

KARAKTERISTIK GETARAN DALAM BENTUK WAVEFORM DAN SPEKTRUM MELALUI TRANSFORMASI FOURIER

CHARACTERISTICS OF VIBRATIONS IN THE FORM OF WAVEFORM AND SPECTRUM THROUGH FOURIER TRANSFORM

Salman*, I D.K. Okariawan, Nurchayati, Arif Mulyanto, Emmy Dyah Sulistyowati

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Mataram, Jl. Majapahit No. 62, Mataram, NTB

*Corresponding author

E-mail addresses: salman@unram.ac.id

<https://doi.org/10.29303/enatq908>

Received 18 September 2025; Received in revised form 3 October 2025; Accepted 6 October 2025

ABSTRACT

The analysis of machine vibration is therefore essential for predictive maintenance and condition monitoring. Modern approaches, ranging from time-domain measurements of acceleration, velocity, and displacement to frequency-domain and modal analysis. This study investigates the vibration characteristics of rotating equipment in a manufacturing environment, focusing on identifying dominant frequencies, evaluating amplitude trends, and assessing overall machine condition. Data collected from accelerometers mounted on a centrifugal pump were processed using time-domain and frequency-domain techniques. The results highlight clear signatures of imbalance and bearing wear, demonstrating the value of predictive maintenance based on vibration monitoring. As the result the amplitude–frequency spectrum demonstrates that the machine is primarily influenced by rotational imbalance, with minimal evidence of high-frequency faults.

Keywords: *Vibration, Frequencies, Amplitude, Waveform, Spectral analysis*

1. Pendahuluan

Getaran pada mesin berputar merupakan indikator penting integritas dan kinerja struktural. Getaran yang berlebihan dapat menyebabkan kelelahan, kegagalan bantalan prematur, dan waktu henti yang mahal. Strategi perawatan prediktif sangat bergantung pada analisis getaran untuk mendeteksi anomali sebelum kegagalan katastrofik terjadi. Makalah ini menyajikan studi kasus tentang perilaku getaran pompa sentrifugal, dengan menerapkan teknik diagnostik standar untuk mengungkap pola kerusakan.

Pada mesin berputar, mesin resiprokal, rangkaian roda gigi, dan peralatan industri lainnya, getaran muncul akibat ketidakseimbangan massa, ketidaksejajaran, kelonggaran, cacat bantalan, kesalahan gigi roda gigi, dan resonansi struktural [1, 2]. Getaran yang berlebihan tidak hanya mempercepat keausan bantalan, poros, dan kopling, tetapi juga mengurangi keandalan operasional, meningkatkan kehilangan energi, dan dapat menyebabkan kegagalan katastrofik jika tidak terdeteksi [3, 4]. Oleh karena itu, analisis getaran mesin sangat penting untuk pemeliharaan prediktif dan pemantauan kondisi. Pendekatan modern—mulai dari pengukuran domain waktu untuk akselerasi, kecepatan, dan perpindahan hingga analisis domain frekuensi dan modal—memungkinkan para insinyur untuk mendeteksi kerusakan awal dan mengoptimalkan kinerja mesin [4, 5]. Dengan munculnya pemrosesan sinyal digital dan pembelajaran mesin, diagnostik berbasis getaran telah berkembang melampaui pemantauan ambang

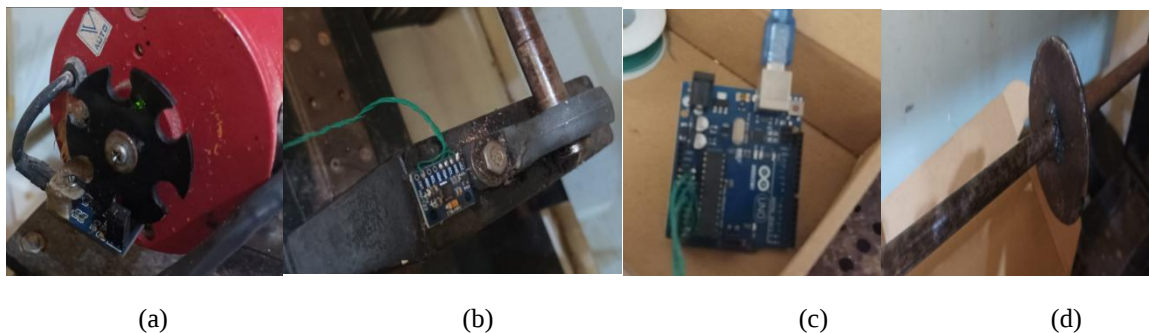
batas sederhana hingga mencakup klasifikasi kerusakan, estimasi sisa masa pakai, dan kontrol adaptif [6, , 8].

