

Aplikasi *Short Time Fourier Transform* (STFT) untuk Diagnosa Kerusakan Bantalan Gelinding

Berli Kamiel^a, Muhammad Rizki Fadilah^a

^a Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, Jalan Brawijaya, Tamantirto, Kasihan, Bantul 55183
e-mail: berlikamiel@umy.ac.id

Kata kunci:

Bantalan; Frekuensi; Amplitudo; *Fourier Transform* (FT); *Short Time Fourier Transform* (STFT)

Keywords:

Bearing; Frequency; Amplitude; *Fourier Transform* (FT); *Short Time Fourier Transform* (STFT)

ABSTRAK

Kipas sangat penting untuk menjaga aliran udara di industri. Bantalan pada kipas mencegah gesekan dan harus kuat agar berfungsi dengan baik. Kerusakan pada bantalan dapat mengurangi kinerja mesin. Pemeliharaan *prediktif* penting untuk mendeteksi kerusakan secara dini. Salah satu cara menganalisis kerusakan bantalan menggunakan *Short Time Fourier Transform* (STFT), karena unggul dalam menganalisa sinyal *non-stasioner*. Uji coba dilakukan dalam kondisi normal dan kerusakan lintasan dalam pada bantalan dengan kecepatan poros 1162,5 Hz. Deteksi getaran menggunakan sensor akselerometer dan menggunakan analisis matlab, kemudian data tersebut di proses menggunakan metode FT melalui domain waktu juga frekuensi, dan STFT melalui spektrogram. Pada plot spektrum masih terdapat banyak *noise* sehingga amplitudo cacat bantalan dikaburkan oleh amplitudo tinggi dari frekuensi lain dan juga *Fourier transform* (FT) hanya cocok untuk melakukan analisa sinyal yang bersifat stasioner, dan untuk melakukan filter terhadap *noise* tersebut digunakan analisis envelope. Pada metode analisa STFT memberikan informasi tentang frekuensi dan waktu secara bersamaan. Sehingga terlihat bahwa hasil spektrogram pada cacat lintasan menggambarkan tiga puncak amplitudo tinggi pada frekuensi harmonik. Hal ini menunjukkan bahwa sinyal berada dalam keadaan non stasioner karena ada amplitudo yang dilihat.

ABSTRACT

A fan is crucial for maintaining airflow in industries. Bearings in fans prevent friction and must be robust to function effectively. Damage to the bearings can diminish the machine's performance. Predictive maintenance is essential for early detection of faults. One way to analyze bearing faults is by using the *Short Time Fourier Transform* (STFT), as it excels at analyzing non-stationary signals. Experiments were conducted under normal conditions and with inner race faults in bearings at a shaft speed of 1162.5 Hz. Vibration detection was done using an accelerometer sensor, and Matlab analysis was employed. The data was processed using the *Fourier Transform* (FT) method through both time and frequency domains, as well as the STFT through spectrograms. In the spectrum plot, there is still a significant amount of noise present. This high amplitude of noise from other frequencies obscures the bearing fault amplitudes. Furthermore, the *Fourier Transform* (FT) is only suitable for analyzing stationary signals. To address this, an envelope analysis was used to filter out the noise. The STFT analysis method provides simultaneous frequency and time information. This reveals that the spectrogram results for inner race faults depict three high-amplitude peaks at harmonic frequencies. This indicates that the signal is non-stationary due to fluctuating amplitudes, making bearing fault analysis more accessible.

1. PENDAHULUAN

Salah satu mesin yang banyak digunakan di industri adalah kipas angin, karena berfungsi dalam menjaga aliran udara di suatu tempat. Bantalan merupakan salah satu komponen penting dari kipas angin, sebab agar tidak adanya terjadi gesekan berlebihan pada poros maka perlu adanya komponen tersebut. Bantalan harus memiliki kekuatan yang cukup, karena membuat komponen mesin lainnya bekerja dengan baik. Jika terjadi kerusakan pada bantalan dapat menyebabkan kemampuan mesin berkurang seluruhnya

[1], [2].

Untuk mencegah terjadinya kegagalan tersebut diperlukan perawatan *prediktif* untuk menganalisis kondisi sistem dan kemungkinan kesalahan dapat dideteksi pada tahap awal [3], [4]. Ini biasanya berupa akuisisi sinyal, analisis sinyal, dan pengambilan keputusan. Sumber sinyal yang umum adalah getaran, suhu, tekanan, radiasi suara, atau arus listrik [5].

Analisis sinyal getaran merupakan salah satu cara yang digunakan untuk memantau dan memperkirakan kerusakan yang terjadi di komponen mesin [6], [7]. Mesin dan komponen yang rusak menghasilkan sinyal tertentu [8]. Sinyal getaran yang dihasilkan bantalan cacat akan menghasilkan sinyal yang berbeda dengan sinyal yang dihasilkan dari bantalan normal, seperti sinyal yang dihasilkan bantalan cacat akan memiliki frekuensi unik atau frekuensi yang besarnya tergantung pada kecepatan poros dan geometri bantalan.

Sebuah penelitian dilakukan untuk mendeteksi cacat pada lintasan dalam bantalan menggunakan metode *Fast Fourier Transform* (FFT). Hasil penelitian tersebut mengindikasikan bahwa analisis FFT memiliki kemampuan untuk mengidentifikasi retakan pada tahap awal terjadinya keretakan, yang sulit terdeteksi melalui inspeksi visual. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk meningkatkan efektivitas dan efisiensi dalam mendiagnosis kerusakan bantalan pada motor induksi [9].

