EMPD 5 (2) Nopember 2026, 443-454 ISSN 2964-6987
Energy, Materials and Product Design
https://journal.unram.ac.id/index.php/empd

SIMULASI NUMERIK PEMODELAN KARAKTERISTIK GETARAN SISTEM POROS BERPUTAR PADA KONDISI KETIDAKSEJAJARAN POROS

NUMERICAL SIMULATION OF MODELING OF VIBRATION CHARACTERISTICS OF ROTATING SHAFT SYSTEMS IN MISALIGNMENT CONDITIONS

Salman*, Paryanto Dwi Setiawan, I Dewa Ketut Okariawan, Yesung Allo Padang, Sinarep

Program Studi Teknik Mesin, Jurusan Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Mataram, Jl. Majapahit No. 62, Mataram, NTB, no. hp/WA 087765542332

**Corresponding author*
E-mail addresses: salman@unram.ac.id
https://doi.org/10.29303/empd.v5n2.443-454
Received 2 August 2026; Received in revised form 25 August 2026; Accepted 25 August 2026

ABSTRACT

Misalignment of rotating shafts is crucial for developing a condition monitoring system. This study aims to simulate the vibration characteristics of rotating shaft systems under misalignment conditions using a numerical approach based on GNU Octave and analyze the vibration response in the time domain, Fast Fourier Transform (FFT), and Power Spectral Density (PSD). The simulation was performed at a rotational speed of 1200 RPM (20 Hz) with a sampling frequency of 1000 Hz for 10 seconds, resulting in 10,000 vibration data samples. The misalignment model was constructed by adding harmonic components at 2× and 3× the rotational frequency to the fundamental component. The simulation results show that the misalignment condition produced a more complex time-domain waveform with vibration amplitude reaching approximately ±1.2, compared with the relatively stable waveform under normal conditions. FFT analysis quantitatively identified the dominant spectral peak at 20 Hz (1× RPM) with an amplitude of 1.000, accompanied by a significant 2× RPM harmonic (40 Hz) at 0.550, and a 3× RPM harmonic (60 Hz) at 0.180. Furthermore, PSD analysis confirmed a clear energy redistribution toward higher harmonics, yielding peak spectral energy values of -4.467 dB/Hz at 1× RPM, -9.668 dB/Hz at 2× RPM, and -19.383 dB/Hz at 3× RPM. These quantitative frequency-domain characteristics demonstrate that the emergence of the 2× RPM and 3× RPM harmonics provides a clear indicator for identifying rotating shaft misalignment. The integrated use of time-domain analysis, FFT, PSD, and rotating shaft animation provides a comprehensive representation of the vibration characteristics associated with shaft misalignment.

Keywords: *Animation, PSD, Spectrum, Welch method, Waveform*

1. Pendahuluan

Misalignment atau ketidaksejajaran poros merupakan salah satu jenis gangguan mekanis yang paling sering dijumpai pada mesin berputar, terutama pada sistem yang menggunakan kopling untuk menghubungkan motor penggerak dengan poros yang digerakkan. Kondisi ini terjadi ketika sumbu geometris kedua poros tidak berada pada satu garis lurus sehingga pusat rotasi motor dan beban tidak berimpit. Ketidaksejajaran tersebut dapat berupa ketidaksejajaran paralel (*offset misalignment*), yaitu kedua poros sejajar tetapi tidak segaris, maupun ketidaksejajaran sudut *(angular misalignment*), yaitu kedua poros berpotongan dengan sudut tertentu [1, 2, 3].

Pada kondisi operasi normal, gaya yang ditransmisikan melalui kopling berlangsung secara merata sehingga sistem poros berputar dengan stabil. Sebaliknya, ketika terjadi ketidaksejajaran poros,

gaya dan momen yang bekerja pada poros berubah secara periodik selama berputar. Perubahan gaya ini menghasilkan pembebanan dinamis tambahan pada bantalan (*bearing*), kopling, dan poros, sehingga meningkatkan amplitudo getaran serta mempercepat keausan komponen mekanis [4, 5, 6]. Dari sudut pandang analisis getaran, ketidaksejajaran poros memiliki karakteristik spektrum yang berbeda dibandingkan kondisi normal. Getaran tidak hanya muncul pada frekuensi putaran dasar (1× rpm), tetapi juga menghasilkan komponen harmonik, terutama pada 2× rpm, dan pada beberapa kasus dapat muncul komponen 3 × rpm, tergantung tingkat keparahan dan jenis ketidaksejajaran poros. Kehadiran harmonik-harmonik tersebut menjadi salah satu indikator utama yang digunakan dalam diagnosis kondisi mesin berbasis analisis spektrum [7, 8, 9].

Dalam simulasi ini, kondisi ketidaksejajaran poros direpresentasikan dengan memodelkan ketidaksejajaran antara sumbu poros penggerak dan poros yang digerakkan. Ketidaksejajaran tersebut menyebabkan pusat rotasi kedua poros tidak lagi berimpit sehingga selama poros berputar timbul gaya periodik yang memodifikasi bentuk sinyal getaran. Dampaknya terlihat pada domain waktu sebagai perubahan amplitudo dan bentuk gelombang, sedangkan pada domain frekuensi muncul peningkatan amplitudo pada komponen 1 × rpm, dan terutama 2 × rpm. Distribusi energi getaran akibat misalignment selanjutnya dapat diamati secara lebih jelas melalui analisis Rapat Daya Spektral/*Power Spectral Density* (PSD) yang menunjukkan peningkatan energi pada frekuensi-frekuensi dominan tersebut. Pemodelan kondisi ketidaksejajaran poros melalui simulasi memberikan keuntungan karena karakteristik dinamis sistem dapat diamati secara terkontrol tanpa risiko kerusakan pada peralatan nyata. Selain itu, simulasi memungkinkan visualisasi hubungan antara posisi poros, perubahan gaya dinamis, dan respons getaran secara simultan melalui animasi, domain waktu, *Fast Fourier Transform* (FFT), dan PSD. Pendekatan ini membantu memahami mekanisme terbentuknya pola getaran akibat ketidaksejajaran poros serta menjadi dasar dalam pengembangan metode deteksi dini kerusakan pada mesin berputar [10, 11, 12].

