

## Identifikasi Karakteristik Kerusakan *Bearing* Berdasarkan Analisis FFT dan *Envelope Spectrum* pada Sinyal Getaran

Ade Usra Berli<sup>1)\*</sup>, Dythia Septi Kesuma<sup>2)</sup>, Aggrivina Dwiharzandis<sup>3)</sup>, Desmarita Leni<sup>4)</sup>, Wiwin Lovita<sup>5)</sup>

<sup>1)\*</sup>Universitas Muhammadiyah Sumatera Barat, Padang, Indonesia, adeusra@gmail.com

<sup>2)</sup>Universitas Muhammadiyah Sumatera Barat, Padang, Indonesia, dythia@gmail.com

<sup>3)</sup>Universitas Muhammadiyah Sumatera Barat, Padang, Indonesia, aggrivina@gmail.com

<sup>4)</sup>Universitas Muhammadiyah Sumatera Barat, Padang, Indonesia, desmaritaleni@gmail.com

<sup>5)</sup>Universitas Muhammadiyah Sumatera Barat, Padang, Indonesia, lovitawiwini21@gmail.com

### Abstrak

Identifikasi kondisi kerusakan *bearing* berdasarkan sinyal getaran merupakan salah satu pendekatan dalam pemantauan kondisi mesin. Penelitian ini bertujuan menganalisis karakteristik frekuensi getaran *bearing* pada kondisi normal, *inner race fault*, *outer race fault*, dan *ball fault* menggunakan *fast fourier transform* (FFT) dan *envelope spectrum*. Data yang digunakan berasal dari dataset *Case Western Reserve University (CWRU)* dengan frekuensi sampling 12 kHz. Analisis dilakukan dengan mengidentifikasi sepuluh puncak amplitudo terbesar pada rentang frekuensi 0–500 Hz, kemudian membandingkannya dengan frekuensi karakteristik *bearing*, yaitu frekuensi *shaft*, BPFI, BPFO, dan BSF beserta harmoniknya. Tingkat kesesuaian frekuensi dievaluasi berdasarkan *relative error*, sedangkan konsistensi antar file pada setiap kondisi dievaluasi menggunakan *mean relative error* (MRE) dan *standard deviation* (SD). Hasil analisis menunjukkan bahwa kondisi normal didominasi oleh frekuensi *shaft* dan harmoniknya. Pada kondisi *inner race fault*, kedua metode menunjukkan pola harmonik  $1\times-2\times-3\times$ BPFI, dengan pola yang lebih jelas pada *envelope spectrum*, sedangkan pada *outer race fault*, karakteristik BPFO tidak tampak dominan pada FFT tetapi teridentifikasi lebih jelas pada *envelope spectrum* melalui pola  $1\times-2\times-3\times-4\times$ BPFO. Pada *ball fault*, FFT lebih banyak menunjukkan dominasi harmonik *shaft* dan belum memberikan pola BSF yang kuat, sedangkan *envelope spectrum* menunjukkan indikasi karakteristik BSF tetapi masih terdapat tumpang tindih dengan karakteristik BPFO sehingga belum cukup spesifik untuk mengonfirmasi kondisi tersebut. Hasil evaluasi kuantitatif menunjukkan *relative error* yang rendah pada karakteristik target di keempat kondisi, tetapi konsistensi identifikasi tetap bergantung pada pola harmonik dan kemungkinan tumpang tindih karakteristik frekuensi. Secara keseluruhan, kombinasi FFT dan *envelope spectrum* memberikan informasi yang saling melengkapi dalam identifikasi karakteristik getaran *bearing*, khususnya pada kondisi normal, *inner race fault*, dan *outer race fault*, sedangkan identifikasi *ball fault* masih memiliki keterbatasan.

**Kata Kunci:** *pemantauan kondisi, diagnosis kerusakan, karakteristik frekuensi, pemeliharaan prediktif, kesehatan mesin*

### Abstract

*Identification of bearing faults based on vibration signals is one of the approaches used in machine condition monitoring. This study aims to analyze the vibration frequency characteristics of bearings under normal, inner race fault, outer race fault, and ball fault conditions using fast fourier transform (FFT) and envelope spectrum analysis. The data were obtained from the Case Western Reserve University (CWRU) dataset with a sampling frequency of 12 kHz. The analysis was performed by identifying the ten highest-amplitude peaks within the frequency range of 0–500 Hz and comparing them with the characteristic bearing frequencies, namely shaft frequency, BPFI, BPFO, and BSF, along with their harmonics. Frequency agreement was evaluated using relative error, while the consistency of the identified frequencies across files for each condition was evaluated using mean relative error (MRE) and standard deviation (SD). The results showed that the normal condition was dominated by the shaft frequency and its harmonics. Under the inner race fault condition, both methods revealed a harmonic pattern of  $1\times-2\times-3\times\text{BPFI}$ . In the outer race fault condition, the BPFO characteristic was not dominant in the FFT spectrum but was more clearly identified in the envelope spectrum through the  $1\times-2\times-3\times-4\times\text{BPFO}$  pattern. For the ball fault condition, the FFT results were predominantly characterized by shaft-frequency harmonics and did not show a strong BSF pattern, whereas the envelope spectrum indicated BSF-related characteristics, although overlap with BPFO characteristics was still observed, limiting the specificity of the identification. Quantitative evaluation showed relatively low frequency errors for the target characteristics across all four conditions; however, the consistency of fault identification remained dependent on harmonic patterns and potential overlap among characteristic frequencies. Overall, the combination of FFT and envelope spectrum provides complementary information for identifying bearing vibration characteristics, particularly under normal, inner race fault, and outer race fault conditions, while ball fault identification remains subject to limitations.*

**Keywords:** condition monitoring, fault diagnosis, frequency characteristics, predictive maintenance, machinery health

## PENDAHULUAN

*Bearing* merupakan salah satu komponen penting pada mesin berputar karena berfungsi menopang komponen yang berotasi dan memungkinkan gerakan relatif dengan gesekan yang rendah. Kerusakan pada *bearing* dapat mempengaruhi keandalan dan kontinuitas operasi mesin, bahkan dapat berkembang menjadi kegagalan mesin apabila tidak terdeteksi sejak dini. Oleh karena itu, condition monitoring dan fault diagnosis *bearing* menjadi bagian penting dalam menjaga keandalan mesin berputar. Berbagai teknik telah dikembangkan untuk memantau kondisi *bearing*, antara lain analisis temperatur, acoustic emission, analisis arus motor, analisis debris, serta analisis getaran. Di antara berbagai pendekatan tersebut, analisis berbasis getaran banyak digunakan karena sinyal getaran dapat merepresentasikan kondisi dinamis komponen mesin dan memberikan informasi mengenai perubahan kondisi *bearing* selama operasi [1], [2], [3].

Dalam analisis berbasis getaran, sinyal yang diperoleh dari *bearing* umumnya direkam dalam domain waktu, sehingga karakteristik frekuensi yang berkaitan dengan kondisi *bearing* belum dapat diamati secara langsung. Analisis domain frekuensi dapat digunakan untuk mengidentifikasi komponen periodik dalam sinyal, salah satunya melalui *fast fourier transform* (FFT). Selain itu, *envelope analysis* dapat digunakan untuk memperoleh informasi frekuensi dari respons getaran yang berkaitan dengan karakteristik *bearing*. Kedua pendekatan tersebut dapat digunakan untuk mengamati komponen yang berkaitan dengan frekuensi putaran poros serta frekuensi karakteristik *bearing*. Frekuensi karakteristik tersebut ditentukan oleh kecepatan putaran dan parameter geometrik *bearing*, sehingga kesesuaian antara puncak spektrum dengan frekuensi karakteristik dan harmoniknya dapat digunakan sebagai dasar dalam analisis kondisi *bearing* [4] [5].

Dalam penerapannya pada sinyal getaran *bearing*, FFT dan *envelope spectrum* memberikan representasi frekuensi yang dapat digunakan untuk mengamati karakteristik sinyal pada kondisi *bearing* yang berbeda. FFT mengubah representasi sinyal dari domain waktu ke domain frekuensi sehingga distribusi amplitudo terhadap frekuensi dapat dianalisis, sedangkan *envelope spectrum* digunakan untuk mengamati komponen frekuensi dari sinyal hasil proses *envelope analysis*. Kedua pendekatan tersebut memberikan dasar untuk mengamati komponen frekuensi yang muncul pada sinyal getaran *bearing* dan selanjutnya menghubungkannya dengan karakteristik kondisi *bearing* yang dianalisis [6].

Untuk menginterpretasikan karakteristik frekuensi tersebut, diperlukan acuan berupa frekuensi karakteristik *bearing* yang berkaitan dengan geometri *bearing* dan kecepatan putaran poros. Frekuensi karakteristik *bearing* dapat digunakan untuk mengidentifikasi lokasi kerusakan melalui komponen spektrum dan harmoniknya [7]. Secara umum, kerusakan pada *inner race*, *outer race*, dan elemen gelinding menghasilkan frekuensi karakteristik yang berbeda, yaitu *ball pass frequency inner race* (BPFI), *ball pass frequency outer race* (BPFO), dan *ball spin frequency* (BSF). Nilai frekuensi tersebut bergantung pada jumlah elemen gelinding, diameter elemen gelinding, diameter pitch, sudut kontak, serta frekuensi putaran poros [8]. Oleh karena itu, keberadaan puncak spektrum yang berdekatan dengan frekuensi karakteristik beserta kelipatan harmoniknya dapat digunakan sebagai salah satu dasar untuk mengevaluasi kondisi *bearing*.

Dalam penerapannya, keberadaan frekuensi karakteristik tersebut perlu diamati pada spektrum hasil pengukuran untuk mengetahui bagaimana masing-masing kondisi *bearing* direpresentasikan dalam sinyal getaran. Data getaran dari *bearing* dengan kondisi yang berbeda dapat menghasilkan komponen frekuensi yang beragam, baik yang berkaitan dengan frekuensi karakteristik maupun komponen lain yang muncul selama operasi. Oleh karena itu, pemeriksaan terhadap puncak-puncak spektrum dan kesesuaiannya dengan frekuensi teoritis serta harmoniknya diperlukan untuk memperoleh gambaran karakteristik frekuensi pada setiap kondisi *bearing* [3], [6]. Pendekatan tersebut memungkinkan

karakteristik spektrum dari kondisi normal maupun kondisi kerusakan diamati dengan dasar analisis yang sama.

Untuk memperoleh gambaran yang lebih menyeluruh, karakteristik frekuensi perlu diamati pada beberapa kondisi *bearing* yang mewakili keadaan normal maupun jenis kerusakan yang berbeda. Perbandingan tersebut memungkinkan karakteristik frekuensi yang muncul pada suatu kondisi diamati terhadap kondisi lainnya dengan menggunakan dasar pemeriksaan yang sama. Penggunaan data *bearing* dengan kondisi yang berbeda dapat digunakan untuk mengevaluasi keterkaitan antara respons getaran dan karakteristik kondisi yang diwakilinya [1], [2], [9]. Oleh karena itu, pengamatan terhadap beberapa kondisi *bearing* menggunakan FFT dan *envelope spectrum* menjadi penting untuk mengetahui pola frekuensi yang muncul pada masing-masing kondisi serta kesesuaiannya dengan frekuensi karakteristik *bearing*.

Salah satu dataset yang dapat digunakan untuk melakukan evaluasi tersebut adalah dataset Case Western Reserve University (CWRU), yang menyediakan sinyal getaran *bearing* pada kondisi normal maupun dengan beberapa jenis kerusakan pada elemen *bearing*. Penggunaan dataset dengan kondisi *bearing* yang telah diketahui memungkinkan karakteristik frekuensi hasil pengolahan sinyal dibandingkan dengan kondisi *bearing* yang menjadi acuan. Dalam penelitian ini, empat data CWRU digunakan untuk mewakili kondisi *bearing* yang berbeda, yaitu 97.mat sebagai kondisi normal, 105.mat sebagai *inner race fault*, 130.mat sebagai *outer race fault*, dan 118.mat sebagai *ball fault*. Keempat data tersebut dianalisis menggunakan FFT dan *envelope spectrum* dengan prosedur pemeriksaan yang sama terhadap frekuensi *shaft*, BPFI, BPFO, dan BSF beserta harmoniknya.

Meskipun karakteristik frekuensi *bearing* dapat ditentukan secara teoritis, hubungan antara puncak spektrum hasil pengukuran dan frekuensi karakteristik tersebut perlu dievaluasi pada setiap kondisi *bearing*. Masing-masing data dapat menampilkan komponen frekuensi yang berbeda ketika dianalisis menggunakan FFT maupun *envelope spectrum*. Oleh karena itu, diperlukan analisis yang membandingkan puncak-puncak dominan pada kedua spektrum terhadap frekuensi *shaft*, BPFI, BPFO, dan BSF beserta harmoniknya dengan kriteria yang sama. Selain kesesuaian masing-masing puncak, konsistensi hasil identifikasi antar file pada kondisi yang sama juga perlu dievaluasi secara kuantitatif menggunakan *mean relative error* (MRE) dan *standard deviation* (SD). Pendekatan tersebut memungkinkan karakteristik frekuensi yang muncul pada setiap kondisi *bearing* diidentifikasi dan dibandingkan secara sistematis, sekaligus mengevaluasi tingkat kesesuaian dan konsistensi hasil identifikasi tanpa membatasi pemeriksaan hanya pada frekuensi karakteristik yang secara teoritis diasosiasikan dengan kondisi *bearing*.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan membandingkan karakteristik frekuensi sinyal getaran pada empat kondisi *bearing* menggunakan FFT dan *envelope spectrum*. Analisis dilakukan dengan mengidentifikasi sepuluh puncak amplitudo terbesar pada masing-masing spektrum, kemudian memeriksa kesesuaiannya terhadap frekuensi putaran *shaft*, BPFI, BPFO, dan BSF beserta harmoniknya berdasarkan nilai *relative error*. Setiap kondisi *bearing* diperiksa terhadap keempat frekuensi karakteristik tersebut untuk mengetahui pola frekuensi yang muncul pada masing-masing data dan membandingkan karakteristik yang diperoleh dari FFT dan *envelope spectrum*. Selanjutnya, *mean relative error* (MRE) dan *standard deviation* (SD) digunakan untuk mengevaluasi tingkat kesesuaian dan konsistensi identifikasi frekuensi karakteristik antar file pada setiap kondisi *bearing*. Hasil analisis tersebut digunakan untuk mengevaluasi kemampuan kedua metode dalam merepresentasikan karakteristik frekuensi pada kondisi *bearing* normal, *inner race fault*, *outer race fault*, dan *ball fault*.

