

Analisis Getaran *Displacement* Drum Roller Menggunakan Fast Fourier Transform dan Short Time Fourier Transform

Ilhamullah¹, Dedik Romahadi^{1*}, Rikko Putra Youlia¹

¹ Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Mercu Buana Jakarta
Jl. Meruya Selatan No. 1, Kembangan, Jakarta Barat 11650, Indonesia

*E-mail: dedik.romahadi@mercubuana.ac.id

Abstrak--Drum roller berperan penting dalam pengujian ketahanan ban mobil setelah proses produksi. Terjadi getaran yang berlebihan pada drum roller yang dapat mempengaruhi kualitas ban mobil. Getaran yang tinggi juga dapat merusak bagian-bagian penting mesin. Perlu adanya pencarian sumber masalah yang menyebabkan getaran drum roller tinggi. Maka dengan itu, penelitian ini bertujuan melakukan analisis sumber getaran tinggi pada drum roller untuk mengidentifikasi kerusakan menggunakan metode Fast Fourier Transform (FFT) dan Metode Short Time Fourier Transform (STFT). Pemrosesan sinyal dilakukan dari input hasil pengukuran getaran berupa data domain waktu menggunakan alat ukur getaran kemudian metode FFT dan STFT diterapkan menggunakan fungsi filter jendela Hanning di MATLAB. Selanjutnya memvalidasi hasil diagnosis kerusakan. Berdasarkan hasil pengukuran getaran didapatkan sumber getaran terbesar pada posisi radial yaitu getaran yang dihasilkan sebesar 97 μm RMS. Dari grafik spektrum dan spektrogram STFT di semua titik pengukuran menyimpulkan adanya indikasi unbalance. Pola di setiap grafik memperlihatkan amplitudo tinggi di frekuensi 6.7 Hz atau satu kalinya frekuensi drum roller. Berdasarkan standar nilai getaran ISO 10816-3 displacement, getaran drum roller masuk pada Zona C, bermakna mesin hanya diizinkan beroperasi dalam waktu singkat. Hasil analisis bahwa drum roller mengalami unbalance terbukti benar dengan turunnya nilai getaran menjadi 18 μm RMS.

Kata kunci: Analisis Getaran, FFT, STFT, Drum roller

Abstract-- Drum rollers play an important role in testing the durability of car tires after the production process. Excessive vibration occurs on the drum roller which can affect the quality of car tires. High vibrations can also damage important engine parts. It is necessary to find the source of the problem that causes high drum roller vibration. Therefore, this study aims to analyze the source of high vibrations on the drum roller to identify damage using the Fast Fourier Transform (FFT) and Short Time Fourier Transform (STFT) methods. Signal processing is carried out from the input of the vibration measurement results in the form of time domain data using a vibration measuring instrument then the FFT and STFT methods are applied using the Hanning window filter function in MATLAB. Then validate the results of the fault diagnosis. Based on the results of vibration measurements, the largest vibration source was found in the radial position, namely the vibration generated by 97 m RMS. From the spectrum graph and STFT spectrogram at all measurement points, it can be concluded that there is an indication of unbalance. The pattern in each chart shows a high amplitude at 6.7 Hz or one drum roller frequency. Based on the standard ISO 10816-3 displacement vibration value, the drum roller vibration enters Zone C, meaning the machine is only allowed to operate for a short time. The results of the analysis that the drum roller experienced unbalance proved correct with a decrease in the vibration value to 18 m RMS.

Keywords: Vibration analysis, FFT, STFT, drum roller

1. PENDAHULUAN

Pada proses produksi ban mobil diperlukan sebuah mesin yang disebut drum roller seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2, yakni untuk mengetahui ketahanan ban yang sudah diproduksi. Kesalahan getaran frekuensi juga merupakan salah satu kesalahan paling umum dalam pengoperasian peralatan berputar, dan realisasi diagnosis waktu nyata dari kesalahan getaran frekuensi umum sangat penting untuk

memantau kesehatan dan menerapkan penurunan getaran peralatan berputar [1], [2].

Getaran yang disebabkan oleh ketidakseimbangan dapat merusak bagian-bagian penting mesin seperti bantalan, segel, roda gigi dan kopling. Dalam praktiknya, karena toleransi manufaktur, rotor tidak dapat diseimbangkan dengan sempurna. akibat ketidakseimbangan massa [3].

Gaya sentrifugal dihasilkan dan harus diserap oleh bantalan dan struktur pendukung.

