tersebut, dapat diamati bahwa baik *bearing* lama maupun *bearing* baru menunjukkan fluktuasi amplitudo yang tinggi, tidak stabil, dan tidak berpola periodik yang khas. Pola getaran semacam ini mengindikasikan adanya gangguan dinamis yang konsisten pada kedua kondisi, sehingga diperlukan evaluasi lebih lanjut secara kuantitatif melalui perhitungan RMS dan transformasi domain frekuensi.



Gambar 2. *Time Waveform Bearing* Lama



Gambar 3. *Time Waveform Bearing* Baru

Perhitungan RMS dan Evaluasi terhadap ISO 10816-1

Sebagai langkah evaluatif terhadap kondisi getaran, sinyal percepatan yang telah dikonversi ke dalam satuan m/s² diintegrasikan secara numerik terhadap waktu untuk memperoleh sinyal kecepatan dalam m/s. Nilai Root Mean Square (RMS) dari kecepatan getaran kemudian dihitung untuk masing-masing arah pengukuran—horizontal, vertikal, dan aksial—baik pada kondisi *bearing* lama maupun bearing baru. Hasil RMS yang diperoleh dikonversi ke satuan mm/s agar dapat dibandingkan secara langsung dengan batas ambang yang ditetapkan oleh ISO 10816-1.

Arah	Bearing Lama (mm/s)	Zona	Bearing Baru (mm/s)	Zona
Horizontal	16.06	Unacceptable	6.14	unacceptable
Vertikal	1.90	Satisfactory	7.93	Unacceptable
Aksial	4.58	Unacceptable	3.29	Unsatisfactory

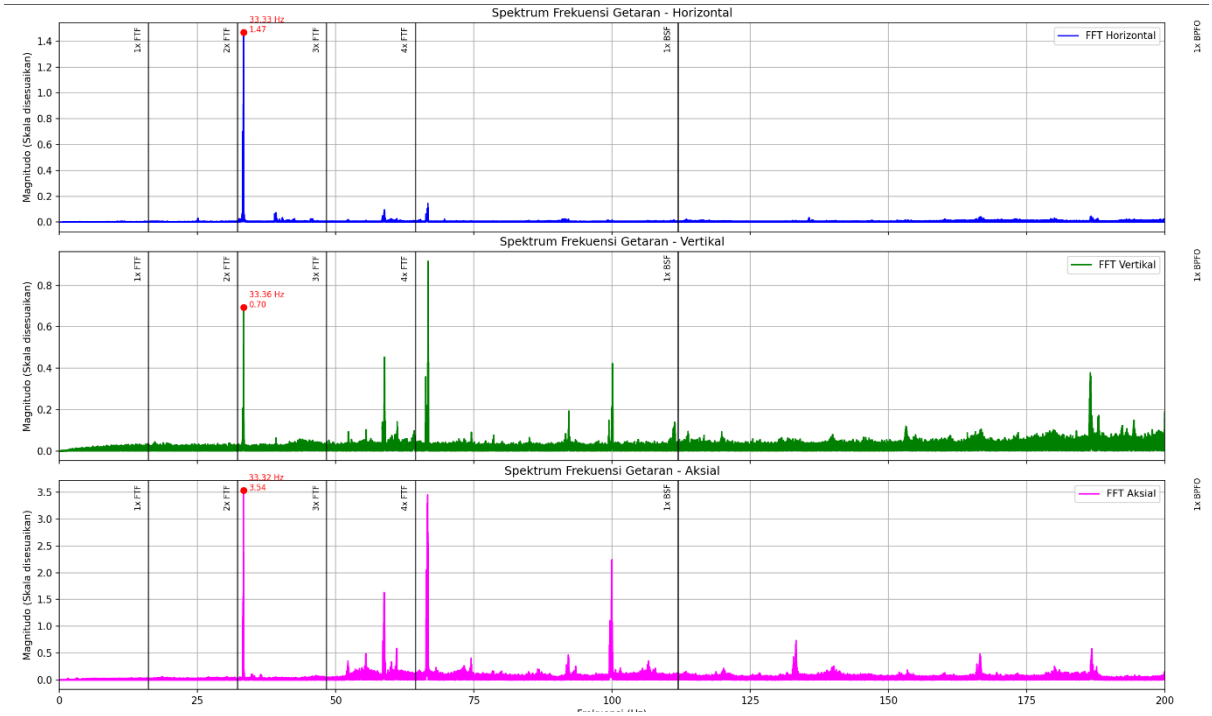
Tabel 1 menunjukkan nilai RMS kecepatan getaran untuk masing-masing arah pengukuran pada kedua kondisi bearing. Berdasarkan klasifikasi ISO 10816-1, mesin dengan motor 0,75 kW dan pondasi kaku termasuk dalam Kelas I, dengan ambang batas getaran antara 0,28 mm/s hingga 2,80 mm/s. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa seluruh nilai RMS, baik pada bearing lama maupun bearing baru, berada dalam Zona C dan D, yang menunjukkan kondisi getaran tidak stabil hingga berbahaya. Hal ini memperkuat indikasi bahwa kedua kondisi bearing menunjukkan anomali dinamis dan memerlukan analisis lanjutan di domain frekuensi.