## METODE PENELITIAN

### Data Penelitian

Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan sinyal getaran *bearing* dari *Case Western Reserve University (CWRU) Bearing Data Center*. Dataset CWRU menyediakan data getaran *bearing* normal dan *bearing* dengan kerusakan terlokalisasi pada *inner race*, *outer race*, dan *rolling element (ball)*, serta informasi mengenai kondisi pengujian dan kecepatan putar [10], [11]. Data pada penelitian ini dipilih pada sisi *Drive End (DE)* dengan frekuensi sampling 12.000 Hz dan kecepatan putar 1797 rpm [11]. Pemilihan kecepatan 1797 rpm dilakukan agar keempat kondisi yang dianalisis berada pada kondisi operasi yang sama sehingga perbandingan karakteristik spektrum dapat dilakukan secara konsisten.

Empat data yang digunakan mewakili kondisi *bearing* normal, *inner race fault*, *outer race fault*, dan *ball fault*, yaitu 97.mat, 105.mat, 130.mat, dan 118.mat. Keempat data tersebut tidak hanya diperiksa terhadap frekuensi karakteristik kerusakan yang sesuai dengan label kondisinya, tetapi seluruh data diperiksa terhadap frekuensi *shaft*, BPFI, BPFO, dan BSF beserta harmoniknya. Pendekatan tersebut digunakan untuk memperoleh gambaran karakteristik frekuensi yang muncul pada masing-masing kondisi dan selanjutnya membandingkan hasil analisis FFT dan *envelope spectrum*.

### Prapengolahan Data

Sebelum dilakukan analisis pada domain frekuensi, sinyal getaran terlebih dahulu melalui tahap prapengolahan berupa *mean removal*. Proses ini dilakukan dengan mengurangi setiap sampel sinyal dengan nilai rata-rata seluruh sampel, sehingga sinyal memiliki nilai rata-rata mendekati nol. *Mean removal* digunakan untuk menghilangkan komponen DC (*DC offset*) yang dapat menghasilkan komponen pada frekuensi 0 Hz dan mengganggu interpretasi spektrum frekuensi [12], [13]. Secara matematis, proses *mean removal* dinyatakan sebagai

$$x'(n) = x(n) - \bar{x} \quad (1)$$

dengan:

$x(n)$  = sinyal getaran asli,

$\bar{x}$  = nilai rata-rata seluruh sampel sinyal,

$x'(n)$  = sinyal hasil *mean removal*.

Sinyal hasil *mean removal* selanjutnya digunakan sebagai masukan untuk dua tahap analisis, yaitu *fast fourier transform* (FFT) dan *envelope spectrum*. Dengan demikian, kedua metode menggunakan sinyal hasil prapengolahan yang sama sehingga perbandingan karakteristik spektrum pada empat kondisi *bearing* dapat dilakukan secara konsisten.

### Analisis Fast fourier transform (FFT)

Setelah tahap prapengolahan, sinyal getaran hasil *mean removal* dianalisis menggunakan *fast fourier transform* (FFT) untuk mengubah representasi sinyal dari domain waktu ke domain frekuensi. Transformasi ini digunakan untuk memperoleh informasi mengenai komponen frekuensi yang terkandung dalam sinyal sehingga karakteristik spektrum pada masing-masing kondisi *bearing* dapat diamati. FFT merupakan algoritma yang menghitung *discrete fourier transform* (DFT) secara efisien dengan mengurangi jumlah operasi komputasi dibandingkan perhitungan DFT secara langsung [4]. Secara matematis, transformasi *fourier* diskrit dinyatakan sebagai

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j2\pi kn/N} \quad (2)$$

dengan:

$X(k)$  = koefisien spektrum pada indeks frekuensi ke  $-k$ ,  
 $x(n)$  = sinyal getaran pada domain waktu,  
 $N$  = jumlah sampel,  
 $n$  = indeks sampel,  
 $k$  = indeks frekuensi.

Frekuensi setiap komponen spektrum ditentukan berdasarkan frekuensi sampling ( $f_s$ ) dan jumlah sampel ( $N$ ), dengan resolusi frekuensi ( $\Delta f$ ) sebesar:

$$\Delta f = \frac{f_s}{N} \quad (3)$$

Pada penelitian ini digunakan frekuensi sampling sebesar 12.000 Hz dengan 243.938 sampel, sehingga diperoleh resolusi frekuensi sekitar 0,049 Hz. Spektrum hasil FFT selanjutnya dibatasi pada rentang 0–500 Hz untuk memfokuskan pemeriksaan pada frekuensi yang digunakan dalam analisis karakteristik *bearing*. Hasil FFT berupa spektrum kompleks yang mengandung informasi magnitudo dan fase. Penelitian ini menggunakan nilai magnitudo yang diperoleh dari nilai absolut hasil FFT, sedangkan informasi fase tidak digunakan. Karena spektrum sinyal real memiliki komponen frekuensi positif dan negatif yang bersifat simetris, analisis selanjutnya hanya menggunakan *positive frequency spectrum*. Magnitudo spektrum digunakan sebagai besaran relatif untuk menentukan dan membandingkan puncak frekuensi dominan pada keempat kondisi *bearing*.

### **Analisis Envelope spectrum**

Setelah analisis FFT dilakukan, tahap berikutnya adalah analisis *envelope spectrum* untuk memperoleh karakteristik frekuensi dari sinyal getaran yang berkaitan dengan kejadian periodik pada *bearing*. *Envelope analysis* merupakan salah satu pendekatan yang digunakan dalam diagnosis *bearing* untuk mengekstraksi informasi frekuensi karakteristik dari respons getaran yang termodulasi oleh kejadian impulsif akibat kerusakan *bearing* [3], [6]. Pada penelitian ini, sinyal hasil *mean removal* digunakan sebagai masukan untuk proses pembentukan sinyal *envelope*. Pembentukan *envelope* dilakukan menggunakan Hilbert Transform untuk memperoleh sinyal analitik dari sinyal getaran. Secara matematis, sinyal analitik dinyatakan sebagai

$$z(t) = x(t) + j\hat{x}(t) \quad (4)$$

dengan

$x(t)$  = sinyal getaran hasil *mean removal*,  
 $\hat{x}(t)$  = Hilbert Transform dari sinyal  $x(t)$ .

Sinyal *envelope* kemudian diperoleh dari magnitudo sinyal analitik, yaitu

$$e(t) = |z(t)| = \sqrt{x^2(t) + \hat{x}^2(t)} \quad (5)$$

Sinyal  $e(t)$  selanjutnya ditransformasikan ke domain frekuensi menggunakan FFT. Transformasi Fourier diskrit dari sinyal *envelope* dinyatakan sebagai

$$E(k) = \sum_{n=0}^{N-1} e(n) e^{-j2\pi kn/N} \quad (6)$$

dengan

$e(n)$  = sinyal *envelope* pada domain waktu,  
 $N$  = jumlah sampel,  
 $E(k)$  = koefisien spektrum *envelope* pada indeks frekuensi ke- $k$ .

*Envelope spectrum* yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari magnitudo hasil transformasi tersebut, yaitu  $|E(k)|$ . Analisis dilakukan pada spektrum frekuensi positif dengan rentang 0–500 Hz, sama seperti pada analisis FFT. Dari *envelope spectrum* tersebut kemudian diidentifikasi sepuluh puncak dengan amplitudo terbesar. Setiap puncak selanjutnya diperiksa terhadap frekuensi *shaft*, BPFI, BPFO, dan BSF beserta harmoniknya. Dengan prosedur tersebut, hasil *envelope spectrum* dapat dibandingkan secara konsisten dengan hasil FFT pada keempat kondisi *bearing*.

### Identifikasi dan Pemeriksaan Frekuensi Karakteristik

Setelah diperoleh spektrum FFT dan *envelope spectrum*, tahap selanjutnya adalah mengidentifikasi kesesuaian puncak frekuensi terhadap karakteristik teoritis *bearing*. Frekuensi karakteristik yang diperiksa meliputi frekuensi putaran *shaft*, *ball pass frequency inner race* (BPFI), *ball pass frequency outer race* (BPFO), dan *ball spin frequency* (BSF). Frekuensi karakteristik kerusakan *bearing* ditentukan berdasarkan kecepatan putar dan parameter geometrik *bearing*, sehingga nilai teoritisnya dapat digunakan sebagai acuan dalam pemeriksaan puncak spektrum [1], [7]. Frekuensi putaran *shaft* dihitung dari kecepatan putar dalam satuan rpm menggunakan

$$f_{shaft} = \frac{RPM}{60} \quad (7)$$

Sedangkan frekuensi karakteristik *bearing* dihitung berdasarkan hubungan geometrik *bearing*. Dengan  $n$  sebagai jumlah elemen gelinding,  $d$  sebagai diameter elemen gelinding,  $D$  sebagai diameter pitch,  $\theta$  sebagai sudut kontak, dan  $f_r$  sebagai frekuensi putaran *shaft*, frekuensi karakteristik dinyatakan sebagai [1], [7]:

$$BPFI = \frac{n}{2} f_r \left( 1 + \frac{d}{D} \cos \theta \right) \quad (8)$$

$$BPFO = \frac{n}{2} f_r \left( 1 - \frac{d}{D} \cos \theta \right) \quad (9)$$

$$BSF = \frac{D}{2d} f_r \left( 1 - \left( \frac{d}{D} \cos \theta \right)^2 \right) \quad (10)$$

Nilai teoritis yang diperoleh selanjutnya digunakan sebagai dasar untuk memeriksa puncak-puncak dominan pada setiap spektrum. Pemeriksaan tidak hanya dilakukan terhadap frekuensi fundamental, tetapi juga terhadap kelipatan integer dari frekuensi karakteristik tersebut. Secara umum, apabila suatu karakteristik memiliki frekuensi dasar  $f_c$ , maka komponen harmoniknya dapat dinyatakan sebagai

$$f_m = m f_c \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (11)$$

Keberadaan frekuensi dasar dan beberapa harmoniknya pada spektrum merupakan representasi dari komponen periodik yang dapat muncul pada sinyal getaran. Oleh karena itu, pola harmonik digunakan sebagai salah satu dasar untuk mengevaluasi konsistensi suatu karakteristik frekuensi, bukan sebagai satu-satunya kriteria dalam menentukan kondisi *bearing*.

Pada penelitian ini, setiap data diperiksa terhadap keempat karakteristik, yaitu *shaft*, BPFI, BPFO, dan BSF, tanpa membatasi pemeriksaan berdasarkan label kondisi *bearing*. Dengan demikian, data normal, *inner race fault*, *outer race fault*, dan *ball fault* seluruhnya diperiksa terhadap keempat karakteristik dan harmoniknya. Pendekatan ini digunakan untuk mengetahui karakteristik frekuensi yang benar-benar muncul pada masing-masing data serta untuk mengidentifikasi kemungkinan adanya kesesuaian dengan lebih dari satu

karakteristik. Untuk menentukan tingkat kesesuaian antara puncak hasil pengukuran dan frekuensi teoritis, digunakan error relatif yang dihitung berdasarkan

$$Error (\%) = \left| \frac{f_{peak} - f_{theory}}{f_{theory}} \right| \times 100\% \quad (12)$$

dengan  $f_{peak}$  merupakan frekuensi puncak hasil spektrum dan  $f_{theory}$  merupakan frekuensi teoritis atau harmoniknya. Nilai error yang lebih kecil menunjukkan kedekatan frekuensi puncak terhadap frekuensi teoritis yang lebih tinggi. Dalam penelitian ini, puncak dinyatakan memiliki kesesuaian dengan frekuensi teoritis apabila nilai error relatif kurang dari 5%. Batas tersebut digunakan sebagai kriteria operasional untuk memastikan bahwa pemeriksaan frekuensi dilakukan secara konsisten pada seluruh data dan kedua metode analisis. Namun, kesesuaian frekuensi tidak dinilai hanya berdasarkan nilai error, tetapi juga mempertimbangkan pola harmonik dan kemungkinan bahwa satu puncak memiliki kesesuaian yang lebih kuat dengan karakteristik lainnya.

### **Identifikasi Sepuluh Puncak Dominan**

Setelah diperoleh spektrum FFT dan *envelope spectrum*, tahap selanjutnya adalah menentukan puncak-puncak frekuensi yang digunakan dalam pemeriksaan karakteristik *bearing*. Pada masing-masing spektrum, puncak diurutkan berdasarkan nilai amplitudonya dari yang terbesar hingga yang terkecil. Selanjutnya, dipilih sepuluh puncak dengan amplitudo terbesar pada rentang frekuensi 0–500 Hz untuk setiap kondisi *bearing*. Pemilihan sepuluh puncak dominan dilakukan dengan prosedur yang sama pada FFT dan *envelope spectrum* sehingga hasil kedua metode dapat dibandingkan secara konsisten. Setiap puncak yang terpilih dicatat berdasarkan frekuensi dan amplitudonya, kemudian frekuensinya dibandingkan dengan frekuensi *shaft*, BPFI, BPFO, dan BSF beserta harmoniknya sebagaimana dijelaskan pada Subbab 2.5. Puncak yang memiliki error relatif kurang dari 5% dicatat sebagai puncak yang memiliki kesesuaian dengan frekuensi teoritis atau harmoniknya.

Sepuluh puncak dominan dari setiap data selanjutnya digunakan sebagai dasar penyusunan tabel pemeriksaan frekuensi. Untuk setiap puncak, ditentukan karakteristik frekuensi dan orde harmonik yang memiliki kesesuaian berdasarkan nilai error relatif. Apabila satu puncak memiliki kesesuaian dengan lebih dari satu karakteristik, seluruh kemungkinan tersebut dicatat dan selanjutnya dibandingkan berdasarkan nilai error serta keteraturan pola harmoniknya. Dengan demikian, identifikasi tidak hanya mempertimbangkan keberadaan satu puncak, tetapi juga hubungan puncak tersebut dengan frekuensi dasar dan harmoniknya.