Penurunan karakteristik frekuensi akibat kegagalan bagian-bagian mesin dapat diekstraksi dengan menggunakan teknik pemantauan kondisi seperti analisis getaran dan analisis emisi akustik. Sinyal yang diekstraksi ditampilkan dalam bentuk gelombang domain waktu yang sering kali tidak memberikan informasi diagnostik yang berguna tentang kesalahan yang terjadi pada komponen mesin. Oleh karena itu, sinyal-sinyal ini harus dianalisis dalam domain frekuensi menggunakan teknik pemrosesan sinyal yaitu FFT, STFT, CWT, dll [4]–[6].

Fast Fourier Transform (FFT) adalah metode untuk menghitung transformasi Fourier hingga dari satu set N (kompleks) titik data dengan $N \log_2 N$ operasi [7], [8]. Keuntungan utama dari FFT adalah kecepatan yang dicapai dengan mengurangi jumlah perhitungan yang diperlukan untuk menganalisis bentuk gelombang. Kekurangan yang terkait dengan FFT adalah terbatasnya jangkauan data bentuk gelombang yang dapat diubah dan kebutuhan untuk menerapkan fungsi pembobotan jendela didefinisikan ke bentuk gelombang untuk mengkompensasi kebocoran spektrum juga ditentukan [9].

Dan juga melakukan proses pengolahan data menggunakan STFT sehingga dapat melihat domain frekuensi dalam jangkauan yang lebih luas. Dalam praktiknya, prosedur untuk menghitung STFT adalah dengan membagi sinyal waktu yang lebih panjang menjadi segmen-segmen yang lebih pendek dengan panjang yang sama, dan kemudian menghitung transformasi *fourier* secara terpisah pada setiap segmen yang pendek. Sebuah spektrogram yang berubah dari waktu ke waktu, yang disebut spektrum, kemudian sering digambarkan. dapat didefinisikan juga sebagai subjek analisis spektrum menggunakan FFT, urutan sinyal pendek diperlakukan sebagai kuasi-stasioner [10].

Penelitian terdahulu yang dilakukan oleh Jianjun Feng et al [11] membahas tentang relasi sinyal getaran dengan keadaan kavitasi turbin Kaplan. Berikutnya dilakukan oleh (Dutta et al., 2018) penelitiannya dapat menemukan letak kerusakannya saja tetapi tidak dilengkapi dengan keadaan kondisi mesin yang bermasalah sesuai analisis spektrum pada standar analisis getaran *displacement* (ISO 10816-3) [12]. Selanjutnya hasil penelitian tidak dilengkapi dengan hasil dari titik poin pengukuran getaran yang berbeda sehingga dapat dijadikan perbandingan [13]. Dan juga dilakukan penelitian oleh [14] yaitu tidak dilakukannya proses pengukuran getaran kembali setelah proses

perbaikan dilakukan dengan penggunaan STFT [14].

Maka diperlukan dilakukannya pengolahan data untuk menganalisis dalam rentang frekuensi rendah dan menengah pengukuran getaran stasioner dan non stasioner yang berasal dari mesin yang berputar dengan metode FFT dan STFT. Pada penelitian ini saya, melakukan proses pengolahan data dengan metode FFT dan STFT pada frekuensi yang dihasilkan oleh drum roller dengan standar analisis getaran *displacement* (ISO 10816-3). Dapat diharapkan, nantinya dapat mengetahui informasi dari hasil getaran pada drum roller sehingga mengetahui letak kerusakannya dan jenis kerusakan yang bermasalah. Lalu, diperlukannya juga proses pengukuran getaran kembali terkait setelah proses perbaikan pada unit yang bermasalah sehingga dapat mengetahui nilai getarannya semakin menurun atau tidak dengan itu dapat meningkatkan kinerja dan memperpanjang umur komponen drum roller.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Metodologi

Fast Fourier Transform

Transformasi Fourier Diskret didefinisikan oleh rumus:

$$F = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} [X] \cdot e^{-j2\pi(n-1)k} \quad (1)$$

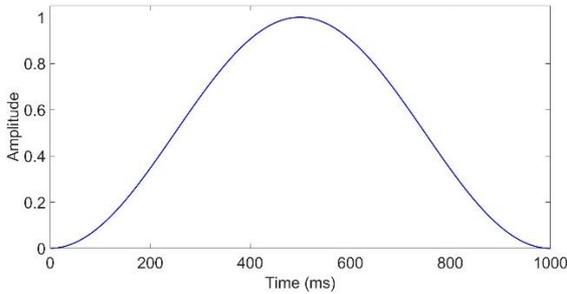
Di mana N adalah jumlah sampel waktu, X adalah sinyal dalam bentuk domain waktu, n adalah deret sampel waktu dan k adalah hasil pembagian setiap sampel waktu dengan jumlah sampel waktu. Menghitung deret ini secara langsung memerlukan operasi aritmetika sebanyak $O(N^2)$. Sebuah algoritme FFT hanya memerlukan operasi sebanyak $O(N \log N)$ untuk menghitung deret yang sama. Secara umum algoritme tersebut tergantung pada pemfaktoran N [15].

