

Deteksi Kerusakan *Bearing* secara *Non-Invasive* pada Kondisi Kecepatan Bervariasi

Fajar Agung Priambodo¹, Pandu Arafu Putra Subagya², Adistra Shanda Syahputri³

¹PT. Prakarsa Lestari Jaya Surabaya

²Program Studi Teknologi Kedokteran Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

³Program Studi Teknologi Laboratorium Medik Universitas Airlangga Surabaya

Korespondensi: pandurafi29@gmail.com

Received: Juli 2022 ; Accepted: September 2022 ; Published: November 2022

DOI: <https://doi.org/10.30649/je.v4i2.114>

Abstrak

Pemakaian motor secara terus menerus akan menyebabkan kerusakan. Deteksi kerusakan penting dilakukan untuk menghindari kerusakan parah, menekan biaya perawatan dan menjaga keandalan motor. Penggunaan motor tidak bisa lepas dari perubahan kecepatan karena disesuaikan dengan kebutuhan pengguna. Pada saat motor beroperasi akan menghasilkan suara yang menggambarkan kondisi kesehatannya. Penelitian ini bertujuan untuk pengembangan system deteksi kerusakan bearing berdasarkan sinyal suara dengan variasi kecepatan. Pengolahan dan analisis data menggunakan pendekatan analisis spectrum. Perubahan kecepatan akan berpengaruh pada frekuensi putaran sehingga akan berpengaruh kepada diagnosis kondisi elemen motor. Dengan mengamati lonjakan amplitude pada spectrum suara maka akan diketahui kondisi kesehatan motor. Pendekatan *Analysis of Variance* (ANOVA) digunakan sebagai pendekatan untuk menentukan pengaruh variable speed terhadap akurasi deteksi. Untuk mempercepat proses diagnosis pengembangan system dilakukan secara real-time menggunakan mini PC raspberry sehingga hasil diagnosis dapat dilakukan dengan cepat tanpa membutuhkan waktu lama. Signifikansi dari penelitian adalah sistem deteksi kerusakan yang dibahas memberikan solusi monitoring kondisi bearing yang sederhana, murah, cepat dan akurasi tinggi sehingga tindakan perawatan motor dilakukan tepat waktu. Hasil penelitian mencapai akurasi diagnosis sebesar 93.75%.

Kata kunci: *Fast Fourier Transform*, Motor Induksi, *Outer Race Bearing*, Sinyal Suara

Abstract

The continuous use of motors is an operational process that often causes damage. This process commonly encompass fault detection, which is very important in avoiding serious destruction, reducing maintenance costs, and maintaining system reliability. From this context, motor use is inseparable from the change in speed, due to being adjusted to the users' needs. Regarding this detection process, a sound describing the health condition of the motor is often produced during operation. Therefore, this study aims to develop a bearing fault detection system, based on sound signals with speed variations. Data processing and analysis were carried out by using a spectrum analysis approach. Based on the results, speed changes affected the frequency of rotation, which then influenced the diagnosis of the motor elements condition. By observing the amplitude spikes in the sound spectrum, the health

conditions of the motor were known. The Analysis of Variance (ANOVA) approach was also used to determine the various speed effects on detection accuracy. To speed up the diagnosis process, system development was carried out in real-time, using a Raspberry MiniPC. In this case, the diagnostic outputs were rapidly carried out. Regarding the significance of the study, the fault detection system provided a simple, inexpensive, fast, as well as high-accuracy bearing condition monitoring solution, while rapidly performing motor maintenance actions. The results showed that a diagnostic accuracy of 93.75% was achieved.

Key words: Fast Fourier Transform, Induction Motor, Outer Race Bearing, Sound Signal

I. PENDAHULUAN

Bearing adalah komponen yang berperan penting membantu motor berputar. Kerusakan bearing merupakan kerusakan yang sering terjadi mencapai lebih dari 40% dibandingkan elemen motor lainnya [1]. Kerusakan bearing menyebabkan kebisingan, panas berlebih dan terhentinya operasional motor [2]. Untuk menghindari dampak merugikan tersebut maka diperlukan deteksi kerusakan bearing agar tindakan perawatan dapat dilakukan tepat waktu. Deteksi kerusakan secara dini bermanfaat untuk menjaga keandalan dan efisiensi, menekan biaya perawatan, menghindari kerusakan parah, bahkan mencegah terhentinya operasional secara mendadak [3].

Sinyal yang dihasilkan oleh operasional motor memberikan informasi kondisi kesehatannya. Deteksi kerusakan dapat dilakukan dengan teknik *invasive* dan *non-invasive*. Teknik *non-invasive* merupakan deteksi kerusakan tanpa memerlukan kontak langsung dengan elemen motor [4][5]. Getaran, *thermal*, dan suara merupakan data sinyal yang dapat digunakan sebagai dasar deteksi kerusakan, dimana teknik tersebut termasuk teknik *non-invasive* [6]. Diagnosis kerusakan motor untuk kerusakan mekanis banyak dilakukan dengan analisa data getaran dan suara. Namun analisis melalui getaran untuk menghasilkan akurasi yang tinggi membutuhkan akselerometer berpenampang kecil yang berharga mahal

[7]. Alternatif lain yang cukup menjanjikan dan memerlukan biaya yang relative murah adalah diagnosis kerusakan berdasarkan sinyal suara. Kekurangan dari metode ini adalah sinyal suara mudah *overlapping* dengan sinyal suara lain sehingga diperlukan teknik khusus untuk mengolah sinyal agar dapat menggambarkan kondisi mesin [8].