Transformasi FFT dan Analisis Spektrum Frekuensi

Berdasarkan evaluasi nilai RMS yang telah dikonversi ke satuan mm/s, seluruh arah pengukuran baik pada bearing lama maupun bearing baru menunjukkan tingkat getaran yang melebihi ambang batas Zona C dan D dalam klasifikasi ISO 10816-1. Oleh karena itu, dilakukan analisis lanjutan menggunakan transformasi Fourier cepat (Fast Fourier Transform/FFT) untuk mengidentifikasi kandungan frekuensi dominan yang berpotensi menjadi indikator kerusakan pada komponen bearing.

Proses transformasi FFT dilakukan terhadap sinyal percepatan getaran yang telah dikonversi ke m/s^2, dengan menggunakan pustaka scipy.fft dalam bahasa pemrograman Python. Hasil transformasi menghasilkan spektrum frekuensi getaran hingga 210 Hz, sesuai dengan batas frekuensi maksimum yang ditentukan oleh Teorema Nyquist berdasarkan frekuensi sampling sebesar 420 Hz. Visualisasi spektrum frekuensi ini disajikan dalam Gambar 3 dan Gambar 4, masing-masing mewakili kondisi bearing lama dan bearing baru pada ketiga arah pengukuran.

Gambar 3: Spektrum frekuensi bearing lama (horizontal, vertikal, aksial)



Gambar 3: Spektrum Frekuensi dari Hasil FFT

Spektrum hasil FFT menunjukkan adanya kemunculan puncak amplitudo (spike) yang konsisten pada ketiga arah pengukuran, yang berada pada frekuensi sekitar 2×FTF (±32,20 Hz). Dari hasil spektrum

frekuensi, terlihat kemunculan puncak-puncak amplitudo signifikan pada frekuensi tertentu yang mengindikasikan adanya gangguan mekanis periodik. Kemunculan spike pada rentang frekuensi di bawah 100 Hz, terutama di sekitar nilai 2×FTF (Fundamental Train Frequency), menunjukkan indikasi awal adanya kerusakan cage (penjaga bola) pada bearing. Temuan ini diamati secara konsisten baik pada kondisi bearing lama maupun bearing baru.

Identifikasi Frekuensi Karakteristik dan Diagnosis Kerusakan

Untuk mengidentifikasi jenis kerusakan pada bearing, spektrum frekuensi hasil transformasi FFT dibandingkan dengan nilai-nilai frekuensi karakteristik kerusakan bearing. Nilai-nilai tersebut dihitung berdasarkan parameter geometri dari bearing tipe 6204, yaitu jumlah bola, diameter bola, pitch diameter, dan sudut kontak. Perhitungan dilakukan menggunakan rumus standar dari literatur teknik mesin untuk menentukan frekuensi-frekuensi khas sebagai berikut: Fundamental Train Frequency (FTF), Ball Pass Frequency Outer (BPFO), Ball Pass Frequency Inner (BPFI), dan Ball Spin Frequency (BSF). Seluruh nilai dihitung dengan menggunakan kecepatan rotasi poros sebesar 1196 RPM atau 19,93 Hz.

Tabel 2 menyajikan nilai-nilai frekuensi karakteristik hasil perhitungan. Hasil analisis spektrum menunjukkan bahwa terdapat puncak amplitudo yang konsisten muncul pada frekuensi sekitar 31,94 Hz, yang merupakan dua kali lipat dari nilai FTF. Kemunculan puncak pada frekuensi ini, baik pada kondisi bearing lama maupun baru, mengindikasikan adanya kemungkinan kerusakan pada bagian cage bearing. Puncak-puncak lainnya yang berada dekat dengan BPFO dan BPFI juga terlihat, namun tidak setajam frekuensi 2×FTF. Hal ini memperkuat dugaan bahwa kerusakan utama terletak pada cage.