Hanning window

$$w(n) = 0.5 \left(1 - \cos \left(2\pi \frac{n}{N} \right) \right), \quad 0 \leq n \leq N \quad (2)$$

Panjang *window* adalah $L=N+1$ [16].

Bentuk Hanning *window* yang digunakan pada pada penelitian ini seperti ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Hanning window

Panjang *window* adalah $L=N+1$ Untuk menyelidiki segmen fungsi yang lebih panjang, untuk meratakan spektrum frekuensi dari waktu ke waktu.

Short Time Fourier Transform

STFT digunakan untuk menganalisis bagaimana konten frekuensi sinyal non stasioner berubah dari waktu ke waktu. STFT sinyal dihitung dengan menggeser jendela analisis dengan panjang M di atas sinyal dan menghitung transformasi Fourier diskrit dari data berjendela. Jendela melompati sinyal asli pada interval sampel R . Sebagian besar fungsi jendela meruncing di tepinya untuk menghindari dering spektrum. Jika panjang (L) tumpang tindih bukan nol ditentukan, penambahan tumpang tindih segmen berjendela mengkompensasi redaman sinyal di tepi jendela. DFT dari setiap segmen berjendela ditambahkan ke matriks yang berisi magnitudo dan fase untuk setiap titik waktu dan frekuensi. Jumlah kolom dalam matriks STFT diberikan oleh:

$$k = \left\lfloor \frac{N_x - L}{M - L} \right\rfloor \tag{3}$$

Di mana N_x adalah panjang sinyal asli $x(n)$ dan simbol dalam kurungnya menunjukkan fungsi floor. Jumlah baris dalam matriks sama dengan N_{DFT} , jumlah titik DFT, untuk transformasi pusat dan dua sisi dan $\lfloor N_{DFT}/2 \rfloor + 1$ untuk transformasi satu sisi. Matriks STFT diberikan oleh persamaan

$$X(f) = [X_1(f) \ X_2(f) \ X_3(f) \ \dots \ X_k(f)] \tag{4}$$

sehingga elemen ke- m dari matriks ini adalah

$$X_m(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)g(n - mR)e^{-j2\pi fn} \tag{5}$$

Di mana, $g(n)$ adalah fungsi jendela dengan panjang M . $X_m(f)$ adalah DFT dari data jendela yang berpusat pada waktu mR . R adalah ukuran hop antara DFT yang berurutan. Ukuran hop adalah perbedaan antara panjang jendela dan panjang tumpang tindih L [17].

2.2. Alat dan Bahan

A. Drum Roller

Drum roller memiliki spesifikasi sebagai berikut:

Power	: 75 kW
Foundation	: Flexible
Motor Speed	: 1500 RPM
Impeller Speed	: 400 RPM
Diameter Impeller	: 1706 mm
Rotor Weight	: 500 kg
Transmission System	: Belt



Gambar 2. Drum roller

B. Alat Ukur Getaran

Pengukuran getaran pada Drum roller dilakukan pada sumbu *Axial* dan *Radial* terhadap bearing untuk mendapatkan getaran yang dihasilkan oleh Drum roller. VibExpert II seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3 ini digunakan untuk melakukan pengukuran getaran pada Drum roller sehingga akan mendapatkan nilai getaran yang muncul untuk diolah menggunakan aplikasi MATLAB.



Gambar 3. VibExpert II

C. MATLAB

Aplikasi MATLAB seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4 digunakan untuk melakukan pengolahan data dari hasil pengukuran getaran dengan penggunaan FFT Dan STFT untuk mendapatkan nilai dari grafik dan spektrum.



Gambar 4. MATLAB

```

%% short-time FFT
winlen = 1000; % window length
stepsize = 25; % step size for STFFT
numsteps = floor((n-winlen)/stepsize);

hz = linspace(0,fs/2,floor(winlen/2));

% initialize time-frequency matrix
tf = zeros(length(hz),numsteps);

% Hann taper
hwin = .5*(1-cos(2*pi*(1:winlen) / (winlen-1)));

% loop over time windows
for ti=1:numsteps

    % extract part of the signal
    tidix = (ti-1)*stepsize+1:(ti-1)*stepsize+winlen;
    tapdata = signal(tidix);

    % FFT of these data
    x = fft(hwin.*tapdata)/winlen;

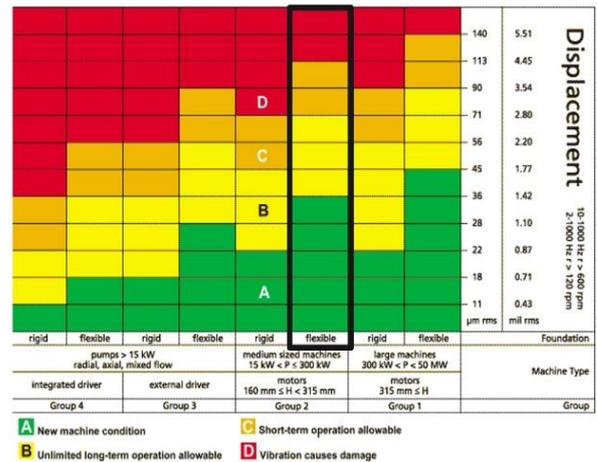
    % and put in matrix
    tf(:,ti) = 2*abs(x(1:length(hz)));
end
    
```

