

Placement for Condition Monitoring of Rotating Machine Elements Based on HSD

Penempatan untuk Pemantauan Kondisi Elemen Mesin Berputar Berdasarkan HSD

Iradiratu Diah Prahmana Karyatanti^{1*}, Muhammad Hakim Ramadhan²

^{1,2} Teknik Elektro, Fakultas Teknik dan Ilmu Kelautan, Universitas Hang Tuah, Indonesia

¹iradiratu@hangtuah.ac.id

²mhakinr15@gmail.com

Abstract _ Careful placement and selection of sensors is the key to accurate motorbike monitoring. This research aims to develop an optimal sound sensor placement strategy for monitoring the condition of induction motor bearing elements. Sensor placement will affect monitoring accuracy. The nature of sound signals is that they easily overlap with surrounding sounds. Different placement of sound sensors will provide opportunities for non-motor sounds to overlap. The bearing condition monitoring system was developed in real time by processing sound signals using fast Fourier transform (FFT). The sensor placement strategy needs to be taken into account so that monitoring results obtain high accuracy. The honestly significant difference (HSD) approach is a test used to determine the best sensor placement. Tests were carried out with variations in the placement of sound sensor distances and different levels of bearing damage. The results of the research are the best sensor placement at a distance of 110 cm from the motor body with a detection accuracy of 94.14%.

Keywords: Bearing; FFT; spectrum; honestly significant difference

Abstrak _ Penempatan dan pemilihan sensor yang tepat merupakan kunci monitoring motor yang akurat. Penelitian ini bertujuan mengembangkan strategi penempatan sensor suara yang optimal untuk monitoring kondisi element bearing motor induksi. Penempatan sensor akan mempengaruhi akurasi monitoring. Sifat sinyal suara adalah mudah ber-overlapping dengan suara sekitar. Penempatan sensor suara yang berbeda akan memberikan peluang suara non-motor untuk ber-overlapping. Sistem monitoring kondisi bearing dikembangkan secara realtime dengan pengolahan sinyal suara menggunakan fast fourier transform (FFT). Strategi penempatan sensor perlu diperhitungkan agar hasil monitoring mendapatkan keakuratan yang tinggi. Pendekatan honestly significant difference (HSD) merupakan uji yang digunakan untuk menentukan penempatan sensor terbaik. Pengujian dilakukan dengan variasi penempatan jarak sensor suara dan tingkat kerusakan bearing yang berbeda. Hasil penelitian adalah penempatan sensor terbaik pada jarak 110 cm dari badan motor dengan akurasi deteksi sebesar 94.14%.

Kata Kunci: Bearing; FFT; spectrum; honestly significant difference

I. INTRODUCTION

Motor induksi adalah mesin listrik yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Motor induksi biasanya banyak digunakan di industri karena handal, konstruksinya sederhana, perawatannya mudah dan berharga murah [1]. Di industri motor induksi digunakan sebagai penggerak utama dan berperan sangat penting. Untuk mempertahankan kontinuitas produksi industri, maka motor induksi harus terjaga keandalannya agar terhindar dari kerusakan [2]. Ketika motor induksi beroperasi dalam waktu yang lama maka akan mengalami kerusakan. Kerusakan motor induksi terdapat beberapa kategori yaitu : kerusakan elektrik (tegangan, arus, dan grounding tidak normal), kerusakan mekanik (patahnya poros *rotor* dan kerusakan *bearing*), dan kerusakan pengaruh *eksternal* (suhu dan kelembaban lingkungan sekitar) [3]. Kerusakan yang sangat berpengaruh pada motor induksi adalah kerusakan *bearing* [4]. Kerusakan *bearing* disebabkan kurang pelumasan, korosi, aus, dan kelebihan beban. Kerusakan bearing motor induksi bisa menyebabkan terjadinya getaran, kebisingan, peningkatan suhu, dan munculnya bunga api yang nantinya akan menyebabkan kerusakan yang merambat pada elemen motor induksi yang lain [5][6]. Untuk menghindari dampak tersebut diperlukan sistem monitoring kondisi motor [7].