Sinyal yang didapat dari sensor akan diolah untuk diagnosis kondisi motor. Sinyal prosesing yang digunakan untuk deteksi kerusakan adalah *Time Domain Analisis*, *Fast Fourier Transform* (FFT) [9]-[11], *Hilbert Huang Transform* (HHT) [12][13], *Short Time Fourier Transform* (STFT) [14]-[16] dan *Wavelet Transform* (WT) [17][18]. Pengolahan sinyal yang mudah dan sederhana adalah FFT. FFT berperan untuk mentransformasi sinyal domain waktu menjadi domain frekuensi. Keuntungan analisis domain frekuensi adalah memiliki kemampuan untuk mengidentifikasi komponen sinyal [19].

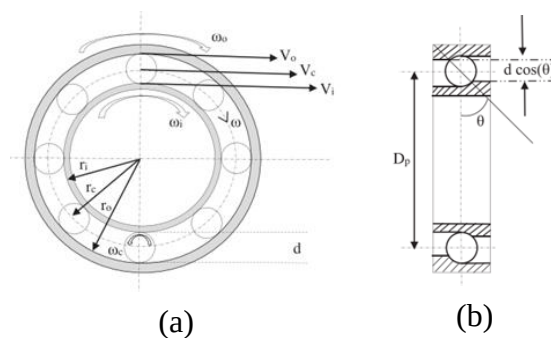
Sebagai *prime over* motor induksi dibutuhkan kecepatan yang tidak tetap dan deteksi kerusakan motor harus dilakukan secara kontinue agar keandalan tetap terjaga. Penelitian ini mengusulkan deteksi kerusakan dengan teknik *non-invasive* berdasarkan sinyal suara, dimana proses diagnosis dilakukan *real time*. Pengolahan data dan diagnosis menggunakan pendekatan analisis spektrum dan pengujian dilakukan pada variasi kecepatan. ANOVA merupakan pendekatan apakah deteksi kerusakan dapat dilakukan pada kondisi

motor beroperasi pada kecepatan yang berbeda. Hal ini perlu diteliti karena deteksi kerusakan sangat dipengaruhi oleh frekuensi bearing. Signifikasi hasil penelitian adalah pengembangan sistem diagnosis kerusakan bearing yang murah, sederhana, cepat dan akurasi tinggi. Hasil dari penelitian ini nantinya dapat digunakan sebagai alternatif untuk mendeteksi dini kerusakan pada motor induksi sehingga terhindar terjadinya kerusakan parah bahkan terhentinya operasional motor.

II. METODE PENELITIAN

2.1 Karakteristik Frekuensi Bearing

Bearing merupakan salah satu komponen penting dalam mesin listrik sehingga dapat mengakibatkan timbulnya permasalahan jika *bearing* tersebut mengalami kerusakan. Ketika terjadi kerusakan pada elemen bearing maka menyebabkan lonjakan amplitude pada setiap frekuensi harmonik. Lonjakan amplitude disebabkan kerapatan fluks pada *air-gap* menjadi tidak simetri dan mempengaruhi induktansi di stator [20].



Gambar 1. (a) Bearing tampak depan dan (b) tampak samping

Gambar 1 menunjukkan bagian bearing tampak depan dan samping dengan dasar karakteristik frekwensi bearing. Ketika bearing berputar maka menghasilkan kecepatan linier pada cage sebesar :

$$V_c = \frac{V_i + V_o}{2} = \frac{\omega_i r_i + \omega_o r_o}{2} \quad (1)$$

$$V_c = \omega_c r_c = \omega_c \left(\frac{D_p}{2} \right) \text{ jika } r_c = \frac{D_p}{2}$$

Maka

$$\begin{aligned} \omega_c &= \left(\frac{2V_c}{D_p} \right) = \left(\frac{2}{D_p} \right) \cdot V_c = \left(\frac{2}{D_p} \right) \times \left(\frac{\omega_i r_i + \omega_o r_o}{2} \right) \\ &= \frac{\omega_i r_i + \omega_o r_o}{D_p} \end{aligned} \quad (2)$$

$$r_i = \frac{D_p}{2} - \frac{d \cos \theta}{2} \text{ dan } r_o = \frac{D_p}{2} + \frac{d \cos \theta}{2}$$

r_i adalah jarak inner dan r_o adalah jarak outer race maka :

$$\begin{aligned} \omega_c &= \frac{\omega_i \left(\frac{D_p}{2} - \frac{d \cos \theta}{2} \right) + \omega_o \left(\frac{D_p}{2} + \frac{d \cos \theta}{2} \right)}{D_p} \\ &= \frac{1}{2} \left[\omega_i \left(1 - \frac{d \cos \theta}{D_p} \right) + \omega_o \left(1 + \frac{d \cos \theta}{D_p} \right) \right] \end{aligned} \quad (3)$$