Gambar 5. Pemrograman STFT

Pemrograman STFT secara garis besar ditunjukkan oleh Gambar 5 berfungsi untuk pengolahan sinyal getaran hasil pengukuran di *bearing NDE axial* dan *radial*.

2.3. Analisis Data

Pada tahap analisis data yaitu mengidentifikasi garis spektrum frekuensi domain dengan membandingkan karakteristik getaran antara posisi *axial* dan *radial* pada pengukurannya terhadap hasil spektrogram *fourier transform*. Untuk parameter yang dibandingkan adalah amplitudo dan frekuensinya untuk menentukan letak kerusakan pada drum roller dengan mengetahui kondisi kerusakannya berdasarkan standar nilai getaran *displacement* ISO 10816-3 seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 6.

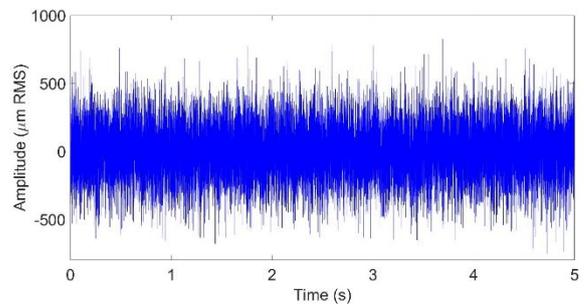


Gambar 6. Standar ISO 10816-3 displacement

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Time Signal

Gambar 7 dan 8 merupakan hasil dari pengolahan sinyal menggunakan aplikasi MATLAB yang didapatkan dari hasil pengukuran getaran sesuai dengan data getaran pada posisi *axial* dan *radial*. *Time signal axial* ini merupakan hasil dari pengambil data getaran yang dilakukan pada saat motor sudah berputar stabil dan kecepatan maksimumnya. Banyaknya sumber getaran yang dihasilkan oleh komponen-komponen *ID Fan* dalam grafik domain waktu membuat sulit untuk menemukan letak frekuensi dari sebuah amplitudo.

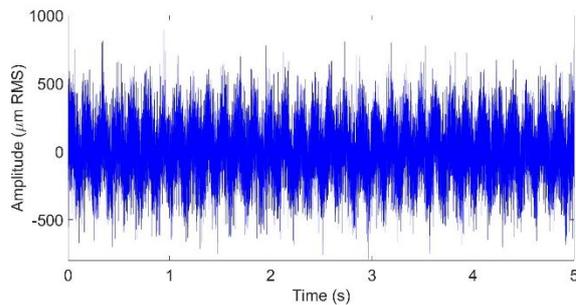


Gambar 7. Data pengukuran titik axial

Menggunakan grafik domain waktu kita tidak bisa membaca frekuensi dari getaran-getaran yang muncul. Grafik domain waktu hanya menunjukkan nilai amplitudo dan waktu pengukuran.

Data pengukuran sinyal getaran di titik *axial* yang belum diolah atau masih berupa domain waktu ditunjukkan oleh Gambar 7. Sedangkan data pengukuran di titik *radial* ditunjukkan oleh Gambar 8. Getaran pada titik *axial* terlihat memiliki kerapatan lebih tinggi dibanding pada titik *radial*. Hal ini menunjukkan amplitudo besar

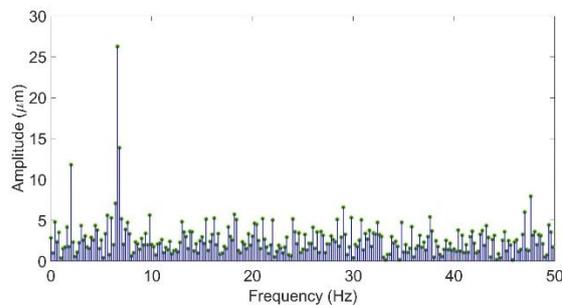
terjadi pada frekuensi rendah.