Penelitian ini bertujuan untuk mensimulasikan karakteristik getaran pada poros yang mengalami kondisi ketidaksejajaran poros menggunakan pendekatan numerik berbasis GNU Octave. Simulasi dilakukan untuk menghasilkan sinyal getaran yang merepresentasikan perilaku dinamis poros akibat ketidaksejajaran poros, kemudian dianalisis menggunakan domain waktu, FFT, dan PSD. Secara khusus, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan model simulasi poros pada kondisi ketidaksejajaran poros yang mampu merepresentasikan respons getaran akibat ketidaksejajaran poros, menghasilkan sinyal getaran sintetis yang menggambarkan karakteristik ketidaksejajaran poros pada domain waktu, menganalisis karakteristik spektrum frekuensi menggunakan FFT untuk mengidentifikasi komponen frekuensi dominan dan harmoniknya yang muncul akibat ketidaksejajaran poros, menganalisis distribusi energi getaran menggunakan PSD untuk mengevaluasi perubahan energi pada frekuensi-frekuensi dominan akibat kondisi ketidaksejajaran poros, dan menyediakan visualisasi animasi poros yang terintegrasi dengan hasil analisis domain waktu, FFT, dan PSD sehingga hubungan antara kondisi mekanis poros dan karakteristik sinyal getaran dapat diamati secara lebih komprehensif. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar dalam memahami karakteristik getaran akibat ketidaksejajaran poros serta mendukung pengembangan metode diagnosis kondisi (*condition monitoring*) pada mesin berputar melalui analisis domain waktu dan domain frekuensi.

2. Bahan dan Metode

Penelitian ini menggunakan pendekatan simulasi numerik untuk memodelkan karakteristik getaran pada sistem poros berputar dalam dua kondisi operasi, yaitu kondisi normal dan kondisi ketidaksejajaran poros. Simulasi dikembangkan menggunakan perangkat lunak GNU Octave dengan tujuan menghasilkan sinyal getaran sintetis yang merepresentasikan respons dinamis poros, serta menyediakan visualisasi animasi pergerakan poros. Sinyal yang dihasilkan selanjutnya dianalisis pada domain waktu, domain frekuensi menggunakan FFT, dan distribusi energi menggunakan PSD.

2.1 Pendekatan Simulasi

Pendekatan simulasi dilakukan dengan membangun model sinyal getaran berdasarkan komponen frekuensi putaran poros dan komponen harmoniknya. Kondisi normal digunakan sebagai kondisi

referensi, yang direpresentasikan oleh sinyal dengan komponen utama pada frekuensi putaran dasar (1× rpm). Kondisi ketidaksejajaran poros dimodelkan dengan menambahkan komponen harmonik pada frekuensi 2× dan 3× frekuensi putaran dasar. Pendekatan ini digunakan untuk merepresentasikan perubahan respons getaran akibat ketidaksejajaran antara sumbu poros penggerak dan poros yang digerakkan. Kecepatan putar poros ditetapkan sebesar 1200 rpm, yang ekuivalen dengan frekuensi putaran sebesar 20 Hz. Sinyal getaran dibangkitkan menggunakan frekuensi sampling 1000 Hz dengan durasi simulasi 10 detik, sehingga diperoleh 10.000 sampel data pada setiap kondisi simulasi. Parameter tersebut dipilih untuk menghasilkan resolusi data yang memadai dalam analisis domain waktu dan domain frekuensi. Dengan frekuensi putaran 20 Hz, komponen harmonik yang digunakan dalam model ketidaksejajaran poros terdiri atas frekuensi 20 Hz sebagai komponen 1 x rpm, 40 Hz sebagai komponen 2 × rpm, dan 60 Hz sebagai komponen 3 × rpm.

Model simulasi dibangun dengan menjumlahkan komponen sinusoidal pada frekuensi putaran dasar dan harmoniknya. Pada kondisi normal, sinyal didominasi oleh komponen 1× RPM dengan amplitudo relatif kecil serta ditambahkan noise acak beramplitudo rendah untuk merepresentasikan variasi sinyal. Pada kondisi ketidaksejajaran poros, komponen harmonik kedua dan ketiga ditambahkan ke komponen fundamental sehingga menghasilkan bentuk gelombang yang lebih kompleks. Perbedaan karakteristik kedua kondisi tersebut kemudian dievaluasi melalui perubahan bentuk gelombang, kemunculan komponen harmonik pada spektrum FFT, dan perubahan distribusi energi pada PSD. Selain pembangkitan sinyal, pendekatan simulasi juga mencakup visualisasi kinematik poros. Animasi dibuat pada beberapa posisi sudut poros, yaitu 0°, 120°, dan 240°, untuk menggambarkan perubahan orientasi poros selama proses rotasi. Pada kondisi ketidaksejajaran poros, visualisasi mempertahankan offset antara sumbu poros penggerak dan poros yang digerakkan selama rotasi. Dengan demikian, pendekatan simulasi tidak hanya menghasilkan sinyal getaran, tetapi juga menghubungkan kondisi geometris poros dengan karakteristik respons getaran yang dihasilkan.

2.2 Kondisi Normal

Pada kondisi normal, poros diasumsikan berputar secara ideal tanpa ketidaksejajaran poros maupun cacat mekanis. Sinyal getaran dimodelkan sebagai gelombang sinus yang didominasi oleh komponen frekuensi putaran (1× rpm) dengan amplitudo relatif kecil dan ditambahkan gangguan acak (*noise*) beramplitudo rendah untuk merepresentasikan kondisi pengukuran nyata.

2.3 Kondisi Ketidaksejajaran Poros

Pada kondisi ketidaksejajaran poros, model getaran dibangun dengan menambahkan komponen harmonik kedua (2 × rpm) dan ketiga (3 × rpm) pada sinyal dasar. Penambahan komponen harmonik tersebut digunakan untuk merepresentasikan karakteristik getaran akibat ketidaksejajaran poros. Dengan kecepatan putar 1200 rpm atau 20 Hz, komponen yang digunakan dalam simulasi adalah 20 Hz untuk 1 × rpm, 40 Hz untuk 2 × rpm, dan 60 Hz untuk 3 × rpm. Penjumlahan ketiga komponen tersebut menghasilkan pola getaran yang lebih kompleks dibandingkan kondisi normal. Animasi poros pada kondisi ketidaksejajaran poros dibuat pada posisi sudut 0°, 120°, dan 240°. Setiap posisi menunjukkan orientasi poros selama proses rotasi dengan tetap mempertahankan offset antara sumbu poros penggerak dan poros yang digerakkan. Visualisasi tersebut digunakan sebagai pelengkap analisis sinyal untuk memperlihatkan hubungan antara kondisi geometris poros dan respons getaran yang dihasilkan.

