

Diagnosa Kerusakan *Rolling Bearing* Motor Induksi Menggunakan Sinyal Suara

Novan D. Ramadhan¹, Adistra Shanda Syahputri², Pandu Arafi Putra Subagya³

¹PT. Dayasa Aria Prima Gresik

²Program Studi Teknologi Laboratorium Medik Universitas Airlangga Surabaya

³Program Studi Teknologi Kedokteran Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Korespondensi: adistra.anda.syahputri-2023@vokasi.unair.ac.id

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

DOI: <https://doi.org/10.30649/je.v4i2.112>

Abstrak

Monitoring kondisi motor induksi perlu dilakukan secara kontinyu. Biaya perawatan akan berkurang secara signifikan jika kesehatan motor terus terpantau. Tujuan monitoring kondisi yaitu untuk deteksi kerusakan secara dini sehingga menghindari kerusakan parah, meningkatkan keandalan, dan menghindari terhentinya operasional motor. Kerusakan elemen motor yang sering terjadi adalah kerusakan *bearing*. Penelitian ini mengembangkan sistem monitoring kondisi *bearing* berdasarkan analisis sinyal suara dimana proses monitoring dilakukan secara realtime. Dengan pengembangan sistem secara realtime maka memberikan solusi yang efektif dan tidak menyita waktu. Sensor yang murah dan mudah didapat ditawarkan pada pengembangan penelitian ini. Sinyal suara yang ditangkap oleh microphone secara langsung diolah dengan sistem pengolahan sinyal dan analisis spectrum. Monitoring kondisi dilakukan pada elemen *bearing* yaitu inner race, outer race, dan ball *bearing*. Hasil penelitian mendapatkan sistem monitoring yang handal dan menghasilkan diagnosis yang akurat dengan presentase sebesar 98.3 -100%.

Kata kunci: Motor induksi, *bearing*, sinyal suara, fast fourier transform, spectrum, *real-time*

Abstract

The monitoring of induction motor conditions is carried out continuously to significantly reduce maintenance costs. This monitoring of motor condition aims to quickly detect damages, toward avoiding severe destruction, increasing reliability, and averting operation cessation. From this context, the frequently occurring element destruction is the bearing damage. Therefore, this study aims to develop a bearing condition monitoring system through sound signal analysis, with the diagnostic processes carried out in real time. Since the development of a real-time system produces an effective solution that is not time-consuming, this analysis is then provided with cheap and easily available sensors. In this analysis, the sound frequency captured by the microphone was directly processed through a signal processing system and spectrum analysis. This indicated that monitoring was carried out on the conditions of some elements, namely inner, outer, and ball bearings. Based on the results, a reliable monitoring system with an accurate diagnosis level of 98.3-100% was determined.

Key words: induction motor, bearing, sound signal, fast fourier transform, spectrum, *real-time*

I. PENDAHULUAN

Motor induksi adalah peralatan elektromekanik yang digunakan untuk mengubah tenaga listrik menjadi tenaga mekanik. Motor induksi memiliki peranan penting dalam dunia industri yang berfungsi sebagai penggerak utama [1]. Jenis motor ini merupakan type yang paling banyak digunakan. Hal ini dikarenakan motor induksi memiliki kelebihan yaitu konstruksi sangat kuat, sederhana, harganya relatif murah, tingkat keandalannya tinggi, dan biaya pemeliharaan yang rendah [2].

Penggunaan motor induksi dalam jangka waktu lama akan mengalami kerusakan [3]. Kerusakan pada motor induksi yang sering ditemukan adalah *mechanical unbalance*, *bearing* dan rotor. Kerusakan *bearing* disebabkan karena kurangnya pelumasan, tekanan mekanis pada *ball bearing*, kerusakan *inner race*, *outer race*, dan korosi [4]. Berdasarkan hasil survei oleh *Electric Power Research Institute (EPRI)* dan *Institute of Electrical and Electronics Engineers Industry Applications Society (IEEE-IAS)* dari beberapa motor diperoleh bahwa kerusakan terbesar terletak pada *bearing* [5].

Sistem monitoring kondisi *bearing* dapat didiagnosis dengan dua metode yaitu teknik invasif dan non-invasif. Teknik invasif yaitu menggunakan sinyal arus yang dikenal dengan istilah Motor current signature analysis (MCSA), sedangkan teknik non-invasif dilakukan berdasarkan data termal, getaran dan suara [6].