Monitoring kondisi motor bertujuan menjaga keandalan, menekan biaya perawatan, tindakan perawatan tepat waktu, dan pencegahan kerusakan yang parah [8]. Monitoring kondisi motor dapat dilakukan dengan teknik invasive dan non-invasive. Teknik invasive memerlukan sensor yang ditempatkan pada elemen mesin sedangkan teknik non-invasive tidak memerlukan kontak langsung dengan elemen mesin [9]. Motor Current Signature Analysis (MCSA) adalah teknik monitoring berbasis data arus *stator* motor [10] [11]. MCSA banyak dikembangkan oleh peneliti karena dinilai sinyal arus tidak mudah terkontaminasi sinyal lain, namun MCSA hanya handal digunakan untuk memonitoring elemen motor yang teraliri arus (rotor dan stator) [12]. *Motor Vibration Signature Analysis* (MVSA) adalah teknik monitoring non invasive berdasarkan data getaran motor. MVSA memiliki keunggulan yaitu tidak memerlukan kontak langsung dengan bagian motor yang akan dimonitoring [13]. MVSA mempunyai kelemahan yaitu memerlukan sensor getaran dengan permukaan yang kecil untuk mendapatkan akurasi

tinggi dan berharga mahal. Monitoring teknik non invasive yang lain adalah berbasis data *thermal* (suhu). Keunggulan dari monitoring tersebut dapat terbilang sederhana, namun disisi lain jika terjadi kesalahan pengambilan data, sensor membutuhkan waktu cukup lama untuk pengambilan data berikutnya [14] [15]. Monitoring menggunakan sinyal suara merupakan salah satu teknik non-invasive yang memerlukan biaya relatif murah. Kelemahan teknik ini yaitu *noise external* atau suara non- mesin dapat dengan mudah tertangkap sensor [16]. Penempatan sensor suara memberikan pengaruh sensitivitas sehingga mempengaruhi akurasi hasil monitoring [17]. Strategi penempatan sensor perlu diteliti agar mendapatkan proses diagnostic dan prognostic yang tepat.

Penelitian ini akan membahas monitoring kondisi bearing berdasarkan sinyal suara dengan pengembangan strategi penempatan sensor yang optimal. Mengingat suara mudah *overlapping* dengan suara dari sumber lain, maka pada penelitian diuji pengaruh penempatan sensor terhadap akurasi monitoring. Pengujian dengan variasi penempatan sensor dimaksudkan untuk memberikan peluang noise suara sekitar ber-overlapping dengan suara motor uji. Penelitian ini akan melakukan pengujian terhadap *bearing*. Monitoring dan diagnosis dilakukan secara *realtime* menggunakan *raspberry* dengan algoritma pemrosesan sinyal suara menggunakan fast fourier transform (FFT). Strategi penempatan sensor dengan akurasi yang tinggi diuji dengan Honestly Significant Difference (HSD) yang sebelum data akurasi monitoring melewati uji Completely Randomized Design (CRD). Signifikansi hasil penelitian adalah sistem monitoring yang dikembangkan dilakukan secara *realtime* sehingga tidak memerlukan waktu dalam proses diagnosis dan strategi penempatan sensor suara yang tepat memberikan kontribusi akurasi monitoring yang tinggi.

II. METHODS

2.1. Konfigurasi Sistem

Sistem monitoring kondisi motor dengan pengembangan strategi penempatan sensor yang optimal dikembangkan pada penelitian ini. Gambar 1 menunjukkan langkah proses monitoring kondisi bearing dengan pengembangan strategi penempatan sensor. Konfigurasi sistem monitoring memerlukan beberapa peralatan penunjang yaitu motor induksi 3

fasa, mikrofon, Raspberry Pi dengan program python, sensor suara, dan LCD display untuk menampilkan grafik dan hasil monitoring. Gambar 2 menunjukkan konfigurasi sistem monitoring motor. Bearing merupakan objek yang diteliti, dimana elemen bearing yang dimonitoring adalah outer-race, inner-race, dan ball bearing. Penempatan sensor merupakan variabel perlakuan yang mempengaruhi akurasi monitoring. Perlakuan penempatan sensor suara adalah jarak 10 cm, 60 cm, 110 cm, 160 cm, dan 210 cm yang diukur dari badan motor. Microphone sebagai sensor suara akan merecord suara motor saat beroperasi. Kemudian sinyal suara tersebut akan diolah untuk proses diagnosis kondisi bearing yang terpusat pada Raspberry Pi dan hasil monitoring akan ditampilkan pada LCD display.