2.4 Analisis Sinyal Getaran

Analisis sinyal getaran dilakukan melalui tiga tahapan. Tahap pertama adalah analisis domain waktu yang digunakan untuk mengamati perubahan amplitudo dan bentuk gelombang akibat ketidaksejajaran poros. Tahap kedua adalah transformasi sinyal menggunakan FFT untuk memperoleh distribusi amplitudo terhadap frekuensi. Pada kondisi normal diharapkan muncul puncak dominan pada frekuensi putaran 1 × rpm, sedangkan pada kondisi ketidaksejajaran poros diharapkan muncul peningkatan komponen harmonik, terutama pada 2 × rpm, dan 3 × rpm. Tahap ketiga adalah perhitungan PSD menggunakan metode Welch untuk mengevaluasi distribusi energi getaran pada setiap komponen frekuensi. PSD dihitung menggunakan fungsi *pwelch* pada GNU *Octave* dengan jendela *Hamming* sepanjang 1024 sampel, *overlap* 75%, dan NFFT 8192. Hasil PSD selanjutnya dihaluskan menggunakan

moving average lima titik (*movmean*) untuk meningkatkan keterbacaan kurva. Seluruh hasil simulasi berupa sinyal domain waktu, spektrum FFT, PSD, dan animasi poros kemudian dibandingkan antara kondisi normal dan ketidaksejajaran poros untuk mengidentifikasi karakteristik getaran yang berkaitan dengan ketidaksejajaran poros.

Analisis sinyal getaran yang digunakan untuk mendeteksi dan membedakan kondisi operasi menggunakan model dinamis sistem getaran satu derajat kebebasan *Single Degree of Freedom* (SDOF). Model ini ditunjukkan pada Persamaan 1 dengan *m* adalah massa sistem (kg), c adalah koefisien redaman (N·s/m), *k* adalah konstanta kekakuan pegas (N/m), sedangkan F(t) adalah gaya eksitasi (N) yang berubah terhadap waktu. Model ini menjadi dasar teoritis dari perubahan gaya eksitasi yang mempengaruhi perpindahan x (m), kecepatan ẋ (m/s), dan percepatan getaran ẍ (m/s^2). Model matematika getaran poros ini berlaku untuk semua kondisi komponen mesin.

$$mx^{\cdot\cdot}(t) + cx^{\cdot}(t) + kx(t) = F(t) \tag{1}$$

2.5 Model Numerik Kondisi Normal

Pada kondisi normal, gaya eksitasi berasal dari putaran poros ditunjukkan di Persamaan 2.

$$F(t) = F_0 \sin(2\pi f_r t) \tag{2}$$

Dengan demikian, sinyal getaran dan nilai f_r dapat dituliskan sebagai Persamaan 3, 4, dan 5.

$$x(t) = A \sin(2\pi f_r t) \tag{3}$$

dengan,

$$f_r = \frac{RPM}{60} \tag{4}$$

Untuk penelitian ini nilai f_r seperti berikut.

$$f_r = \frac{1200}{60} = 20\ Hz \tag{5}$$

2.6 Model Numerik Kondisi Ketidaksejajaran Poros

Pada kondisi ketidaksejajaran poros, dengan respons getaran tidak hanya didominasi oleh frekuensi putaran dasar (1 × rpm), tetapi juga mengandung harmonik kedua (2 × rpm) dan ketiga (3 × rpm). Penjumlahan ketiga komponen sinusoidal tersebut menggambarkan bahwa ketidaksejajaran poros menghasilkan pola getaran yang lebih kompleks dibandingkan kondisi normal, sehingga model ini sesuai digunakan untuk simulasi maupun analisis karakteristik getaran pada domain waktu dan frekuensi. Persamaan tersebut dinyatakan dalam model sederhana di Persamaan 6 dan 7.

$$x(t) = A_1 \sin(2\pi f_r t) + A_2 \sin(4\pi f_r t) + A_3 \sin(6\pi f_r t) \tag{6}$$

atau

$$x(t) = \sum_{n=1}^{3} A_n \sin\,(2\pi n\, f_r t) \tag{7}$$

Masing-masing menyatakan amplitudo getaran pada komponen 1×, 2×, dan 3× frekuensi putaran (f_r).

2.7 Domain Waktu

Pada analisis domain waktu, sinyal getaran hasil pengukuran direpresentasikan sebagai sinyal diskrit x(n) yaitu deretan nilai amplitudo yang diperoleh pada setiap interval waktu sampling. Sinyal ini terdiri atas *N* sampel dengan indeks n = 0,1, …, N−1, sehingga setiap nilai x(n) menunjukkan amplitudo getaran pada waktu pengambilan sampel tertentu. Representasi sinyal diskrit ini menjadi dasar dalam analisis karakteristik getaran di domain waktu serta digunakan sebagai masukan untuk proses transformasi ke domain frekuensi menggunakan FFT dan perhitungan PSD.

2.8 Fast Fourier Transformation

Transformasi Fourier diperoleh menggunakan FFT, algoritma cepat untuk menghitung *Discrete Fourier Transform* (DFT) lewat Persamaan 8. Persamaan DFT digunakan untuk mentransformasikan sinyal dari domain waktu ke domain frekuensi. Namun, karena perhitungan DFT memerlukan waktu komputasi yang tinggi, penelitian ini menggunakan algoritma FFT yang menghasilkan spektrum identik dengan DFT tetapi dengan komputasi yang lebih efisien.