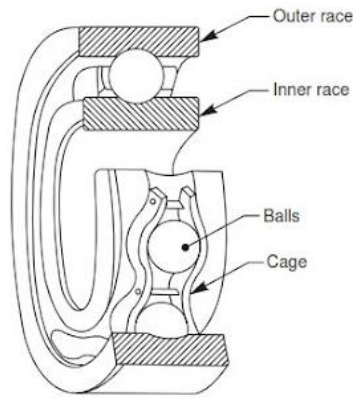
Penelitian yang dilakukan Kamiel dkk [10] menerapkan teknik envelope spectrum membuktikan bahwa meskipun cacat frekuensi memiliki amplitudo yang jelas terlihat dalam spektrum, namun seringkali terdapat amplitudo *noise* dan amplitudo dari sumber lain yang berpotensi mengaburkan amplitudo cacat frekuensi tersebut. Teknik envelope spectrum berhasil mengatasi masalah tersebut dengan menggunakan *high-pass* filter untuk mereduksi amplitudo selain yang berasal dari cacat bantalan. Terutama pada tahap awal (cacat kecil).

Penelitian yang dilakukan Khodja dkk [11] mengenai diagnosis kesalahan bantalan dari motor menggunakan metode *Short Time Fourier Transform* (STFT) memberikan informasi tambahan tentang perubahan frekuensi dari waktu ke waktu untuk analisis sinyal arus *stator*. Selain itu, pendekatan ini juga memungkinkan untuk memantau tanda kesalahan mengikuti perubahan kecepatan motor. Dibandingkan mendeteksi dengan menggunakan *Fourier Transform* yang memiliki kesederhanaan dan waktu komputasi yang rendah dan tidak disarankan untuk memproses sinyal *nonstationer*

Dari penelitian tersebut menunjukkan berbagai metode yang efektif dalam mendeteksi dini dan mendiagnosis kerusakan pada bantalan mesin berputar. Penggunaan metode FFT mendeteksi cacat pada tahap awal dan dilanjutkan penggunaan metode envelope untuk melihat amplitudo yang lebih jelas dan mengurangi *noise* dalam spektrum akan tetapi masih belum memberikan informasi frekuensi dan waktu secara bersamaan sehingga mempermudah analisis cacat bantalan.

2. METODE

Cacat pada bantalan merupakan hal yang sering terjadi dalam dunia pemesinan. Beberapa faktor yang menyebabkan kerusakan pada bantalan adalah pecahnya komponen, keausan, instalasi yang tidak tepat, kecacatan selama produksi, dan ukuran bola yang berbeda. Getaran alami disebabkan oleh gaya kontak yang bekerja pada kerusakan. Dalam bantalan, gaya kontak memiliki nilai yang sama pada setiap bola dan posisi bola. Namun, jika bantalan bola mengalami kerusakan, nilai gaya kontak akan tidak seragam dan menyebabkan getaran yang tidak teratur. Para peneliti telah mengelompokkan jenis kerusakan pada bantalan bola dengan menggunakan definisi berdasarkan rumus-rumus getaran. Ini membantu membuat elemen mesin bisa terperinci. Gambar 1 merupakan letak dari cacat bantalan.



Gambar 1. Letak dari cacat bantalan

Cacat lokal pada lintasan dalam

Frekuensi ekstensi impuls yang timbul karena keberadaan kecacatan lokal pada lintasan dalam atau sebagai *Ball Pass Frequency Inner Race* (BPFI) dalam bentuk persamaan 1 berikut:

$$\text{BPFI} = \frac{Nb}{2} \times fr \times \left(1 + \frac{Bd}{Pd} \times \cos \alpha\right) \quad (1)$$

Cacat lokal pada lintasan luar

Frekuensi eksitasi impuls yang timbul karena keberadaan kecacatan local pada lintasan luar atau sebagai *Ball Pass Frequency Outer Race* (BPFO), dapat dibuat dalam bentuk persamaan 2 berikut

$$\text{BPFO} = \frac{Nb}{2} \times fr \times \left(1 - \frac{Bd}{Pd} \times \cos \alpha\right) \quad (2)$$

Cacat local yang terjadi pada bagian bola

Istilah yang digunakan untuk menggambarkan frekuensi impuls adalah *Ball Spin Frequency* (BSF). Nilainya dapat dibuat menggunakan persamaan 3 dibawah

$$\text{BSF} = \frac{Nb}{2Bd} \times fr \times \left(1 - \frac{Bd}{Pd} \times \cos \alpha\right)^2 \quad (3)$$

Cacat lokal pada pemisah (*Cage*)

Jumlah getaran yang disebabkan oleh keberadaan kecacatan pemisah (*cage*) dikenal sebagai *Fundamental Train Frequency* (FTF). FTF dibuat menggunakan persamaan 4 berikut:

$$\text{FTF} = \frac{Fr}{2} \times \left(1 - \frac{Bd}{Pd} \times \cos \alpha\right) \quad (4)$$

dimana:

- Nb = Jumlah Bola (*number of balls*).
- Fr = Frekuensi putaran poros (Hz).
- Bd = Diameter bola (*ball diameter*) mm.
- Pd = Diameter pitch (*pitch diameter*) mm.
- α = Sudut kontak (*contact angle*) derajat.