Diagnosis sinyal untuk monitoring kondisi mesin dapat dilakukan dengan Transformasi Wafelet, Fast Fourier Transform (FFT), Transformasi Hilbert, dan Machine Learning [7]. FFT merupakan algoritma pemrosesan sinyal yang direkomendasikan karena aplikasinya sederhana, cocok untuk monitoring elemen mekanik dan memiliki akurasi tinggi [8]. Spectrum sinyal yang diolah oleh FFT dapat

memberikan informasi lokasi kerusakan elemen motor, sedangkan jika menggunakan Transformasi Wafelet tidak dapat menentukan dimanakah bagian yang mengalami kerusakan [9].

Monitoring kondisi motor dengan pengamatan lonjakan frekuensi *bearing* melalui software matlab merupakan metode yang cukup membutuhkan waktu lama [10]. Oleh karena itu diperlukan pengembangan diagnosis kondisi motor secara realtime untuk memangkas waktu pengerjaan [11]. Monitoring *bearing* secara realtime berdasarkan sinyal getaran dengan diagnosis time domain analysis menawarkan metode yang efisien [12]. Proses secara realtime dikembangkan berdasarkan sinyal getaran dan LabVIEW software, sehingga nilai amplitud dari setiap harmonik dapat ditampilkan secara langsung [13].

Effisiensi waktu yang ditawarkan oleh monitoring secara realtime merupakan pengembangan sistem monitoring yang menguntungkan. Penelitian ini mendiskusikan monitoring yang murah dan diagnosis secara realtime pada *outer race*, *inner race*, dan *ball bearing*. Sinyal suara merupakan teknik monitoring yang dipilih karena teknik ini tidak memerlukan kontak dengan elemen *bearing*. FFT diterapkan untuk mengolah sinyal suara dan diagnosis *bearing* menggunakan analisis spectrum. Software python dan miniPC raspberry pi dikembangkan untuk pemrosesan analisis spectrum secara realtime. Penelitian mendapatkan hasil presentase deteksi kerusakan *outer race* sebesar 100%, *inner race* sebesar 98.3%, dan *ball bearing* sebesar 100%.

II. METODE PENELITIAN

Kerusakan motor induksi dalam dunia industri tidak dapat diprediksi. Kerusakan yang tidak terduga menyebabkan berhentinya proses produksi dan perlu

dicegah dengan mendeteksi kerusakan secara dini. Motor induksi terdiri dari beberapa bagian mekanik dan listrik, seperti rangka motor, belitan stator, sangkar rotor, *bearing*, kipas, poros rotor dan lain-lain. Meskipun motor induksi dirancang dengan konstruksi yang kuat, motor induksi dihadapkan oleh situasi eksternal seperti, tegangan suplai yang tidak stabil, sumber arus suplai yang tidak stabil, dan kelebihan beban. Karena faktor situasi eksternal tersebut, kerusakan pada elemen motor induksi tidak terhindarkan. Jenis kerusakan pada motor induksi yaitu kerusakan rotor, stator, *bearing*, dan eksentrisitas celah udara [14].

Ketika motor beroperasi pada kondisi *bearing* yang rusak maka menghasilkan impuls periodic pada frekuensi *bearing* [15]. Lonjakan tersebut menandakan adanya ketidaknormalan elemen *bearing*. Frekuensi ini ditentukan oleh kinematika, geometri, dan kecepatan putar *bearing*. Frekuensi elemen *bearing* motor induksi memiliki frekuensi yang berbeda. Frekuensi untuk setiap bagian dari *bearing* dapat dilihat pada persamaan (1)-(4) [16].

Outer race bearing

$$f_o = \frac{N_b}{2} \cdot nm \cdot \left(1 - \frac{db \cdot \cos \alpha}{Dp}\right) \quad (1)$$

Inner race bearing

$$f_i = \frac{N_b}{2} \cdot nm \cdot \left(1 + \frac{db \cdot \cos \alpha}{Dp}\right) \quad (2)$$

Ball bearing

$$f_b = \frac{Dp}{2db} \cdot nm \cdot \left(1 - \frac{db \cdot \cos \alpha}{Dp}\right)^2 \quad (3)$$

Cage bearing

$$f_c = \frac{1}{2} \cdot nm \cdot \left(1 - \frac{db \cdot \cos \alpha}{Dp}\right) \quad (4)$$

Dimana N_b adalah jumlah ball, nm adalah kecepatan putar dalam rev/sec, db adalah diameter ball, Dp adalah diameter pitch, dan α adalah sudut kontak bola.