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j2\pi kn/N} \tag{8}$$

Spektrum amplitudo dinyatakan dalam Persamaan 9.

$$A(k) = \frac{2}{N} |X(k)| \tag{9}$$

2.9 *Power Spectral Density* (PSD)

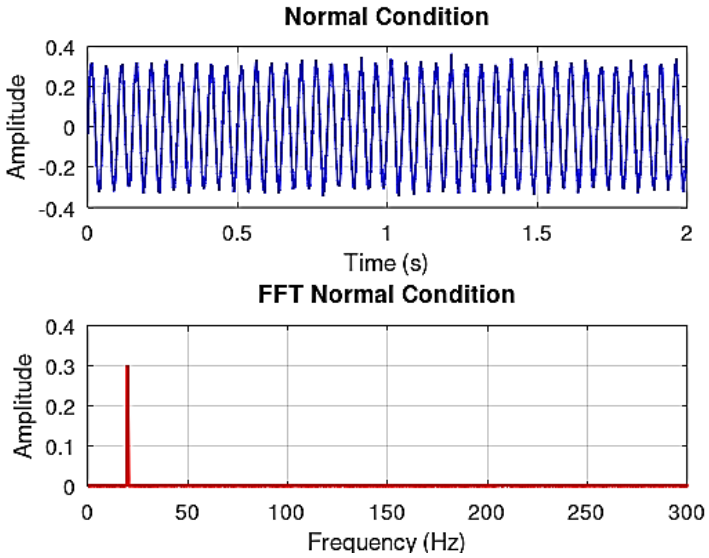
Dalam statistika sinyal dan teknik, PSD adalah metode statistik untuk menganalisis dan mengkarakterisasi getaran atau sinyal acak (stokastik). Analisis PSD menunjukkan bagaimana sebaran energi atau daya sinyal tersebar di berbagai komponen frekuensi. Besaran PSD dihitung menggunakan metode *Welch* dengan fungsi *pwelch* (f) pada GNU Octave dengan jendela *Hamming* sepanjang 1024 sampel, *overlap* 75%, dan NFFT 8192. Selanjutnya, hasil PSD dihaluskan menggunakan *moving average* lima titik (*movmean*) untuk meningkatkan keterbacaan kurva seperti ditunjukkan pada Persamaan 10.

$$P_{Welch}(f) = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^{L} P_i(f) \tag{10}$$

Jumlah segmen *L* adalah potongan sinyal yang digunakan untuk menghitung PSD secara terpisah sebelum hasilnya dirata-ratakan menggunakan metode Welch. Frekuensi harmonik digunakan dalam simulasi untuk kemudian diproses FFT dan PSD. Parameter simulasi digunakan untuk membangkitkan sinyal ketidaksejajaran poros.

3 Hasil dan Pembahasan

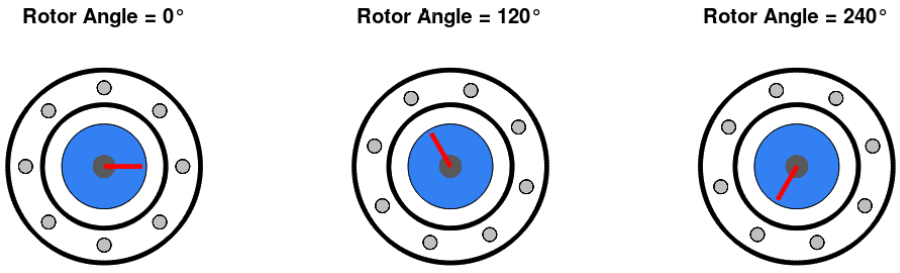
Pada kondisi operasi normal, sistem putar menghasilkan respons getaran yang stabil dan periodik, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1. Pada domain waktu, sinyal memiliki pola sinusoidal yang relatif seragam dengan amplitudo yang konstan selama periode pengamatan 10 detik. Tidak terlihat adanya perubahan amplitudo secara tiba-tiba, modulasi amplitudo, maupun impuls yang umumnya mengindikasikan adanya ketidakseimbangan massa, *ketidaksejajaran poros*, atau kerusakan elemen bantalan. Hal ini menunjukkan bahwa sistem beroperasi dalam kondisi dinamis yang stabil.



Gambar 1 Karakteristik amplitude terhadap domain waktu dan FFT pada kondisi mesin normal

Hasil analisis FFT memperlihatkan satu puncak spektrum yang dominan pada frekuensi sekitar 20 Hz, yang sesuai dengan kecepatan putar motor sebesar 1200 rpm (20 Hz). Dominasi komponen frekuensi putaran (1× *rotational frequency*) dengan amplitudo harmonik yang sangat kecil menunjukkan bahwa sistem tidak mengalami gangguan mekanis yang signifikan. Tidak munculnya puncak-puncak tambahan pada frekuensi harmonik maupun frekuensi karakteristik bantalan menunjukkan bahwa simulasi merepresentasikan kondisi operasi normal.

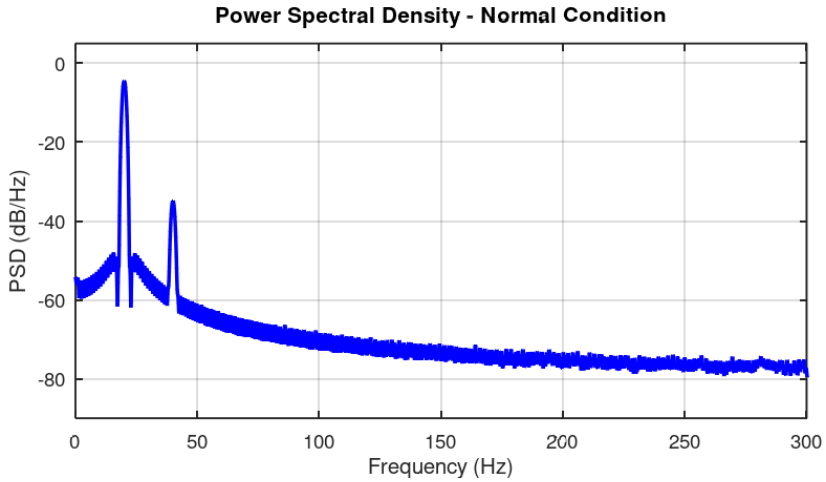
Kondisi fisik sistem pada Gambar 2 memperlihatkan tiga cuplikan posisi poros pada sudut 0°, 120°, dan 240° selama satu putaran penuh. Hasil animasi memperlihatkan rotor, poros, cincin dalam, cincin luar, dan elemen bola bantalan yang berputar secara normal tanpa gangguan (kondisi normal). Perubahan orientasi poros hanya menggambarkan gerakan rotasi yang kontinyu, sedangkan distribusi bola bantalan tetap seragam mengelilingi lintasan (*raceway*). Tidak terdapat eksentrisitas poros maupun perubahan posisi elemen bantalan yang dapat memicu variasi gaya dinamis. Oleh karena itu, gaya sentrifugal yang dihasilkan selama rotasi relatif konstan sehingga menghasilkan sinyal getaran yang stabil sebagaimana ditunjukkan pada domain waktu dan frekuensi.