[Figure 1 about here.]

[Figure 2 about here.]

2.2. Frekuensi Bearing

Disaat bearing bekerja pada kondisi rusak maka akan menimbulkan impuls yang periodic pada frekuensi tertentu. Impuls tersebut dapat dikata sebagai characteristic defect frequencies. Bearing terdiri dari inner race bearing, outer race bearing, cage dan ball bearing. Perubahan kecepatan putar rotor dapat mempengaruhi karakteristik frekuensi bearing. Persamaan (1)-(3) adalah perhitungan frekuensi elemen bearing dimana Nb merupakan jumlah ball, nm adalah kecepatan putar, db adalah diameter ball, Dp adalah diameter pitch, dan α adalah sudut kontak bola [18].

$$\text{Outer race bearing } f_o = \left(\frac{Nb}{2} \times nm\right) \left(1 - \frac{db}{Dp} \times \cos \alpha\right) \quad (1)$$

$$\text{Inner race bearing } f_i = \left(\frac{Nb}{2} \times nm\right) \left(1 + \frac{db}{Dp} \times \cos \alpha\right) \quad (2)$$

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

Frekuensi bearing berulang disetiap komponen harmoniknya dengan bertambahnya konstanta [19]. f_p merupakan komponen frekuensi periodic bearing, f_v merupakan frekuensi karakteristik elemen bearing yang didapat dari persamaan (1)-(3), dan k merupakan konstanta $k = 1, 2, 3, 4 \dots$. Maka komponen frekuensi harmonik elemen bearing adalah ..

$$f_p = |k \times f_v| \quad (4)$$

Untuk menggambarkan bearing kondisi rusak

maka dilakukan rekontruksi bagian bearing dengan memberikan kerusakan buatan. Gambar 2 menunjukkan bearing dalam kondisi rusak sebagai objek pengujian. Kerusakan bearing biasanya diawali dengan kerusakan yang ringan, jika tidak segera diatasi maka bearing akan mengalami kerusakan yang parah. Terdapat 3 kasus kerusakan bearing yaitu Fault#1 (outer race bearing retak), Fault#2 (inner race bearing lubang), dan Fault#3 (ball bearing pecah). Rekontruksi bearing dengan cacat buatan dilakukan dengan maksud untuk menguji sistem monitoring apakah dapat mendeteksi kerusakan atau tidak. Jika sistem monitoring yang dirancang dapat mendeteksi kondisi bearing yang sebenarnya (rusak) maka hasil monitoring akurat.

[Figure 3 about here.]

Spesifikasi bearing yang digunakan untuk pengujian adalah type 6205 2R, outside diameter = 52 mm, inside diameter = 25 mm, diameter ball (db) = 7.25 mm, dan jumlah bearing (Nb) 9 buah. Jika kerusakan terjadi pada motor maka akan menyebabkan ketidakseimbangan putar rotor. Kerusakan elemen bearing mengakibatkan perubahan karakteristik spektrum suara motor. Monitoring elemen bearing menggunakan pendekatan analisis spectrum yang memerlukan nilai frekuensi bearing. Dengan data spesifikasi bearing dan mengaplikasikan persamaan (1)-(4) didapatkan frekuensi bearing yang ditunjukkan Tabel 1, dimana $nm = 1499.9$ didapat dari pengukuran tachometer. Komponen frekuensi harmonik diamati sampai $k - 8$. Semakin banyak komponen harmonik yang diamati maka hasil monitoring semakin meyakinkan.

[Tabel 1 about here.]

2.3. CRD and HSD

Pendekatan CRD digunakan untuk uji hipotesis apakah penempatan sensor memberikan pengaruh terhadap akurasi monitoring. Persamaan CRD adalah :

$$Y_{ij} = \pi + \tau_i + \varepsilon_{ij} \quad (5)$$

Dimana : Y_{ij} = pengamatan pada treatment ke-i dan ulangan ke-j, π = rata-rata umum, τ_i = pengaruh treatment ke-i, ε_{ij} = pengaruh acak pada treatment ke-

i, ulangan ke-j, $i = 1, 2, \dots, t$ dan $j = 1, 2, \dots, r$.