Secara umum monitoring kondisi mesin terdiri dari tiga langkah yaitu pengumpulan data yang relevan dari mesin (arus, getaran, suara, atau termal). Langkah kedua adalah pengolahan dan analisis data, dan ketiga adalah pengambilan keputusan diagnostic dan prognostic. FFT merupakan suatu algoritma perhitungan cepat yang digunakan untuk mentransformasikan sinyal domain waktu ke sinyal domain frekuensi.

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. Diagnosis kerusakan elemen motor dapat dideteksi dengan bantuan FFT [17].

Monitoring kondisi *bearing* pada penelitian ini menggunakan motor induksi tiga fasa yang mempunyai spesifikasi kapasitas daya 1,5 KW, tegangan 220/380 V, arus 6,36/3,68 A, dan Frekuensi 50 Hz. Gambar 1 menunjukkan sistem monitoring *bearing* yang digunakan untuk mengidentifikasi kondisi *bearing*. Rekondisi *bearing* merupakan kerusakan buatan sebagai kondisi uji. Rekondisi *bearing* uji berupa kecacatan retak, berlubang dan korosi.

Sistem monitoring kondisi *bearing* secara realtime memerlukan beberapa alat yaitu motor induksi 3 fasa, raspberry, lcd, dan microphone. Data suara dari motor sehat digunakan sebagai sinyal referensi. Pengolahan sinyal suara dan diagnosis kondisi *bearing* terprogram pada raspberry dengan software python. Hasil pengolahan sinyal secara realtime akan ditampilkan pada LCD, berupa grafik spectrum dan nilai amplitud dari setiap frekuensi *bearing*.

Bearing terdiri dari empat bagian utama yaitu *outer race*, *inner race*, *ball* dan *cage*. Setiap bagian *bearing* memiliki fungsi masing-masing yang berperan penting agar motor dapat bergerak dengan bebas. Spesifikasi *bearing* yang digunakan

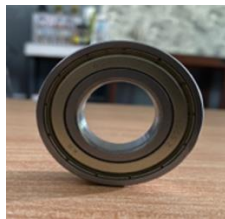
pada penelitian ini ditunjukkan pada Tabel 1.



Gambar 1. Konfiguasi sistem monitoring kerusakan *bearing*

Gambar 2 menunjukkan *bearing* kondisi sehat yang digunakan untuk operasional motor normal sebagai referensi. Pada Gambar 3 menunjukkan rekontruksi *bea-ring* uji dengan memberikan kecacatan pada *outer*, *inner* dan *ball*. *Outer* dan *inner race* diberi tiga variasi kerusakan yaitu retak, berlubang, korosi.

Rekondisi *bearing* retak dan korosi menggambarkan kondisi *bearing* dengan kerusakan ringan. Sedangkan kerusakan *bearing* berlubang merupakan gambaran kondisi *bearing* rusak parah, meskipun dalam kenyataan *bearing* dengan kondisi berlubang sulit ditemukan. Pada *ball bearing* diberi dua variasi kerusakan yaitu *ball* pecah 1, *ball* pecah 2.



Gambar 2. *Bearing* kondisi sehat



Gambar 3. Rekondisi *bearing* uji

Tabel 1. Spesifikasi *bearing*

Deskripsi	Spesifikasi
<i>Brand</i>	CSC
<i>Type</i>	6205 2R
<i>Inside Diameter (Inner)</i>	25 mm
<i>Number of Balls</i>	9 pieces
<i>Brand</i>	CSC
<i>Type</i>	6205 2R
<i>Ball Bearing Diameter</i>	7.25 mm
<i>Outside Diameter (Outer)</i>	52 mm

Diagnosis kondisi *bearing* membutuhkan algoritma FFT untuk mengubah sinyal dari *microphone* menjadi spectrum frekuensi. Diagnosis kondisi *bearing* dilakukan pada sinyal suara domain frekuensi. Jika terjadi lonjakan pada frekuensi *bearing* maka menandakan adanya ketidaknormalan elemen motor.

Berdasarkan spesifikasi *bearing* pada Tabel 1 dengan parameter $N_b = 9$, $db = 7.25$ mm, $\cos \alpha = 1$, kecepatan rotor 1498.1 rpm (tachometer) maka diameter *pitch* adalah sebagai berikut :

$$Dp = \frac{52 \text{ mm} + 25 \text{ mm}}{2} = 38.5 \text{ mm}$$

$$nm = \frac{1498.1}{60} = 24.9683 \text{ rev/sec}$$

Frekuensi *outer race bearing* adalah :

$$f_o = \frac{9}{2} \times 24.9683 \times \left(1 - \frac{7.25 \times 1}{38.5}\right) = 91.1 \text{ Hz}$$

dengan mengaplikasikan rumus (2) maka frekuensi *inner race bearing* :

$$f_i = \frac{9}{2} \times 24.9683 \times \left(1 + \frac{7.25 \times 1}{38.5}\right) = 133.5 \text{ Hz}$$

sedangkan frekuensi *ball bearing* :

$$f_b = \frac{38.5}{14.5} \times 24.9683 \times \left(1 - \frac{7.25 \times 1}{38.5}\right)^2 = 43.7 \text{ Hz}$$