Gambar 2 Cuplikan simulasi sistem putar dalam kondisi operasi normal, menunjukkan orientasi poros pada 0°, 120°, dan 240° selama satu putaran penuh pada 1200 rpm (20 Hz)

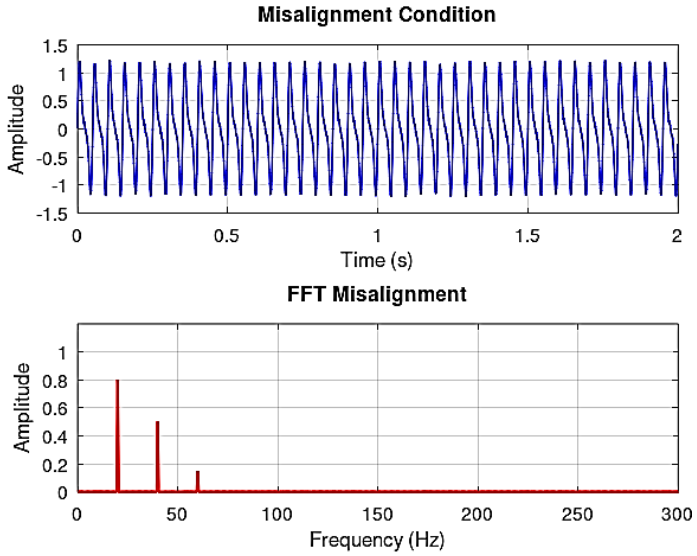
Hasil simulasi ini dapat dijadikan kondisi acuan (*baseline*) untuk membandingkan karakteristik getaran pada berbagai kondisi kerusakan selain ketidaksejajaran poros, seperti *unbalance, mechanical looseness*, maupun kerusakan bantalan. Setiap kondisi gangguan diperkirakan akan menghasilkan perubahan pada bentuk gelombang di domain waktu maupun kemunculan komponen frekuensi tambahan pada spektrum FFT yang berbeda dari karakteristik kondisi normal. Karakteristik tersebut sesuai dengan teori analisis getaran pada mesin berputar dan yang dijabarkan oleh Tiboni dkk. (2022)

[13], Rahman dkk. (2022) [14], dan Yu dkk. (2024) [15] dengan sistem yang beroperasi dalam kondisi sehat umumnya didominasi oleh komponen frekuensi putaran (1× *rotational frequency*), sedangkan amplitudo harmonik dan komponen frekuensi karakteristik kerusakan masih sangat rendah atau tidak muncul.



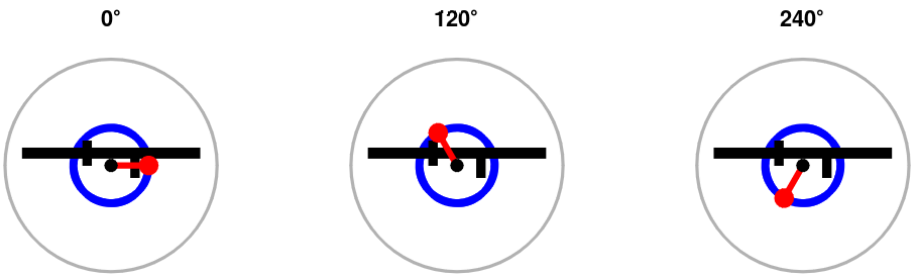
Gambar 3 Model PSD dari kondisi operasi normal yang disimulasikan pada kecepatan putaran 1200 rpm

Gambar 3 menunjukkan puncak spektral dominan diamati pada frekuensi putaran fundamental (20 Hz), sementara hanya harmonik kedua yang lemah yang hadir, menunjukkan operasi poros yang stabil. Berdasarkan Gambar 3, PSD dari kondisi operasi normal yang disimulasikan pada kecepatan putaran 1200 rpm (20 Hz). Puncak spektral dominan diamati pada sekitar 20 Hz, yang sesuai dengan frekuensi putaran fundamental poros. Puncak yang lebih kecil muncul di dekat 40 Hz, mewakili harmonik kedua yang lemah yang mungkin timbul dari interaksi mekanis kecil yang termasuk dalam model simulasi. Terlepas dari komponen-komponen ini, energi spektral yang tersisa terdistribusi pada tingkat yang relatif rendah, menunjukkan operasi poros yang stabil tanpa komponen frekuensi terkait kesalahan yang signifikan. Tidak adanya puncak harmonik tambahan atau energi pita lebar menegaskan bahwa sistem yang disimulasikan beroperasi dalam kondisi normal dengan eksitasi getaran minimal. Oleh karena itu, PSD menyediakan spektrum referensi yang dapat digunakan sebagai dasar untuk perbandingan dengan kondisi kesalahan seperti ketidakseimbangan, ketidaksejajaran, kelonggaran mekanis, dan kerusakan bantalan.