Jika H_0 ditolak maka langkah selanjutnya adalah analisis strategi penempatan sensor terbaik menggunakan pendekatan HSD [20]

$$|t| = \frac{|y_i - y_j|}{\sqrt{MSE\left(\frac{1}{n_i} + \frac{1}{n_j}\right)}} > \frac{1}{\sqrt{2}} q_{\alpha, k, N-k} \quad (6)$$

Dimana y_i and y_j adalah sample mean of the group i and j , n_i dan n_j merupakan sample size group, MSE is mean squared error, α adalah taraf signifikansi, $q_{\alpha, k, N-k}$ adalah tabel Tukey, k adalah jumlah kelompok, dan N adalah total jumlah observasi.

III. RESULTS AND DISCUSSION

Analisis spectrum merupakan pendekatan yang digunakan untuk monitoring kondisi bearing. Dimana pada penelitian ini akan didiskusikan karakteristik sinyal suara yang didapat dari kondisi bearing rusak dengan perlakuan penempatan sensor dengan jarak 10 cm, 60 cm, 110 cm, 160 cm, 210 cm dari badan motor. Hal ini berdasarkan penelitian referensi bahwa pengambilan jarak ukur harus dalam interval yang konsisten yaitu kenaikan 50cm. Dalam perhitungan HSD interval perlakuan harus konsisten agar data mendekati homogen [21]. jika Variasi jarak penempatan suara sangat mempengaruhi hasil analisis karena semakin jauh jarak pengukuran akan menambah peluang sinyal suara motor overlapping dengan sinyal suara non-motor H_1 . Untuk mendiagnosa kondisi motor diperlukan sinyal suara motor kondisi sehat sebagai referensi. Pengulangan monitoring dilakukan 5 kali pada setiap perlakuan.

3.1. Feature Generation (Frequency Domain)

Sinyal suara referensi dan sinyal uji (pengoperasian bearing kondisi rusak) dengan penempatan sensor 10 cm disajikan pada Gambar 4 sampai Gambar 6. Sinyal suara didapat dari mikrofon sebagai sensor suara dengan time sampling sebesar 48 KHz dengan durasi perekaman selama 30 detik.

[Figure 4 about here.]

[Figure 5 about here.]

[Figure 6 about here.]

Sinyal warna biru merupakan sinyal suara referensi yang didapatkan dari pengoperasian motor sehat dan telah disimpan sebagai data base pada raspberry. Sinyal warna merah adalah sinyal suara pengujian bearing kondisi rusak. Jika diamati sinyal suara uji menunjukkan amplitudo lebih besar dibandingkan dengan amplitudo sinyal suara referensi. Hal ini menunjukkan adanya sesuatu yang tidak normal pada bagian motor. Kelemahan monitoring kondisi bearing dengan pendekatan analisis domain waktu adalah tidak dapat menentukan lokasi kerusakan. Oleh karena itu perlu dilakukan pengolahan sinyal suara lanjutan untuk mengetahui karakteristik frekuensi suara.

3.2. Feature Extraction (spectrum analysis)

Langkah feature extraction diambil untuk mengetahui kondisi elemen bearing dengan analisis spectrum. FFT digunakan untuk mengolah sinyal suara dari domain waktu ke dalam domain frequency. Gambar 7 hingga Gambar 9 adalah spektrum frekuensi yang dihasilkan dari pengolahan FFT. Untuk mengetahui kondisi elemen bearing perlu diamati amplitudo pada frekuensi bearing. Amplitudo di setiap frekuensi pada Tabel 1 akan dibandingkan dengan amplitudo referensi. Ketika amplitudo sinyal uji lebih besar daripada amplitudo referensi maka dapat dikatakan kondisi bearing rusak. Sebaliknya jika amplitudo sinyal suara referensi lebih besar dari sinyal uji maka dapat dikatakan kondisi bearing sehat.

[Figure 7 about here.]

[Figure 8 about here.]

[Figure 9 about here.]