Diagnosis kondisi *bearing* dilakukan sampai frekuensi harmonik ke-8. Sebenarnya pengamatan dapat dilakukan pada frekuensi fundamental, namun untuk meyakinkan hasil monitoring maka pada penelitian ini pengamatan frekuensi dilakukan sampai ke komponen frekuensi harmonik ke-8 pada setiap kasusnya. Tabel 2 menunjukkan frekuensi elemen *bearing*. Nilai frekuensi karakteristik *bearing* ini akan digunakan lebih lanjut untuk menentukan kondisi elemen *bearing*.

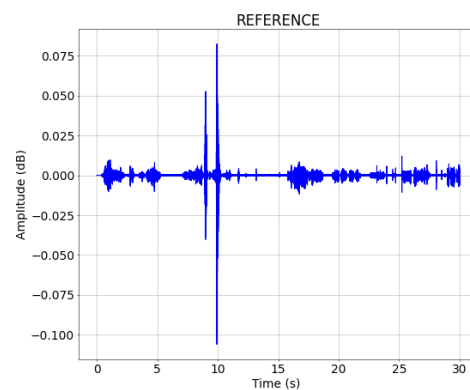
Tabel 2. *Bearing frequency*

Frekuensi <i>Bearing</i> (Hz)			
<i>Frequency harmonic</i>	<i>Outer race (f_o)</i>	<i>Inner race (f_i)</i>	<i>Ball (f_b)</i>
f_1	91.3	133.6	43.7
f_2	182.7	267.1	87.4
f_3	274.0	400.7	131.1
f_4	365.3	534.3	174.8
f_5	456.7	667.8	218.5
f_6	548.0	801.4	262.3
f_7	639.3	935.0	305.9
f_8	730.7	1068.5	349.6

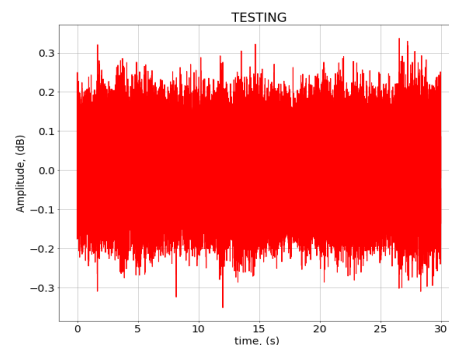
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini akan mendiskusikan karakteristik sinyal suara untuk monitoring kondisi *bearing*. Monitoring kondisi *bearing* secara realtime membutuhkan suara motor sehat sebagai referensi dimana suara tersebut dijadikan database yang tersimpan di raspberry. Sinyal yang ditangkap oleh microphone secara *realtime* akan diolah pada miniPC raspberry. Dimana pada raspberry telah tertanam program pengolahan sinyal dan analisis spectrum untuk memberikan informasi kondisi *bearing*. Data suara direcord selama 30 detik untuk mendapatkan informasi komponen harmonik elemen *bearing*. Tampilan hasil diagnosis berupa informasi karakteristik spectrum akan ditampilkan pada LCD

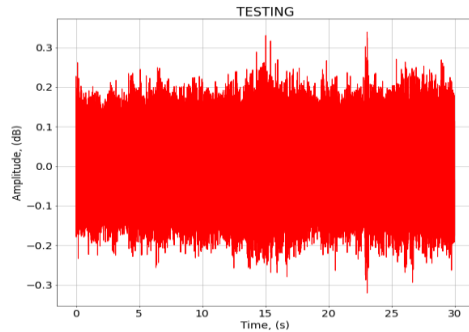
Sinyal suara yang ditangkap microphone merupakan sinyal dalam domain waktu. Sinyal suara motor sehat sebagai referensi dalam domain waktu bisa dilihat pada Gambar 4, sedangkan sinyal pengujian kondisi *outer race* dan *inner race* kondisi rusak ditunjukkan pada Gambar 5 dan Gambar 6. Sinyal suara kondisi motor sehat menunjukkan rata-rata amplitude berada di sekitar 0.0010 dB dan saat terjadi kerusakan elemen *bearing* akan mengalami kenaikan amplitude. Saat motor beroperasi dengan kondisi *outer race* retak memiliki amplitude rata-rata sebesar 0.24 dan *inner* korosi amplitude rata-rata sebesar 0.22. Disaat kondisi *bearing* mengalami kerusakan akan menimbulkan suara yang lebih kasar. Dari sinyal suara tersebut tidak dapat mengidentifikasi lokasi kerusakan elemen motor.