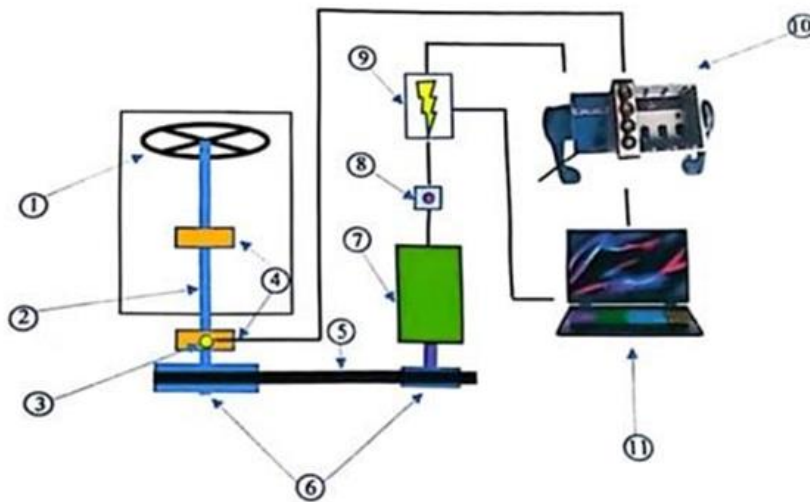
Penelitian ini menggunakan *fan* industri sebagai alat uji untuk mendeteksi cacat pada bantalan lintasan dalam. Proses deteksi cacat dilakukan dengan menganalisis data menggunakan metode *Short Time Fourier Transform* dalam dua kondisi yang berbeda. Kondisi pertama adalah bantalan normal, dan kondisi kedua adalah bantalan dengan cacat lintasan dalam. Untuk menciptakan cacat pada bantalan, peneliti merusak bagian lintasan dalam menggunakan mesin *Electric Discharge Machine*. Pengujian dilakukan pada

kecepatan poros sebesar 1162.5 rpm untuk bantalan dengan cacat lintasan dalam. Dalam pengambilan data respon getaran, peneliti menggunakan sensor accelerometer yang ditempelkan pada rumah bantalan yang akan diuji. Data respon getaran dari sensor accelerometer direkam oleh modul data akuisisi yang terpasang pada *chassis*, kemudian disimpan dan ditampilkan menggunakan *software* Matlab di laptop. Sinyal getaran dari bantalan normal dan bantalan cacat lintasan dalam dianalisis dengan menggunakan *software* Matlab untuk melihat perbedaan karakteristiknya



Gambar 2. a) Bantalan Normal, (b) Bantalan Cacat Lintasan Dalam

Skema alat uji penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Skema Uji

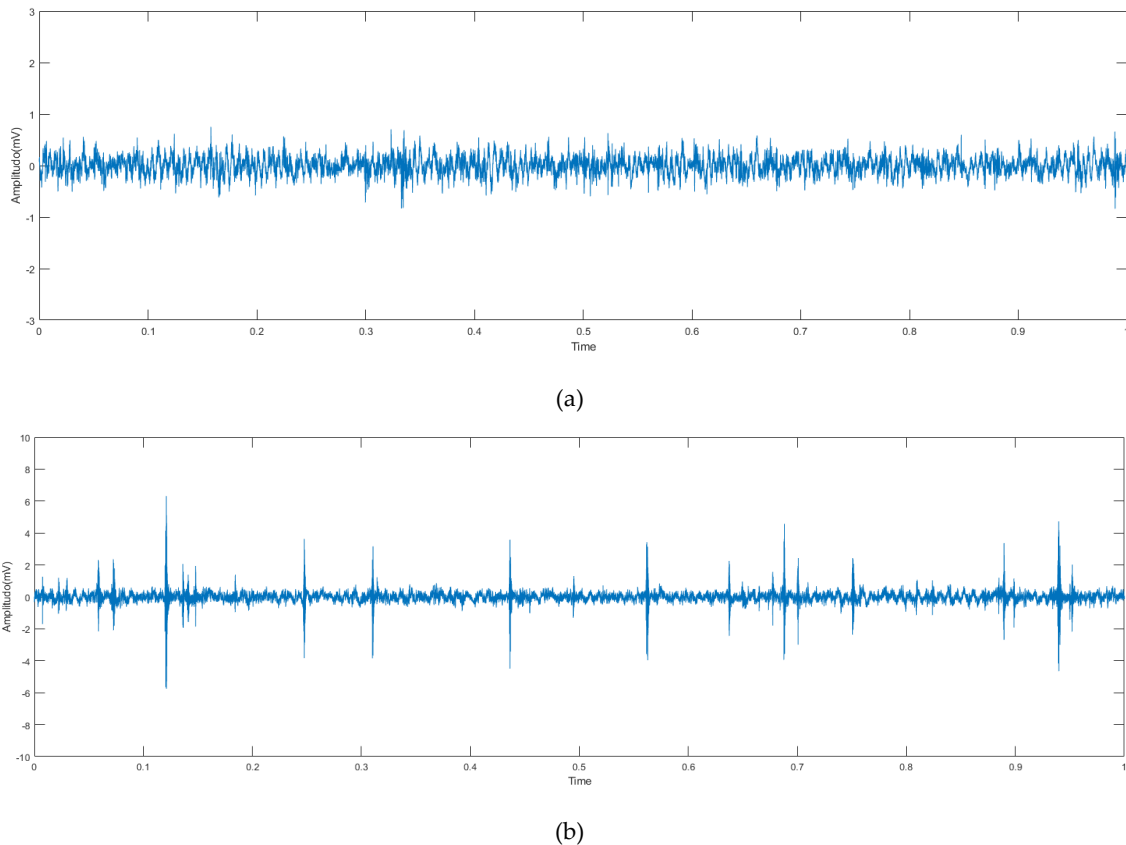
Transformasi Fourier dikenal sebagai metode transformasi sinyal dari domain waktu ke domain frekuensi. Variasi atau transformasi ini dilakukan untuk menjaga informasi yang terkandung dalam sinyal ketika informasi domain waktu tidak cukup representatif. Pada dasarnya, sinyal selalu berada dalam domain waktu, karena sinyal mengalami diferensiasi atau perubahan komponen amplitudo maupun fase. Akan tetapi memiliki keterbatasan, misalnya hanya dapat menganalisis sinyal statis jika terdapat banyak sinyal *non* statis, yang kedua transformasi ini hanya memberikan informasi berupa kandungan frekuensi yang terdapat pada keseluruhan sinyal, tetapi tidak dapat menunjukkan waktu kejadian. Untuk mengatasi masalah tersebut, digunakan metode STFT yang mendeteksi cacat pada bantalan dengan memberikan informasi waktu terjadinya frekuensi tersebut.