### **Perbandingan FFT dan Envelope spectrum**

Hasil pemeriksaan sepuluh puncak dominan dari FFT dan *envelope spectrum* selanjutnya dibandingkan untuk mengetahui kesesuaian karakteristik frekuensi pada masing-masing kondisi *bearing*. Perbandingan dilakukan dengan menggunakan kriteria yang sama, yaitu kesesuaian frekuensi terhadap *shaft*, BPFI, BPFO, dan BSF beserta harmoniknya serta nilai error relatif yang diperoleh dari masing-masing puncak. Pada tahap ini, setiap kondisi *bearing* dibandingkan berdasarkan pola frekuensi yang muncul pada kedua metode. Perhatian diberikan pada keberadaan frekuensi dasar dan beberapa harmoniknya, tingkat kesesuaian frekuensi berdasarkan error relatif, serta kemungkinan satu puncak memiliki kesesuaian dengan lebih dari satu karakteristik. Kemunculan beberapa harmonik yang konsisten digunakan sebagai pendukung interpretasi karakteristik frekuensi, sedangkan keberadaan satu puncak saja tidak digunakan sebagai dasar tunggal untuk menentukan kondisi *bearing*.

Perbandingan dilakukan secara menyeluruh pada empat kondisi, yaitu *bearing normal*, *inner race fault*, *outer race fault*, dan *ball fault*. Hasil FFT dan *envelope spectrum* kemudian digunakan secara bersama-sama untuk melihat karakteristik yang paling konsisten pada masing-masing kondisi. Dengan pendekatan tersebut, hasil analisis tidak hanya didasarkan pada satu metode atau satu frekuensi karakteristik, tetapi mempertimbangkan pola spektrum dan kesesuaian frekuensi dari kedua metode secara keseluruhan. Untuk mengevaluasi tingkat kesesuaian karakteristik frekuensi secara kuantitatif pada setiap kondisi *bearing*, analisis selanjutnya dilakukan terhadap beberapa file yang merepresentasikan kondisi yang sama. Kondisi normal menggunakan data 97–100, *inner race fault* menggunakan data 105–108, *outer race fault* menggunakan data 130–133, dan *ball fault* menggunakan data 118–121. Pada masing-masing kondisi, *relative error* dari frekuensi karakteristik target dihitung untuk setiap file, yaitu  $1 \times \text{shaft}$  pada kondisi normal, BPFI pada *inner race fault*, BPFO pada *outer race fault*, dan BSF pada *ball fault*. Nilai *relative error* tersebut kemudian diringkas menggunakan *mean relative error* (MRE) untuk menunjukkan rata-rata tingkat kesesuaian frekuensi hasil identifikasi terhadap frekuensi teoritis. MRE dihitung menggunakan persamaan:

$$MRE = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m RE_i \quad (13)$$

dengan

$RE_i$  = nilai *relative error* pada file ke- $i$ ,

$m$  = jumlah file yang dianalisis pada masing-masing kondisi.

Selain nilai rata-rata, konsistensi hasil identifikasi antar file pada kondisi yang sama dievaluasi menggunakan *standard deviation* (SD). Nilai SD menunjukkan tingkat penyebaran *relative error* terhadap nilai rata-ratanya, sehingga nilai SD yang lebih kecil menunjukkan variasi hasil identifikasi yang lebih rendah antar-file. SD dihitung menggunakan persamaan:

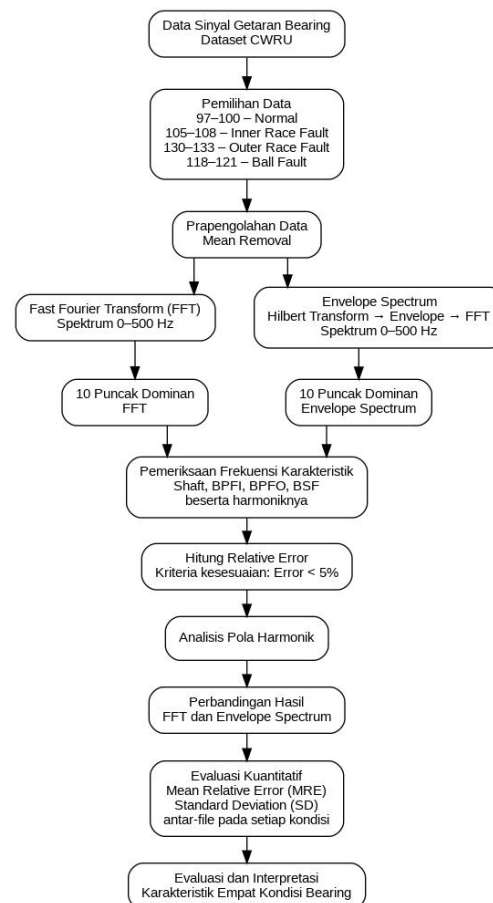
$$SD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (RE_i - \overline{RE})^2}{m-1}} \quad (14)$$

dengan  $RE_i$  merupakan nilai *relative error* pada file ke- $i$ ,  $\overline{RE}$  merupakan rata-rata *relative error* pada kondisi yang dianalisis, dan  $m$  merupakan jumlah file. Nilai MRE dan SD selanjutnya digunakan untuk mengevaluasi tingkat kesesuaian dan konsistensi identifikasi frekuensi karakteristik pada keempat kondisi *bearing*.

### Diagram Alir Penelitian

Tahapan penelitian secara keseluruhan disusun dalam bentuk diagram alir untuk menunjukkan urutan proses mulai dari pengambilan data hingga evaluasi hasil analisis. Penelitian diawali dengan pemilihan empat data getaran *bearing* dari dataset CWRU, yaitu 97.mat, 105.mat, 130.mat, dan 118.mat. Data selanjutnya melalui tahap *mean removal* sebelum digunakan sebagai masukan pada dua metode analisis, yaitu FFT dan *envelope spectrum*. Hasil FFT dan *envelope spectrum* kemudian dibatasi pada rentang frekuensi 0–500 Hz dan masing-masing dianalisis untuk memperoleh sepuluh puncak dengan amplitudo terbesar. Puncak-puncak tersebut selanjutnya diperiksa terhadap frekuensi *shaft*, BPFI, BPFO, dan BSF beserta harmoniknya. Kesesuaian antara frekuensi puncak dan frekuensi teoritis ditentukan berdasarkan nilai *relative error*, dengan kriteria *relative error* < 5% sebagai batas kesesuaian frekuensi. Selanjutnya, pola harmonik yang terbentuk dari puncak-puncak yang memenuhi kriteria tersebut dianalisis untuk setiap kondisi *bearing*.

Hasil pemeriksaan frekuensi pada masing-masing file kemudian digunakan untuk menghitung *mean relative error* (MRE) dan *standard deviation* (SD) pada setiap kondisi *bearing*. MRE digunakan untuk mengevaluasi rata-rata tingkat kesesuaian frekuensi hasil identifikasi terhadap frekuensi teoritis, sedangkan SD digunakan untuk mengevaluasi variasi *relative error* antar-file dalam kondisi yang sama. Selanjutnya, hasil FFT dan *envelope spectrum* dibandingkan untuk memperoleh karakteristik frekuensi yang paling konsisten pada masing-masing kondisi serta mengevaluasi kesesuaian hasil analisis dengan kondisi *bearing* yang menjadi acuan. Alur penelitian secara keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 1.



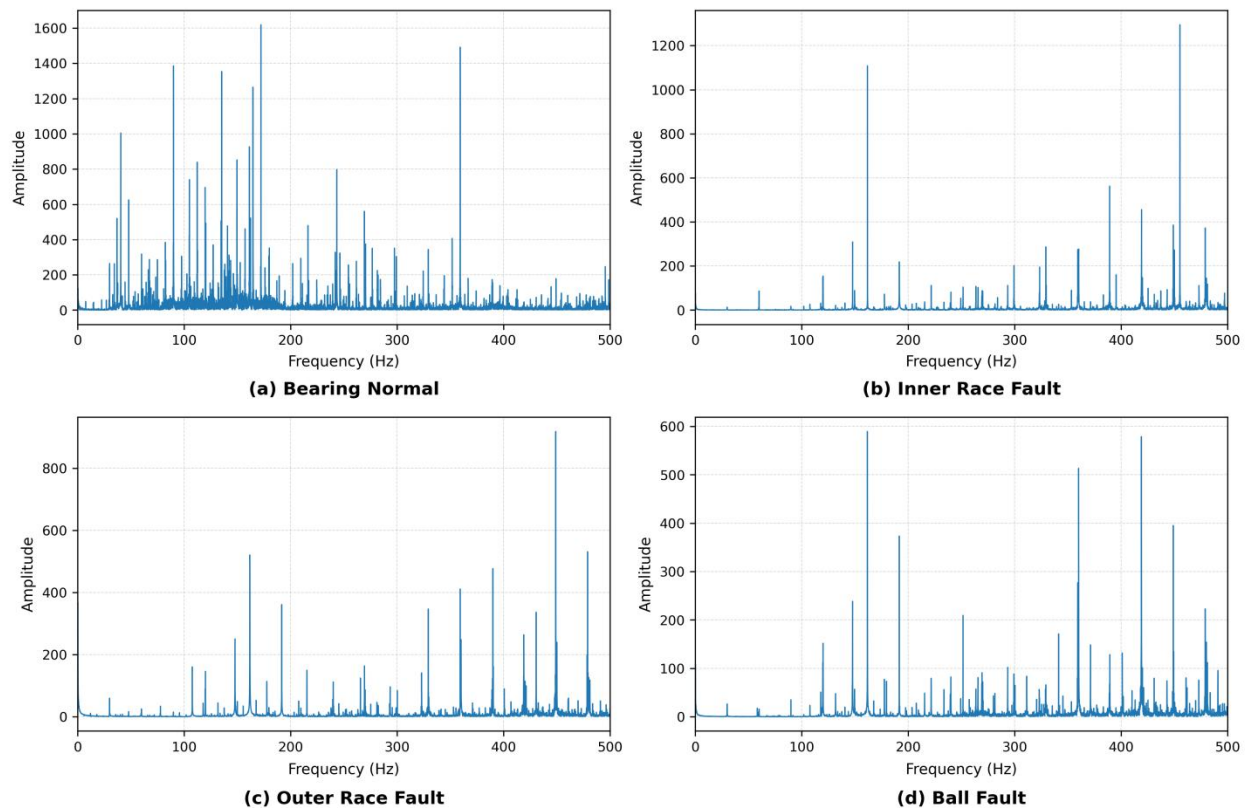
Gambar 1. Diagram alir tahapan penelitian.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian ini menyajikan hasil analisis sinyal getaran *bearing* menggunakan *fast fourier transform* (FFT) dan *envelope spectrum* pada empat kondisi, yaitu *bearing* normal, *inner race fault*, *outer race fault*, dan *ball fault*. Analisis dilakukan pada rentang frekuensi 0–500 Hz untuk mengidentifikasi komponen frekuensi dan amplitudo dominan serta mengevaluasi kesesuaiannya dengan frekuensi karakteristik *bearing*, yaitu *shaft*, BPFI, BPFO, dan BSF. Hasil analisis FFT dan *envelope spectrum* selanjutnya digunakan untuk membandingkan pola spektrum pada masing-masing kondisi *bearing* dan mengidentifikasi karakteristik getaran yang muncul pada setiap kondisi.

### Analisis Fast fourier transform (FFT)

Sebagai tahap awal, analisis dilakukan menggunakan *fast fourier transform* (FFT) untuk memperoleh gambaran umum kandungan frekuensi dan amplitudo sinyal getaran pada masing-masing kondisi *bearing*. Spektrum FFT pada rentang 0–500 Hz untuk keempat kondisi ditampilkan pada Gambar 2. Selanjutnya, puncak-puncak frekuensi dominan dianalisis dengan membandingkannya terhadap frekuensi karakteristik *shaft*, BPFI, BPFO, dan BSF beserta harmoniknya.



Gambar 2. Spektrum FFT pada rentang frekuensi 0–500 Hz untuk empat kondisi *bearing*: (a) *bearing* normal, (b) *inner race fault*, (c) *outer race fault*, dan (d) *ball fault*.

Gambar 2 memperlihatkan spektrum FFT pada rentang frekuensi 0–500 Hz untuk empat kondisi *bearing*, yaitu (a) *bearing* normal, (b) *inner race fault*, (c) *outer race fault*, dan (d) *ball fault*. Secara umum, keempat spektrum menunjukkan adanya sejumlah puncak pada frekuensi yang berbeda dengan amplitudo yang bervariasi. Perbedaan distribusi puncak tersebut menunjukkan bahwa setiap kondisi menghasilkan kandungan frekuensi yang berbeda, sehingga diperlukan analisis lebih lanjut untuk mengetahui keterkaitannya dengan frekuensi karakteristik *bearing*. Untuk memperoleh analisis yang terstruktur dan konsisten pada seluruh kondisi, dipilih 10 puncak dengan amplitudo terbesar pada masing-masing spektrum. Pemilihan puncak berdasarkan amplitudo dilakukan untuk memfokuskan analisis pada komponen frekuensi yang paling dominan dalam sinyal. Kesepuluh puncak tersebut selanjutnya diperiksa terhadap empat frekuensi karakteristik, yaitu frekuensi putaran poros (*shaft*), BPFI, BPFO, dan BSF, termasuk kemungkinan kemunculannya pada kelipatan harmonik. Tingkat kesesuaian antara frekuensi hasil pengukuran dan frekuensi teoritis dievaluasi berdasarkan nilai selisih frekuensi dan error relatif. Analisis diawali pada data 97.mat yang merepresentasikan kondisi *bearing* normal. Berdasarkan spektrum FFT yang diperoleh, sepuluh puncak dengan amplitudo terbesar kemudian diperiksa terhadap keempat frekuensi karakteristik *bearing* tersebut. Hasil pemeriksaan frekuensi dan harmonik pada data 97.mat disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Analisis 10 Peak Terbesar FFT pada Data 97.mat terhadap Frekuensi Karakteristik *Bearing*

| Rank | Peak Hz | Amp     | <i>Shaft</i> /Error | BPFI/Error | BPFO/Error | BSF/Error |
|------|---------|---------|---------------------|------------|------------|-----------|
| 1    | 172,08  | 1619,17 | 6X/4,24%            | 1X/6,10%   | 2X/19,86%  | 2X/21,90% |
| 2    | 359,16  | 1491,95 | 12X/0,07%           | 2X/10,72%  | 3X/11,51%  | 5X/1,77%  |
| 3    | 89,97   | 1385,65 | 3X/0,14%            | 1X/44,52%  | 1X/16,20%  | 1X/27,47% |
| 4    | 135,18  | 1353,93 | 5X/9,73%            | 1X/16,65%  | 1X/25,91%  | 2X/4,24%  |
| 5    | 164,60  | 1264,73 | 5X/9,92%            | 1X/1,49%   | 2X/23,35%  | 2X/16,60% |
| 6    | 40,44   | 1004,77 | 1X/35,01%           | 1X/75,07%  | 1X/62,34%  | 1X/42,71% |
| 7    | 161,16  | 926,81  | 5X/7,62%            | 1X/0,64%   | 2X/24,95%  | 2X/14,16% |
| 8    | 149,64  | 852,27  | 5X/0,07%            | 1X/7,73%   | 1X/39,38%  | 2X/6,00%  |
| 9    | 112,21  | 839,24  | 4X/6,34%            | 1X/30,81%  | 1X/4,51%   | 2X/20,51% |
| 10   | 243,36  | 796,85  | 8X/1,57%            | 2X/24,98%  | 2X/13,33%  | 3X/14,93% |