Karena ω merupakan $2\pi f$ maka nilai frekwensi adalah :

$$f_c = \frac{1}{2} \left[f_i \left(1 - \frac{d \cos \theta}{D_p} \right) + f_o \left(1 + \frac{d \cos \theta}{D_p} \right) \right] \quad (4)$$

Frekwensi *Outer Race Bearing* dapat dihitung sebagai berikut :

$$f_o = N(\omega_c - \omega_o) = \frac{N}{2} (f_i - f_o) \cdot \left(1 - \frac{d \cos \theta}{D_p} \right) \quad (5)$$

Karena *outer race* terkunci dengan eksternal casing maka frekwensi inner race sama dengan frekwensi shaft rotor motor ($f_i = f_s$) sehingga frekwensi *Outer Race Bearing* diasumsikan 0 dan bernilai sama dengan kecepatan rotor (m) dengan demikian maka [21] :

$$f_o = \frac{N}{2} f_s \left(1 - \frac{d \cos \theta}{D_p} \right) = \frac{N}{2} m \left(1 - \frac{d \cos \theta}{D_p} \right) \quad (6)$$

Disaat *Outer Race Bearing* mengalami kerusakan maka lonjakan amplitude akan terjadi pada komponen frekuensinya [22]. Dimana komponen

frekuensi *Outer Race Bearing* sesuai persamaan berikut :

$$f_v = |k \cdot f_o| \quad (7)$$

Dimana f_o adalah frekwensi *Outer Race Bearing* dari persamaan (6), f_v adalah frekwensi harmonik, dan k adalah konstanta $k=1,2,3,\dots$

2.2 Experimental Procedure And Methology

Prosedur deteksi kerusakan motor terdiri dari tiga langkah yaitu pengupulan data yang relevan dari mesin, kedua, pengolahan dan analisis data; dan ketiga adalah pengambilan keputusan diagnostic dan prognostic [23]. Gambar 2 merupakan prosedur dan methology penelitian.

Proses analisis kerusakan domain waktu memerlukan analisis cukup panjang yang dapat menimbulkan ketidakteelitian hasil analisis. Analisis sinyal akan lebih mudah dilakukan pada domain frekuensi [19]. Salah satu formulasi yang ampuh untuk proses pengolahan sinyal adalah menggunakan *Discrete Fourier Transform* (DFT). Untuk memangkas proses dengan waktu yang lebih cepat maka dikembangkan FFT. Prinsip kerja FFT adalah membagi sinyal hasil penyamplingan menjadi beberapa bagian yang kemudian masing-masing bagian diselesaikan dengan algoritma yang sama dan hasilnya dikumpulkan kembali [23]. Persamaan DFT adalah :

$$X_{(k)} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-i2\pi \frac{k}{N} n}, \quad k = 1, 2, \dots, (N-1)$$

Dimana N adalah jumlah data dan k adalah indeks frekuensi. Agar perhitungan lebih singkat maka FFT akan membagi sampel data menjadi dua bagian, kemudian pada masing-masing kelompok sampel dikerjakan menggunakan DFT sehingga dapat digambarkan dengan rumus :

$$FFT(N) = DFT\left(\frac{N}{2}\right) + DFT\left(\frac{N}{2}\right)$$

Sehingga jumlah perhitungan FFT adalah

$$FFT(N) = DFT\left(\frac{N}{2}\right)^2 + DFT\left(\frac{N}{2}\right)^2$$

$$FFT(N) = \frac{N^2}{2}$$

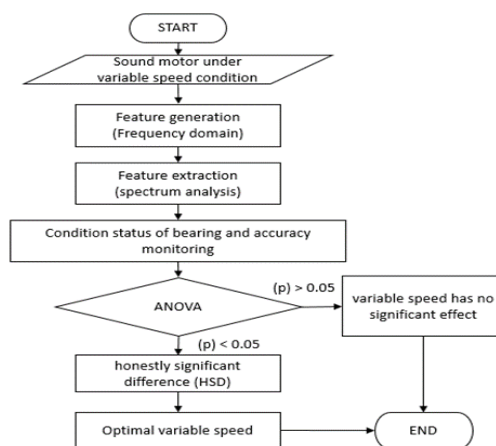
Dengan demikian perhitungan FFT lebih singkat dan effisien dibandingkan DFT. Langkah berikutnya adalah menghitung persamaan sesuai persamaan dasar FFT :

$$FFT(N) = DFT\left(\frac{N}{2}\right) \text{ sampe genap} + DFT\left(\frac{N}{2}\right) \text{ sampe ganjil}$$