STFT adalah metode analisis sinyal yang digunakan untuk menganalisis bagaimana amplitudo dan frekuensi sinyal bervariasi seiring waktu. Prinsip dasar STFT ialah dengan cara mengambil sinyal ke dalam beberapa segment waktu yang lebih pendek dan menerapkan *Fourier Transform* pada setiap segment sehingga diperoleh spektrum frekuensi. Jika kita menerapkan *Fourier Transform* (FT) pada suatu sinyal, kita

hanya akan memperoleh informasi frekuensi yang cukup akurat namun tanpa informasi waktu dari suatu sinyal dan hal yang sama berlaku sebaliknya.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Domain waktu adalah metode yang menampilkan karakteristik getaran berdasarkan kronis kejadian yang adalah data yang belum diolah dan berisi noise yang diperoleh dari hasil data getaran yang diambil dengan sensor akselerometer yang mengganggu proses penangkapan sinyal. Gambar 4(a) menampilkan domain waktu dari bantalan normal; Gambar 4(b) menunjukkan domain waktu bantalan cacat lintasan dalam.



Gambar 4. (a) Domain Waktu Bantalan Normal, (b) Domain Waktu Bantalan Cacat Lintasan Dalam

Ketika level getaran meningkat, amplitudo domain waktu meningkat, dapat dilihat dari perbandingan bantalan normal dan cacat lintasan dalam yaitu perbedaan antara dua sinyal getaran adalah amplitudo. Domain waktu bisa menunjukkan bahwa cacat bantalan ada, tetapi tidak bisa menunjukkan lokasi cacat yang tepat di bantalan, dan banyak menimbulkan amplitudo yang bisa disebabkan oleh noise atau impact yang mengganggu proses pengambilan sinyal [12]. Hasil ini juga sesuai dengan yang diperoleh Poddar [13], yaitu cacat dapat menghasilkan sinyal getaran amplitudo tinggi di sekitar frekuensi BPFO atau BPFI.

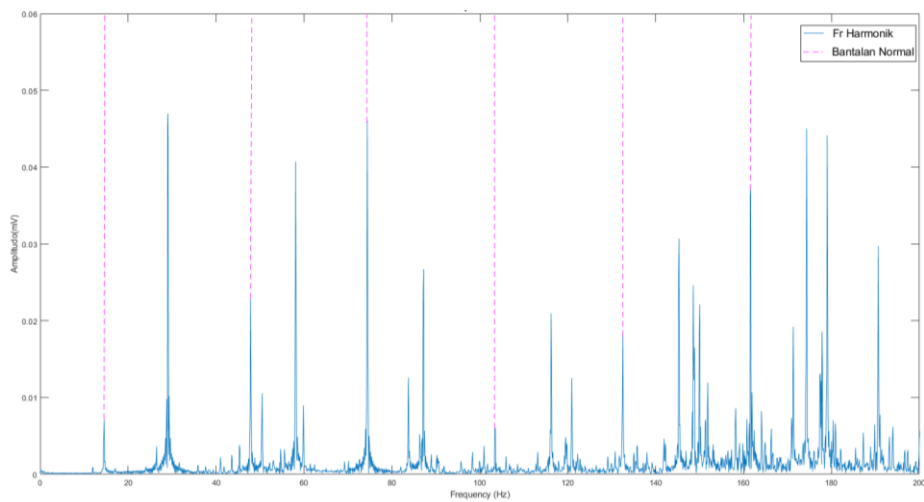
Untuk mengidentifikasi apakah sinyal tersebut, adalah sinyal dari bantalan cacat atau tidak, sulit dianalisa dari domain waktu. Dari pola amplitudo sesaat terlihat bahwa Gambar 4(b) merupakan sinyal dari bantalan cacat dikarenakan memiliki amplitudo yang besar, hal ini sesuai dengan yang diperoleh Aji [14] apabila bantalan mengalami cacat pada lintasannya maka akan terjadi gesekan antar permukaan lintasan dengan bola ataupun pemisah (*cage*) saat berputar, dan pada Gambar 4(a) merupakan sinyal kondisi bantalan normal dikarenakan memiliki amplitudo yang lebih kecil dibandingkan yang lainnya

Analisa dalam domain waktu sulit dilakukan karena peningkatan amplitudo bisa memiliki banyak