Berdasarkan Tabel 1, analisis diawali dengan pemeriksaan kesesuaian puncak frekuensi terhadap frekuensi putaran *shaft* dan harmoniknya, Pada data 97.mat, frekuensi *shaft* sebesar 29,95 Hz. Dari sepuluh puncak dominan, terdapat beberapa komponen yang sesuai dengan harmonik *shaft*, yaitu 172,08 Hz sebagai 6×*shaft* dengan error 4,24%, 359,16 Hz sebagai 12×*shaft* dengan error 0,07%, 89,97 Hz sebagai 3×*shaft* dengan error 0,14%, 149,64 Hz sebagai 5×*shaft* dengan error 0,07%, dan 243,36 Hz sebagai 8×*shaft* dengan error 1,57%. Kesesuaian paling kuat ditunjukkan oleh komponen 3×, 5×, dan 12×*shaft* yang menunjukkan adanya beberapa komponen spektrum yang berkaitan dengan frekuensi putaran poros dan harmoniknya.

Pemeriksaan berikutnya dilakukan terhadap BPFI yang memiliki frekuensi teoritis 162,19 Hz. Dua puncak berada di sekitar frekuensi fundamental BPFI, yaitu 164,60 Hz dengan error 1,49% dan 161,16 Hz dengan error 0,64%. Kedua puncak tersebut berada pada orde 1×BPFI sehingga tidak dianggap sebagai dua harmonik yang berbeda. Dengan demikian, meskipun terdapat komponen yang berdekatan dengan BPFI, tidak terbentuk rangkaian harmonik BPFI yang jelas. Pada BPFO dengan frekuensi teoritis 107,36 Hz, hanya ditemukan satu puncak yang relatif dekat, yaitu 112,21 Hz dengan error 4,51% terhadap 1×BPFO. Tidak terdapat puncak lain yang menunjukkan kesesuaian dengan kelipatan BPFO berikutnya, sehingga pola harmonik BPFO yang jelas juga tidak terlihat. Sementara itu, BSF memiliki frekuensi teoritis 70,58 Hz. Terdapat dua puncak yang relatif dekat dengan kelipatan BSF, yaitu 359,16 Hz sebagai 5×BSF dengan error 1,77% dan 135,18 Hz sebagai 2×BSF dengan error 4,24%. Namun, puncak 359,16 Hz memiliki kesesuaian yang jauh lebih kuat dengan 12×*shaft* dengan error 0,07%, sehingga interpretasinya lebih kuat sebagai harmonik *shaft*. Puncak 135,18 Hz juga hanya menunjukkan satu kecocokan pada 2×BSF. Dengan demikian, tidak terbentuk pola harmonik BSF yang kuat.

Secara keseluruhan, data 97.mat menunjukkan bahwa puncak-puncak dominan lebih banyak memiliki kesesuaian dengan frekuensi *shaft* dan harmoniknya dibandingkan dengan pola harmonik BPFI, BPFO, dan BSF. Meskipun terdapat beberapa puncak yang berdekatan dengan frekuensi karakteristik tersebut, tidak ditemukan pola harmonik yang kuat dan konsisten yang secara spesifik mengarah pada karakteristik kerusakan *bearing*. Berdasarkan hasil analisis tersebut, karakteristik spektrum 97.mat lebih mendukung kondisi *bearing* normal. Setelah pembahasan data 97.mat sebagai kondisi *bearing* normal, analisis dilanjutkan pada data 105.mat yang merepresentasikan kondisi *inner race fault*. Prosedur analisis dilakukan dengan cara yang sama, yaitu sepuluh puncak dengan amplitudo terbesar diperiksa terhadap frekuensi *shaft*, BPFI, BPFO, dan BSF beserta harmoniknya. Hasil pemeriksaan frekuensi dan harmonik pada data 105.mat disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Analisis 10 Peak Terbesar FFT pada Data 105.mat terhadap Frekuensi Karakteristik *Bearing*

| Rank | Peak Hz | Amp     | <i>Shaft</i> /Error | BPFI/Error | BPFO/Error | BSF/Error |
|------|---------|---------|---------------------|------------|------------|-----------|
| 1    | 455,10  | 1294,66 | 15X/1,30%           | 3X/6,46%   | 4X/5,97%   | 6X/7,46%  |
| 2    | 161,70  | 1108,42 | 5X/7,98%            | 1X/0,30%   | 2X/24,70%  | 2X/14,54% |
| 3    | 389,10  | 562,46  | 13X/0,06%           | 2X/19,95%  | 4X/9,40%   | 6X/8,12%  |
| 4    | 419,08  | 455,78  | 14X/0,05%           | 3X/13,87%  | 4X/2,42%   | 6X/1,04%  |
| 5    | 448,97  | 385,72  | 15X/0,06%           | 3X/7,73%   | 4X/4,54%   | 6X/6,01%  |
| 6    | 478,95  | 372,73  | 16X/0,05%           | 3X/1,56%   | 4X/11,53%  | 7X/3,06%  |
| 7    | 147,74  | 309,17  | 5X/1,34%            | 1X/8,91%   | 1X/37,61%  | 2X/4,66%  |
| 8    | 329,23  | 286,85  | 11X/0,07%           | 2X/1,50%   | 3X/2,22%   | 5X/6,71%  |
| 9    | 360,10  | 276,70  | 12X/0,20%           | 2X/11,02%  | 3X/11,80%  | 5X/2,04%  |
| 10   | 359,21  | 274,67  | 12X/0,05%           | 2X/10,74%  | 3X/11,53%  | 5X/1,78%  |

Berdasarkan Tabel 2, analisis diawali dengan pemeriksaan kesesuaian puncak frekuensi terhadap frekuensi putaran *shaft* dan harmoniknya. Pada data 105.mat, frekuensi *shaft* sebesar 29,95 Hz. Beberapa puncak menunjukkan kesesuaian dengan harmonik *shaft*, yaitu 455,10 Hz sebagai 15×*shaft* dengan error 1,30%, 389,10 Hz sebagai 13×*shaft* dengan error 0,06%, 419,08 Hz sebagai 14×*shaft* dengan error 0,05%, 448,97 Hz sebagai 15×*shaft* dengan error 0,06%, 478,95 Hz sebagai 16×*shaft* dengan error 0,05%, 147,74 Hz sesuai dengan 5×*shaft* dengan error 1,34%, 329,23 Hz sesuai dengan 11×*shaft* dengan error 0,07%, 360,10 Hz, dan 359,21 Hz sesuai dengan 12×*shaft* dengan masing – masing error 0,20%, dan 0,05%. Hasil tersebut menunjukkan adanya rangkaian harmonik *shaft* yang jelas pada orde 11× hingga 16× dengan error relatif kecil.

Pemeriksaan berikutnya dilakukan terhadap BPFI yang memiliki frekuensi teoritis 162,19 Hz. Terdapat tiga puncak yang menunjukkan kesesuaian dengan harmonik BPFI, yaitu 161,70 Hz sebagai 1×BPFI dengan error 0,30%, 478,95 Hz sebagai 3×BPFI dengan error 1,56% dan 329,23 Hz sebagai 2×BPFI dengan error 1,50%. Ketiga komponen tersebut membentuk rangkaian harmonik 1×–2×–3×BPFI dengan error relatif rendah, sehingga menunjukkan pola BPFI yang lebih jelas dibandingkan hasil pemeriksaan pada data 97.mat. Pada BPFO dengan frekuensi teoritis 107,36 Hz, beberapa puncak menunjukkan kesesuaian dengan kelipatan BPFO, yaitu 419,08 Hz sebagai 4×BPFO dengan error 2,42%, 448,97 Hz sebagai 4×BPFO dengan error 4,54% dan 329,23 Hz sebagai 3×BPFO dengan error 2,22%. Dengan demikian, meskipun terdapat beberapa puncak yang berdekatan dengan kelipatan BPFO, tidak terbentuk rangkaian harmonik BPFO yang kuat mulai dari frekuensi fundamental. Sementara itu, BSF memiliki frekuensi teoritis 70,58 Hz. Beberapa puncak menunjukkan kesesuaian dengan kelipatan BSF, yaitu 419,08 Hz sebagai 6×BSF dengan error 1,04%, 478,95 Hz sebagai 7×BSF dengan error 3,06%, 147,74 Hz sebagai 2×BSF dengan error 4,66%, 360,1 Hz sebagai 5×BSF dengan error 2,04%, dan 359,21 Hz sebagai 5×BSF dengan error 1,78%. Dengan demikian, terdapat kecocokan pada harmonik 2×, 5×, 6×, dan 7×BSF. Hasil tersebut menunjukkan adanya rangkaian harmonik 5×–6×–7×BSF. Namun, rangkaian tersebut tidak dimulai dari harmonik orde rendah dan sebagian puncaknya juga memiliki kesesuaian dengan harmonik *shaft* maupun BPFI. Oleh karena itu, pola tersebut perlu dibandingkan dengan keseluruhan karakteristik *shaft*, BPFI, dan BPFO sebelum menentukan karakteristik yang paling dominan pada data 105.mat.

Secara keseluruhan, hasil pemeriksaan pada data 105.mat menunjukkan bahwa keempat karakteristik memiliki beberapa kecocokan dengan puncak dominan, tetapi pola yang terbentuk memiliki tingkat keteraturan yang berbeda. Pada *shaft*, terdapat banyak kecocokan pada berbagai orde, terutama pada rentang 11× hingga 16×. Meskipun jumlah

kecocokannya banyak, puncak-puncak tersebut tidak membentuk rangkaian harmonik orde rendah yang berurutan seperti  $1\times-2\times-3\times shaft$ . Pada BPFO, beberapa kecocokan juga ditemukan, tetapi tidak membentuk rangkaian harmonik yang jelas. Sementara itu, BSF menunjukkan kecocokan pada  $2\times$ ,  $5\times$ ,  $6\times$ , dan  $7\times$ , termasuk rangkaian  $5\times-6\times-7\times$ , tetapi pola tersebut tidak dimulai dari harmonik fundamental dan sebagian puncaknya juga memiliki kecocokan dengan karakteristik lainnya. Berbeda dengan ketiga karakteristik tersebut, BPFI menunjukkan rangkaian harmonik  $1\times BPFI \rightarrow 2\times BPFI \rightarrow 3\times BPFI$  dengan error masing-masing 0,30%, 1,50%, dan 1,56%. Meskipun ketiga puncak tersebut tidak menempati peringkat amplitudo tertinggi secara berturut-turut, keteraturannya terhadap frekuensi karakteristik BPFI menunjukkan pola harmonik yang jelas. Oleh karena itu, berdasarkan perbandingan keempat karakteristik, pola BPFI memberikan indikasi yang lebih spesifik terhadap kondisi *inner race fault* pada data 105.mat. Analisis selanjutnya dilakukan pada data 130.mat yang merepresentasikan kondisi *outer race fault*. Dengan prosedur yang sama, sepuluh puncak dengan amplitudo terbesar diperiksa terhadap frekuensi *shaft*, BPFI, BPFO, dan BSF beserta harmoniknya. Hasil pemeriksaan frekuensi dan harmonik pada data 130.mat disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Analisis 10 Peak Terbesar FFT pada Data 130.mat terhadap Frekuensi Karakteristik *Bearing*

| Rank | Peak Hz | Amp    | <i>Shaft</i> | BPFI      | BPFO      | BSF       |
|------|---------|--------|--------------|-----------|-----------|-----------|
| 1    | 448,95  | 918,51 | 15X/0,07%    | 3X/7,73%  | 4X/4,54%  | 6X/6,01%  |
| 2    | 478,85  | 531,19 | 16X/0,07%    | 3X/1,58%  | 4X/11,50% | 7X/3,08%  |
| 3    | 161,62  | 520,80 | 5X/7,93%     | 1X/0,35%  | 2X/24,73% | 2X/14,49% |
| 4    | 389,93  | 477,01 | 13X/0,15%    | 2X/20,21% | 4X/9,20%  | 6X/7,93%  |
| 5    | 359,14  | 411,18 | 12X/0,07%    | 2X/10,72% | 3X/11,50% | 5X/1,76%  |
| 6    | 191,62  | 361,22 | 6X/6,63%     | 1X/18,15% | 2X/10,76% | 3X/9,51%  |
| 7    | 329,24  | 346,92 | 11X/0,06%    | 2X/1,50%  | 3X/2,22%  | 5X/6,71%  |
| 8    | 430,56  | 336,41 | 14X/2,68%    | 3X/11,51% | 4X/0,26%  | 6X/1,67%  |
| 9    | 418,95  | 263,97 | 14X/0,08%    | 3X/13,90% | 4X/2,45%  | 6X/1,08%  |
| 10   | 147,75  | 250,59 | 5X/1,34%     | 1X/8,90%  | 1X/37,61% | 2X/4,66%  |

Berdasarkan Tabel 3, analisis diawali dengan pemeriksaan kesesuaian puncak frekuensi terhadap frekuensi putaran *shaft* dan harmoniknya. Pada data 130.mat, frekuensi *shaft* sebesar 29,95 Hz. Dari sepuluh puncak dominan, beberapa puncak menunjukkan kesesuaian yang sangat baik dengan harmonik *shaft*, yaitu 448,95 Hz sebagai  $15\times shaft$  dengan error 0,07%, 478,85 Hz sebagai  $16\times shaft$  dengan error 0,07%, 389,93 Hz sebagai  $13\times shaft$  dengan error 0,15%, 359,14 Hz sebagai  $12\times shaft$  dengan error 0,07%, 329,24 Hz sebagai  $11\times shaft$  dengan error 0,06%, 430,56 Hz sebagai  $14\times shaft$  dengan error 2,68%, 418,95 Hz sebagai  $14\times shaft$  dengan error 0,08%, dan 147,75 Hz sebagai  $5\times shaft$  dengan error 1,34%. Hasil tersebut menunjukkan rangkaian harmonik *shaft* yang sangat jelas pada orde  $11\times$  hingga  $16\times$ . Setelah karakteristik *shaft* diperiksa, analisis dilanjutkan dengan pemeriksaan terhadap frekuensi BPFI yang memiliki nilai teoritis sebesar 162,19 Hz. Dari sepuluh puncak dominan, terdapat tiga puncak yang menunjukkan kesesuaian dengan harmonik BPFI, yaitu 478,85 Hz sebagai  $3\times BPFI$  dengan error 1,58%, 161,62 Hz sebagai  $1\times BPFI$  dengan error 0,35% dan 329,24 Hz sebagai  $2\times BPFI$  dengan error 1,50%. Ketiga

puncak tersebut membentuk rangkaian harmonik  $1\times-2\times-3\times$ BPFI dengan error relatif rendah, sehingga menunjukkan adanya pola harmonik BPFI yang jelas pada data 130.mat.