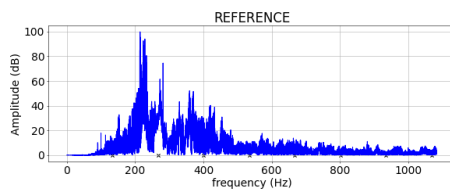
Gambar 4. Sinyal suara motor sehat sebagai referensi



Gambar 5. Sinyal suara motor kondisi *outer race bearing* retak



Gambar 6. Sinyal suara motor kondisi *inner race bearing* korosi



Gambar 7. Spectrum suara motor kondisi sehat sebagai referensi

```

OUTER RACE BEARING
frequency reference = 91.3 Hz with amplitude 1.0
frequency reference = 182.7 Hz with amplitude 5.0
frequency reference = 274.0 Hz with amplitude 42.0
frequency reference = 365.3 Hz with amplitude 24.0
frequency reference = 456.7 Hz with amplitude 20.0
frequency reference = 548.0 Hz with amplitude 10.0
frequency reference = 639.3 Hz with amplitude 2.0
frequency reference = 730.7 Hz with amplitude 3.0
[0.00086975]
0.0008697509765625
[24000.]
24000.0
Bearing Outer healthy

```

(a)

```

INNER RACE BEARING
frequency reference = 133.6 Hz with amplitude 4.0
frequency reference = 267.1 Hz with amplitude 27.0
frequency reference = 400.7 Hz with amplitude 9.0
frequency reference = 534.3 Hz with amplitude 3.0
frequency reference = 667.8 Hz with amplitude 5.0
frequency reference = 801.4 Hz with amplitude 1.0
frequency reference = 935.0 Hz with amplitude 2.0
frequency reference = 1068.5 Hz with amplitude 2.0
[0.00086975]
0.0008697509765625
[24000.]
24000.0
Bearing Inner healthy

```

(b)

```

BALL BEARING
frequency reference = 43.7 Hz with amplitude 0.0
frequency reference = 87.4 Hz with amplitude 1.0
frequency reference = 131.1 Hz with amplitude 5.0
frequency reference = 174.8 Hz with amplitude 5.0
frequency reference = 218.5 Hz with amplitude 39.0
frequency reference = 262.2 Hz with amplitude 28.0
frequency reference = 305.9 Hz with amplitude 10.0
frequency reference = 349.6 Hz with amplitude 22.0
[0.00086975]
0.0008697509765625
[24000.]
24000.0
Ball Bearing healthy

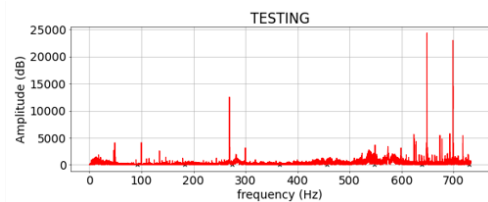
```

(c)

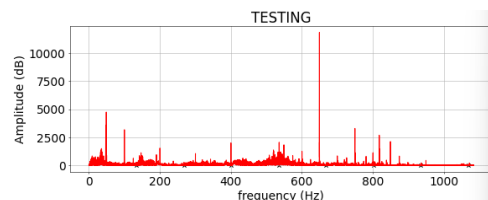
Gambar 8. Amplitude referensi, (a) frekuensi *outer race*, (b) frekuensi *inner race*, (c) frekuensi *ball bearing*

Langkah monitoring kondisi mesin selanjutnya adalah pengolahan dan analisis data. Setiap frekuensi harmonik elemen *bearing* yang disajikan pada Tabel 2 digunakan sebagai acuan analisis spectrum. Nilai amplitudo pengujian akan dibandingkan dengan nilai amplitudo referensi. Gambar 7 merupakan spectrum suara motor kondisi sehat sebagai referensi. Nilai amplitudo spectrum suara ditampilkan pada Gambar 8.