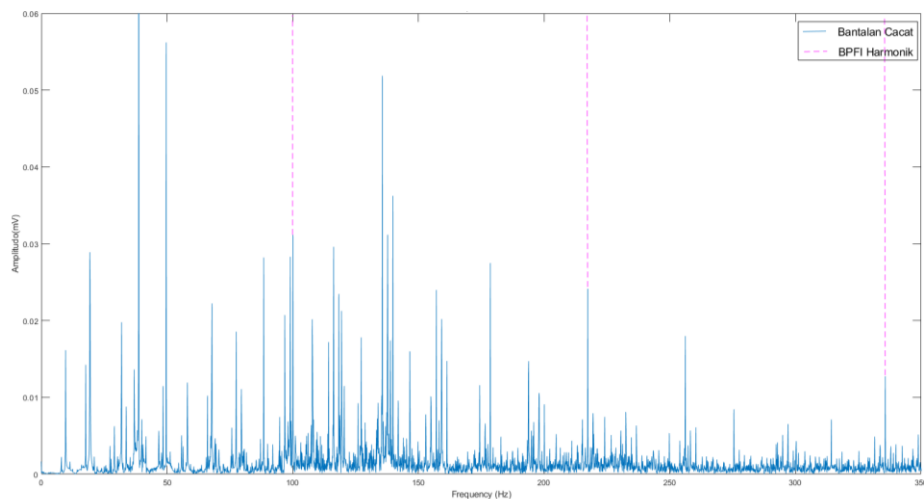
penyebab bukan oleh cacat bantalan. Proses analisis dalam domain waktu memerlukan analisis cukup panjang dengan melibatkan turunan dari fungsi yang bisa menimbulkan ke tidak telitian hasil analisis dan juga sinyal dalam domain waktu tidak bisa mengidentifikasi cacat elemen mesin, karena ada beberapa data yang saling berhimpitan. Namun data yang diperoleh sangat berguna sebagai dasar untuk proses analisis selanjutnya, dengan cara pengolahan data dilakukan dengan mengkonversi data domain waktu dengan menggunakan metode *fourier transform* (FT) dan mengubah domain waktu menjadi domain frekuensi dengan cepat sehingga menampilkan banyak komponen frekuensi dalam sinyal.

Domain Frekuensi

Gambar 5(a) dan 5(b) berturut-turut merupakan domain frekuensi bantalan kondisi normal dan cacat yang mengandung frekuensi poros serta harmonik BPFI untuk cacat lintasan dalam. Harmonik merupakan nilai frekuensi yang berkelipatan sehingga menunjukkan adanya kerusakan. Keberadaan harmonik menunjukkan seberapa parah kerusakan yang terjadi pada bantalan, jika semakin tinggi nilai harmonik menunjukkan bahwa kerusakan tersebut semakin parah. Spektrum memberikan informasi besaran frekuensi dan amplitudo yang dihasilkan getaran dari bantalan.



(a)



(b)

Gambar 5. (a)Domain Frekuensi Bantalan Normal,(b)Domain Frekuensi Bantalan cacat Lintasan Dalam

Spektrum bantalan normal bisa dijelaskan pada Gambar 5(a), yang memberikan informasi frekuensi yang diakibatkan putaran poros dan diikuti harmonikan itu memiliki amplitudo yang bervariasi karena kemampuan mesin. Selain itu, spektrum bantalan normal tidak menunjukkan adanya amplitudo tinggi di frekuensi BPFI yang membuktikan bahwa bantalan tersebut tidak dalam keadaan cacat.

Dari plot spektrum Gambar 5(b) dapat dilihat bahwa harmonik dari bantalan yang cacat dan amplitudo yang tinggi dihasilkan oleh bantalan yang cacat. Terjadi cacat pada bantalan karena frekuensi yang berhimpit atau mendekati BPFI, dan spektrum tidak bisa mengidentifikasi frekuensi sinyal karena FT hanya sesuai untuk analisis sinyal stasioner (tidak berubah), dan sinyal itu adalah sinyal yang amplitudonya berubah terhadap waktu atau dengan kata lain, memiliki sifat non stasioner. Pada Tabel 1 ditunjukkan besaran nilai dari frekuensi poros, frekuensi BPFI, dan harmonik yang ditemukan pada spektrum bantalan cacat

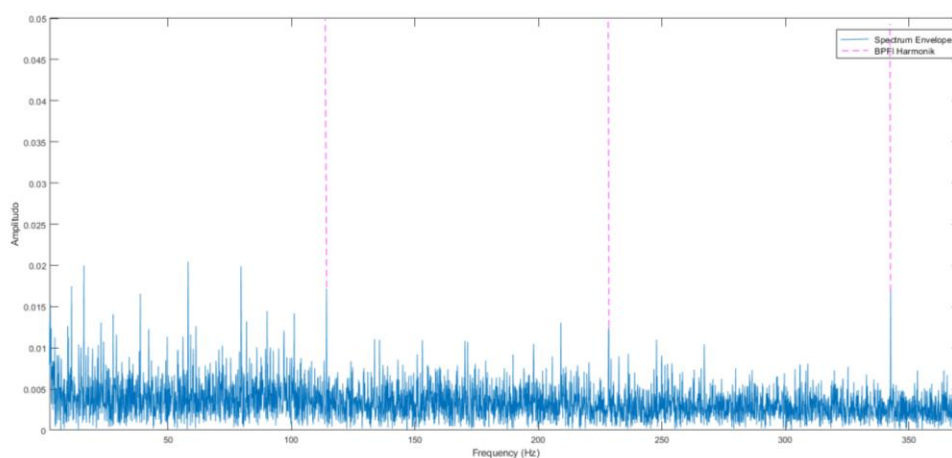
Tabel 1. Besaran *Ball Pass Frequency Inner Race* (BPFI)

| Keterangan | Frekuensi BPFI (Hz) | Amplitudo |
|------------|---------------------|-----------|
| Fr | 19.375 Hz | 0.027 |
| 1xBPFI | 114.40 Hz | 0.029 |
| 2xBPFI | 227.81 Hz | 0.024 |
| 3xBPFI | 343.22 Hz | 0.012 |