Pemeriksaan kemudian dilanjutkan terhadap frekuensi BPFO yang memiliki nilai teoritis sebesar 107,36 Hz. Dari sepuluh puncak dominan, terdapat beberapa puncak yang menunjukkan kesesuaian dengan harmonik BPFO, yaitu 329,24 Hz sebagai  $3\times$ BPFO dengan error 2,22%, 430,56 Hz sebagai  $4\times$ BPFO dengan error 0,26%, dan 418,95 Hz sebagai  $4\times$ BPFO dengan error 2,45%. Hasil tersebut menunjukkan adanya kecocokan pada harmonik  $3\times$  dan  $4\times$ BPFO. Namun, karena tidak ditemukan kecocokan pada  $1\times$  dan  $2\times$ BPFO dalam sepuluh puncak dominan, pola harmonik BPFO yang terbentuk belum lengkap. Tahap pemeriksaan selanjutnya adalah frekuensi BSF yang memiliki nilai teoritis sebesar 70,58 Hz. Dari sepuluh puncak dominan, terdapat beberapa puncak yang menunjukkan kesesuaian dengan kelipatan BSF, yaitu 478,85 Hz sebagai  $7\times$ BSF dengan error 3,08%, 359,14 Hz sebagai  $5\times$ BSF dengan error 1,76%, 430,56 Hz sebagai  $6\times$ BSF dengan error 1,67%, 418,95 Hz sebagai  $6\times$ BSF dengan error 1,08%, dan 147,75 Hz sebagai  $2\times$ BSF dengan error 4,66%. Dengan demikian, terdapat kecocokan pada harmonik  $2\times$ ,  $5\times$ ,  $6\times$ , dan  $7\times$ BSF. Namun, pola tersebut tidak membentuk rangkaian harmonik BSF yang lengkap dari orde rendah.

Secara keseluruhan, data 130.mat yang merepresentasikan kondisi *outer race fault* menunjukkan adanya beberapa kecocokan frekuensi pada *shaft*, BPFI, BPFO, dan BSF. *Shaft* memiliki rangkaian harmonik pada orde  $11\times$  hingga  $16\times$ , sedangkan BSF menunjukkan kecocokan pada orde  $2\times$ ,  $5\times$ ,  $6\times$ , dan  $7\times$ . Namun, kedua pola tersebut tidak dimulai dari frekuensi fundamental sehingga belum dapat dipandang sebagai indikator spesifik kerusakan. BPFI justru menunjukkan rangkaian  $1\times-2\times-3\times$  dengan error relatif rendah, sehingga pada spektrum FFT pola BPFI terlihat lebih jelas dibandingkan karakteristik lainnya. Sementara itu, BPFO yang secara teoritis merupakan frekuensi karakteristik *outer race fault* hanya menunjukkan kecocokan pada  $3\times$  dan  $4\times$ , tanpa kemunculan  $1\times$  dan  $2\times$  pada sepuluh puncak dominan.

Dengan demikian, meskipun data 130.mat secara label merupakan kondisi *outer race fault*, hasil analisis FFT pada sepuluh puncak dominan tidak menunjukkan pola harmonik BPFO yang kuat dan berurutan. Temuan ini menunjukkan bahwa karakteristik *outer race fault* pada data 130.mat tidak tampak secara dominan melalui FFT, sedangkan pola BPFI justru lebih terlihat. Oleh karena itu, hasil tersebut perlu dikaji lebih lanjut untuk melihat apakah karakteristik BPFO dapat teridentifikasi dengan lebih jelas. Analisis selanjutnya dilakukan pada data 118.mat yang merepresentasikan kondisi *ball fault*. Dengan prosedur yang sama, sepuluh puncak dengan amplitudo terbesar diperiksa terhadap frekuensi *shaft*, BPFI, BPFO, dan BSF beserta harmoniknya. Hasil pemeriksaan frekuensi dan harmonik pada data 118.mat disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Analisis 10 Peak Terbesar FFT pada Data 118.mat terhadap Frekuensi Karakteristik *Bearing*

| Rank | Peak Hz | Amp    | <i>Shaft</i> /Error | BPFI/Error | BPFO/Error | BSF/Error |
|------|---------|--------|---------------------|------------|------------|-----------|
| 1    | 161,64  | 589,58 | 5X/7,94%            | 1X/0,34%   | 2X/24,72%  | 2X/14,50% |
| 2    | 418,92  | 578,89 | 14X/0,09%           | 3X/13,90%  | 4X/2,45%   | 6X/1,08%  |

|    |        |        |           |           |           |           |
|----|--------|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 3  | 359,99 | 513,35 | 12X/0,16% | 2X/10,98% | 3X/11,77% | 5X/2,00%  |
| 4  | 448,88 | 395,21 | 15X/0,08% | 3X/7,74%  | 4X/4,52%  | 6X/5,99%  |
| 5  | 191,60 | 373,42 | 6X/6,62%  | 1X/18,13% | 2X/10,77% | 3X/9,52%  |
| 6  | 359,11 | 277,06 | 12X/0,08% | 2X/10,71% | 3X/11,49% | 5X/1,75%  |
| 7  | 147,73 | 238,56 | 5X/1,35%  | 1X/8,91%  | 1X/37,60% | 2X/4,65%  |
| 8  | 478,84 | 223,00 | 16X/0,07% | 3X/1,59%  | 4X/11,50% | 7X/3,09%  |
| 9  | 251,41 | 209,60 | 8X/4,93%  | 2X/22,49% | 2X/17,08% | 4X/10,95% |
| 10 | 341,19 | 171,30 | 11X/3,56% | 2X/5,18%  | 3X/5,93%  | 5X/3,32%  |

Berdasarkan Tabel 4, analisis diawali dengan pemeriksaan kesesuaian puncak frekuensi terhadap frekuensi putaran *shaft* dan harmoniknya. Pada data 118.mat, frekuensi *shaft* sebesar 29,95 Hz. Dari sepuluh puncak dominan, beberapa puncak menunjukkan kesesuaian dengan harmonik *shaft*, yaitu 418,92 Hz sebagai  $14 \times \text{shaft}$  dengan error 0,09%, 359,99 Hz sebagai  $12 \times \text{shaft}$  dengan error 0,16%, 448,88 Hz sebagai  $15 \times \text{shaft}$  dengan error 0,08%, 359,11 Hz sebagai  $12 \times \text{shaft}$  dengan error 0,08%, 147,73 Hz sebagai  $5 \times \text{shaft}$  dengan error 1,35%, 478,84 Hz sebagai  $16 \times \text{shaft}$  dengan error 0,07%, 251,41 Hz sebagai  $8 \times \text{shaft}$  dengan error 4,93%, dan 341,19 Hz sebagai  $11 \times \text{shaft}$  dengan error 3,56%. Hasil tersebut menunjukkan banyaknya komponen spektrum yang memiliki kesesuaian dengan frekuensi *shaft* dan harmoniknya, termasuk rangkaian harmonik yang berurutan pada orde  $11 \times$  hingga  $16 \times$ .

Setelah karakteristik *shaft* diperiksa, analisis dilanjutkan dengan pemeriksaan terhadap frekuensi BPFI yang memiliki nilai teoritis sebesar 162,19 Hz. Dari sepuluh puncak dominan, terdapat dua puncak yang menunjukkan kesesuaian dengan frekuensi karakteristik BPFI, yaitu 161,64 Hz sebagai  $1 \times \text{BPFI}$  dengan error 0,34% dan 478,84 Hz sebagai  $3 \times \text{BPFI}$  dengan error 1,59%. Namun, tidak ditemukan puncak yang menunjukkan kesesuaian kuat dengan  $2 \times \text{BPFI}$ . Dengan demikian, meskipun terdapat kecocokan pada  $1 \times$  dan  $3 \times \text{BPFI}$ , belum terbentuk rangkaian harmonik  $1 \times - 2 \times - 3 \times \text{BPFI}$  yang lengkap dan sekuat yang ditemukan pada data 105.mat. Pemeriksaan kemudian dilanjutkan terhadap frekuensi BPFO yang memiliki nilai teoritis sebesar 107,36 Hz. Dari sepuluh puncak dominan, terdapat dua puncak yang menunjukkan kesesuaian dengan  $4 \times \text{BPFO}$ , yaitu 418,92 Hz dengan error 2,45% dan 448,88 Hz dengan error 4,52%. Namun, kedua puncak tersebut juga memiliki kesesuaian yang lebih kuat dengan harmonik *shaft*, masing-masing sebagai  $14 \times \text{shaft}$  dengan error 0,09% dan  $15 \times \text{shaft}$  dengan error 0,08%. Oleh karena itu, kedua puncak tersebut lebih kuat dikaitkan dengan harmonik *shaft*, sehingga belum terbentuk pola harmonik BPFO yang kuat pada data 118.mat.

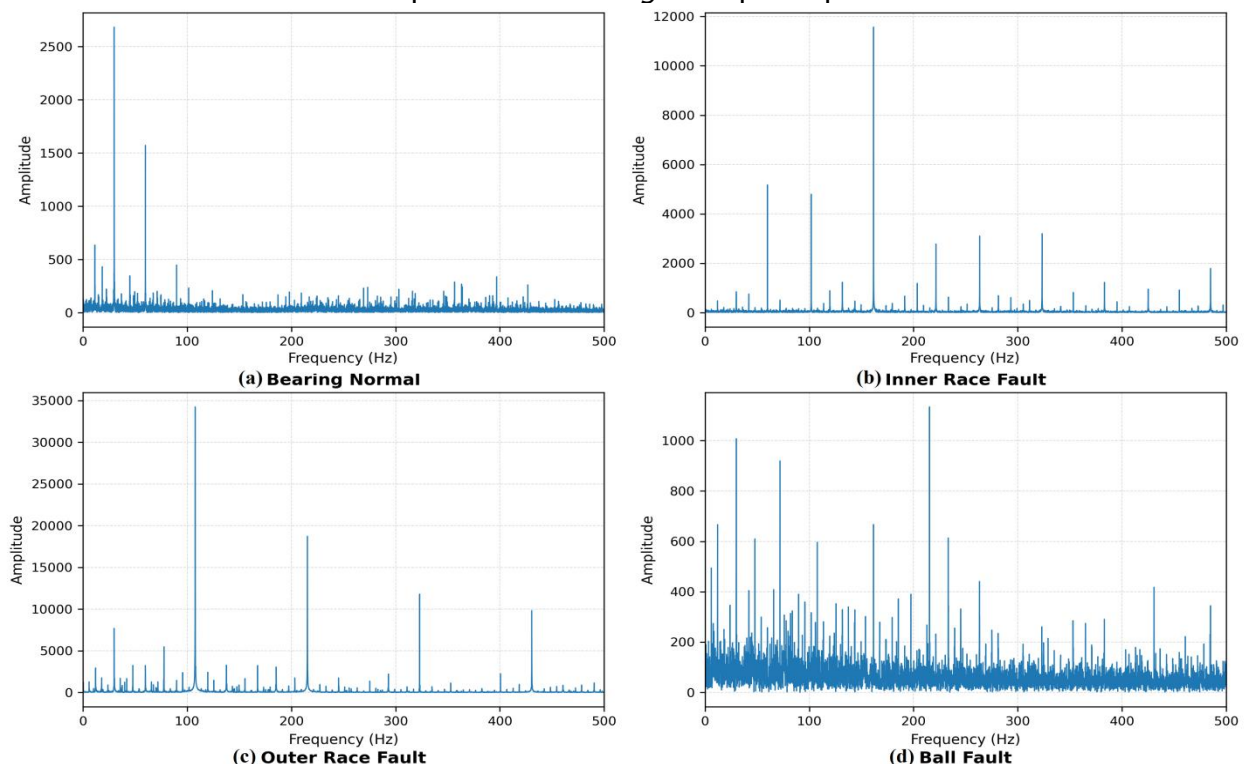
Selanjutnya, pemeriksaan dilakukan terhadap frekuensi BSF yang memiliki nilai teoritis sebesar 70,58 Hz. Dari sepuluh puncak dominan, terdapat beberapa puncak yang menunjukkan kesesuaian dengan kelipatan BSF, yaitu 418,92 Hz sebagai  $6 \times \text{BSF}$  dengan error 1,08%, 359,99 Hz sebagai  $5 \times \text{BSF}$  dengan error 2,00%, 359,11 Hz sebagai  $5 \times \text{BSF}$  dengan error 1,75%, 147,73 Hz sebagai  $2 \times \text{BSF}$  dengan error 4,65%, 478,84 Hz sebagai  $7 \times \text{BSF}$  dengan error 3,09%, dan 341,19 Hz sebagai  $5 \times \text{BSF}$  dengan error 3,32%. Meskipun terdapat beberapa kecocokan dengan kelipatan BSF, sebagian puncak tersebut juga memiliki kesesuaian yang lebih kuat dengan harmonik *shaft*. Sebagai contoh, puncak 418,92 Hz memiliki error 0,09% terhadap  $14 \times \text{shaft}$ , sedangkan terhadap  $6 \times \text{BSF}$  memiliki error 1,08%. Demikian pula, puncak 359,99 Hz memiliki error 0,16% terhadap  $12 \times \text{shaft}$  dibandingkan 2,00% terhadap  $5 \times \text{BSF}$ . Dengan demikian, kecocokan tersebut lebih kuat dijelaskan oleh harmonik *shaft*, sehingga hasil ini belum cukup untuk menyatakan terbentuknya pola harmonik BSF yang kuat pada data 118.mat.