Memahami mekanisme getaran dan dampaknya terhadap integritas mekanis merupakan persyaratan utama dalam manajemen aset industri. Artikel ini mengkaji aspek-aspek fundamental getaran mesin, teknik pengukuran, dan perannya dalam memastikan keandalan dan keamanan dalam sistem rekayasa modern [9, 10]. Studi ini menyelidiki karakteristik getaran peralatan berputar di lingkungan manufaktur, dengan fokus pada identifikasi frekuensi dominan, evaluasi tren amplitudo, dan penilaian kondisi mesin secara keseluruhan. Data yang dikumpulkan dari akselerometer yang terpasang pada pompa sentrifugal diproses menggunakan teknik domain waktu dan domain frekuensi. Hasilnya menunjukkan tanda-tanda ketidakseimbangan dan keausan bantalan yang jelas, menunjukkan pentingnya perawatan prediktif berdasarkan pemantauan getaran.

Untuk menentukan komponen frekuensi dominan dari sinyal getaran, data percepatan yang terekam ditransformasikan dari domain waktu ke domain frekuensi menggunakan teknik Fast Fourier Transform (FFT) [11, 12]. FFT adalah algoritma numerik efisien yang menguraikan sinyal deret waktu diskrit menjadi komponen-komponen sinusoidal penyusunnya, yang masing-masing ditentukan oleh frekuensi, amplitudo, dan fase tertentu. Sinyal getaran yang diukur dari mesin, struktur, atau kendaraan yang berputar seringkali mengandung beberapa komponen frekuensi yang timbul dari ketidakseimbangan, ketidaksejajaran, cacat bantalan, atau eksitasi eksternal. Menganalisis sinyal-sinyal ini hanya dalam domain waktu dapat mengaburkan detail-detail penting. Analisis spektral, yang biasanya dicapai melalui FFT, mengungkapkan hubungan antara amplitudo dan frekuensi, memungkinkan identifikasi yang tepat dari mode dominan dan tanda-tanda kerusakan.

Tujuan dari penelitian ini adalah Mengukur getaran pada rotor mini menggunakan sensor akselerometer yang terintegrasi dengan mikrokontroler dengan menganalisis karakteristik getaran rotor dalam domain waktu (*waveform*) maupun domain frekuensi (*spectrum*) untuk mengetahui pola dinamika getaran.

2. Bahan dan Metode



Gambar 1 Komponen yang dibutuhkan dalam pengujian getaran poros putar. (a) Dinamo; (b) Akselerometer; (c) Mikrokontroler Arduino UNO; (d) Poros

2.1. Instrumen Pengukuran

Desain sistem pengukuran diilustrasikan melalui diagram blok desain, yang berfungsi sebagai komponen penting dalam proses manufaktur dan produksi instrumen pengukuran getaran (Gambar 1). Mesin putar mini digunakan untuk mereplikasi getaran yang mungkin terjadi dalam kondisi standar dan atipikal. Akselerometer ADXL345 mendeteksi intensitas getaran yang ada dalam mesin putar mini ini. Arduino Uno berfungsi sebagai pemroses sinyal, memfasilitasi akuisisi data dari ADXL345 [9]. LCD terintegrasi dengan Arduino untuk berfungsi sebagai tampilan, sementara Megunolink digunakan sebagai perangkat lunak untuk visualisasi data di komputer.

Metode dan analisis yang dilakukan dalam penelitian Anda harus ditulis di bagian ini. Strategi sederhana yang dapat diikuti adalah menggunakan kata kunci dari judul Anda di beberapa kalimat pertama. Ketika alat ukur getaran digunakan untuk mengukur getaran mesin, akselerometer yang sesuai harus dipilih, tergantung pada jenis mekanismenya. Akselerometer dirancang untuk frekuensi rendah,

mengukur tingkat akselerasi rendah, dan karenanya sangat sensitif. Namun, ukuran dan massanya yang lebih besar menghasilkan frekuensi resonansi yang rendah saat dipasang. Akselerometer untuk frekuensi tinggi mengukur tingkat akselerasi tinggi dan biasanya ringkas, ringan, dan memiliki sensitivitas rendah. Perancangan sistem pengukuran getaran dalam karya ini merupakan pilihan akselerometer piezoelektrik yang mencakup rentang frekuensi yang luas. Dengan menggabungkan akselerometer dengan alat ukur getaran yang dirancang untuk memaksimalkan karakteristiknya, berbagai pengukuran dapat dilakukan dengan efisiensi optimal.