Deteksi cacat bantalan lintasan dalam dapat dilakukan dengan melihat amplitudo yang memiliki puncak tinggi berulang di frekuensi BPFI. Frekuensi yang berhasil dideteksi BPFI yaitu sebesar 114.4 Hz sebesar 0.029 diikuti dengan harmoniknya. Harmonik BPFI kurang terlihat Ketika amplitudo pertama berada dalam spektrum tertutup atau dikaburkan oleh amplitudo tinggi dari frekuensi komponen lain yang disebabkan oleh banyak faktor seperti getaran dari luar dan bukan dari getaran bantalan cacat seperti frekuensi kipas, motor listrik, atau pada kecepatan poros 1162.5 rpm menghasilkan getaran yang rendah sehingga amplitudo cacat kurang terbaca. Hal ini membuktikan bahwa pada metode spektrum kerusakan pada komponen bantalan tidak dapat terlihat disebabkan oleh frekuensi yang terlihat pada grafik spektrum adalah yang memiliki nilai amplitudo yang tinggi. Sehingga frekuensi kerusakan komponen bantalan yang umumnya memiliki amplitudo rendah tidak terlihat, akibat didominasi oleh kemunculan amplitudo tinggi.

Envelope Spektrum

Metode selanjutnya adalah menggunakan analisis envelope spektrum untuk mengurangi atau menghilangkan noise pada spektrum. Gambar 6 merupakan envelope bantalan cacat lintasan dalam.



Gambar 6. Spektrum Envelope cacat Lintasan Dalam

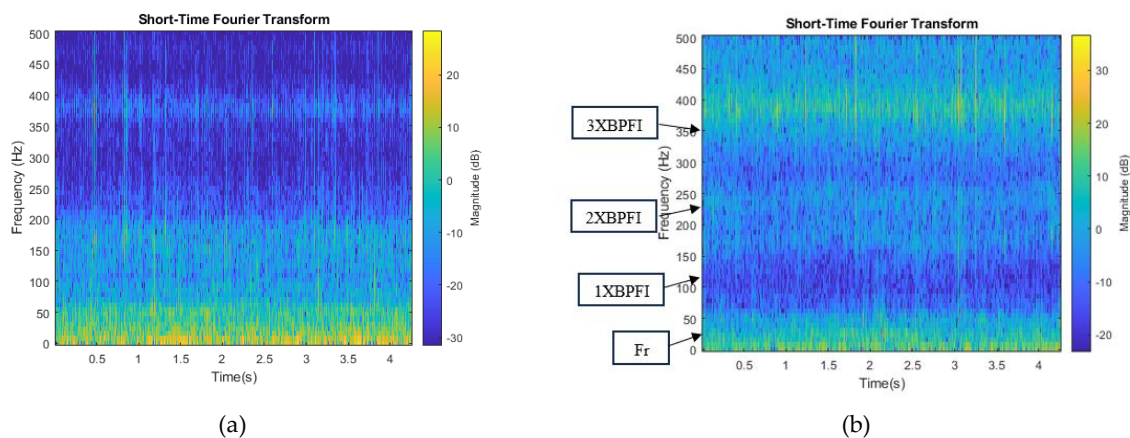
Spektrum envelope pada Gambar 6 menunjukkan bahwa dengan filter terhadap sinyal getaran, spektrum envelope dapat menampilkan frekuensi cacat bantalan yang sesuai harmonik dengan jelas dari cacat bantalan lintasan dalam. Perhitungan BPF_I menggunakan persamaan 2 adalah 114.4 Hz diikuti harmoniknya yang meliputi 2xBPF_I sampai dengan 3xBPF_I berturut-turut adalah 227.81 Hz dan 343.22 Hz. Sedangkan peak amplitudo pada spektrum envelope terlihat pada frekuensi-frekuensi 114.16 Hz, 228.41 Hz, dan 342.57 Hz. Dapat dilihat bahwa frekuensi-frekuensi pada spektrum envelope tersebut tepat berhimpit dengan frekuensi-frekuensi hasil perhitungan BPF_I dan harmoniknya.

Ditemukan bahwa pada bantalan cacat lintasan dalam nilai 1xBPF_I sampai 3xBPF_I memiliki puncak yang hampir sama tingginya, hal ini terbukti dengan melakukan filter maka noise dapat dikurangi sehingga mempermudah membaca kerusakan dari bantalan cacat.

Dengan melihat hasil analisis dari masing-masing metode, maka ketiga metode tersebut saling berkaitan satu dengan yang lainnya. Dimulai dengan metode domain waktu yang mengidentifikasi kerusakan secara umum, hingga metode spektrum dan envelope yang mengidentifikasi letak kerusakan bantalan lebih spesifik. Deteksi cacat bantalan menggunakan spektrum envelope menunjukkan hasil yang lebih akurat daripada yang diperoleh dengan menggunakan spektrum frekuensi. Hal ini ditunjukkan dengan memperlihatkan amplitudo yang lebih jelas sehingga deteksi cacat bantalan lebih mudah dilakukan.