Gambar 4 Karakteristik amplitude terhadap domain waktu dan FFT pada kondisi mesin ketidaksejajaran poros

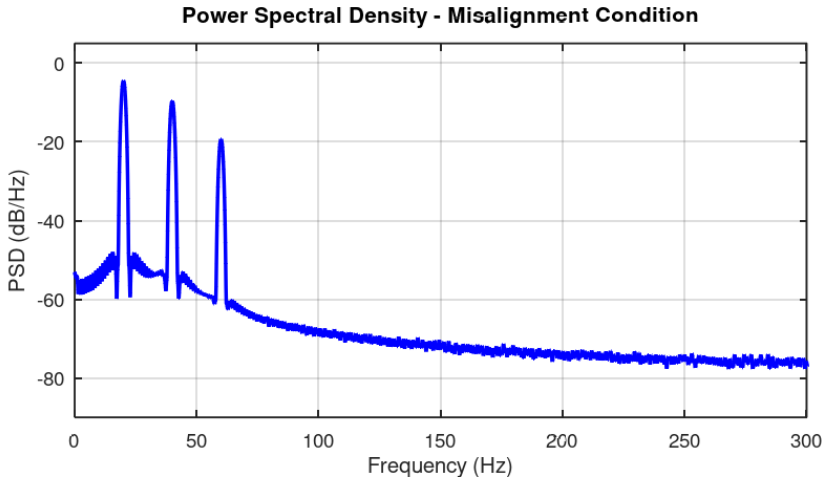
Gambar 4 menunjukkan karakteristik sinyal getaran pada kondisi ketidaksejajaran poros yang dianalisis dalam domain waktu dan domain frekuensi (FFT). Pada grafik domain waktu (bagian atas), sinyal getaran tampak memiliki pola periodik yang relatif stabil dengan amplitudo berkisar ±1,2, namun bentuk gelombangnya tidak lagi berupa sinus murni. Hal ini menunjukkan adanya gangguan akibat ketidaksejajaran poros yang menyebabkan perubahan gaya dinamis selama sistem berputar. Sementara itu, hasil analisis FFT (bagian bawah) memperlihatkan adanya puncak amplitudo dominan pada frekuensi putaran (1× rpm) sekitar 20 Hz, disertai puncak harmonik pada 40 Hz (2× rpm) dan harmonik yang lebih kecil di sekitar 60 Hz (3× rpm). Kemunculan harmonik kedua (2× rpm) merupakan salah satu karakteristik utama kondisi ketidaksejajaran poros karena menunjukkan adanya gaya tambahan akibat ketidaksejajaran poros dan kopling. Dengan demikian, kombinasi pola gelombang pada domain waktu dan kemunculan harmonik pada spektrum frekuensi mengindikasikan bahwa sistem mengalami kondisi ketidaksejajaran poros yang menghasilkan distribusi getaran lebih kompleks dibandingkan kondisi normal.



Gambar 5 Hasil animasi tiga posisi poros (0°, 120°, dan 240°) akibat ketidaksejajaran sumbu poros

Tiga ilustrasi representatif yang diekstrak dari animasi ketidaksejajaran poros pada posisi sudut poros 0°, 120°, dan 240° ditunjukkan pada Gambar 5. Ketiga bingkai tersebut menggambarkan gerakan rotasi poros sambil mempertahankan offset konstan antara sumbu poros dan pusat poros, yang mewakili kondisi ketidaksejajaran paralel. Meskipun orientasi poros berubah terus menerus selama rotasi, offset geometris tetap tidak berubah, menunjukkan bahwa ketidaksejajaran adalah cacat mekanis stasioner dan bukan ketidakseimbangan rotasi. Visualisasi tersebut menunjukkan bahwa sumbu poros dan poros tidak kolinear sepanjang siklus rotasi. Akibatnya, kopling mentransmisikan gaya siklik ke bantalan pendukung, menghasilkan komponen getaran periodik yang disinkronkan dengan rotasi poros. Tidak seperti kondisi operasi normal, di mana pusat poros dan poros tetap sejajar, kondisi ketidaksejajaran menimbulkan beban dinamis tambahan karena hubungan eksentrik yang terus-menerus antara poros yang terhubung. Ketiga posisi sudut tersebut lebih lanjut menegaskan bahwa konfigurasi mekanis ketidaksejajaran tidak bergantung pada sudut poros sesaat. Sebaliknya, hanya orientasi poros yang berputar yang berubah, sedangkan offset poros tetap konstan. Perilaku ini mencerminkan karakteristik fisik ketidaksejajaran paralel yang diamati pada mesin berputar, di mana perpindahan relatif antara garis tengah poros tetap konstan selama operasi.

Oleh karena itu, animasi ini memberikan representasi visual yang jelas tentang perilaku kinematik sistem poros yang tidak sejajar. Ini memfasilitasi pemahaman tentang bagaimana offset poros yang konstan menghasilkan eksitasi berulang selama setiap putaran, yang kemudian muncul dalam sinyal getaran sebagai komponen frekuensi rotasi dominan dan, dalam banyak kasus praktis, amplitudo yang meningkat baik pada frekuensi fundamental (1× rpm) maupun frekuensi harmonik. Akibatnya, visualisasi ini berfungsi sebagai pelengkap yang efektif untuk analisis domain waktu dan domain frekuensi yang disajikan dalam studi ini dengan menggambarkan mekanisme fisik yang bertanggung jawab atas pembangkitan getaran dalam kondisi ketidaksejajaran.



Gambar 6 PSD pada kondisi ketidaksejajaran poros hasil simulasi dengan kecepatan putar 1200 rpm

Gambar 6 menyajikan, bahwa spektrum menunjukkan puncak dominan pada frekuensi putaran (20 Hz) disertai munculnya harmonik kedua (40 Hz) dan harmonik ketiga (60 Hz) yang mengindikasikan karakteristik getaran akibat ketidaksejajaran poros. Berdasarkan hasil analisis domain frekuensi pada kondisi ketidaksejajaran poros, karakteristik getaran tidak hanya dicirikan oleh bentuk sinyal yang mengalami distorsi pada domain waktu, melainkan juga ditunjukkan secara kuantitatif melalui nilai puncak amplitudo FFT dan rapat daya spektral (PSD) pada frekuensi putaran dasar beserta komponen harmoniknya seperti disajikan pada Gambar 6. Pada spektrum FFT, puncak amplitudo dominan berada pada frekuensi putaran 1× rpm (20 Hz) sebesar 1,000, diikuti oleh kemunculan harmonik kedua 2×rpm (40 Hz) sebesar 0,550, serta harmonik ketiga 3× rpm (60 Hz) sebesar 0,180. Penambahan komponen harmonik 2× rpm yang signifikan ini mengonfirmasi timbulnya gaya siklik akibat ketidaksejajaran poros. Sejalan dengan hasil FFT, analisis PSD menggunakan metode *Welch* menghasilkan nilai puncak energi spektral berturut-turut sebesar -4,467 dB/Hz ($3{,}575 \times 10^{-1}$ unit²/Hz) pada 1×rpm, -9,668 dB/Hz ($1{,}079 \times 10^{-1}$ unit²/Hz) pada 2× rpm, dan -19,383 dB/Hz ($1{,}153 \times 10^{-2}$ unit²/Hz) pada 3× rpm. Konsentrasi energi yang tinggi pada 2× rpm dan 3× rpm menunjukkan terjadinya redistribusi energi getaran menuju spektrum frekuensi yang lebih tinggi, yang secara kuantitatif membedakan kondisi ketidaksejajaran poros dari kondisi operasi normal.