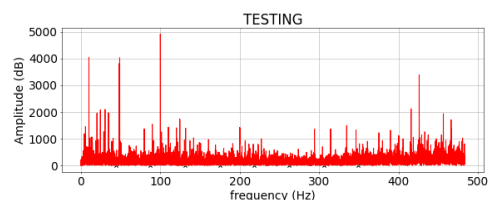
Gambar 8(a) merupakan spectrum frekuensi referensi untuk diagnosis kondisi *outer race bearing*, (b) *inner race bearing*, dan (c) *ball bearing*. Setelah mendapatkan nilai amplitudo referensi disetiap komponen frekuensi elemen *bearing*, langkah selanjutnya adalah menguji sistem monitoring yang telah dirancang dengan mengoperasikan motor kondisi *bearing* yang telah direkondisi.



(a)



(b)



(c)

Gambar 9. Spectrum suara untuk diagnosis elemen bearing, (a) *outer race*, (b) *inner race*, (c) *ball bearing*

Gambar 9 merupakan spectrum suara pengoperasian *bearing* uji yang telah direkondisi (a) Spectrum suara kondisi outer kondisi retak, (b) kondisi inner kondisi korosi dan (c) kondisi ball *bearing* pecah. Nilai amplitude referensi dan nilai amplitude pengujian akan dibandingkan untuk menentukan diagnosis kerusakan *bearing*.

Jika nilai amplitude pengujian lebih besar daripada nilai amplitude referensi, maka dapat dinyatakan *bearing* dalam kondisi rusak. Sedangkan jika nilai amplitude pengujian lebih kecil dari nilai amplitude referensi maka dapat dikatakan bahwa *bearing* dalam kondisi sehat dengan kata lain hasil diagnosis tidak valid karena tidak sesuai dengan kondisi sebenarnya. Sebagai contoh pengujian outer race pada frekuensi fundamental nilai amplitude mencapai 158 dB sedangkan amplitude referensi 1 dB, dari analisis spectrum dinyatakan bahwa outer race *bearing* mengalami kerusakan.

Pernyataan ini adalah valid karena kondisi pengujian pada kondisi outer race *bearing* retak. Dengan cara yang sama analisis spectrum dilakukan pada seluruh frekuensi harmonik elemen *bearing*. Gambar 10 merupaka diagnosis kerusakan pada masing-masing elemen *bearing*.

```

OUTER RACE BEARING
frequency reference = 91.3 Hz with amplitude 1.0
frequency reference = 182.7 Hz with amplitude 5.0
frequency reference = 274.0 Hz with amplitude 12.0
frequency reference = 365.3 Hz with amplitude 24.0
frequency reference = 456.7 Hz with amplitude 20.0
frequency reference = 548.0 Hz with amplitude 10.0
frequency reference = 639.3 Hz with amplitude 2.0
frequency reference = 730.7 Hz with amplitude 3.0
test frequency = 91.3 Hz with amplitude 54.0
test frequency = 182.7 Hz with amplitude 347.0
test frequency = 274.0 Hz with amplitude 596.0
test frequency = 365.3 Hz with amplitude 146.0
test frequency = 456.7 Hz with amplitude 596.0
test frequency = 548.0 Hz with amplitude 1199.0
test frequency = 639.3 Hz with amplitude 509.0
test frequency = 730.7 Hz with amplitude 527.0
[0.00086975]
0.0008697509765625
[1.374404951]
1.3744049072265625
Bearing Outer broken

```

(a)

```

INNER RACE BEARING
frequency reference = 133.6 Hz with amplitude 4.0
frequency reference = 267.1 Hz with amplitude 27.0
frequency reference = 400.7 Hz with amplitude 9.0
frequency reference = 534.3 Hz with amplitude 3.0
frequency reference = 667.8 Hz with amplitude 5.0
frequency reference = 801.4 Hz with amplitude 1.0
frequency reference = 935.0 Hz with amplitude 2.0
frequency reference = 1068.5 Hz with amplitude 10.0
test frequency = 133.6 Hz with amplitude 11.0
test frequency = 267.1 Hz with amplitude 67.0
test frequency = 400.7 Hz with amplitude 166.0
test frequency = 534.3 Hz with amplitude 184.0
test frequency = 667.8 Hz with amplitude 37.0
test frequency = 801.4 Hz with amplitude 84.0
test frequency = 935.0 Hz with amplitude 26.0
test frequency = 1068.5 Hz with amplitude 10.0
[0.00086975]
0.0008697509765625
[3.03153992]
3.0315399169921875
Bearing Inner broken