Akselerometer piezoelektrik biasanya digunakan untuk mengukur getaran dengan frekuensi lebih dari 1 Hz. Jenis akselerometer ini memiliki karakteristik frekuensi tinggi yang baik dan sangat cocok untuk mengukur getaran pada rentang frekuensi atas. Aplikasi utamanya adalah pemantauan getaran dan pemeriksaan diagnostik instalasi mekanis di pabrik industri. Akselerometer piezoelektrik menghasilkan sejumlah derau frekuensi rendah ketika suhu sekitar berubah (disebut pironoise). Tergantung pada aplikasinya, akselerometer harus dilindungi dari perubahan suhu. Ketika kecepatan dan perpindahan yang akan digunakan untuk evaluasi diperoleh dengan mengintegrasikan percepatan, pironoise akan dievaluasi sebagai produk integral, pironoise akan diperkuat dan oleh karena itu harus diberikan pertimbangan khusus. Kecuali untuk tipe yang mengandung muatan, akselerometer piezoelektrik memerlukan penguat muatan.

2.2. Alat dan Bahan

Akselerometer dipasang pada mesin berputar untuk mendeteksi amplitudo getaran berdasarkan parameter percepatan. Data yang diperoleh dari proses penginderaan ini kemudian dianalisis oleh mikrokontroler, yang kemudian menyajikan hasil pengukuran dalam bentuk grafik komputer.

Alat dan bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

- a. Perangkat keras meliputi sensor akselerometer ADXL345, Arduino Uno R3, layar karakter LCD 2x16, transformator, dan komponen lainnya.
- b. Perangkat lunak meliputi Arduino Integrated Development Environment (IDE), Megunolink, dan PCB Wizard.

2.3. Analisis Spektral

Terdapat tiga parameter getaran yang dapat digunakan untuk menyatakan besarnya getaran: perpindahan, kecepatan, dan percepatan. Untuk menemukan amplitudo dari persamaan gerak harmonik sederhana, identifikasi koefisien fungsi kosinus dalam persamaan gerak harmonik sederhana. Nilai absolut dari koefisien ini adalah amplitudo. Total jarak yang ditempuh dalam satu siklus lengkap saat berosilasi, mengalikan amplitudo. Dalam pengertian gerak harmonik sederhana, suatu benda yang bergerak maju mundur pada lintasan yang sama berada dalam gerak periodik. Hal ini disebabkan oleh gaya pemulih yang bekerja untuk membawa benda yang bergerak ke posisi setimbangnya. Gerak harmonik sederhana terjadi ketika gaya pemulih sebanding dengan perpindahan suatu benda. Gerak harmonik sederhana diberikan oleh persamaan-persamaan berikut. Dengan x adalah amplitudo, A adalah perpindahan, ω adalah kecepatan sudut, t adalah waktu, dan a adalah percepatan, rumus perhitungan untuk parameter getaran ditunjukkan dalam persamaan-persamaan berikut.

$$x = A \sin \omega t \quad (1)$$

$$v = \omega A \cos \omega t \quad (2)$$

$$a = -\omega^2 A \sin \omega t \quad (3)$$

Sinyal getaran yang diukur dari mesin, struktur, atau kendaraan yang berputar seringkali mengandung beberapa komponen frekuensi yang timbul dari ketidakseimbangan, misalignment, cacat bantalan, atau eksitasi eksternal. Menganalisis sinyal-sinyal ini hanya dalam domain waktu dapat mengaburkan detail-detail penting. Analisis spektral, yang biasanya dicapai melalui FFT, mengungkap hubungan antara amplitudo dan frekuensi, memungkinkan identifikasi yang tepat dari mode dominan dan tanda-tanda gangguan. Spektrum ini menyoroti bagaimana energi didistribusikan di seluruh frekuensi, sehingga memungkinkan identifikasi resonansi, harmonik, dan pita samping.