Tabel 1 Perbandingan karakteristik kondisi normal dan ketidaksejajaran poros berdasarkan analisis domain waktu, FFT, dan PSD

Parameter	Kondisi normal	Kondisi ketidaksejajaran poros
Domain waktu	Gelombang sinusoidal stabil dengan amplitudo relatif konstan.	Gelombang masih periodik, namun amplitudo meningkat dan bentuk sinyal dipengaruhi oleh harmonik akibat ketidakselarasan poros.
Frekuensi dominan (FFT)	20 Hz (1× rpm).	20 Hz (1× rpm) tetap dominan.
Harmonik (FFT)	Harmonik kedua (40 Hz) sangat kecil atau hampir tidak terlihat.	Harmonik kedua (40 Hz) meningkat secara signifikan, diikuti harmonik ketiga (60 Hz).
PSD	Energi spektral terkonsentrasi pada frekuensi 20 Hz dengan noise floor rendah.	Energi spektral meningkat pada 20 Hz serta terdistribusi pada harmonik 40 Hz dan 60 Hz.
Interpretasi	Menunjukkan kondisi poros beroperasi normal tanpa gangguan mekanis.	Menunjukkan adanya ketidakselarasan poros yang menghasilkan eksitasi periodik dan peningkatan harmonik.

Dibandingkan dengan kondisi normal, distribusi energi spektral pada kondisi ketidaksejajaran poros lebih terkonsentrasi pada frekuensi harmonik, khususnya pada 2× rpm, yang merupakan salah satu karakteristik utama ketidaksejajaran poros pada sistem poros. Dengan demikian, hasil animasi memberikan pemahaman mengenai mekanisme fisik terjadinya ketidakselarasan poros, sedangkan hasil PSD mengonfirmasi bahwa kondisi tersebut menghasilkan peningkatan energi getaran pada frekuensi fundamental dan harmoniknya. Data berupa simulasi, sehingga karakteristik (*qualitative comparison*) dan parameter utama (*quantitative comparison*), ditampilkan pada Tabel 1. Pada domain waktu, kondisi ketidaksejajaran poros menunjukkan peningkatan kompleksitas sinyal dibandingkan kondisi normal akibat adanya ketidakselarasan poros. Pada domain frekuensi, kondisi normal hanya didominasi oleh frekuensi putaran dasar (1× rpm), sedangkan kondisi ketidaksejajaran poros memperlihatkan kemunculan harmonik kedua (2× rpm) dan harmonik ketiga (3× rpm). Hasil PSD juga menunjukkan bahwa energi getaran pada kondisi ketidaksejajaran poros tidak hanya terkonsentrasi pada frekuensi dasar, tetapi juga meningkat pada frekuensi harmonik, sehingga karakteristik spektralnya berbeda secara jelas dari kondisi normal. Hasil penelitian ini sejalan dengan beberapa penelitian terdahulu mengenai karakteristik getaran akibat ketidaksejajaran poros. Penelitian Pavlović dkk. (2024) [11] melaporkan bahwa kondisi ketidaksejajaran poros ditandai oleh tetap dominannya komponen frekuensi putaran (1× rpm), disertai peningkatan amplitudo harmonik kedua (2× rpm) sebagai indikator utama ketidakselarasan poros. Hasil tersebut sesuai dengan penelitian ini yang menunjukkan puncak spektrum pada 20 Hz (1× rpm) dengan kemunculan harmonik 40 Hz (2× rpm) dan harmonik ketiga 60 Hz (3× rpm). Selanjutnya, Morel dan Desavale (2025) [12] menunjukkan bahwa ketidaksejajaran poros tidak hanya meningkatkan amplitudo harmonik, tetapi juga menyebabkan distribusi energi spektral berpindah dari frekuensi dasar menuju harmonik-harmonik yang lebih tinggi. Fenomena tersebut juga terlihat pada hasil PSD penelitian ini, di mana energi tidak lagi terkonsentrasi hanya pada frekuensi 20 Hz, tetapi meningkat pada harmonik 40 Hz dan 60 Hz. Selain itu, penelitian Suryawanshi et al. (2021) [16] juga menegaskan pentingnya analisis spektrum dalam mendeteksi ketidaksejajaran pada sistem rotor-bantalan.

Diagnosis ketidaksejajaran poros menggunakan FFT/PSD menjelaskan bahwa kombinasi analisis domain waktu dan domain frekuensi memberikan identifikasi kondisi ketidaksejajaran poros yang lebih akurat dibandingkan hanya menggunakan salah satu metode. Temuan tersebut memvalidasi pendekatan penelitian ini karena perubahan bentuk gelombang pada domain waktu didukung oleh kemunculan harmonik yang jelas pada analisis FFT dan redistribusi energi pada PSD. Dengan demikian, kesesuaian hasil penelitian ini dengan penelitian terdahulu menunjukkan bahwa peningkatan harmonik kedua dan ketiga serta perubahan distribusi energi spektral merupakan karakteristik yang konsisten dan dapat dijadikan indikator yang andal dalam mendeteksi kondisi ketidaksejajaran pada sistem poros.