Analisis spectrum untuk masing-masing pengujian ditunjukkan Gambar 10 hingga Gambar 12, dimana hasil analisis kondisi bearing berupa perbandingan amplitudo referensi dan pengujian. Jika hasil monitoring menyatakan bearing kondisi rusak maka hasil tersebut valid dikarenakan kondisi bearing uji dalam kondisi telah mengalami rekontruksi. Presentasi akurasi pada setiap pengujian dihitung dari perbandingan jumlah pernyataan bearing kondisi rusak dibagi dengan jumlah frekuensi harmonic bearing. Pengujian dilakukan sebanyak 5 kali pengulangan pada setiap kasus kerusakan dan variasi penempatan sensor. Tabel 2 merupakan tabulasi data akurasi monitoring pada semua kondisi bearing uji dan

perlakuan penempatan sensor suara.

[Figure 10 about here.]

[Figure 11 about here.]

[Figure 12 about here.]

[Tabel 2 about here.]

3.3. Strategi Penempatan Sensor

Tabulasi akurasi monitoring terhadap penempatan sensor akan diuji dengan pendekatan CRD. Keabsahan data uji harus dari populasi yang homogen dan normal. Dari uji Anderson-darling didapatkan P-value sebesar 0.068 (>0.05) maka data telah terdistribusi normal. Sedangkan uji homogenitas menggunakan pendekatan lavene's test dengan P-value 0.697 (>0.05) yang berarti data uji telah homogen. Tabel 3 merupakan analisis varian dari akurasi monitoring dengan nilai signifikansi sebesar 95%.

[Tabel 3 about here.]

[Figure 13 about here.]

Dari analisis of variance didapatkan nilai P-value bernilai 0.001 ($<5\%$), hal ini menunjukkan bahwa penempatan sensor memberikan pengaruh signifikan terhadap akurasi monitoring. Penempatan terbaik diperoleh dari uji HSD, dimana pendekatan ini akan membandingkan seluruh pasangan rata-rata perlakuan. Gambar 13 merupakan hasil uji HSD dengan tingkat confidence sebesar 95%, didapatkan bahwa penempatan sensor dengan jarak 110cm merupakan lokasi yang terbaik untuk monitoring kondisi element bearing. Penempatan sensor dengan jarak 110 dari badan motor akan mendapatkan akurasi monitoring sebesar 94.14%. Tabel 4 merupakan perbandingan penelitian yang serupa dengan bahasan pengaruh penempatan sensor untuk monitoring kondisi motor. Beberapa peneliti menggunakan multisensor untuk mendapatkan informasi yang sebanyak-banyaknya tanpa bahasan strategi yang optimal. Jika dibandingkan hasil penelitian ini memberikan kontribusi pengembangan sistem monitoring yang murah, sederhana, dan akurasi monitoring yang menjanjikan.

[Tabel 4 about here.]

IV. CONCLUSION

Penelitian ini membahas tentang monitoring kondisi bearing dengan pengembangan strategi penempatan sensor yang optimal. Monitoring yang dikembangkan dilakukan secara realtime sehingga diagnosis tidak memerlukan waktu yang lama. Melalui pendekatan analisis spectrum didapatkan bahwa sistem monitoring dapat mendeteksi keadaan elemen motor yang handal. Penempatan sensor memberikan pengaruh terhadap akurasi monitoring. Pada penelitian ini membuktikan bahwa adanya penurunan akurasi jika sensor suara diletakkan terlalu jauh. Dengan uji HSD didapatkan penempatan sensor yang optimal pada jarak 110 cm dari badan motor dengan akurasi monitoring sebesar 94.14 %. Akurasi monitoring yang tinggi sangat berguna untuk diagnostic dan prognostic kondisi motor agar kerusakan parah dapat dihindari bahkan mencegah terhentinya operasional motor.

V. ACKNOWLEDGEMENTS

Penelitian ini didukung oleh tim peneliti di Laboratorium Teknik Elektro Universitas Hang Tuah. Kami ingin mengucapkan terimakasih kepada rekan-rekan kami dari tim yang memberikan wawasan, keahlian, komentar dan sarannya yang berguna untuk melakukan penelitian ini.