Gambar 8. Data pengukuran titik *radial*

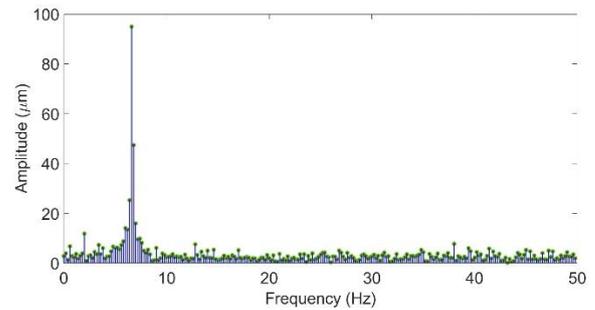
3.2. Hasil Komputasi FFT

Proses perhitungan dilakukan dengan menggunakan algoritma FFT seperti yang ditunjukkan oleh Persamaan 1. Grafik hasil algoritma FFT pengukuran posisi *axial* dan *radial* ditunjukkan oleh Gambar 9 dan 10.



Gambar 9. Spektrum pengukuran *axial*

Pada Gambar 9 menunjukkan grafik hasil pengolahan FFT di titik pengukuran *axial*. Nilai getaran tertinggi sebesar 27 µm terletak pada satu kali RPM drum roller atau di frekuensi 6.7 Hz. Jika mengacu pada standar ISO 10816-3, getaran tersebut masih dalam kategori baik. Grafik spektrum hasil pengolahan algoritma FFT di titik *radial* ditunjukkan oleh Gambar 10. Terlihat getaran di dominasi oleh amplitudo yang terletak di frekuensi 6.7 Hz atau 1 kali RPM drum roller. Pada kedua titik pengukuran menunjukkan amplitudo paling besar terjadi di frekuensi satu kali RPM drum roller. Adanya amplitudo yang melebihi batas standar pada satu kali frekuensi objek yang berputar mengindikasikan kerusakan *unbalance* [18].

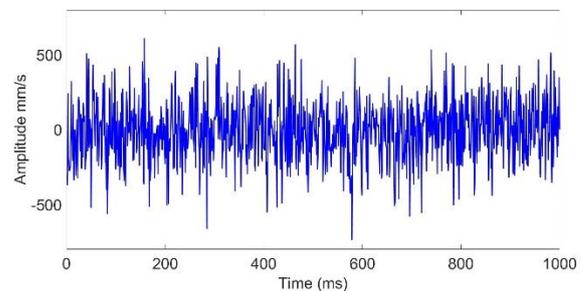


Gambar 10. Spektrum pengukuran *radial*

Penggunaan metode FFT menyajikan sebuah visualisasi yang bermanfaat untuk mengetahui sumber kerusakan drum roller dengan cepat dan akurat. Namun spektrum hasil pengolahan FFT memiliki banyak garis dan saat kondisi tertentu sulit untuk mengetahui frekuensi dari sebuah amplitudo yang paling dominan. Pengolahan sinyal getaran menggunakan metode STFT dilakukan untuk mendukung hasil diagnosis kerusakan drum roller.

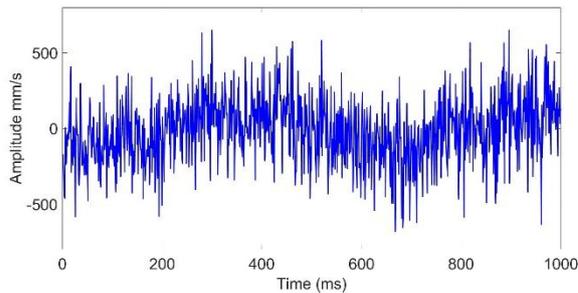
3.3. Hasil Pemotongan Domain Waktu

Hasil pemotongan data domain waktu ditunjukkan oleh Gambar 11 dan 12. Gambar 11 menunjukkan grafik sinyal getaran dalam domain waktu hasil pengukuran di titik *axial*. Sedangkan grafik sinyal getaran dalam domain waktu hasil pengukuran di titik *radial* ditunjukkan oleh Gambar 12.



Gambar 11. Hasil pemotongan sinyal titik *axial*

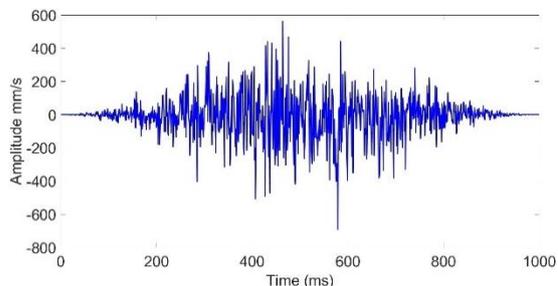
Kedua grafik domain waktu ini sama dengan data grafik yang ditunjukkan oleh Gambar 7 dan 8, perbedaannya hanya terletak pada waktu yang lebih diperkecil. Grafik sebelumnya memiliki waktu 5 detik dan diperkecil menjadi 1 detik. Pemotongan sinyal dilakukan di tengah dan simetri.