Setelah seluruh karakteristik frekuensi diperiksa, hasilnya kemudian dibandingkan untuk melihat pola yang paling menonjol pada data 118.mat. Secara keseluruhan, data

118.mat yang merepresentasikan kondisi *ball fault* menunjukkan bahwa komponen spektrum lebih banyak memiliki kesesuaian dengan frekuensi *shaft* dan harmoniknya. Rangkaian harmonik *shaft* terlihat pada orde  $1\times$  hingga  $16\times$ , sedangkan BPFI hanya menunjukkan kecocokan pada  $1\times$  dan  $3\times$  tanpa membentuk rangkaian  $1\times-2\times-3\times$  yang lengkap. Pada BPFO, beberapa puncak yang sesuai dengan  $4\times$ BPFO juga memiliki kecocokan yang lebih kuat dengan harmonik *shaft*. Sementara itu, 118.mat menunjukkan beberapa puncak yang memiliki kedekatan dengan harmonik BSF, termasuk  $2\times$ ,  $5\times$ ,  $6\times$ , dan  $7\times$ BSF. Namun, sebagian besar puncak tersebut juga memiliki kecocokan yang lebih kuat dengan harmonik *shaft*. Oleh karena itu, meskipun FFT memberikan indikasi adanya komponen yang berkaitan dengan BSF, pola harmoniknya belum cukup kuat dan spesifik untuk mengonfirmasi karakteristik *ball fault*. Hasil ini menunjukkan bahwa karakteristik *ball fault* pada data 118.mat belum tampak secara dominan pada sepuluh puncak terbesar FFT.

### Analisis Envelope spectrum

Analisis selanjutnya dilakukan menggunakan *envelope spectrum* sebagai tahap lanjutan setelah pemeriksaan spektrum FFT. Analisis ini dilakukan dengan prosedur yang sama pada data 97.mat, 105.mat, 130.mat, dan 118.mat. Sepuluh puncak dengan amplitudo terbesar pada masing-masing spektrum *envelope* diperiksa terhadap frekuensi *shaft*, BPFI, BPFO, dan BSF beserta harmoniknya. Pendekatan yang sama digunakan agar hasil *envelope spectrum* dapat dibandingkan secara konsisten dengan hasil FFT dan untuk melihat apakah karakteristik frekuensi *bearing* yang belum tampak secara jelas pada analisis FFT dapat teridentifikasi melalui spektrum *envelope*. Spektrum *envelope* pada rentang frekuensi 0–500 Hz untuk keempat kondisi *bearing* ditampilkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Spektrum *Envelope* pada rentang frekuensi 0–500 Hz untuk empat kondisi *bearing*: (a) *bearing* normal, (b) *inner race fault*, (c) *outer race fault*, dan (d) *ball fault*.

Gambar 3 menunjukkan spektrum *envelope* pada rentang frekuensi 0–500 Hz untuk keempat kondisi *bearing*. Secara visual, masing-masing kondisi menunjukkan distribusi puncak frekuensi dan amplitudo yang berbeda. Pada kondisi *bearing* normal, puncak

spektrum tersebar dengan amplitudo yang relatif lebih rendah pada sebagian besar rentang frekuensi. Sementara itu, pada kondisi *inner race fault*, *outer race fault*, dan *ball fault* terlihat beberapa puncak dengan amplitudo yang lebih tinggi pada frekuensi tertentu. Perbedaan pola tersebut memberikan gambaran awal mengenai karakteristik spektrum *envelope* pada masing-masing kondisi, yang selanjutnya dianalisis secara lebih terperinci berdasarkan frekuensi karakteristik *bearing* dan harmoniknya. Analisis pertama dilakukan pada data 97.mat yang merepresentasikan kondisi *bearing* normal. Dengan prosedur yang sama, sepuluh puncak dengan amplitudo terbesar pada spektrum *envelope* diperiksa terhadap frekuensi *shaft*, BPFI, BPFO, dan BSF beserta harmoniknya. Hasil pemeriksaan tersebut disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Pemeriksaan 10 Puncak Terbesar *envelope spectrum* pada Data 97.mat

| Rank | Peak Hz | Amp     | <i>Shaft</i> /Error | BPFI/Error | BPFO/Error | BSF/Error |
|------|---------|---------|---------------------|------------|------------|-----------|
| 1    | 29,91   | 1788,27 | 1X/0,14%            | 1X/81,56%  | 1X/72,14%  | 1X/57,63% |
| 2    | 59,87   | 1111,24 | 2X/0,05%            | 1X/63,09%  | 1X/44,24%  | 1X/15,18% |
| 3    | 11,41   | 442,71  | 1X/61,89%           | 1X/92,96%  | 1X/89,37%  | 1X/83,83% |
| 4    | 18,50   | 318,52  | 1X/38,24%           | 1X/88,60%  | 1X/82,77%  | 1X/73,79% |
| 5    | 89,78   | 308,81  | 3X/0,08%            | 1X/44,65%  | 1X/16,38%  | 1X/27,19% |
| 6    | 14,95   | 295,71  | 1X/50,07%           | 1X/90,78%  | 1X/86,07%  | 1X/78,81% |
| 7    | 273,12  | 243,83  | 9X/1,32%            | 2X/15,80%  | 3X/15,20%  | 4X/3,26%  |
| 8    | 303,03  | 201,44  | 10X/1,18%           | 2X/6,58%   | 3X/5,92%   | 4X/7,33%  |
| 9    | 101,44  | 183,97  | 3X/12,89%           | 1X/37,46%  | 1X/5,52%   | 1X/43,71% |
| 10   | 452,67  | 161,95  | 15X/0,76%           | 3X/6,96%   | 4X/5,41%   | 6X/6,89%  |

Berdasarkan Tabel 5, analisis diawali dengan pemeriksaan kesesuaian puncak frekuensi terhadap frekuensi putaran *shaft* dan harmoniknya. Pada data 97.mat, frekuensi *shaft* sebesar 29,95 Hz. Dari sepuluh puncak dominan, beberapa puncak menunjukkan kesesuaian dengan harmonik *shaft*, yaitu 29,91 Hz sebagai 1×*shaft* dengan error 0,14%, 59,87 Hz sebagai 2×*shaft* dengan error 0,05%, 89,78 Hz sebagai 3×*shaft* dengan error 0,08%, 273,12 Hz sebagai 9×*shaft* dengan error 1,32%, 303,03 Hz sebagai 10×*shaft* dengan error 1,18%, dan 452,67 Hz sebagai 15×*shaft* dengan error 0,76%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa *envelope spectrum* 97.mat memiliki pola harmonik *shaft* yang jelas, terutama pada rangkaian 1×–2×–3×*shaft*.

Setelah karakteristik *shaft* diperiksa, analisis dilanjutkan terhadap frekuensi BPFI yang memiliki nilai teoritis sebesar 162,19 Hz. Dari sepuluh puncak dominan, tidak terdapat puncak yang menunjukkan kesesuaian kuat dengan frekuensi fundamental maupun harmonik BPFI. Dengan demikian, pada data 97.mat tidak terbentuk pola harmonik BPFI yang jelas. Pemeriksaan kemudian dilakukan terhadap frekuensi BPFO yang memiliki nilai teoritis sebesar 107,36 Hz. Dari sepuluh puncak dominan, tidak terdapat puncak yang menunjukkan kesesuaian yang cukup kuat dengan frekuensi fundamental maupun harmonik BPFO. Dengan demikian, tidak terbentuk pola harmonik BPFO yang jelas pada data 97.mat. Selanjutnya, pemeriksaan dilakukan terhadap frekuensi BSF yang memiliki nilai teoritis sebesar 70,58 Hz. Terdapat satu puncak yang menunjukkan kesesuaian dengan 4×BSF, yaitu 273,12 Hz dengan error 3,26%. Namun, hanya terdapat satu kecocokan sehingga belum membentuk rangkaian harmonik BSF yang kuat. Secara keseluruhan, hasil *envelope spectrum* pada data 97.mat menunjukkan dominasi frekuensi putaran *shaft* dan harmoniknya, terutama pada rangkaian 1×–2×–3×*shaft* dengan error relatif rendah. Sementara itu, tidak ditemukan pola harmonik yang kuat dan konsisten pada BPFI, BPFO,

maupun BSF. Dengan demikian, hasil *envelope spectrum* mendukung hasil analisis FFT bahwa karakteristik spektrum data 97.mat lebih sesuai dengan kondisi *bearing normal*.

Setelah pembahasan data 97.mat sebagai kondisi *bearing normal*, analisis dilanjutkan pada data 105.mat yang merepresentasikan kondisi *inner race fault*. Dengan prosedur yang sama, sepuluh puncak dengan amplitudo terbesar pada *envelope spectrum* diperiksa terhadap frekuensi *shaft*, BPFI, BPFO, dan BSF beserta harmoniknya. Hasil pemeriksaan frekuensi dan harmonik pada data 105.mat disajikan pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil Pemeriksaan 10 Puncak Terbesar *envelope spectrum* pada Data 105.mat

| Rank | Peak Hz | Amp      | Shaft/Error | BPFI/Error | BPFO/Error | BSF/Error |
|------|---------|----------|-------------|------------|------------|-----------|
| 1    | 161,70  | 11470,95 | 5X/7,98%    | 1X/0,30%   | 2X/24,70%  | 2X/14,54% |
| 2    | 59,87   | 5317,70  | 2X/0,05%    | 1X/63,09%  | 1X/44,24%  | 1X/15,18% |
| 3    | 101,83  | 4909,55  | 3X/13,33%   | 1X/37,22%  | 1X/5,16%   | 1X/44,26% |
| 4    | 263,52  | 3192,47  | 9X/2,24%    | 2X/18,76%  | 2X/22,72%  | 4X/6,66%  |
| 5    | 323,39  | 3144,29  | 11X/1,84%   | 2X/0,30%   | 3X/0,40%   | 5X/8,37%  |
| 6    | 221,56  | 2773,17  | 7X/5,68%    | 1X/36,61%  | 2X/3,18%   | 3X/4,63%  |
| 7    | 485,09  | 1865,64  | 16X/1,23%   | 3X/0,30%   | 5X/9,64%   | 7X/1,82%  |
| 8    | 383,26  | 1287,83  | 13X/1,56%   | 2X/18,15%  | 4X/10,76%  | 5X/8,60%  |
| 9    | 203,65  | 1247,05  | 7X/2,86%    | 1X/25,57%  | 2X/5,16%   | 3X/3,82%  |
| 10   | 131,71  | 1037,22  | 4X/9,94%    | 1X/18,79%  | 1X/22,68%  | 2X/6,70%  |

Berdasarkan Tabel 6, analisis diawali dengan pemeriksaan kesesuaian puncak frekuensi terhadap frekuensi putaran *shaft* dan harmoniknya. Pada data 105.mat, frekuensi *shaft* sebesar 29,95 Hz. Dari sepuluh puncak dominan, beberapa puncak menunjukkan kesesuaian dengan harmonik *shaft*, yaitu 59,87 Hz sebagai  $2 \times \text{shaft}$  dengan error 0,05%, 263,52 Hz sebagai  $9 \times \text{shaft}$  dengan error 2,24%, 323,39 Hz sebagai  $11 \times \text{shaft}$  dengan error 1,84%, 485,09 Hz sebagai  $16 \times \text{shaft}$  dengan error 1,23%, 383,26 Hz sebagai  $13 \times \text{shaft}$  dengan error 1,56%, dan 203,65 Hz sebagai  $7 \times \text{shaft}$  dengan error 2,86%. Hasil tersebut menunjukkan adanya beberapa komponen spektrum yang berkaitan dengan frekuensi *shaft* dan harmoniknya. Namun, puncak-puncak tersebut tidak membentuk rangkaian harmonik *shaft* yang berurutan seperti  $1 \times - 2 \times - 3 \times \text{shaft}$ .

Setelah karakteristik *shaft* diperiksa, analisis dilanjutkan terhadap frekuensi BPFI yang memiliki nilai teoritis sebesar 162,19 Hz. Dari sepuluh puncak dominan, terdapat tiga puncak yang menunjukkan kesesuaian dengan harmonik BPFI, yaitu 161,70 Hz sebagai  $1 \times \text{BPFI}$  dengan error 0,30%, 323,39 Hz sebagai  $2 \times \text{BPFI}$  dengan error 0,30%, dan 485,09 Hz sebagai  $3 \times \text{BPFI}$  dengan error 0,30%. Ketiga puncak tersebut membentuk rangkaian harmonik  $1 \times - 2 \times - 3 \times \text{BPFI}$  dengan error yang sama dan sangat rendah. Hasil tersebut menunjukkan pola harmonik BPFI yang sangat jelas pada *envelope spectrum* data 105.mat. Pemeriksaan kemudian dilanjutkan terhadap frekuensi BPFO yang memiliki nilai teoritis sebesar 107,36 Hz. Dari sepuluh puncak dominan, terdapat dua puncak yang menunjukkan kesesuaian dengan harmonik BPFO, yaitu 323,39 Hz sebagai  $3 \times \text{BPFO}$  dengan error 0,40% dan 221,56 Hz sebagai  $2 \times \text{BPFO}$  dengan error 3,18%. Namun, tidak ditemukan kecocokan yang kuat pada  $1 \times \text{BPFO}$ . Dengan demikian, meskipun terdapat kecocokan pada  $2 \times$  dan  $3 \times \text{BPFO}$ , belum terbentuk rangkaian harmonik BPFO yang lengkap.