REFERENCES

- [1] S. K. Gundewar and P. V. Kane, *Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Induction Motor*, vol. 9, no. 4. Springer Singapore, 2021. doi: 10.1007/s42417-020-00253-y.
- [2] X. Song, Z. Wang, and J. Hu, "Detection of Bearing Outer Race Fault in Induction Motors using Motor Current Signature Analysis," *2019 22nd Int. Conf. Electr. Mach. Syst. ICEMS 2019*, pp. 1–5, 2019, doi: 10.1109/ICEMS.2019.8922036.
- [3] O. AlShorman *et al.*, "Sounds and acoustic emission-based early fault diagnosis of induction motor: A review study," *Adv. Mech. Eng.*, vol. 13, no. 2, pp. 1–19, 2021, doi: 10.1177/1687814021996915.
- [4] A. Kundu, Institute of Electrical and Electronics Engineers, Institute of Electrical and Electronics Engineers. Kolkata Section. PES Chapter, and Institute of Electrical and Electronics Engineers. Kolkata Section, "2020 IEEE International Conference for Convergence in Engineering: proceedings : 5-6 September, Kolkata, India," pp. 16–20, 2020.
- [5] M. Sameh, A. Tarek, and K. Yassine, "Bearing and Rotor Faults detection and diagnosis of Induction Motors using Statistical Neural Networks," *Proc. - STA 2020 20th Int. Conf. Sci. Tech. Autom. Control Comput. Eng.*, pp. 77–81, 2020, doi:

- 10.1109/STA50679.2020.9329334.
- [6] P. Gangsar and R. Tiwari, "Signal based condition monitoring techniques for fault detection and diagnosis of induction motors: A state-of-the-art review," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 144, p. 106908, 2020, doi: 10.1016/j.ymssp.2020.106908.
- [7] W. J. Lee, K. Xia, N. L. Denton, B. Ribeiro, and J. W. Sutherland, "Development of a speed invariant deep learning model with application to condition monitoring of rotating machinery," *J. Intell. Manuf.*, vol. 32, no. 2, pp. 393–406, 2021, doi: 10.1007/s10845-020-01578-x.
- [8] F. Bethke, L. Brabetz, and M. Ayeb, "Condition Monitoring of Electrical Machines Using Detection Coils," *IEEE Int. Symp. Ind. Electron.*, vol. 2019-June, pp. 261–266, 2019, doi: 10.1109/ISIE.2019.8781090.
- [9] M. R. Barusu and M. Deivasigamani, "Non-Invasive Vibration Measurement for Diagnosis of Bearing Faults in 3-Phase Squirrel Cage Induction Motor Using Microwave Sensor," *IEEE Sens. J.*, vol. 21, no. 2, pp. 1026–1039, 2021, doi: 10.1109/JSEN.2020.3004515.
- [10] C. N. Okwuosa, U. E. Akpudo, and J. W. Hur, "A Cost-Efficient MCSA-Based Fault Diagnostic Framework for SCIM at Low-Load Conditions," *Algorithms*, vol. 15, no. 6, 2022, doi: 10.3390/a15060212.
- [11] A. Mejia-Barron, G. Tapia-Tinoco, J. R. Razo-Hernandez, M. Valtierra-Rodriguez, and D. Granados-Lieberman, "A neural network-based model for MCSA of inter-turn short-circuit faults in induction motors and its power hardware in the loop simulation," *Comput. Electr. Eng.*, vol. 93, no. May, p. 107234, 2021, doi: 10.1016/j.compeleceng.2021.107234.
- [12] M. Deeb, N. F. Kotelenets, T. Assaf, H. M. Sultan, and A. S. A. Akaysheedept, "Three-phase induction motor short circuits fault diagnosis using MCSA and NSC," *Proc. 3rd 2021 Int. Youth Conf. Radio Electron. Electr. Power Eng. REEPE 2021*, 2021, doi: 10.1109/REEPE51337.2021.9388051.
- [13] M. S. Moiz *et al.*, "Health Monitoring of Three-Phase Induction Motor Using Current and Vibration Signature Analysis," *2019 Int. Conf. Robot. Autom. Ind. ICRAI 2019*, pp. 45–48, 2019, doi: 10.1109/ICRAI47710.2019.8967356.
- [14] D. Goyal, C. Mongia, and S. Sehgal, "Applications of Digital Signal Processing in Monitoring Machining Processes and Rotary Components: A Review," *IEEE Sens. J.*, vol. 21, no. 7, pp. 8780–8804, 2021, doi: 10.1109/JSEN.2021.3050718.
- [15] O. Alshorman *et al.*, "A Review of Artificial Intelligence Methods for Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Rolling Element Bearings for Induction Motor," *Shock Vib.*, vol. 2020, no. Cm, 2020, doi: 10.1155/2020/8843759.
- [16] M. J. Hasan, M. M. M. Islam, and J. M. Kim, "Acoustic spectral imaging and transfer learning for reliable bearing fault diagnosis under variable speed conditions," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 138, pp. 620–631, 2019, doi: 10.1016/j.measurement.2019.02.075.
- [17] S. Zhang *et al.*, "Model-Based Analysis and Quantification of Bearing Faults in Induction Machines," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 56, no. 3, pp. 2158–2170, 2020, doi: 10.1109/TIA.2020.2979383.
- [18] N. W. Nirwan and H. B. Ramani, "Condition monitoring and fault detection in roller bearing used in rolling mill by acoustic emission and vibration analysis," *Mater. Today Proc.*, vol. 51, no. xxxx, pp. 344–354, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.05.447.
- [19] 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," *Electron.*, vol. 9, no. 9, pp. 1–18, 2020, doi: 10.3390/electronics9091334.
- [20] M. N. S. K. Shabbir, X. Liang, and S. Chakrabarti, "An ANOVA-Based Fault Diagnosis Approach for Variable Frequency Drive-Fed Induction Motors," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 36, no. 1, pp. 500–512, 2021, doi: 10.1109/TEC.2020.3003838.
- [21] Karyatanti, I.D.P., Winarno, I., Wijayanto, A., Harahab, N., Wibowo, R.B.E. and Budiarto, A., 2023. Sound Sensor Placement Strategy for Condition Monitoring of Induction Motor Bearing. *Pertanika Journal of Science & Technology*, 31(6).
- [22] Vanraj, Dhami, S.S. & Pabla, B.S. (2017). Optimization of sound sensor placement for condition monitoring of fixed-axis gearbox. *Cogent Engineering*, 4(1), p.1345673. <https://doi.org/10.1080/23311916.2017.1345673>
- [23] Glowacz, A., Glowacz, W., Glowacz, Z., & Kozik, J. (2018). Early fault diagnosis of bearing and stator faults of the single-phase induction motor using acoustic signals. *Measurement*, 113, 1-9.. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.08.036>
- [24] Zhong, J.H., Wong, P.K. and Yang, Z.X., 2018. Fault diagnosis of rotating machinery based on multiple probabilistic classifiers. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 108, pp.99-114. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.02.009>
- [25] Goyal, D., Pabla, B.S. & Dhami, S.S. (2019). Non-contact sensor placement strategy for condition monitoring of rotating machine-elements. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 22(2), pp.489-501.