Jika $n \text{ genap} = 2r$ dan $n \text{ ganjil} = 2r + 1$ dengan r adalah bilangan bulat positif maka persamaan FFT menjadi :

$$X_{(k)} = \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x_{(2r)} e^{-i2\pi \frac{k}{N} (2r)} + \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} x_{(2r+1)} e^{-i2\pi \frac{k}{N} (2r+1)} \quad (8)$$

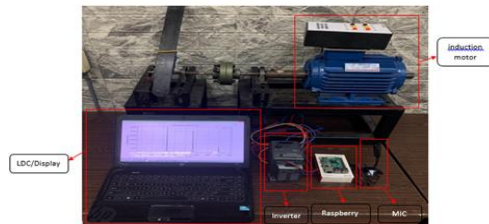
Dari rumus FFT didapatkan bahwa setiap nilai indeks frekuensi k mempunyai dua kelompok perkalian yaitu sampel genap dan ganjil. Setiap nilai indeks frekuensi k pada masing-masing kelompok memiliki jumlah sampel maksimum adalah $\frac{N}{2} - 1$.



Gambar 2. Prosedur penelitian

Deteksi kerusakan bearing yang dikembangkan dalam penelitian ini berbasis sinyal suara yang berasal dari

pengoperasian motor induksi. Gambar 3 merupakan konfigurasi sistem diagnosis kerusakan bearing motor. Komponen yang digunakan terdiri dari motor induksi 3 fasa sebagai objek diagnosis, inveter sebagai *driver speed*, mikrofon sebagai sensor suara, dan raspberry sebagai mini PC untuk pengolahan sinyal dan diagnosis kerusakan.



Gambar 3. Konfigurasi deteksi kerusakan bearing

Kondisi kecepatan divariasikan dengan mengubah nilai frekuensi pada inverter. Dimana 10 Hz setara dengan kecepatan 298.4 rpm sampai 50Hz setara dengan kecepatan 1495.3 rpm. Pengujian kondisi bearing rusak dilakukan dengan cara rekontruksi *Outer Race Bearing* dengan memberikan kecacatan buatan berupa kerusakan retak dan lubang. Pengujian bearing yang telah direkontruksi dimaksud agar system diagnosis kerusakan dapat mengenali kondisi sebenarnya, baik kondisi kerusakan kecil (retak) atau kerusakan parah (berlubang). Gambar 4 menunjukkan rekontruksi *Outer Race Bearing* sebagai bearing uji. Kerusakan buatan diupayakan dapat memberikan informasi karakteristik frekuensi yang menggambarkan ketidaknormalan *Outer Race Bearing*.



Gambar 4. Rekontruksi outer race bearing

Design (CRD) diaplikasikan untuk menganalisis pengaruh variasi kecepatan

terhadap akurasi deteksi kerusakan. Model CRD adalah [25] :

$$Y_{ij} = \pi + \tau_i + \varepsilon_{ij}$$

dengan

$$i = 1, 2, \dots, t \text{ dan } j = 1, 2, \dots, r$$

Y_{ij} = pengamatan pada perlakuan ke- i dan ulangan ke- j

π = rata-rata umum

τ_i = pengaruh perlakuan ke- i

ε_{ij} = pengaruh acak pada perlakuan ke- i , ulangan ke- j

Hipotesis (H1) penelitian adalah variable kecepatan mempengaruhi akurasi deteksi kerusakan sedangkan (H0) kecepatan tidak mempengaruhi akurasi deteksi. Uji hipotesis menggunakan pendekatan ANOVA. Jika H1 ditolak maka dapat dinyatakan tindakan deteksi kerusakan dapat dilakukan pada seluruh variasi kecepatan motor.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Motor berputar dengan kecepatan yang tidak tetap dan disesuaikan dengan keperluan pengguna. Berdasarkan pendekatan tersebut pengujian terhadap variasi kecepatan dilakukan dengan bervariasi frekuensi yaitu 10 Hz , 20 Hz , 30 Hz , 40 Hz , 50 Hz. Frekuensi tersebut akan menghasilkan putaran motor sebesar 298.4 rpm, 605.5 rpm, 900.6 rpm, 1196.7 rpm, dan 1495.3 rpm. Disaat terjadi perubahan kecepatan maka karakteristik frekuensi bearing akan berubah. Perlu kecermatan dalam indentifikasi kondisi bearing. Diperlukan frekuensi bearing pada setiap kecepatan motor. Tabel 1 merupakan frekuensi outer race bearing dari aplikasi persamaan (6) pada setiap kecepatan yang diuji. Dimana spesifikasi bearing uji adalah outside diameter = 52 mm, inside diameter = 25 mm, diameter ball = 7.25 mm, dan