Selanjutnya, pemeriksaan dilakukan terhadap frekuensi BSF yang memiliki nilai teoritis sebesar 70,58 Hz. Dari sepuluh puncak dominan, terdapat beberapa puncak yang menunjukkan kesesuaian dengan kelipatan BSF, yaitu 221,56 Hz sebagai  $3 \times \text{BSF}$  dengan error 4,63%, 485,09 Hz sebagai  $7 \times \text{BSF}$  dengan error 1,82% dan 203,65 Hz sebagai  $3 \times \text{BSF}$  dengan error 3,82%. Dengan demikian, terdapat kecocokan pada harmonik  $3 \times$  dan  $7 \times \text{BSF}$ .

Namun, kecocokan tersebut tidak membentuk rangkaian harmonik BSF yang berurutan sehingga belum menunjukkan pola BSF yang kuat. Setelah seluruh karakteristik frekuensi diperiksa, hasilnya kemudian dibandingkan untuk melihat pola yang paling menonjol pada data 105.mat. Secara keseluruhan, *envelope spectrum* data 105.mat menunjukkan beberapa kecocokan dengan harmonik *shaft*, BPFO, dan BSF. Namun, pola yang paling jelas ditunjukkan oleh BPFI melalui rangkaian  $1 \times -2 \times -3 \times$ BPFI dengan error masing-masing 0,30%. Rangkaian tersebut juga muncul pada puncak dengan amplitudo yang relatif tinggi, yaitu 161,70 Hz, 323,39 Hz, dan 485,09 Hz. Dibandingkan dengan karakteristik lainnya, keteraturan dan kesesuaian frekuensi BPFI tersebut memberikan indikasi yang lebih spesifik terhadap kondisi *inner race fault*. Dengan demikian, hasil *envelope spectrum* pada data 105.mat memperkuat hasil analisis FFT dan mendukung karakteristik *inner race fault* pada data tersebut.

Setelah pembahasan data 105.mat yang merepresentasikan kondisi *inner race fault*, analisis dilanjutkan pada data 130.mat yang merepresentasikan kondisi *outer race fault*. Dengan prosedur yang sama, sepuluh puncak dengan amplitudo terbesar pada *envelope spectrum* diperiksa terhadap frekuensi *shaft*, BPFI, BPFO, dan BSF beserta harmoniknya. Hasil pemeriksaan frekuensi dan harmonik pada data 130.mat disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7. Hasil Pemeriksaan 10 Puncak Terbesar *envelope spectrum* pada Data 130.mat

| Rank | Peak Hz | Amp      | <i>Shaft</i> /Error | BPFI/Error | BPFO/Error | BSF/Error |
|------|---------|----------|---------------------|------------|------------|-----------|
| 1    | 107,61  | 34362,34 | 4X/10,17%           | 1X/33,65%  | 1X/0,23%   | 2X/23,77% |
| 2    | 215,33  | 18808,80 | 7X/2,71%            | 1X/32,77%  | 2X/0,28%   | 3X/1,69%  |
| 3    | 322,94  | 12027,14 | 11X/1,98%           | 2X/0,44%   | 3X/0,26%   | 5X/8,49%  |
| 4    | 430,56  | 9819,89  | 14X/2,68%           | 3X/11,51%  | 4X/0,26%   | 6X/1,67%  |
| 5    | 29,90   | 7761,76  | 1X/0,15%            | 1X/81,56%  | 1X/72,15%  | 1X/57,63% |
| 6    | 77,71   | 5582,95  | 3X/13,51%           | 1X/52,09%  | 1X/27,62%  | 1X/10,10% |
| 7    | 137,62  | 3327,70  | 5X/8,10%            | 1X/15,15%  | 1X/28,18%  | 2X/2,52%  |
| 8    | 167,52  | 3317,23  | 6X/6,78%            | 1X/3,29%   | 2X/21,98%  | 2X/18,67% |
| 9    | 59,81   | 3277,79  | 2X/0,15%            | 1X/63,12%  | 1X/44,29%  | 1X/15,27% |
| 10   | 47,81   | 3235,25  | 2X/20,19%           | 1X/70,52%  | 1X/55,47%  | 1X/32,27% |

Berdasarkan Tabel 7, analisis diawali dengan pemeriksaan kesesuaian puncak frekuensi terhadap frekuensi putaran *shaft* dan harmoniknya. Pada data 130.mat, frekuensi *shaft* sebesar 29,95 Hz. Dari sepuluh puncak dominan, terdapat beberapa puncak yang menunjukkan kesesuaian dengan harmonik *shaft*, yaitu 215,33 Hz sebagai  $7 \times$  *shaft* dengan error 2,71%, 322,94 Hz sebagai  $11 \times$  *shaft* dengan error 1,98%, 430,56 Hz sebagai  $14 \times$  *shaft* dengan error 2,68%, 29,90 Hz sebagai  $1 \times$  *shaft* dengan error 0,15%, 59,81 Hz sebagai  $2 \times$  *shaft* dengan error 0,15%. Hasil tersebut menunjukkan adanya beberapa komponen yang berkaitan dengan frekuensi *shaft* dan harmoniknya, tetapi tidak membentuk rangkaian harmonik *shaft*. Setelah karakteristik *shaft* diperiksa, analisis dilanjutkan terhadap frekuensi BPFI yang memiliki nilai teoritis sebesar 162,19 Hz. Dari sepuluh puncak dominan, terdapat satu puncak yang menunjukkan kesesuaian dengan harmonik BPFI, yaitu 167,52 Hz sebagai  $1 \times$ BPFI dengan error 3,29% dan 322,94 Hz sebagai  $2 \times$ BPFI dengan error 0,44%. Namun, tidak ditemukan puncak lain yang membentuk rangkaian harmonik BPFI secara berurutan. Dengan demikian, belum terbentuk pola harmonik BPFI yang kuat pada data 130.mat.

Pemeriksaan kemudian dilanjutkan terhadap frekuensi BPFO yang memiliki nilai teoritis sebesar 107,36 Hz. Dari sepuluh puncak dominan, terdapat empat puncak yang menunjukkan kesesuaian dengan harmonik BPFO, yaitu 107,61 Hz sebagai  $1 \times$ BPFO dengan error 0,23%, 215,33 Hz sebagai  $2 \times$ BPFO dengan error 0,28%, 322,94 Hz sebagai  $3 \times$ BPFO

dengan error 0,26%, dan 430,56 Hz sebagai  $4 \times \text{BPFO}$  dengan error 0,26%. Keempat puncak tersebut membentuk rangkaian harmonik  $1 \times -2 \times -3 \times -4 \times \text{BPFO}$  dengan error relatif sangat rendah. Hasil tersebut menunjukkan pola harmonik BPFO yang sangat jelas pada *envelope spectrum* data 130.mat. Selanjutnya, pemeriksaan dilakukan terhadap frekuensi BSF yang memiliki nilai teoritis sebesar 70,58 Hz. Dari sepuluh puncak dominan, terdapat beberapa puncak yang menunjukkan kesesuaian dengan kelipatan BSF, yaitu 215,33 Hz sebagai  $3 \times \text{BSF}$  dengan error 1,69%, 430,56 Hz sebagai  $6 \times \text{BSF}$  dengan error 1,67%, dan 137,62 Hz sebagai  $2 \times \text{BSF}$  dengan error 2,52%. Namun, kecocokan tersebut tidak membentuk rangkaian harmonik BSF yang lengkap. Setelah seluruh karakteristik frekuensi diperiksa, hasilnya kemudian dibandingkan untuk melihat pola yang paling menonjol pada data 130.mat.

Secara keseluruhan, *envelope spectrum* data 130.mat menunjukkan kecocokan pada beberapa harmonik *shaft*, BPFI, BPFO, dan BSF. Namun, karakteristik yang paling menonjol adalah BPFO, yang membentuk rangkaian harmonik  $1 \times -2 \times -3 \times -4 \times \text{BPFO}$ . Dengan demikian, hasil *envelope spectrum* pada data 130.mat memberikan indikasi yang sangat kuat terhadap karakteristik *outer race fault* dan sekaligus memperjelas karakteristik BPFO yang pada analisis FFT sebelumnya belum terlihat secara dominan. Setelah pembahasan data 130.mat yang merepresentasikan kondisi *outer race fault*, analisis dilanjutkan pada data 118.mat yang merepresentasikan kondisi *ball fault*. Dengan prosedur yang sama, sepuluh puncak dengan amplitudo terbesar pada *envelope spectrum* diperiksa terhadap frekuensi *shaft*, BPFI, BPFO, dan BSF beserta harmoniknya. Hasil pemeriksaan frekuensi dan harmonik pada data 118.mat disajikan pada Tabel 8.

Tabel 8. Hasil Pemeriksaan 10 Puncak Terbesar *envelope spectrum* pada Data 118.mat

| Rank | Peak Hz | Amp     | Shaft     | BPFI      | BPFO      | BSF       |
|------|---------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 1    | 215,39  | 1147,19 | 7X/2,74%  | 1X/32,80% | 2X/0,31%  | 3X/1,72%  |
| 2    | 29,96   | 996,36  | 1X/0,03%  | 1X/81,53% | 1X/72,10% | 1X/57,56% |
| 3    | 71,86   | 946,76  | 2X/19,97% | 1X/55,69% | 1X/33,07% | 1X/1,81%  |
| 4    | 161,64  | 704,26  | 5X/7,94%  | 1X/0,34%  | 2X/24,72% | 2X/14,50% |
| 5    | 12,04   | 690,62  | 1X/59,79% | 1X/92,58% | 1X/88,78% | 1X/82,94% |
| 6    | 47,87   | 625,95  | 2X/20,08% | 1X/70,48% | 1X/55,41% | 1X/32,17% |
| 7    | 107,69  | 625,27  | 4X/10,11% | 1X/33,60% | 1X/0,31%  | 2X/23,71% |
| 8    | 233,30  | 625,06  | 8X/2,63%  | 1X/43,85% | 2X/8,65%  | 3X/10,18% |
| 9    | 5,97    | 514,90  | 1X/80,06% | 1X/96,32% | 1X/94,44% | 1X/91,54% |
| 10   | 263,26  | 454,80  | 9X/2,33%  | 2X/18,84% | 2X/22,60% | 4X/6,76%  |

Berdasarkan Tabel 8, analisis diawali dengan pemeriksaan kesesuaian puncak frekuensi terhadap frekuensi putaran *shaft* dan harmoniknya. Pada data 118.mat, frekuensi *shaft* sebesar 29,95 Hz. Dari sepuluh puncak dominan, terdapat beberapa puncak yang menunjukkan kesesuaian dengan harmonik *shaft*, yaitu 215,39 Hz sebagai  $7 \times \text{shaft}$  dengan error 2,74%, 29,96 Hz sebagai  $1 \times \text{shaft}$  dengan error 0,03%, 233,30 Hz sebagai  $8 \times \text{shaft}$  dengan error 2,63%, dan 263,26 Hz sebagai  $9 \times \text{shaft}$  dengan error 2,33%. Hasil tersebut menunjukkan adanya beberapa komponen spektrum yang berkaitan dengan frekuensi *shaft* dan harmoniknya, tetapi tidak membentuk rangkaian harmonik *shaft* berurutan yang kuat. Setelah karakteristik *shaft* diperiksa, analisis dilanjutkan terhadap frekuensi BPFI yang memiliki nilai teoritis sebesar 162,19 Hz. Dari sepuluh puncak dominan, terdapat satu puncak yang menunjukkan kesesuaian dengan frekuensi fundamental BPFI, yaitu 161,64 Hz sebagai  $1 \times \text{BPFI}$  dengan error 0,34%. Tidak ditemukan puncak lain yang menunjukkan

kesesuaian dengan harmonik BPFI berikutnya. Dengan demikian, belum terbentuk pola harmonik BPFI yang kuat pada data 118.mat.

Pemeriksaan kemudian dilanjutkan terhadap frekuensi BPFO yang memiliki nilai teoritis sebesar 107,36 Hz. Dari sepuluh puncak dominan, terdapat dua puncak yang menunjukkan kesesuaian dengan harmonik BPFO, yaitu 107,69 Hz sebagai  $1 \times \text{BPFO}$  dengan error 0,31% dan 215,39 Hz sebagai  $2 \times \text{BPFO}$  dengan error 0,31%. Kedua puncak tersebut membentuk rangkaian  $1 \times - 2 \times \text{BPFO}$  dengan error yang sangat rendah. Hasil ini menunjukkan adanya pola BPFO yang cukup jelas pada *envelope spectrum* data 118.mat. Selanjutnya, pemeriksaan dilakukan terhadap frekuensi BSF yang memiliki nilai teoritis sebesar 70,58 Hz. Dari sepuluh puncak dominan, terdapat dua puncak yang menunjukkan kesesuaian dengan kelipatan BSF, yaitu 215,39 Hz sebagai  $3 \times \text{BSF}$  dengan error 1,72% dan 71,86 Hz sebagai  $1 \times \text{BSF}$  dengan error 1,81%. Kedua puncak tersebut menunjukkan adanya kecocokan pada  $1 \times$  dan  $3 \times \text{BSF}$ . Meskipun  $2 \times \text{BSF}$  tidak muncul pada sepuluh puncak dominan, keberadaan  $1 \times$  dan  $3 \times \text{BSF}$  memberikan indikasi adanya komponen yang berkaitan dengan karakteristik.

Setelah seluruh karakteristik frekuensi diperiksa, hasilnya kemudian dibandingkan untuk melihat pola yang paling menonjol pada data 118.mat. Secara keseluruhan, pada karakteristik *shaft* terdapat beberapa kecocokan, tetapi tidak membentuk rangkaian harmonik yang kuat. Pada BPFI, hanya terdapat kecocokan pada  $1 \times \text{BPFI}$  sehingga belum menunjukkan pola harmonik yang jelas. Sementara itu, BPFO menunjukkan rangkaian  $1 \times - 2 \times \text{BPFO}$  dengan error masing-masing 0,31%, sehingga memberikan pola yang cukup jelas. Pada BSF, terdapat kecocokan pada  $1 \times \text{BSF}$  dan  $3 \times \text{BSF}$  dengan error masing-masing 1,81% dan 1,72%, yang memberikan indikasi adanya komponen terkait karakteristik BSF. Namun, puncak 215,39 Hz merupakan komponen yang sama dan dapat dikaitkan dengan  $2 \times \text{BPFO}$  maupun  $3 \times \text{BSF}$ . Oleh karena itu, meskipun *envelope spectrum* memberikan indikasi terhadap karakteristik BSF, adanya pola BPFO yang juga cukup jelas membuat hasil tersebut belum cukup untuk secara spesifik mengonfirmasi karakteristik *ball fault*. Interpretasi data 118.mat selanjutnya perlu mempertimbangkan hasil FFT dan perbandingan kedua metode secara keseluruhan.