Short-Time Fourier Transform

Gambar 7(a) dan 7(b) merupakan masing-masing spektrogram bantalan normal dan cacat lintasan dalam. Spektrogram memberikan informasi waktu dan frekuensi secara bersamaan, selain itu dapat menunjukkan tinggi rendahnya magnitude



Gambar 7. (a) Spektrogram Bantalan Normal, (b) Spektrogram Bantalan Cacat Lintasan Dalam

Untuk *Short Time Fourier Transform*, pemilihan fungsi jendela sangat penting guna mendapatkan hasil yang optimal. *Window* yang digunakan pada spektrogram ialah jenis *window* hamming, pada spektrogram dilihat bahwa *window* hamming menunjukkan sinyal dalam keadaan stasioner dan juga digunakan *window* hamming karena memiliki ukuran yang lebih pendek dari jenis *window* lainnya. Ukuran *window* yang dipilih adalah 128, dan penentuan nilai tersebut telah disesuaikan dengan range frekuensi dan waktu yang relevan dalam penelitian ini. Jika ukuran *window* diperbesar, hal ini akan berdampak pada perubahan *range* frekuensi dan waktu yang digunakan

STFT dapat mendeteksi adanya kerusakan dalam kondisi normal dan cacat, dimana ada perbedaan puncak magnitudo bantalan cacat melebihi bantalan normal yang diidentifikasi oleh spektrogram. Pada Gambar 7(a) dan Gambar 7(b) menunjukkan sinyal hasil pengolahan STFT dimana sinyal ini adalah perpaduan antara amplitudo, waktu, dan frekuensi. Kekuatan sinyal atau magnitudo direpresentasikan menggunakan skala warna, di mana warna kuning mengindikasikan amplitudo tertinggi, dan warna biru menunjukkan amplitudo terendah. Semakin tinggi nilai ketiganya maka akan menghasilkan warna dari hijau sampai ke kuning, sedangkan semakin rendah nilai keduanya maka warnanya dominan biru.

Ini membuat spektrogram memberikan informasi tentang frekuensi dan waktu secara bersama, membuat analisis cacat bantalan mudah lebih baik dalam metode spektrum yang tidak memberikan informasi tentang frekuensi dan tidak diketahui waktu terjadinya frekuensinya. Kecacatan pada bantalan akan memberikan sinyal eksitasi impak (transient), artinya terjadi adanya fluktuasi amplitudo, karena itu sinyal tersebut bisa dianggap sebagai sinyal *non-stasioner*. Untuk mendapatkan informasi mengenai kandungan frekuensi dalam domain waktu tertentu digunakan metode STFT yang pada prinsipnya membagi sinyal ke dalam segment *window* yang cukup kecil dan melakukan transformasi fourier untuk setiap *window*-nya. Hal tersebut sesuai dengan yang dilakukan Suprpto [15] yang menjelaskan *Short-time Fourier Transform* (STFT) digunakan untuk menganalisis sinyal *non-stasioner* yang dapat mendeteksi perbedaan kondisi bantalan normal ataupun cacat dengan beban dan kecepatan yang berbeda.

Gambar 7(a) dan 7(b) menunjukkan analisis secara visual pada bantalan normal dan cacat menggunakan metode STFT, terlihat secara visual bentuk grafik kontur yang dihasilkan oleh STFT identik dengan gelombang frekuensi. Secara visual dapat ditentukan jenis gangguan yang terjadi hanya dengan melihat grafik STFT. Spektrogram STFT pada gambar 7(a) bantalan normal memiliki pola yang cukup beraturan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5(a) dan memiliki amplitudo yang sangat kecil sehingga gradasi warnanya teratur dari hijau menuju kebiru sedangkan pada bantalan cacat lintasan dalam dimana memiliki gradasi warnanya tidak teratur terutama disekitar nilai BPFI memiliki amplitudo yang cukup besar yang ditunjukkan oleh dominasi hijau. Pada gambar 7(b), menunjukkan frekuensi poros sebesar 19.375 dengan magnitudo sebesar 15dB dan diikuti harmoniknya dengan rentang 0-10dB.

Hasil dari algoritma Short-Time Fourier Transform (STFT) untuk sinyal getaran bantalan cacat dapat dilihat dalam bentuk spektrogram, di mana parameter frekuensi getaran diplot terhadap waktu. Spektrogram merupakan representasi visual dua dimensi yang memperlihatkan hubungan antara frekuensi dan waktu dalam bentuk sinyal. Pada Gambar 7(b), hasil spektrogram menunjukkan adanya tiga puncak amplitudo yang tinggi pada frekuensi harmonik tertentu. Temuan karakteristik spektrogram ini sesuai dengan data yang dihasilkan oleh spektrum Fourier Transform (FT). Dalam gambar tersebut, dapat dilihat densitas warna yang dominan terletak pada tiga frekuensi, yaitu 1X, 2X, dan 3X. Namun, karena pada data sinyal getaran terdapat banyak noise, beberapa amplitudo juga dapat ditemukan pada spektrogram di luar area frekuensi dominan. Meskipun demikian, baik spektrum maupun spektrogram menunjukkan bahwa frekuensi dominan terdapat pada 1X, 2X, dan 3X, hal ini menguatkan hasil seperti yang diperoleh Romahadi [16] STFT memberikan informasi rinci tentang adanya gangguan pada bantalan.