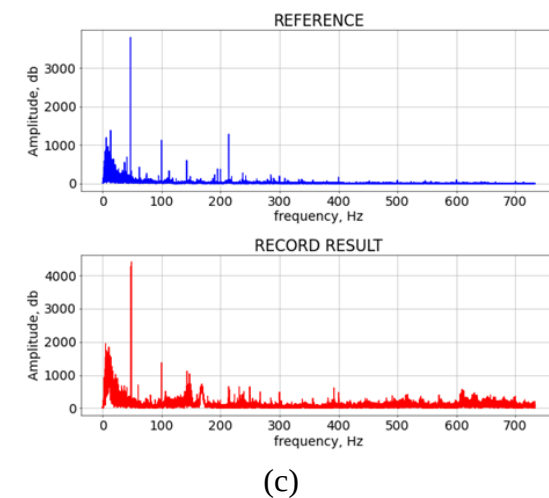
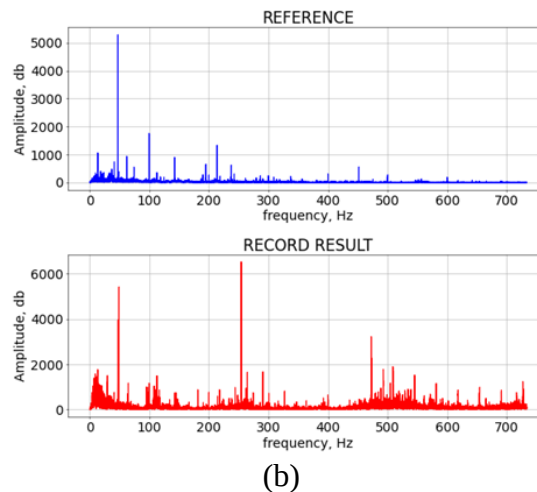
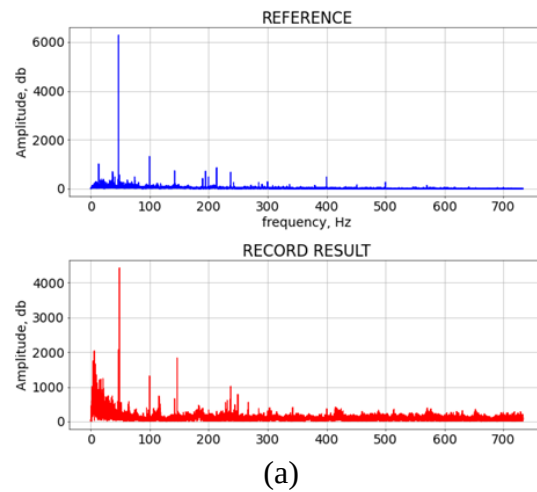
jumlah bearing 9 buah. Nilai frekuensi tersebut merupakan frekuensi fundamental outer race bearing. Untuk mendeteksi kerusakan outer race bearing dapat dilakukan dengan mengamati nilai amplitudo pada komponen frekuensi (f_v) dengan persamaan (7). Dengan record suara selama 30 detik maka didapatkan komponen harmonic sebanyak 8 (f_{ox8}).

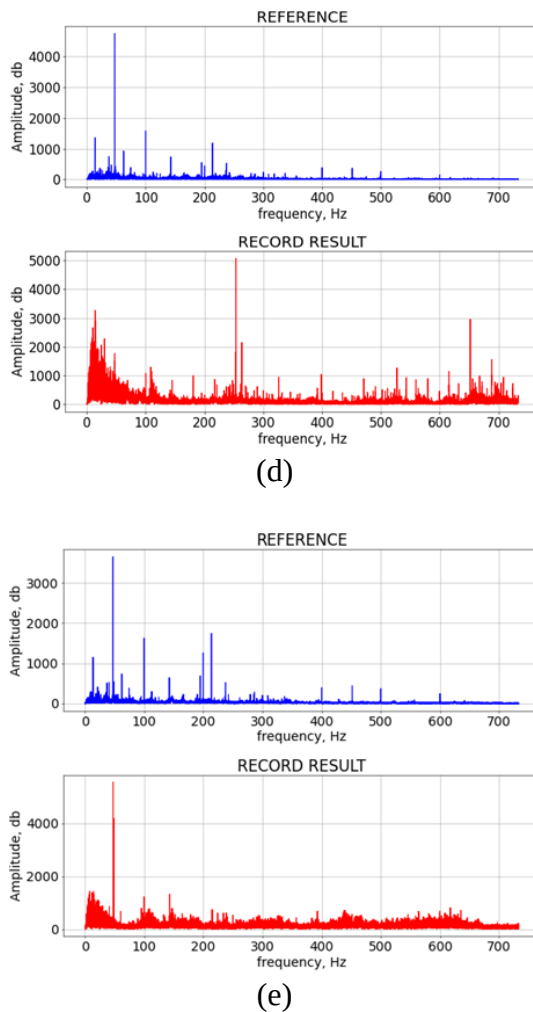
Tabel 1. Frekuensi karakteristik *bearing*

Speed (rpm)	Bearing Frequency (Hz)
298,5	18,1
605,5	36,8
900,6	54,8
1196,7	72,8
1495,3	91,0

Suara motor yang ditangkap oleh microphone diolah dengan pengolahan sinyal berbasis FFT. Proses tersebut menghasilkan spektrum suara yang digunakan sebagai analisis kondisi motor dengan mengamati amplitudo pada frekuensi karakteristik bearing. Perbandingan sinyal suara uji dan sinyal suara referensi (diambil dari kondisi motor sehat) dijadikan pengambilan keputusan kondisi motor.