Frekuensi Karakteristik	**Frekuensi**
1X - Machine Running Speed	38.333 Hz
BPFO - Ball Passing Frequency of Outer Race	207.767 Hz
BPFI - Ball Passing Frequency of Inner Race	290.567 Hz
FTF - Fundemental Train Frequency	16.100 Hz
BSF - Ball Sping Frequency	111.933 Hz

Ringkasan Hasil Penelitian

Hasil penelitian menunjukkan bahwa baik kondisi bearing lama maupun bearing baru pada mesin gerinda berdiri sama-sama menunjukkan karakteristik getaran yang tidak stabil. Visualisasi sinyal getaran dalam domain waktu menampilkan pola fluktuasi amplitudo yang signifikan pada ketiga arah pengukuran. Nilai RMS kecepatan getaran yang diperoleh dari integrasi sinyal percepatan menunjukkan bahwa seluruh arah pada kedua kondisi bearing berada di atas ambang Zona C dalam klasifikasi ISO 10816-1, bahkan

mendekati atau melebihi Zona D. Hal ini menandakan bahwa kondisi getaran pada sistem tersebut berada dalam status tidak aman.

Transformasi spektrum frekuensi menggunakan metode FFT mengungkapkan adanya puncak amplitudo signifikan di sekitar frekuensi 2×FTF (±31,94 Hz) yang merupakan salah satu frekuensi karakteristik kerusakan cage bearing. Kemunculan frekuensi ini secara konsisten pada kedua kondisi bearing memperkuat dugaan bahwa sumber getaran abnormal berasal dari bagian cage. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa kedua kondisi bearing, baik lama maupun baru, menunjukkan indikasi kerusakan pada elemen cage, yang secara langsung berdampak terhadap performa dinamis mesin.

Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kondisi getaran pada mesin gerinda berdiri, baik dengan *bearing* lama maupun *bearing* baru, tidak berada dalam batas kestabilan yang direkomendasikan oleh standar ISO 10816-1. Nilai RMS kecepatan getaran yang dihitung dari hasil integrasi sinyal percepatan menunjukkan bahwa semua arah pengukuran pada kedua kondisi *bearing* masuk dalam Zona *unacceptable*, yang dikategorikan sebagai berbahaya. Temuan ini memberikan indikasi bahwa sistem transmisi dan elemen rotasi pada mesin mengalami gangguan dinamis yang signifikan, dan keberadaan *bearing* baru tidak serta-merta mengembalikan kondisi ke dalam keadaan ideal. (apakah perlu disenggol kalau outer race nya tidak diganti? Dan apakah sebaiknya menyinggung)

Kemunculan puncak amplitudo pada frekuensi sekitar ±33,33 Hz dalam spektrum FFT, yang merupakan dua kali lipat dari nilai Fundamental Train Frequency (FTF), menjadi indikator kuat adanya kerusakan pada cage bearing. Frekuensi ini dihitung berdasarkan parameter geometri dari bearing 6204 dan kecepatan putar poros sebesar 1196 RPM. Berdasarkan literatur teknik (misalnya Harris, 2001), frekuensi 2×FTF sering diasosiasikan dengan kelainan pada elemen cage, seperti keausan atau ketidaksejajaran. Fakta bahwa frekuensi ini muncul secara konsisten pada ketiga arah pengukuran, baik pada kondisi bearing lama maupun baru, mengindikasikan bahwa kerusakan cage tidak hanya terbatas pada umur pakai, tetapi juga mungkin disebabkan oleh kualitas bearing, ketidaktepatan pemasangan, atau gangguan pada sistem transmisi.

Hasil yang menunjukkan adanya puncak frekuensi khas kerusakan bearing pada kondisi bearing baru menjadi temuan yang signifikan sekaligus tidak terduga. Berdasarkan pendekatan diagnostik umum, komponen baru seharusnya menunjukkan pola getaran yang stabil dan tidak mengandung frekuensi karakteristik kerusakan. Namun, kenyataan bahwa pola getaran pada bearing baru menyerupai pola kerusakan yang sama dengan bearing lama mengindikasikan adanya faktor lain yang berperan di luar umur pakai bearing. Kemungkinan penyebab tersebut mencakup proses pemasangan yang tidak tepat, kesalahan alinyemen poros, cacat manufaktur pada bearing baru, atau gangguan mekanis lain pada sistem transmisi seperti ketidakseimbangan atau ketegangan sabuk penggerak. Temuan ini menggarisbawahi

pentingnya pendekatan diagnosis menyeluruh terhadap seluruh komponen sistem dan bukan hanya mengandalkan penggantian komponen sebagai solusi tunggal.