Ketika penganalisis FFT menghasilkan data domain frekuensi, hasil keluarannya adalah spektrum frekuensi. Spektrum ini biasanya diekstraksi dalam bentuk yang disebut spektrum daya dan spektrum

daya silang. Langkah-langkah yang diperlukan untuk memperoleh spektrum daya dan spektrum daya silang diilustrasikan pada gambar di bawah ini:

Persamaan matematis yang umum dipakai dalam analisis getaran dengan FFT untuk mendapatkan amplitudo, frekuensi, dan RMS dari sinyal percepatan $a(t)$, Jika sinyal diskrit $a(n)$ terdiri dari N titik dengan interval sampling Δt , maka FFT didefinisikan:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} a[n] e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \quad (4)$$

dengan:

$k=0, 1, \dots, N-1$ (indeks frekuensi),
 $X[k]$ = spektrum kompleks.

Amplitudo getaran dari spektrum dihitung menggunakan:

$$A[k] = \frac{2}{N} |X[k]| \quad (5)$$

Faktor $2/N$ digunakan agar amplitudo sesuai dengan sinyal aslinya (single-sided spectrum). Misalkan $x(t)$ adalah sinyal getaran (perpindahan, kecepatan, atau percepatan) maka RMS dihitung dari spektrum:

$$x_{rms} = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{k=1}^{N/2} A[k]^2} \quad (6)$$

2.4. Prosedur Pengujian

a. Perancangan sistem dan alat

Mesin rotor mini DC 120 Volt dengan poros berputar dilengkapi PID pengatur putaran rotor. Dilengkapi saklar turn on dan off, transmisi kopling fleksibel, bantalan dan poros. Rotasi poros dihitung dengan sensor kecepatan pada dinamo, Dua buah sensor getaran accelerometer ADXL345 ditempelkan pada housing dua bantalan menggunakan perekat atau bracket agar kontak mekanis baik pada housing bantalan. Sensor mengukur percepatan getaran dalam sumbu X, Y, dan Z. Accelerometer. Mikrokontroler berupa Arduino Uno digunakan sebagai pengambil data (*data acquisition system*) yang membaca sinyal tegangan dari sensor.

Hasil pengukuran dibaca di serial monitor di laptop. Sumbu pengukuran diamati pada posisi X, Y dan Z. Selama pengujian, beban tambahan pada poros diatur pada posisi tertentu yaitu 5, 15, 20, 25 cm dari bantalan pertama.

b. Analisa data

Akuisisi data dilakukan dengan dukungan Excel Datastreamer dan fungsi syntax Python yang diopersikan dengan program VSC. Arduino Uno membaca sinyal percepatan dalam bentuk tegangan analog/digital. Sampling rate ditentukan dengan mengatur kecepatan rpm rotor. Data dikirim ke PC dalam bentuk time series (waveform). Sedangkan pengolahan data dari waveform (domain waktu). Data getaran ditampilkan sebagai grafik percepatan terhadap waktu. Dari waveform dianalisis amplitudo getaran, pola osilasi, perbedaan puncak frekuensi dominan, dan parameter RMS (root mean square). Spektrum (domain frekuensi) diperoleh dari data waveform diubah menggunakan Fast Fourier Transform (FFT). Hasil berupa grafik amplitudo (atau daya) terhadap frekuensi. Bandingkan waveform pada masing-masing kondisi jarak beban di poros.

Pada intinya prosedur penelitian dilakukan dengan mengukur getaran rotor secara real-time, dan didapatkan dua sudut pandang analisis domain waktu (waveform) untuk pola getaran, dan domain frekuensi (spektrum) untuk identifikasi penyebab getaran.