```

(b)

```

BALL BEARING
frequency reference = 43.7 Hz with amplitude 0.0
frequency reference = 87.4 Hz with amplitude 1.0
frequency reference = 131.1 Hz with amplitude 5.0
frequency reference = 174.8 Hz with amplitude 5.0
frequency reference = 218.5 Hz with amplitude 39.0
frequency reference = 262.2 Hz with amplitude 28.0
frequency reference = 305.9 Hz with amplitude 10.0
frequency reference = 349.6 Hz with amplitude 22.0
test frequency = 43.7 Hz with amplitude 287.0
test frequency = 87.4 Hz with amplitude 42.0
test frequency = 131.1 Hz with amplitude 45.0
test frequency = 174.8 Hz with amplitude 103.0
test frequency = 218.5 Hz with amplitude 274.0
test frequency = 262.2 Hz with amplitude 198.0
test frequency = 305.9 Hz with amplitude 57.0
test frequency = 349.6 Hz with amplitude 55.0
[0.00086975]
0.0008697509765625
[5.85148621]
5.8514862060546875
Ball Bearing broken

```

(c)

Gambar 10. Perbandingan amplitude diagnosis bearing kondisi mengalami kerusakan, (a) Diagnosis *outer race*, (b) Diagnosis *inner race*, (c) Diagnosis *ball bearing*

Untuk mendapatkan hasil yang meyakinkan, penelitian ini melakukan pengujian 5 kali pada setiap kasus yang sama. Untuk memberikan gambaran tingkat kerusakan elemen *bearing* maka dibuatlah tingkatan variasi rekondisi *bearing*. Tiga tingkatan rekondisi outer race yaitu retak, berlubang, dan korosi. Sistem monitoring dan diagnosis kondisi outer race *bearing* dengan pengujian tiga tingkat rekondisi menghasilkan akurasi monitoring sebesar 100%.

Rekondisi inner race *bearing* juga menggunakan tiga tingkatan kondisi kerusakan yaitu inner retak, berlubang, dan korosi. Hasil monitoring dari pendekatan yang ditawarkan mendapatkan persentase akurasi 100% pada pengujian inner retak, 100% pada pengujian inner berlubang dan 95% pada pengujian inner korosi. Pengujian pada pengoperasian inner race kondisi korosi mendapatkan persentase 95% karena pengujian ke-3 dan ke-4 terdapat satu titik frekuensi harmonik yang menyatakan sehat.

Sedangkan pengujian monitoring kondisi ball *bearing* menggunakan 2 rekondisi yaitu *ball bearing* pecah satu dan pecah dua. Dari pengujian didapatkan persentase akurasi 100% pada kedua tingkat rekondisi. Total rata-rata persentase akurasi monitoring masing-masing element yaitu *outer race* sebesar 100%, *inner race*

sebesar 98.3%, dan ball *bearing* sebesar 100%. Akurasi monitoring dengan biaya rendah dan diagnosis secara realtime dengan pendekatan yang ditawarkan memberikan akurasi yang tinggi sehingga pengembangan sistem monitoring kondisi motor ini dapat digunakan sebagai alternatif yang menjanjikan.

Tabel 3. Akurasi monitoring *bearing*

test	Akurasi monitoring (%)							
	Outer race			Inner race			Ball	
	Retak	Lubang	Korosi	Retak	Lubang	Korosi	Pecah 1	Pecah 2
1	100	100	100	100	100	100	100	100
2	100	100	100	100	100	87.5	100	100
3	100	100	100	100	100	100	100	100
4	100	100	100	100	100	87,5	100	100
5	100	100	100	100	100	100	100	100

IV. SIMPULAN

Penelitian ini membahas tentang monitoring kondisi bearing secara realtime berdasarkan sinyal suara dengan pengolahan sinyal menggunakan FFT. Penelitian secara realtime lebih memudahkan karena bisa langsung mengetahui hasil monitoring dengan dilengkapi analisis spectrum yaitu nilai amplitud dari setiap frekuensi *harmonic bearing*. Pada penelitian ini membuktikan bahwa sistem monitoring kondisi bearing secara *realtime* dapat mendeteksi kerusakan sesuai dengan kondisi yang sebenarnya.

Sistem monitoring dapat mendiagnosis kondisi bearing dengan kerusakan ringan (korosi) bahkan kerusakan parah (berlubang dan pecah). Persentase akurasi monitoring kondisi *outer race bearing* sebesar 100%, *inner race bearing* sebesar 98.3% dan *ball bearing* sebesar 100%. Signifikasi hasil penelitian adalah monitoring dapat dilakukan dengan cara yang sederhana, murah, dan tidak memerlukan waktu yang lama, namun akurasi moni-

toring sangat menjanjikan. Pengembangan monitoring kondisi bearing yang ditawarkan sangat penting adanya sebagai tool perawatan tepat waktu. Pengembangan lanjutan disarankan untuk monitoring pada elemen motor lainnya misalnya rotor dan stator motor.