Jika terjadi lonjakan amplitudo di frekuensi bearing maka dapat disimpulkan terjadi ketidaknormalan pada elemen motor. Hasil diagnosis dikatakan akurat jika terjadi lonjakan amplitudo pada frekuensi bearing karena bearing yang diuji dalam kondisi *outer race* retak dan berlubang. Gambar 5 merupakan spectrum suara dengan kondisi kecepatan bervariasi a) kecepatan 298.4 rpm, b) kecepatan 605.5 rpm, c) kecepatan 900.6 rpm, d) kecepatan 1196.7, dan e) kecepatan 1495.3 rpm.





Gambar 5. Spectrum suara motor dengan variasi kecepatan, (a) 298.4 rpm, (b) 605.5 rpm, (c) 900.6 rpm, (d) 1196.7, dan (e) 1495.3 rpm

Untuk mempermudah pembacaan pada program diberi perintah untuk menampilkan nilai amplitude pada seluruh komponen frekuensi harmonic bearing. Dengan membandingkan nilai amplitude pada setiap komponen harmoniknya nantinya akan diketahui akurasi deteksi kondisi outer race. Gambar 7 menunjukkan hasil tampilan deteksi kerusakan pada kecepatan motor 298,4 rpm.

Analisis spectrum menunjukkan amplitude pengujian di semua frekwensi harmonic bearing mengalami lonjakan dibandingkan amplitude referensi. Kondisi tersebut menggambarkan ketidaknormalan

elemen motor, keputusan ini dinyatakan valid karena kenyataannya bearing dalam kondisi retak. Oleh karena itu pengujian ini mencapai keakurasian 100%. Pengujian dilakukan sebanyak 5 kali disetiap variasi kecepatan. Tabel 2 merupakan hasil akurasi deteksi kerusakan dengan pendekatan yang diusulkan.

```

OUTER RACE BEARING
frequency reference = 18.1 Hz with amplitude 99.0
frequency reference = 36.3 Hz with amplitude 203.0
frequency reference = 54.4 Hz with amplitude 41.0
frequency reference = 72.6 Hz with amplitude 26.0
frequency reference = 90.8 Hz with amplitude 78.0
frequency reference = 108.9 Hz with amplitude 80.0
frequency reference = 127.1 Hz with amplitude 43.0
frequency reference = 145.3 Hz with amplitude 64.0
frequency tested = 18.1 Hz with amplitude 198.0
frequency tested = 36.3 Hz with amplitude 383.0
frequency tested = 54.4 Hz with amplitude 307.0
frequency tested = 72.6 Hz with amplitude 42.0
frequency tested = 90.8 Hz with amplitude 215.0
frequency tested = 108.9 Hz with amplitude 312.0
frequency tested = 127.1 Hz with amplitude 413.0
frequency tested = 145.3 Hz with amplitude 243.0
[2.69726562]
2.697265625
[3.71601868]
3.7160186767578125
Bearing Outer Rusak
  
```

Gambar 6. Analisa spektrum pada pengujian kecepatan motor 298,4 rpm

Tabel 2. Akurasi deteksi kerusakan pada seluruh pengujian

Speed (rpm)	Repetition of fault detection accuracy tests (%)				
	1	2	3	4	5
298,5	73,7	100	81,2	87,5	87,5
605,5	93,7	87,5	87,5	87,5	87,5
900,6	100	87,5	93,7	93,7	93,7
1196,7	93,7	75,0	87,5	93,7	93,7
1495,3	93,7	93,7	93,7	93,7	93,7

Deteksi kerusakan harus dilakukan secara kontinyu, namun pengoperasian motor harus tetap berjalan dimana kecepatan operasionalnya tidak konstan. Untuk mengetahui pengaruh variasi kecepatan terhadap akurasi deteksi maka uji CRD dengan ANOVA diterapkan. Tabel 3 merupakan tabulasi data uji ANOVA. Terlihat bahwa nilai $P_value (p) = 0,944$ lebih besar dari konstanta kepercayaan 0.05 sehingga hipotesis (H_1) ditolak, ini berarti variasi kecepatan tidak mempengaruhi akurasi deteksi kerusakan.

Tabel 3. ANOVA test

Source of diversity	Degrees free	Sum of square	Middle square	F-value	P-Value
Treatment	4	34,88	8,72	0,18	0,944
Galat	20	946,79	47,33		
Total	24	981,67			

Tabel 4 menunjukkan penelitian yang serupa, dimana deteksi kerusakan dilakukan pada kecepatan yang bervariasi. Dari beberapa pengembangan system deteksi kerusakan didapatkan bahwa hasil penelitian yang diusulkan memberikan kontribusi pengembangan deteksi

kerusakan berdasarkan sinyal suara yang murah dan cepat. Pemrosesan sinyal dan diagnosis dilakukan secara sederhana dan realtime sehingga tidak menyita waktu sehingga tindakan maintenance segera dilakukan.