4. Kesimpulan

Dari analisis data dan pembahasan, dapat disimpulkan bahwa deteksi cacat bantalan lintasan dengan metode cacat buatan berhasil diterapkan pada sinyal getaran bantalan fan industri yang awalnya berbentuk domain waktu menjadi spektrum dan spektrogram. Pada spektrum FT memiliki keterbatasan dalam menampilkan informasi waktu-frekuensi secara bersamaan, dan juga FT hanya cocok untuk melakukan analisa sinyal yang bersifat stasioner. Di sisi lain spektrogram memberikan informasi frekuensi dan waktu sekaligus serta dapat menunjukkan bahwa sinyal berada dalam keadaan *non-stasioner* karena terdapat amplitudo yang berfluktuasi. Hasil ini menunjukkan bahwa metode STFT lebih optimal digunakan untuk deteksi cacat lintasan dalam

Spektrogram cacat lintasan dalam menunjukkan 3 puncak amplitudo tinggi pada frekuensi harmonik. Karakteristik spektrogram ini sesuai dengan data yang dihasilkan oleh spektrum FT dengan densitas warna yang dominan pada frekuensi 1X, 2X, dan 3X. Spektrogram yang digunakan menggunakan *window* Hamming yang lebih pendek dari *window* lainnya dan telah disesuaikan dengan *range* frekuensi dan waktu yang relevan dalam penelitian.

Daftar Pustaka

- [1] Ł. Breńkacz, Ł. Witanowski, M. Drośnińska-Komor, and N. Szewczuk-Krypa, "Research and applications of active bearings: A state-of-the-art review," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 151, p. 107423, 2021.

-
- [2] A. Dhanola and H. C. Garg, "Tribological challenges and advancements in wind turbine bearings: A review," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 118, p. 104885, 2020.
- [3] J. Dalzochio et al., "Machine learning and reasoning for predictive maintenance in Industry 4.0: Current status and challenges," *Comput. Ind.*, vol. 123, p. 103298, 2020.
- [4] C. Scheffer and P. Girdhar, *Practical machinery vibration analysis and predictive maintenance*. Elsevier, 2004.
- [5] Y. E. Lee, B. K. Kim, J. H. Bae, and K. C. Kim, "Misalignment Detection of a Rotating Machine Shaft Using a Support Vector Machine Learning Algorithm," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, vol. 22, no. 3, pp. 409–416, 2021, doi: 10.1007/s12541-020-00462-1.
- [6] A. Aherwar, "An investigation on gearbox fault detection using vibration analysis techniques: A review," *Aust. J. Mech. Eng.*, vol. 10, no. 2, pp. 169–183, 2012.
- [7] D. Goyal and B. S. Pabla, "The vibration monitoring methods and signal processing techniques for structural health monitoring: a review," *Arch. Comput. Methods Eng.*, vol. 23, pp. 585–594, 2016.
- [8] M. Rusli, A. Arisman, L. Son, and M. Bur, "Kaji Banding Prediksi Kerusakan Pada Bantalan Gelinding Melalui Sinyal Getaran Dan Sinyal Suara," no. Snttm Xiv, pp. 7–8, 2015.
- [9] G. Singh, R. Kumar, M. Singh, and J. Singh, "Detection of crack initiation in the ball bearing using FFT analysis," *Int. J. Mech. Eng. Technol.*, vol. 8, no. 7, pp. 1376–1382, 2017.
- [10] B. P. Kamiel, A. M. Nuh, and S. Sudarisman, "Pengembangan Metode Deteksi Cacat Bantalan Berbasis Analisis Envelope pada Prototipe Fan Industri," *JMPM (Jurnal Mater. dan Proses Manufaktur)*, vol. 2, no. 1, pp. 27–34, 2018.
- [11] M. E. A. Khodja, A. F. Aimer, A. H. Boudinar, N. Benouzza, and A. Bendiabdellah, "Bearing Fault Diagnosis of a PWM Inverter Fed-Induction Motor Using an Improved Short Time Fourier Transform," *J. Electr. Eng. Technol.*, vol. 14, no. 3, pp. 1201–1210, 2019, doi: 10.1007/s42835-019-00096-y.
- [12] P. H. Jain and S. P. Bhosle, "Analysis of vibration signals caused by ball bearing defects using time-domain statistical indicators," *Int. J. Adv. Technol. Eng. Explor.*, vol. 9, no. 90, pp. 700–715, 2022, doi: 10.19101/IJATEE.2021.875416.
- [13] S. Poddar and M. L. Chandravanshi, "Ball Bearing Fault Detection Using Vibration Parameters," *Int. J. Eng. Res. Technol.*, vol. 2, no. 12, pp. 1239–1244, 2013, [Online]. Available: www.ijert.org
- [14] K. Aji, "Deteksi kerusakan bantalan gelinding pada pompa sentrifugal dengan analisa sinyal getaran," *Eprints UNS*, vol. 7, no. September, pp. 1–85, 2007.
- [15] E. Suprpto and F. E. Yandra, "Studi Analisis Spektrum Gelombang Petir Dengan," *J. Manaj. Pendidik. Dan Ilmu Sos.*, vol. 2, no. 2, pp. 889–897, 2021.
- [16] D. Romahadi and I. Maris, "Penerapan FFT dan STFT dalam Mendiagnosis Getaran ID Fan Berjenis Sambungan Kopel," *J. Tek. Mesin*, vol. 11, no. 3, 2022.