Temuan dalam penelitian ini secara konsisten menunjukkan bahwa parameter getaran, baik dalam domain waktu, kecepatan RMS, maupun spektrum frekuensi, mengarah pada indikasi kerusakan komponen bearing, khususnya pada elemen cage. Kemunculan frekuensi 2×FTF sebagai puncak dominan dalam spektrum FFT menjadi bukti utama yang menguatkan diagnosis tersebut. Fakta bahwa kondisi getaran tetap berada dalam zona tidak stabil bahkan setelah penggantian bearing mengindikasikan perlunya evaluasi menyeluruh terhadap sistem, termasuk prosedur pemasangan, kondisi lingkungan operasi, dan integritas komponen lain yang saling terhubung. Dengan demikian, pendekatan pemeliharaan prediktif berbasis analisis getaran menjadi penting tidak hanya sebagai alat diagnosis kerusakan, tetapi juga sebagai strategi evaluatif untuk menjamin bahwa solusi yang diterapkan benar-benar efektif dan tuntas menyelesaikan permasalahan utama dalam sistem.

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil menerapkan metode analisis getaran berbasis transformasi Fourier cepat (FFT) untuk mendeteksi potensi kerusakan pada bearing mesin gerinda berdiri. Data getaran diambil dari tiga arah utama—horizontal, vertikal, dan aksial—menggunakan sensor MPU9250 dan mikrokontroler Arduino Mega, kemudian diproses dalam domain waktu dan domain frekuensi menggunakan perangkat lunak Python. Hasil perhitungan RMS dari sinyal kecepatan menunjukkan bahwa kondisi getaran pada kedua kondisi bearing, baik lama maupun baru, berada di luar batas aman yang ditetapkan dalam standar ISO 10816-1 untuk mesin Kelas I. Spektrum frekuensi yang dihasilkan melalui transformasi FFT menunjukkan kemunculan puncak amplitudo signifikan pada frekuensi 2×FTF, yang mengindikasikan adanya kerusakan pada elemen cage bearing.

Temuan bahwa bearing baru juga menunjukkan pola getaran yang serupa dengan bearing lama mengindikasikan bahwa penggantian komponen tidak serta-merta menjamin perbaikan kondisi dinamis sistem secara menyeluruh. Oleh karena itu, pemeliharaan prediktif berbasis analisis getaran sangat penting diterapkan tidak hanya sebagai sarana diagnosis kerusakan, tetapi juga sebagai mekanisme validasi terhadap efektivitas perbaikan atau penggantian komponen.

DAFTAR PUSTAKA

Amrullah, A. M. K. (2019). Pengukuran Serta Analisa Getaran Dan Kebisingan Pada *Spindle* Mesin Bubut *Run Master* Model NO. RUN 330X1000RR Dengan SERIAL NO. 08210810081.

Antoni, J., Kestel, K., Peeters, C., Leclère, Q., Girardin, F., Ooijevaar, T., & Helsen, J. (2024). *On The Design Of Optimal Health Indicators For Early Fault Detection And Their Statistical Thresholds*. *Mechanical Systems and Signal Processing*, *218*. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2024.111518

Eddy, N., Arrijal, D., & Kamal, S. (2017). *Vibration Spectrum Analysis to Identify the Signal Disturbance of the Differensial Gear Transmission System*.

Feri Febrian Syah, & Endi Permata. (2023). Sistem Motor Listrik 6 KV Condensate Extraction Pump di PT Indonesia Power PLTU Suralaya (PGU). *Jurnal Teknik Mesin, Industri, Elektro Dan Informatika*, *2*(2), 122–137. https://doi.org/10.55606/jtmei.v2i2.1687

Hakim, L. (2021). Tugas Akhir Analisa Kerusakan Motor Induksi 3 Fasa 75 Kw Pada *Water Cooling Pump* Dengan Metode MCSA (*Motor Current Signature Analysis*) Unit Blok 2 PT Indonesia Power PGU Semarang.

Ilham, M., & Adzikra, R. (2024). Karakteristik Getaran Yang Terjadi Pada Kasus.

Liao, X., & He, L. (2025). *Simulation Study of Dynamic Behavior of Cage in High-Speed Train with Wheelset Bearing Outer Raceway Flaw*. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 1293–1302. https://doi.org/10.1007/978-981-97-7887-4_114

Nemani, V. P., Lu, H., Thelen, A., Hu, C., & Zimmerman, A. T. (2022). *Ensembles Of Probabilistic LSTM Predictors And Correctors For Bearing Prognostics Using Industrial Standards*. *Neurocomputing*, *491*, 575–596. https://doi.org/10.1016/J.NEUCOM.2021.12.035

SPM, I. (2024, September 16). *Vibration measurement and analysis*. https://webtest.spminstrument.us/measuring-techniques/vibration-monitoring/vibration-measurement-and-analysis/

Zhao, D., Cai, W., & Cui, L. (2024). Adaptive thresholding and coordinate attention-based tree-inspired network for aero-engine bearing health monitoring under strong noise. *Advanced Engineering Informatics*, *61*. https://doi.org/10.1016/j.aei.2024.102559