Tabel 4. Penelitian serupa, deteksi kerusakan pada kecepatan bervariasi

Reference	Feature generation	Feature extraction method	Under Speed variable	Realtime
[26]	Vibration signal	Cepstrum pre-whitening and kurtosis	Yes	Yes
[27]	Vibration signal	Wavelet transform	Yes	No
[28]	Current	Discrete wavelet transform	Yes	Yes
[29]	Vibration signal	Wavelet transform (WT) and Gaussian process (GP)	Yes	No
[30]	Vibration signal	Time-frequency analysis	Yes	

IV. SIMPULAN

Deteksi kerusakan dengan teknik non invasive melalui suara motor dan analisis spektrum mendapatkan akurasi rata-rata sebesar 90.17% sehingga teknik ini dapat digunakan sebagai monitoring kondisi motor yang menjanjikan. Sistem diagnosis secara real-time berbasis raspberry menghasilkan deteksi kerusakan dapat dilakukan dengan cepat.

Dari uji ANOVA menyatakan bahwa variasi kecepatan tidak mempengaruhi akurasi deteksi. Dari uji hipotesis tersebut dinyatakan bahwa tindakan monitoring kondisi mesin atau deteksi kerusakan dapat dilakukan kapan saja tanpa mempengaruhi kecepatan operasional motor. Hal ini sangat menguntungkan sehingga operasional motor tetap berjalan,

keandalan kerja motor tetap terjaga, dan efisien waktu.

V. RUJUKAN

- [1] R.N. Toma, A.E. Prosvirin, J.M. Kim. "Bearing Fault Diagnosis Of Induction Motors Using A Genetic Algorithm And Machine Learning Classifiers". *Sensors*, 20 (7), 1884. 2020.
- [2] C. Malla and I. Panigrahi. "Review Of Condition Monitoring Of Rolling Element Bearing Using Vibration Analysis And Other Techniques". *Journal of Vibration Engineering & Technologies*, 7(4), pp.407-414. 2019.
- [3] W.J. Lee, K. Xia, N.L. Denton, B. Ribeiro & J.W. Sutherland. "Development Of A Speed Invariant Deep Learning Model With Application To

- Condition Monitoring Of Rotating Machinery*". *Journal of Intelligent Manufacturing*, 32(2), pp. 393-406. 2021.
- [4] M. Karami, N.B. Mariun, M.Z.A. Ab-Kadir, N. Misron and M.A. Mohd Radzi. "Motor Current Signature Analysis-Based Non-Invasive Recognition Of Mixed Eccentricity Fault In Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor". *Electric Power Components and Systems*, 49 (1-2), pp.133-145. 2021.
- [5] A. Choudhary, T. Mian, and S. Fatima, 2021. "Convolutional neural network based bearing fault diagnosis of rotating machine using thermal images". *Measurement*, 176, p.109196. 2021.
- [6] T. Mohanraj, S. Shankar, R. Rajasekar, N.R. Sakthivel and A. Pramanik. "Tool Condition Monitoring Techniques In Milling Process A Review". *Journal of Materials Research and Technology*, 9 (1), pp.1032-1042. 2020.
- [7] D. Goyal, C. Mongia and S. Sehgal. "Applications Of Digital Signal Processing In Monitoring Machining Processes And Rotary Components: A Review". *IEEE Sensors Journal*, 21(7), pp.8780-8804. 2021.
- [8] D.K. Saha, S. Ahmed and M.S. Shaurov. "Different Machine Maintenance Techniques of Rotary Machine and Their Future Scopes: A Review". In *2019 4th International Conference on Electrical Information and Communication Technology (EICT)* (pp. 1-6). IEEE. 2019.
- [9] A.K. Sinha, P. Kumar and A.S. Hati. "ANN Based Fault Detection Scheme for Bearing Condition Monitoring in SRIMs using FFT, DWT and Band-pass Filters". In *2020 International Conference on Power, Instrumentation, Control and Computing (PICC)* (pp. 1-6). IEEE. 2020
- [10] Y.J. Yoo. "Fault Detection Of Induction Motor Using Fast Fourier Transform With Feature Selection Via Principal Component Analysis". *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 20 (9), pp.1543-1552. 2019.
- [11] N. Sikder, K. Bhakta, A. Al Nahid and M.M. Islam. "Fault Diagnosis Of Motor Bearing Using Ensemble Learning Algorithm With FFT-Based Preprocessing". *International Conference on Robotics, Electrical and Signal Processing Techniques (ICREST)* (pp. 564-569). IEEE. 2019.
- [12] F. Alvarez-Gonzalez, A. Griffio and B. Wang. "Permanent Magnet Synchronous Machine Stator Windings Fault Detection By Hilbert–Huang Transform". *The Journal of Engineering*, 2019 (17), pp.3505-3509. 2019.
- [13] T. Gao, W. Sheng, M. Zhou, B. Fang, F. Luo and J. Li. "Method For Fault Diagnosis Of Temperature-Related Mems Inertial Sensors By Combining Hilbert–Huang Transform And Deep Learning". *Sensors*, 20 (19), p.5633. 2020.
- [14] 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". *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 14(3), pp.1201-1210. 2019.
- [15] Y. Du, A. Wang, S. Wang, B. He and G. Meng. "Fault Diagnosis Under Variable Working Conditions Based On STFT And Transfer Deep Residual Network". *Shock and Vibration*, 2020.
- [16] C.T. Alexakos, Y.L. Karnavas, M. Drakaki and I.A. Tziafettas. "A Combined Short Time Fourier Transform And Image Classification Transformer Model For Rolling Element Bearings Fault Diagnosis In Electric Motors". *Machine Learning and Knowledge Extraction*, 3 (1), pp.228-242. 2021.
- [17] Y.M. Hsueh, V.R. Ittangihal, W.B. Wu, H.C. Chang and C.C. Kuo. "Fault Diagnosis System For Induction Motors by CNN Using Empirical Wavelet Transform". *Symmetry*, 11 (10), p.1212. 2019.
- [18] M.A. Hmida, A. Braham. "Fault Detection Of VFD-Fed Induction Motor Under Transient Conditions Using Harmonic Wavelet Transform". IEEE