3. Hasil dan Pembahasan

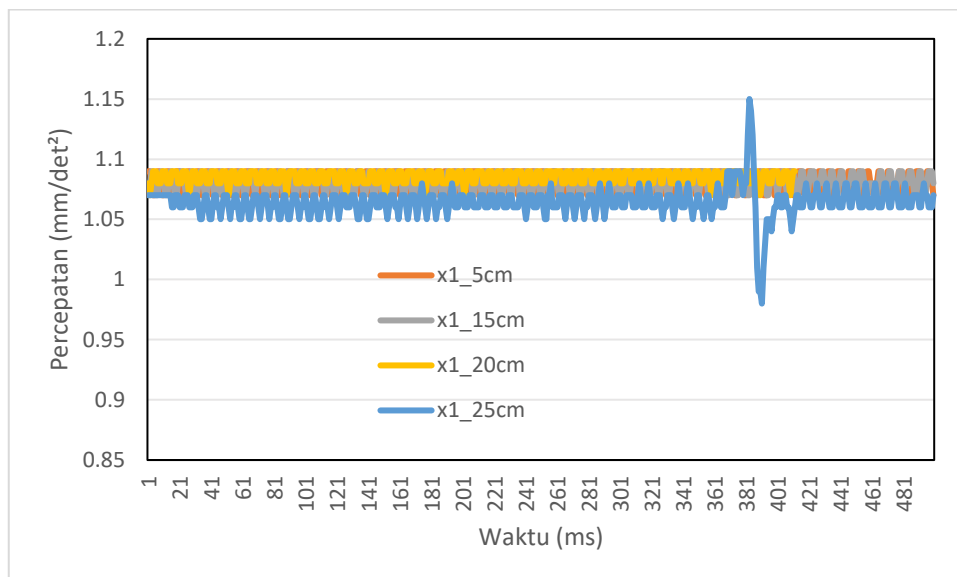
Pada Gambar 2 terlihat sinyal data raw nilai percepatan terhadap waktu dari monitor Arduino UNO yang ditransfer ke data set. Analisa trend percepatan dijelaskan melalui pengambilan satu posisi saja yaitu pada posisi sumbu x_1 . Penentuan satu posisi ini selain dari sumbu y dan z diwakilkan hanya untuk mendapatkan kecenderungan arah kurva. Terlihat adanya sedikit saja fluktuasi yang terjadi sepanjang fase waktu berjalan. Osilasi berlangsung dalam waktu milli second dan mencapai resonansi pada waktu 381 ms. Nilai percepatan tiba-tiba mengalami resonansi karena ketidakstabilan putaran poros akibat getaran oleh penambahan massa whirling shaft. Terlihat pada jarak beban yang tinggi percepatan getaran melemah namun potensi resonansi meningkat disebabkan efek gaya sentrifugal putaran poros yang tinggi pada jarak beban yang besar dari pusat tumpuan bantalan.

Gejala yang sama dari keseragaman fluktuasi sinyal percepatan getaran arah sumbu x di bantalan pertama terhadap waktu ditunjukkan pada Gambar 3 pada putaran poros 860 rpm dengan variasi jarak beban dari bantalan pertama adalah . Resonansi juga terjadi pada jarak beban yang terjauh 25 cm dari tumpuan bantalan pertama.

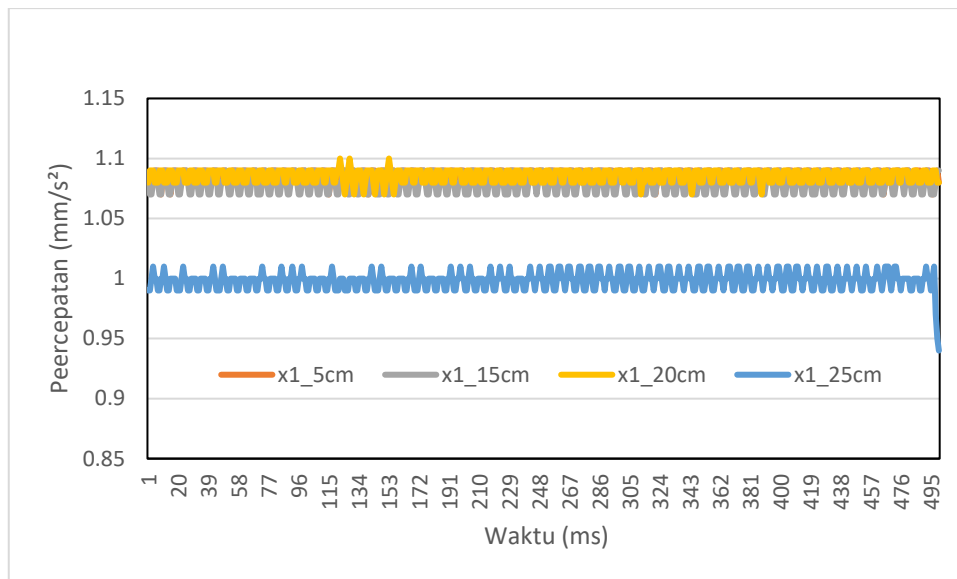
Terhadap arah sumbu getaran, percepatan getaran terbesar dicapai pada arah sumbu y_1 atau di housing bantalan pertama. Sedangkan nilai percepatan getaran terkecil diperoleh pada arah sumbu z_2 atau rumahan bantalan kedua (lihat Gambar 4).