Gambar 12. Hasil pemotongan sinyal titik *radial*

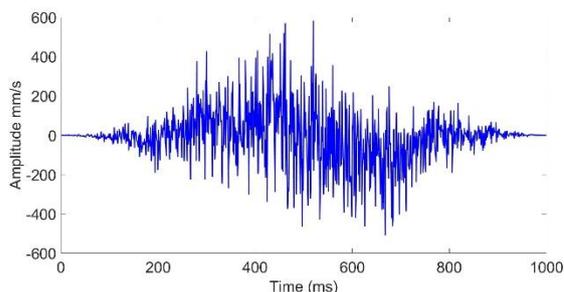
3.4. Hasil Perkalian STFT Dengan Hanning Window

Gambar 13 dan 14 merupakan Hasil Perkalian sinyal getaran dalam domain waktu dengan Hanning *window*. Perkalian Hanning *window* dengan sinyal getaran dari pengukuran titik *axial* ditunjukkan oleh Gambar 13.



Gambar 13. Hasil perkalian sinyal titik *axial* dengan Hanning Window

Hasil perkalian sinyal getaran pengukuran titik *radial* dengan Hanning *window* ditunjukkan oleh Gambar 14. Terlihat pada kedua grafik nilai amplitudo berubah menjadi 0 di ujung awal dan akhir sinyal. Hasil ini sesuai dengan Gambar 1 yang memiliki nilai 0 di setiap ujungnya dan amplitudo paling besar berada di tengah.

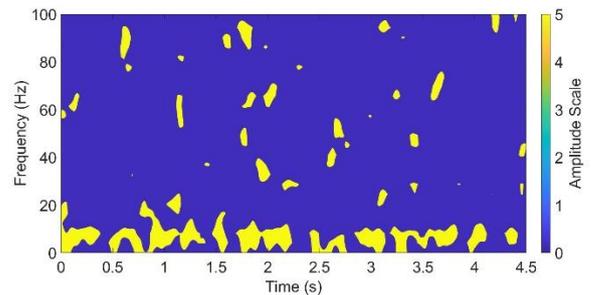


Gambar 14. Hasil perkalian sinyal titik *radial* dengan Hanning Window

3.5. Hasil dan Analisis STFT

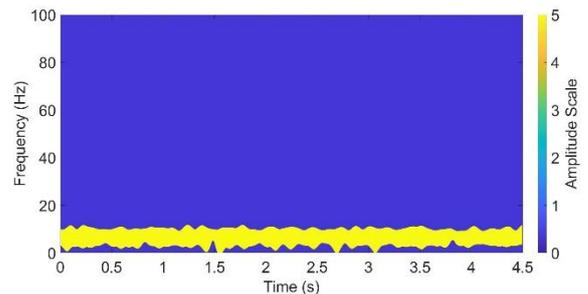
Grafik STFT seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 15, 16, dan 18 didapatkan menggunakan Persamaan 2 – 5. Gambar 15 menunjukkan grafik spektrogram hasil

pengolahan algoritma STFT untuk sinyal getaran yang diambil dari titik *axial*.



Gambar 15. Spektrogram STFT *axial*

Grafik spektrogram menunjukkan amplitudo besar dengan warna kuning banyak terkumpul pada area frekuensi 6.7 Hz. Beberapa warna kuning juga tersebar di area frekuensi lain namun tidak sebanyak di area frekuensi 6.7 Hz. Dengan begitu dapat disimpulkan bahwa amplitudo paling besar terjadi di frekuensi 6.7 Hz atau di satu kali RPM drum roller. Grafik spektrogram menunjukkan karakteristik yang sama dengan grafik spektrum. Keduanya sama-sama menunjukkan amplitudo yang paling besar terjadi pada satu kali RPM drum roller.



Gambar 16. Spektrogram STFT *radial*

Gambar 16 menunjukkan grafik spektrogram untuk hasil pengolahan sinyal getaran dari titik *radial*. Terlihat garis berwarna kuning hanya ada di area frekuensi 6.7 Hz. Pola grafik spektrogram bermakna bahwa amplitudo paling besar terletak pada frekuensi 6.7 Hz. Jika dibandingkan dengan Gambar 15, spektrogram ini memiliki nilai amplitudo yang lebih besar. Karena pada Gambar 16 terlihat warna kuning yang terlihat lebih rapat hingga membentuk sebuah garis. Hasil ini juga didukung oleh spektrum di titik *radial* yang memiliki amplitudo lebih besar jika dibandingkan hasil pengukuran di titik *axial*.