4 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi, kondisi ketidaksejajaran poros pada poros berhasil dimodelkan menggunakan pendekatan numerik sehingga mampu menghasilkan karakteristik getaran yang dapat diamati pada domain waktu, *Fast Fourier Transform* (FFT), dan *Power Spectral Density* (PSD). Pada domain waktu, sinyal getaran menunjukkan perubahan bentuk gelombang dan peningkatan amplitudo dibandingkan kondisi normal akibat adanya ketidaksejajaran poros. Hasil analisis FFT memperlihatkan bahwa kondisi ketidaksejajaran poros menghasilkan komponen frekuensi dominan pada 1× rpm disertai munculnya harmonik, terutama 2× rpm, yang merupakan karakteristik umum dari kerusakan ketidaksejajaran poros. Sementara itu, analisis PSD menunjukkan peningkatan distribusi energi pada frekuensi-frekuensi dominan tersebut, sehingga pola energi getaran dapat diamati dengan lebih jelas dan stabil dibandingkan hanya menggunakan spektrum FFT. Selain menghasilkan sinyal getaran, simulasi juga mampu memvisualisasikan perilaku poros melalui animasi yang menggambarkan ketidaksejajaran poros selama proses rotasi. Integrasi antara animasi, domain waktu, FFT, dan PSD memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai hubungan antara kondisi mekanis poros dan respons getaran yang dihasilkan. Secara keseluruhan, simulasi ini menunjukkan bahwa analisis gabungan menggunakan domain waktu, FFT, dan PSD efektif untuk mengidentifikasi karakteristik getaran akibat ketidaksejajaran poros. Hasil penelitian ini dapat dijadikan sebagai dasar dalam pengembangan metode

pembelajaran, diagnosis dini kerusakan, dan sistem pemantauan kondisi (*condition monitoring*) pada mesin berputar.

Ucapan Terima kasih

Penulis menyampaikan apresiasi dan terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (LPPM) Universitas Mataram atas dukungan dana melalui PNBP Fakultas Teknik Universitas Mataram berdasarkan Kontrak Penelitian Nomor: 3124/UN18.l1/PP/2025.

Daftar Notasi

$x(t)$	Sinyal getaran pada domain waktu (m/s^2 atau g)
$x[n]$	Sinyal getaran diskrit pada sampel ke-n (m/s^2 atau g)
t	Waktu (s)
n	Indeks sampel
N	Jumlah sampel sinyal
A	Amplitudo sinyal (m/s^2 atau g)
f	Frekuensi (Hz)
fs	Frekuensi sampling (Hz)
Δt	Interval sampling (1/fs) (s)
T	Durasi sinyal (s)
$X(k)$	Hasil transformasi FFT pada indeks ke-k
k	Indeks frekuensi FFT
$Pxx(f)$	Power Spectral Density (PSD) $((m/s^2)^2/Hz)$
$Pi(f)$	PSD segmen ke-i $(m/s^2)^2/Hz$
L	Jumlah segmen pada metode Welch
$w(n)$	Fungsi jendela (window function)
U	Faktor normalisasi energi window
$Rxx(\tau)$	Fungsi autokorelasi sinyal $(m/s^2)^2$
τ	Waktu tunda (time lag) s
j	Bilangan imajiner
e	Basis logaritma natural
π	Konstanta pi (3,14159)
rpm	Kecepatan putar poros putaran/menit
fr	Frekuensi putaran poros (Hz)
1× rpm	Frekuensi putaran dasar poros (Hz)
2× rpm	Harmonik kedua akibat ketidaksejajaran poros (Hz)
θ	Sudut putaran poros (rad)
r	Jari-jari poros (m)
A_1, A_2	Amplitudo komponen 1× RPM m/s^2, Amplitudo komponen 2× RPM m/s^2)
Φ	Sudut fase (rad)

Daftar Pustaka

[1] S.S.A. Junior, Analisis pengaruh misalignment pada kinerja motor induksi, Majalah Ilmiah Gema Maritim, 24(1) (2022).

[2] D.Y.S. Utama, M.A.B. Suhariyanto, Analysis of shaft alignment on vibration and motor power consumption in cooling water pumps, Mechanical Science Reports (MSR), 3 (1) (2025) 1-12.

[3] B. Abouelanouar, A. Elkihel, H. Gziri, Experimental study on energy consumption in rotating machinery caused by misalignment, SN Appl. Sci., 2 (7) (2020) 1215.

[4] M.A. Ghasemi, S. Bab, M.K. Mahdiabadi, Nonlinear dynamics of a non-stationary rotor-disk-bearing system with rub-impact and geometric nonlinearity under non-ideal excitation, Sci. Rep., 16 (1) (2026) 7423.

[5] Bearing Bush - an overview ScienceDirect Topics, Available online: https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/bearing-bush (accessed on 21 July 2026).

[6] D. Franke, Rolling Bearing Diagnosis on Machine Sets., Berlin, Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, 2026.

[7] Z. Guan, Vibration analysis of shaft misalignment and diagnosis method of structure faults for rotating machinery, International Journal of Performability Engineering, 2017.
[8] T. Chu, T. Nguyen, H. Yoo, J. Wang, A review of vibration analysis and its applications, Heliyon, 10 (5) (2024) e26282.
[9] A. Navarro-Navarro, V. Biot-Monterde, J.E. Ruiz-Sarrio, J.A. Antonino-Daviu, Current- and vibration-based detection of misalignment faults in synchronous reluctance motors, Machines, 13 (4) (2025) 319.
[10] H. Guan, Modeling of misaligned bearing induced by coupling misalignment and assembly errors and vibration analysis in dual-rotor system, Mech. Syst. Signal Process., 230 (2025) 112656.
[11] I. Pavlović, K. Bratić, R. Kiciński, M. Kluczyk, Testing and modeling of shaft vibrations due to misalignment, J. Mar. Sci. Eng., 12 (12) (2024) 2284.
[12] I.D. More, R.G. Desavale, Dynamic modelling of deep groove ball bearing system with outer raceway spall and misalignment behaviour diagnosis method-measured and simulated identification, Journal of Vibration Engineering & Technologies, 13 (5) (2025) 302.
[13] M. Tiboni, C. Remino, R. Bussola, C. Amici, A review on vibration-based condition monitoring of rotating machinery, Applied Sciences, 12 (3) (2022) 972.
[14] A. Rahman, M.E. Hoque, F. Rashid, F. Alam, M.M. Ahmed, Health condition monitoring and control of vibrations of a rotating system through vibration analysis, J. Sens., 2022 (2022) 1-12.
[15] X. Yu, X. Chen, M. Du, Y. Yang, Z. Feng, Rotating machinery fault diagnosis under time–varying speed conditions based on adaptive identification of order structure, Processes, 12 (4) (2024) 752.
[16] G.L. Suryawanshi, S.K. Patil, R. Desavale, Empirical-based DA and ANN to diagnose misalignment in rotor-bearing system, Nondestructive Testing and Evaluation, 39 (4) (2023) 776-801.