Nilai-nilai parameter getaran tersebut masih dalam bentuk waveform. Untuk mengubah waveform getaran menjadi spektrum Fourier, menggunakan FFT untuk mengubah data dari domain waktu ke domain frekuensi, yang menghasilkan representasi getaran berdasarkan komponen-komponen frekuensinya. Proses ini mengungkap frekuensi apa saja yang terkandung dalam sinyal getaran dan seberapa kuat amplitudo masing-masing frekuensi tersebut, sehingga memberikan pemahaman mendalam tentang karakteristik getaran yang kompleks.

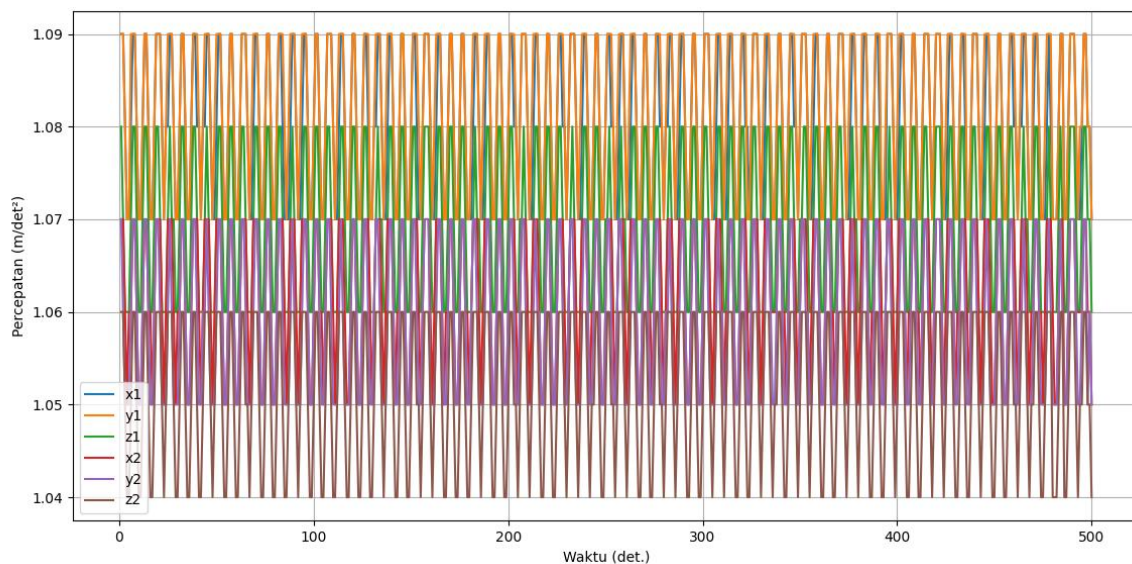
Dengan data set yang sama, data waveform getaran (domain waktu), data getaran dari sensor accelerometer. Data ini akan berupa serangkaian nilai amplitudo pada titik-titik waktu tertentu, menciptakan sebuah waveform. Metode transformasi Fourier: menggunakan algoritma yang efisien secara komputasi untuk menghitung Transformasi Fourier Diskrit (DFT).



Gambar 2 Percepatan terhadap waktu pada putaran 300 rpm pada berbagai jarak beban dari bantalan