### **Perbandingan Hasil FFT dan Envelope spectrum**

Berdasarkan hasil analisis FFT dan *envelope spectrum* pada keempat kondisi *bearing*, diperoleh pola karakteristik yang berbeda pada masing-masing metode. Pada data 97.mat yang merepresentasikan kondisi *bearing* normal, kedua metode menunjukkan dominasi komponen yang berkaitan dengan frekuensi *shaft* dan harmoniknya, tanpa terbentuk pola harmonik BPFI, BPFO, atau BSF yang kuat. Hasil tersebut menunjukkan kesesuaian antara FFT dan *envelope spectrum* dalam mendukung kondisi normal. Pada data 105.mat yang merepresentasikan *inner race fault*, FFT menunjukkan rangkaian harmonik BPFI  $1 \times - 2 \times - 3 \times$  dengan error relatif rendah, sedangkan *envelope spectrum* memperlihatkan rangkaian yang sama dengan error masing-masing 0,30%. Dengan demikian, kedua metode memberikan hasil yang searah dan mendukung karakteristik *inner race fault*, dengan pola BPFI yang lebih jelas pada *envelope spectrum*. Pada data 130.mat yang merepresentasikan *outer race fault*, hasil FFT tidak menunjukkan rangkaian harmonik BPFO yang kuat pada sepuluh puncak dominan. Sebaliknya, *envelope spectrum* menunjukkan rangkaian  $1 \times - 2 \times - 3 \times - 4 \times \text{BPFO}$  dengan error relatif sangat rendah, yaitu 0,23–0,28%. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa karakteristik *outer race fault* yang belum tampak secara dominan pada FFT menjadi jauh lebih jelas pada *envelope spectrum*.

Pada data 118.mat yang merepresentasikan *ball fault*, FFT menunjukkan dominasi harmonik *shaft* dan hanya memberikan indikasi yang belum kuat terhadap BSF. *envelope spectrum* menunjukkan kecocokan pada  $1 \times$  dan  $3 \times \text{BSF}$ , tetapi pada saat yang sama juga membentuk rangkaian  $1 \times - 2 \times \text{BPFO}$ . Puncak 215,39 Hz bahkan dapat dikaitkan dengan

3×BSF maupun 2×BPFO. Oleh karena itu, kedua metode belum memberikan bukti yang cukup spesifik untuk mengonfirmasi karakteristik *ball fault* secara tunggal. Secara keseluruhan, perbandingan kedua metode menunjukkan bahwa *envelope spectrum* mampu memperlihatkan karakteristik frekuensi dengan lebih jelas pada beberapa kondisi. Pada kondisi normal (97.mat), *envelope spectrum* menunjukkan rangkaian  $1\times-2\times-3\times$  *shaft* yang kuat dan konsisten, sejalan dengan hasil FFT yang juga didominasi oleh harmonik *shaft*. Pada *inner race fault* (105.mat), kedua metode sama-sama menunjukkan rangkaian harmonik BPFI, dengan pola yang lebih jelas pada *envelope spectrum*. Pada *outer race fault* (130.mat), karakteristik BPFO yang belum terlihat dominan pada FFT justru tampak sangat jelas pada *envelope spectrum* melalui rangkaian  $1\times-2\times-3\times-4\times$  BPFO. Sementara itu, pada *ball fault* (118.mat), hasil FFT menunjukkan dominasi harmonik *shaft* dan hanya memberikan indikasi yang belum kuat terhadap karakteristik BSF. Hasil *envelope spectrum* kemudian menunjukkan kecocokan pada  $1\times$  dan  $3\times$ BSF, tetapi pada saat yang sama juga memperlihatkan rangkaian  $1\times-2\times$ BPFO. Karena terdapat tumpang tindih antara karakteristik BSF dan BPFO, hasil *envelope spectrum* belum cukup spesifik untuk mengonfirmasi *ball fault*. Dengan demikian, penggunaan FFT dan *envelope spectrum* secara bersamaan memberikan gambaran yang lebih lengkap mengenai karakteristik getaran pada masing-masing kondisi *bearing* dibandingkan penggunaan salah satu metode secara tunggal.

Hasil perbandingan secara kualitatif tersebut selanjutnya diringkas secara kuantitatif untuk mengevaluasi tingkat kesesuaian frekuensi karakteristik yang teridentifikasi pada masing-masing kondisi. Evaluasi dilakukan menggunakan nilai *mean relative error* dan simpangan baku (standard deviation, SD) dari beberapa file pada kondisi yang sama. Nilai *mean relative error* menunjukkan tingkat kedekatan frekuensi hasil analisis terhadap frekuensi karakteristik teoritis, sedangkan SD menunjukkan konsistensi hasil identifikasi antar file. Ringkasan hasil untuk keempat kondisi *bearing* disajikan pada Tabel 9.

Tabel 9. Ringkasan *mean relative error* dan SD Identifikasi Frekuensi Karakteristik *Bearing*

| Kondisi           | File    | Target karakteristik   | <i>Mean relative error</i> (%) | SD (%) |
|-------------------|---------|------------------------|--------------------------------|--------|
| Normal            | 97–100  | $1\times$ <i>Shaft</i> | 0,0829                         | 0,0842 |
| <i>Inner Race</i> | 105–108 | BPFI                   | 0,2421                         | 0,0239 |
| <i>Outer Race</i> | 130–133 | BPFO                   | 0,2524                         | 0,1676 |
| <i>Ball Fault</i> | 118–121 | BSF                    | 0,0900                         | 0,0444 |

Berdasarkan Tabel 9, seluruh kondisi menunjukkan nilai *mean relative error* yang relatif rendah terhadap frekuensi karakteristik target. Pada kondisi normal, frekuensi  $1\times$  *shaft* memiliki *mean relative error* sebesar 0,0829% dengan SD sebesar 0,0842%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa komponen frekuensi yang teridentifikasi memiliki kedekatan yang sangat tinggi terhadap frekuensi putaran poros dan relatif konsisten pada file 97–100. Pada kondisi *inner race fault*, karakteristik BPFI menghasilkan *mean relative error* sebesar 0,2421% dengan SD 0,0239%. Nilai SD yang rendah menunjukkan konsistensi identifikasi BPFI yang tinggi antar file 105–108. Hasil ini sejalan dengan analisis spektrum sebelumnya yang menunjukkan terbentuknya pola harmonik BPFI pada kondisi *inner race fault*.

Pada kondisi *outer race fault*, karakteristik BPFO menghasilkan *mean relative error* sebesar 0,2524% dengan SD 0,1676%. Meskipun nilai *mean relative error* tetap rendah, SD yang lebih besar dibandingkan kondisi lainnya menunjukkan variasi kesesuaian BPFO antar-file yang lebih tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa karakteristik BPFO dapat teridentifikasi dengan kedekatan frekuensi yang baik, tetapi konsistensinya antar file relatif lebih bervariasi. Sementara itu, kondisi *ball fault* menunjukkan *mean relative error* sebesar 0,0900% untuk karakteristik BSF dengan SD sebesar 0,0444%. Nilai error yang rendah menunjukkan adanya kedekatan frekuensi yang baik terhadap BSF. Namun, hasil ini perlu diinterpretasikan secara hati-hati karena pada analisis spektrum sebelumnya ditemukan

adanya tumpang tindih antara komponen BSF dan karakteristik lainnya, khususnya BPFO dan harmonik *shaft*. Dengan demikian, nilai error yang rendah tidak secara langsung menunjukkan bahwa BSF merupakan karakteristik yang paling dominan atau paling spesifik untuk mengidentifikasi *ball fault*.

Secara keseluruhan, hasil kuantitatif pada Tabel 9 memperkuat bahwa frekuensi karakteristik target dapat diidentifikasi dengan *mean relative error* yang rendah pada keempat kondisi. Namun, tingkat kesesuaian frekuensi tidak dapat digunakan sebagai satu-satunya dasar dalam menentukan jenis kerusakan *bearing*. Konsistensi antar file yang ditunjukkan oleh nilai SD serta keberadaan pola harmonik dan kemungkinan tumpang tindih dengan karakteristik frekuensi lainnya perlu dipertimbangkan secara bersamaan. Hasil ini menunjukkan bahwa kombinasi FFT dan *envelope spectrum* memberikan informasi yang saling melengkapi, di mana FFT memberikan gambaran umum kandungan frekuensi, sedangkan *envelope spectrum* membantu memperjelas karakteristik frekuensi *bearing fault* yang tidak selalu dominan pada spektrum FFT.

## PENUTUP

Berdasarkan hasil analisis FFT dan *envelope spectrum* pada empat kondisi *bearing*, serta evaluasi kuantitatif menggunakan *mean relative error* (MRE) dan *standard deviation* (SD), dapat disimpulkan bahwa:

1. *Bearing* normal menunjukkan dominasi frekuensi *shaft* dan harmoniknya pada FFT maupun *envelope spectrum*, sehingga dapat dibedakan dari kondisi *bearing* yang mengalami kerusakan.
2. *Inner race fault* menunjukkan karakteristik BPFI melalui pola harmonik  $1\times-2\times-3\times$ BPFI pada kedua metode, dengan karakteristik yang lebih jelas pada *envelope spectrum*.
3. *Outer race fault* menunjukkan bahwa karakteristik BPFO tidak selalu dominan pada FFT, tetapi dapat teridentifikasi dengan lebih jelas melalui *envelope spectrum* berdasarkan pola harmonik  $1\times-2\times-3\times-4\times$ BPFO.
4. *Ball fault* masih menunjukkan keterbatasan dalam identifikasi. FFT lebih banyak didominasi oleh harmonik *shaft*, sedangkan *envelope spectrum* menunjukkan kecocokan terhadap BSF tetapi juga memperlihatkan karakteristik BPFO. Dengan demikian, BSF belum cukup spesifik untuk digunakan sebagai satu-satunya dasar konfirmasi *ball fault*.
5. Secara keseluruhan, FFT dan *envelope spectrum* memberikan informasi yang saling melengkapi dalam identifikasi karakteristik frekuensi *bearing*. Evaluasi MRE dan SD menunjukkan bahwa frekuensi yang teridentifikasi memiliki kesesuaian yang tinggi terhadap frekuensi teoritis pada keempat kondisi. Namun, nilai error yang rendah tidak dapat digunakan sebagai satu-satunya dasar diagnosis, sehingga interpretasi tetap perlu mempertimbangkan pola harmonik dan kemungkinan tumpang tindih antar karakteristik frekuensi.

## DAFTAR KEPUSTAKAAN

- [1]. J. P. Kumar, P. S. Chauhan, and P. P. Pandit, "Time domain vibration analysis techniques for condition monitoring of rolling element *bearing*: A review," *Materials Today: Proceedings*, vol. 62, pp. 6336–6340, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.02.550.
- [2]. V. Kannan, T. Zhang, and H. Li, "A Review of the Intelligent Condition Monitoring of Rolling Element *Bearings*," *Machines*, vol. 12, no. 7, Art. no. 484, 2024, doi: 10.3390/machines12070484.

- [3]. P. Arun, S. A. Lincon, and N. Prabhakaran, "Detection and Characterization of *Bearing* Faults from the Frequency Domain Features of Vibration," IETE Journal of Research, vol. 64, no. 5, pp. 634–647, 2018, doi: 10.1080/03772063.2017.1369369.
- [4]. E. O. Brigham and R. E. Morrow, "The Fast fourier transform," IEEE Spectrum, vol. 4, no. 12, pp. 63–70, Dec. 1967.
- [5]. S. A. McInerny and Y. Dai, "Basic Vibration Signal Processing for *Bearing* Fault Detection," IEEE Transactions on Education, vol. 46, no. 1, pp. 149–156, Feb. 2003, doi: 10.1109/TE.2002.808234.
- [6]. V. K. Rai and A. R. Mohanty, "*Bearing* fault diagnosis using FFT of intrinsic mode functions in Hilbert–Huang transform," Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 21, no. 6, pp. 2607–2615, 2007, doi: 10.1016/j.ymssp.2006.12.004.
- [7]. K. H. Munde, H. H. Sawant, M. J. Sable, K. J. Kamble, R. N. Yerrawar, K. A. Mahajan, P. D. Darade, and S. H. Gawande, "An improved approach on ball *bearing* characteristic frequencies," Progress in Engineering Science, vol. 1, no. 4, Art. no. 100030, 2024, doi: 10.1016/j.pes.2024.100030.
- [8]. T. A. Harris and M. N. Kotzalas, Advanced Concepts of *Bearing* Technology: Rolling *Bearing* Analysis, 5th ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2007.
- [9]. N. Sikder, K. Bhakta, A. Al Nahid, and M. M. Manjurul Islam, "Fault Diagnosis of Motor *Bearing* Using Ensemble Learning Algorithm with FFT-based Preprocessing," in Proc. 2019 International Conference on Robotics, Electrical and Signal Processing Techniques (ICREST), 2019.
- [10]. W. A. Smith and R. B. Randall, "Rolling element *bearing* diagnostics using the Case Western Reserve University data: A benchmark study," Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 64–65, pp. 100–131, 2015.
- [11]. Case Western Reserve University *Bearing* Data Center, "12k Drive End *Bearing* Fault Data," Case School of Engineering, Case Western Reserve University. [Online]. Available: CWRU *Bearing* Data Center. Accessed: Aug. 17, 2026.
- [12]. J. G. Proakis and D. G. Manolakis, *Digital Signal Processing: Principles, Algorithms, and Applications*, 4th ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 2007.
- [13]. A. V. Oppenheim and R. W. Schaffer, *Discrete-Time Signal Processing*, 3rd ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson, 2010.