- Transactions on Instrumentation and Measurement*, 69 (10), pp.8207-8215. 2020.
- [19] H. Nakamura, K. Asano, S. Usuda and Y. Mizuno. "A Diagnosis Method Of Bearing And Stator Fault In Motor Using Rotating Sound Based On Deep Learning". *Energies*, 14 (5), p.1319. 2021.
- [20] N.W. Nirwan, H.B. Ramani. "Condition Monitoring And Fault Detection In Roller Bearing Used In Rolling Mill By Acoustic Emission And Vibration Analysis". *Materials Today: Proceedings*, 51, pp.344-354. 2022.
- [21] M.R. Barusu, M. Deivasigamani. "Non-Invasive Vibration Measurement For Diagnosis Of Bearing Faults In 3-Phase Squirrel Cage Induction Motor Using Microwave Sensor". *IEEE Sensors Journal*, 21 (2), pp.1026-1039. 2020.
- [22] P. Ewert, C.T. Kowalski and T. Orłowska-Kowalska. "Low Cost Monitoring And Diagnosis System For Rolling Bearing Faults Of The Induction Motor Based On Neural Network Approach". *Electronics*, 9 (9), p.1334. 2020.
- [23] P. Gangsar and R. Tiwari. "Signal Based Condition Monitoring Techniques For Fault Detection And Diagnosis Of Induction Motors: A State-Of-The-Art Review". *Mechanical systems and signal processing*, 144, p.106908. 2020.
- [24] A. Burova. "Reducing The Error Of Digital Algorithms For Deductive Signal Processing Based On Their Multi-Stage Discrete Fourier Transform By The Difference Digital Filters". In 2020 22th International Conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA) (pp. 1-3). IEEE. 2020.
- [25] M.N.S.K. Shabbir, X. Liang, S. Chakrabarti, S. "An ANOVA-Based Fault Diagnosis Approach For Variable Frequency Drive-Fed Induction Motors". *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 36 (1), pp.500-512. 2020.
- [26] A. Klausen, H.V. Khang and K.G. Robbersmyr. "Multi-Band Identification For Enhancing Bearing Fault Detection In Variable Speed Conditions". *Mechanical Systems and Signal Processing*, 139, p.106422. 2020.
- [27] Y. Hu, X. Tu, F. Li, H. Li and G. Meng. "An Adaptive And Tachless Order Analysis Method Based On Enhanced Empirical Wavelet Transform For Fault Detection Of Bearings With Varying Speeds". *Journal of Sound and Vibration*, 409, pp.241-255. 2017.
- [28] T. Ameid, A. Menacer, H. Talhaoui and Y. Azzoug. "Discrete Wavelet Transform And Energy Eigen Value For Rotor Bars Fault Detection In Variable Speed Field-Oriented Control Of Induction Motor Drive". *ISA Transactions*, 79, pp.217-231. 2018.
- [29] J. Park, M. Hamadache, J.M. Ha, Y. Kim, K. Na, B.D. Youn. "A Positive Energy Residual (PER) Based Planetary Gear Fault Detection Method Under Variable Speed Conditions". *Mechanical Systems and Signal Processing*, 117, pp.347-360. 2019.
- [30] L. Wang, J. Xiang and Y. Liu. "A Time-Frequency-Based Maximum Correlated Kurtosis Deconvolution Approach For Detecting Bearing Faults Under Variable Speed Conditions". *Measurement science and technology*, 30 (12), p.125005. 2019.