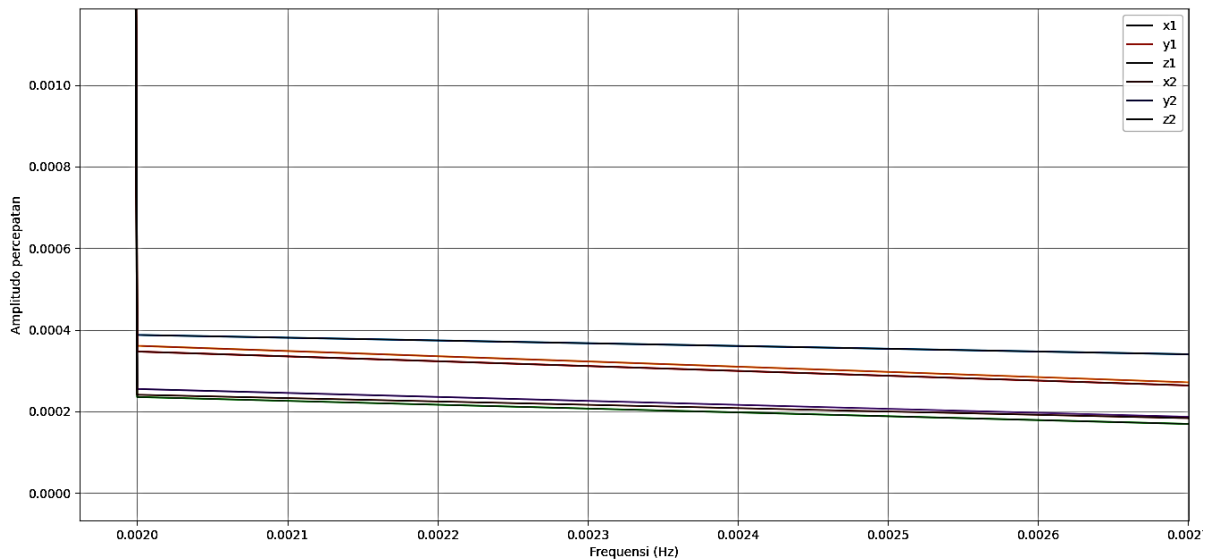


Gambar 3 Percepatan terhadap waktu pada putaran 860 rpm pada berbagai jarak beban dari bantalan

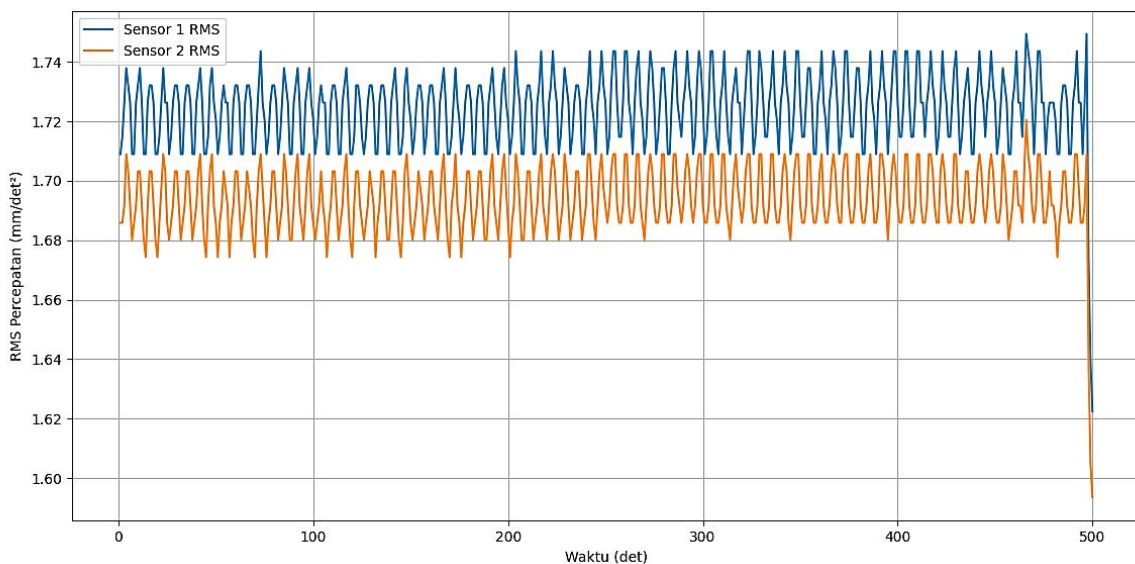


Gambar 4 Percepatan getaran terhadap waktu menurut putaran poros 300 rpm pada jarak beban 5 cm.

Dari penerapan transformasi FFT pada data waveform getaran sinyal kompleks terurai menjadi gelombang sinus fundamental yang berbeda frekuensi dan amplitudonya. Dengan analisa interpretasi spektrum memungkinkan mengidentifikasi frekuensi dominan untuk menemukan frekuensi mana yang paling kuat muncul dalam getaran. Sebagai contoh plot data set diambil rotasi poros 590 rpm dengan jarak beban dari bantalan sebesar 15 cm (lihat Gambar 5). Kembali dominasi frekuensi ditunjukkan oleh arah sumbu x dan y pada housing bantalan pertama.



Gambar 5 Frekuensi dari amplitudo percepatan pada rotasi 590 rpm dengan jarak massa 15 cm dari acuan bantalan pertama



Gambar 6 RMS getaran terhadap waktu pada putaran 860 rpm pada jarak beban 25 cm

Nilai RMS kemudian dihitung dari hasil pemrosesan FFT tersebut, memberikan ukuran energi efektif getaran yang telah dianalisis frekuensinya. Nilai RMS pada getaran adalah nilai tunggal yang merepresentasikan tingkat energi efektif atau keseluruhan dari getaran yang terjadi, sering digunakan untuk mengukur dan mengklasifikasikan tingkat keparahan getaran, terutama untuk getaran yang stabil dan terus-menerus. Dalam kasus getaran sinusoidal, nilai RMS adalah sekitar 0,707 kali nilai puncaknya (peak). Pada Gambar 6 terlihat nilai RMS pada housing bantalan pertama lebih besar daripada di housing bantalan kedua. Resonansi juga terdeteksi di fase waktu 500 ms.