V. RUJUKAN

- [1] X. Liang, M.Z. Ali and H. Zhang, "Induction Motors Fault Diagnosis Using Finite Element Method: A Review," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 56, no. 2, pp. 1205-1217, March-April 2020.
- [2] D.F. de Souza, F.A.M. Salotti, I.L. Sauer, H. Tatizawa, A.T.de Almeida, & A.G. Kanashiro. "A Performance Evaluation of Three-Phase Induction Electric Motors between 1945 and 2020." *Energies*, 15(6), 1–31. 2022. doi: 10.3390/en15062002.
- [3] I.D.P. Karyatanti, R.S. Zulkifli, A. Noersena, F.R. Purnomo, B.Y. Dewantara & A.Wijayanto. "Identification Of Ball Bearing Damage On Induction Motors Through Sound Signal Analysis". *Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 15(1), 33–38. 2022.
- [4] Diah, I., Karyatanti, P., Noersena, A., Purnomo, F. R., Zulkifli, R. S., & Wijayanto, A. "Analysis of Outer Race Bearing Damage by Calculation of Sound Signal Frequency Based on the FFT Method". 28–39. 2023.
- [5] I.P.K. Diah, B.Y. Dewantara, D. Rahmatullah, I. Winarno, & C. Hidayanto. "Decomposition Wavelet Transform As Identification Of Outer Race Bearing Damage Through Stator Flow Analysis In Induction Motor". *International Conference on Information and Communications Technology, ICOIAC 2019, July*, 733–737. 2019. doi:10.1109/ICOIAC46704.2019.8938512.
- [6] T.A. Dhomad, A.A. Jaber. "Bearing Fault Diagnosis Using Motor Current

- Signature Analysis And The Artificial Neural Network*". *International Journal On Advanced Science, Engineering And Information Technology*, 10 (1), 70–79. 2020. doi: 10.18517/ijaseit.10.1.10629
- [7] V. Barai, S.M. Ramteke, V. Dhanal-kotwar, Y. Nagmote, S. Shende, & D. Deshmukh. "Bearing Fault Diagnosis Using Signal Processing And Machine Learning Techniques": A review. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1259 (1), 012034. 2022. doi: 10.1088/1757899x/12-59/1/012034.
- [8] H. Nakamura, K. Asano, S. Usuda, & Y. Mizuno. "A Diagnosis Method Of Bearing And Stator Fault in Motor Using Rotating Sound Based on Deep Learning". *Energies*, 14(5), 1319. 2021. doi: 10.3390/en14051319
- [9] C.Y. Lee, & Y.H. Cheng. "Motor Fault Detection Using Wavelet Transform And Improved Pso-Bp Neural Network". *Processes*, 8(10), 1–16. 2020. doi: 10.3390/pr8101322
- [10] M. Jalayer, A. Kaboli, C. Orsenigo, & C. Vercellis. "Fault Detection and Diagnosis with Imbalanced and Noisy Data: A Hybrid Framework for Rotating Machinery". *Machines*, 10(4), 1–22. 2022. doi: 10.3390/machi-nes10040237
- [11] G. Wu, T. Yan, G. Yang, H. Chai, & C. Cao. "A Review on Rolling Bearing Fault Signal Detection Methods Based on Different Sensors". *Sensors*, 22 (21). 2022. doi: 10.3390/s22218330
- [12] 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. doi: 10.3390/electronics9091334
- [13] S. Jawad, A. Jaber. "Bearings Health Monitoring Based on Frequency-Domain Vibration Signals Analysis". *Engineering and Technology Journal*, 41(1), 86–95. 2022. doi: 10.30684/etj.-2022.131581.1043
- [14] T.G. Calva, D.M Sotelo, V.F Caverro, R. R Troncoso. "Early Detection of Faults in Induction Motors A Review". *Energies*, 15 (21), 7855. 2022. doi : 10.3390/en15217855
- [15] S. Muthukumaran, A. Rammohan, S. Sekar, M. Maiti, & K. Bingi. "Bearing Fault Detection In Induction Motors Using Line Currents". *ECTI Transactions on Electrical Engineering, Electronics, and Communications*, 19 (2), 209–219. 2021. doi: 10.3-7936/ECTI-EEC.2021192.244163
- [16] 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(xxxx), 344–354. 2021. doi: 10.1016/j.matpr.2021.05.447
- [17] D. Goyal, C. Mongia, 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. doi: 10.1109/JSEN.2021.3050718