Semua grafik spektrogram STFT *axial* dan *radial* menyimpulkan bahwa adanya indikasi *unbalance* pada drum roller ditandai dengan adanya amplitudo paling besar terletak di frekuensi 6.7 Hz. Nilai getaran keseluruhan paling besar adalah 97 μm . Berdasarkan standar ISO 10816-3 jenis *displacement* besar getaran

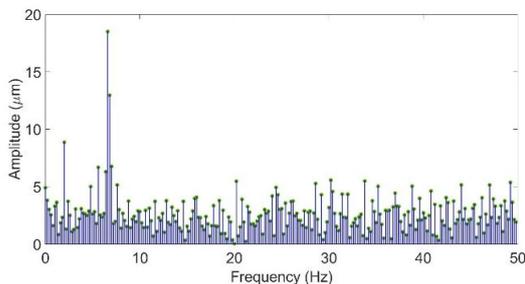
masuk pada zona C, bermakna mesin masih dapat dioperasikan tapi jangka singkat. Dengan kata lain mesin sangat direkomendasikan untuk diperbaiki segera.



Gambar 17. Proses *balancing*

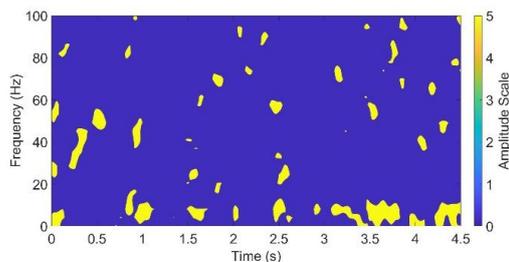
Setelah mengetahui sumber penyebab kerusakan mesin maka dilakukan upaya perbaikan dengan cara menyeimbangkan kembali drum roller agar getaran yang timbul karena masalah unbalance bisa hilang. Selain itu, kegiatan ini dilakukan untuk memvalidasi kebenaran hasil analisis. Proses *balancing* drum roller dapat dilihat pada Gambar 17. Penambahan massa dilakukan untuk menyeimbangkan sisi drum roller yang kurang berat.

Setelah proses *balancing* selesai, selanjutnya melakukan pengukuran getaran kembali pada titik *radial*. Spektrum getaran setelah proses *balancing* ditunjukkan oleh Gambar 18.



Gambar 18. Spektrum *radial* setelah *balancing*

Amplitudo di frekuensi 6.7 Hz yang sebelum dilakukan *balancing* bernilai 97 µm menjadi 18 µm. Mengacu pada standar ISO 10816-3 getaran sebesar 18 µm masuk pada zona A, bermakna mesin dalam kondisi baru dan bisa beroperasi untuk jangka yang lama.



Gambar 19. Spektrogram STFT *radial* setelah *balancing*

Gambar 19 menunjukkan grafik spektrogram drum roller setelah dilakukan *balancing*. Terlihat beberapa area masih berwarna kuning tetapi hanya sedikit. Jika dilihat warna kuning masih terkumpul di area frekuensi 6.7 Hz namun tidak sebanyak pada spektrogram Gambar 15 dan 17. Pola ini menandakan Amplitudo paling besar masih berada pada frekuensi 6.7 Hz akan tetapi nilainya tidak besar. Dapat terlihat dari tidak rapatnya pola warna kuning di area satu kali RPM drum roller.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang sudah dilakukan didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Metode FFT dan STFT berhasil diterapkan untuk mendiagnosis kerusakan drum roller. FTT dan STFT berfungsi mengubah visualisasi sinyal getaran dalam domain waktu menjadi domain frekuensi sehingga sumber kerusakan pada drum roller dapat diidentifikasi.
2. Sumber getaran terbesar terjadi di titik *radial* yaitu sebesar 97 µm RMS. Mengacu pada standar ISO 10816-3 tipe *displacement* masuk pada zona C yang bermakna getaran tinggi dan mesin diizinkan beroperasi untuk waktu yang singkat. Perbaikan drum roller harus dilakukan segera.
3. Hasil pengolahan FFT dan STFT menunjukkan nilai getaran terbesar berasal dari frekuensi 6.7 Hz di mana frekuensi ini sama dengan 1 kali RPM drum roller. Sehingga dapat disimpulkan bahwa sumber kerusakan yang menyebabkan nilai getaran tinggi adalah unbalance drum roller.
4. Hasil diagnosis berupa unbalance pada drum roller terbukti benar karena nilai getaran turun menjadi 18 µm setelah dilakukan *balancing* pada drum roller.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] X. Pan and G. Bin, "Real-time intelligent diagnosis of co-frequency vibration faults in rotating machinery based on Lightweight-Convolutional Neural Networks," pp. 0–18, 2022.
- [2] X. Lu *et al.*, "Prediction and analysis of cold rolling mill vibration based on a data-driven method," *Appl. Soft Comput. J.*, vol. 96, p. 106706, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.asoc.2020.106706.