Hasil ini sejalan dengan sejumlah penelitian sebelumnya seperti yang diperoleh Pandey (13) yang memantau getaran pada Rig Uji Rotor dengan mengukur RMS percepatan pada dua bantalan dan hasil yang diperoleh Lee dkk. (14) dengan mereduksi getaran pada rotor menggunakan metode permukaan respons (RSM).

4. Kesimpulan

Hasil analisis menunjukkan bahwa penerapan FFT pada sinyal getaran memungkinkan identifikasi komponen frekuensi dominan secara jelas. Perhitungan RMS memberikan gambaran kuantitatif mengenai tingkat energi getaran pada masing-masing pita frekuensi. Spektrum yang diperoleh memperlihatkan bahwa amplitudo terbesar terkonsentrasi pada frekuensi fundamental, diikuti oleh beberapa harmonik yang lebih kecil, sesuai dengan karakteristik sistem mekanis yang diuji. Dengan demikian, kombinasi analisis waveform waktu, spektrum frekuensi, dan nilai RMS merupakan pendekatan yang efektif untuk mengevaluasi kondisi dinamis, mendeteksi ketidakseimbangan, kelonggaran, atau cacat pada komponen mesin.

Ucapan Terima kasih

Penulis mengucapkan terimakasih pada Lembaga Penelitian dan Pengabdian pada Masyarakat (LPPM) Universitas Mataram atas dukungan finansial pada penelitian ini.

Daftar Notasi

Δt	Interval sampling
A	Amplitudo getaran
$a(t)$	Sinyal percepatan
$a(n)$	Sinyal diskrit
k	Indeks frekuensi
N	Jumlah titik
$X[k]$	Spektrum kompleks.
$x(t)$	Sinyal getaran

Daftar Pustaka

- [1] Albarbar, S. Mekid, A. Starr, R. Pietruszkiewicz, Condition monitoring of rotating machinery using vibration analysis, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 24 (5) (2010) 1450-1464.
- [2] D.J. Ewins, *Modal Testing: Theory, Practice and Application* (2nd ed.), Research Studies Press, 2000.
- [3] C.M. Harris, A.G. Piersol, *Harris' Shock and Vibration Handbook* (7th ed.), McGraw-Hill, 2022
- [4] Y. Lei, B. Yang, X. Jiang, F. Jia, N. Li, A.K. Nandi, Applications of machine learning to machine fault diagnosis: A review. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 138 (2020) 106587.
- [5] R.B. Randall, *Vibration-based Condition Monitoring: Industrial, Aerospace and Automotive Applications*, Wiley, 2011.
- [6] S.S. Rao, *Mechanical Vibrations* (6th ed.), Pearson, 2017.
- [7] A. Deni, Y. Habil, Perancangan prototype proteksi arus beban lebih pada beban dc menggunakan mikrokontroler, *Jurnal Elektum*, 14 (2) (2017) 25-34.
- [8] L. Contretas, Integrating simulation modeling and equipment condition diagnostig for predictive maintenance. *Proceedings of the 2002 Winter Simulation*, (2002) 1289-1296.
- [9] B. Graney, K. Starry, Rolling element bearing analysis, *Materials Evaluation*, 70 (1) 78.
- [10] K. Erna, *Sistem peredam getaran rekayasa vibrasi lp*, UNAS, 2020.
- [11] I. Feriadi, Mems accelerometer ADXL345 vibration measurement system analysis, *Manutech*, 9 (2) (2017) 63-67.
- [12] C.Y. Huang, J.H. Chen, Development of dual-axis MEMS accelerometers for machine tools vibration monitoring, *Appl. Sci.*, 6 (7) (2016) 201.
- [13] S. Pandey, Vibration monitoring of a rotor system using rms accelerations (m/s^2), *International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST)*, 3 (4) (2011) 2559-2572.

- [14] S.H. Lee, S-W. Song, I-J. Yang, J. Lee J, W-H. Kim, Optimal rotor design for reducing electromagnetic vibration in traction motors based on numerical analysis, *Energies*, 17 (23) (2024) 6206.