- [3] B. K. Kumar, G. Diwakar, and M. R. S. Satynarayana, "Determination of unbalance in rotating machine using vibration signature analysis," *Int. J. Mod. Eng. Res.*, vol. 2, no. 5, pp. 33415–33421, 2012.
- [4] S. M. Ramteke, H. Chelladurai, and M. Amarnath, "Diagnosis and classification of diesel engine components faults using time–frequency and machine learning approach," *J. Vib. Eng. Technol.*, 2021, doi: 10.1007/s42417-021-00370-2.
- [5] D. Romahadi, H. Xiong, and H. Pranoto, "Intelligent system for gearbox fault detection & diagnosis based on vibration analysis using Bayesian Networks," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 694, no. 1, 2019, doi: 10.1088/1757-899X/694/1/012001.
- [6] D. Romahadi, F. Anggara, A. F. Sudarma, and H. Xiong, "The implementation of artificial neural networks in designing intelligent diagnosis systems for centrifugal machines using vibration signal," *SINERGI*, vol. 25, no. November 2020, 2021, doi: 10.22441/sinergi.2021.1.012.
- [7] J. W. Cooley, P. A. W. Lewis, and P. D. Welch, "Historical Notes on the Fast Fourier Transform," *IEEE Trans. Audio Electroacoust.*, vol. 15, no. 2, pp. 76–79, 1967, doi: 10.1109/TAU.1967.1161903.
- [8] D. Romahadi, A. A. Luthfie, W. Suprihatiningsih, and H. Xiong, "Designing expert system for centrifugal using vibration signal and Bayesian Networks," *Int. J. Adv. Sci. Eng. Inf. Technol.*, vol. 12, no. 1, p. 23, Jan. 2022, doi: 10.18517/IJASEIT.12.1.12448.
- [9] E. O. Brigham and R. E. Morrow, *The fast Fourier transform*, vol. 4, no. 12. 1967.
- [10] D. Mokrzan and G. Szymański, "Time-frequency methods of non-stationary vibroacoustic diagnostic signals processing," *Rail Veh.*, no. 3, pp. 44–57, 2021, doi: 10.53502/rail-143047.
- [11] J. Feng, Y. Men, G. Zhu, Y. Li, and X. Luo, "Cavitation detection in a Kaplan turbine based on multifractal detrended fluctuation analysis of vibration signals," *Ocean Eng.*, vol. 263, p. 112232, Nov. 2022, doi: 10.1016/J.OCEANENG.2022.112232.
- [12] R. Dutta, J. P. Dwivedi, V. P. Singh, and A. Ghosh, "Using Vibration Analysis to Identify & Correct an Induced Draft Fan ' s Foundation Problem of a Pollution Control Device - A Case Study," *Int. J. Appl. Eng. Res.*, vol. 13, no. 8, pp. 5831–5840, 2018.
- [13] S. Farokhzad, "Vibration Based Fault Detection of Centrifugal Pump by Fast Fourier Transform and Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System," *J. Mech. Eng. Technol.*, no. November 2013, pp. 82–87, 2013, doi: 10.18005/jmet0103001.
- [14] C. Mateo and J. A. Talavera, "Short-Time Fourier Transform with the Window Size Fixed in the Frequency Domain (STFT-FD): Implementation," *SoftwareX*, vol. 8, pp. 5–8, 2018, doi: 10.1016/j.softx.2017.11.005.
- [15] S. Agrawal, A. N. Tiwari, and V. K. Giri, "Signal processing methods for identification of induction motor bearing fault," *Int. J. Recent Technol. Eng.*, vol. 8, no. 3, pp. 143–151, 2019, doi: 10.35940/ijrte.C3911.098319.
- [16] A. Antoniou, *Digital Signal Processing: Signals, Systems, and Filters*. 2006.
- [17] K. Yani, A. Rizal, and B. Prasetya, "Analisis kinerja algoritma Short Time Fourier Transform (STFT) untuk deteksi sinyal carrier Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS) CDMA," no. November 2017, 2008.
- [18] D. Romahadi, A. A. Luthfie, and L. B. Desti Dorion, "Detecting classifier-coal mill damage using a signal vibration analysis," *SINERGI*, vol. 23, no. 3, p. 175, 2019, doi: 10.22441/sinergi.2019.3.001.