*Correspondent e-mail address

iradiratu@hangtuah.ac.id Peer reviewed under responsibility of Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, Indonesia

© 2025 Universitas Muhammadiyah Sidoarjo, All right reserved, This is an open access article under the CC BY license(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Received: 2024-12-16

Accepted: 2025-04-29

Published: 2025-04-30

DAFTAR TABEL

Table 1. Frekuensi kerusakan bearing	57
Table 2. Akurasi monitoring kondisi bearing pada seluruh pengujian	57
Table 3. Analysis of variance placement sensor	57
Table 4. Penelitian serupa.....	57

Table 1. Frekuensi kerusakan bearing

Frekuensi harmonik	Frekuensi bearing (Hz)		
	Fault#1	Fault#2	Fault#3
f_p	91.3	133.6	43.7
f_{px2}	182.7	267.1	87.4
f_{px3}	274	400.7	131.1
f_{px4}	365.3	534.3	174.9
f_{px5}	456.7	667.8	218.6
f_{px6}	548	801.4	262.3
f_{px7}	639	935	306.1
f_{px8}	730.7	1068.5	349.8

Table 2. Akurasi monitoring kondisi bearing pada seluruh pengujian

Sensor Placement	Repetition of monitoring accuracy tests (%)				
	1	2	3	4	5
10 cm	83.3	87.5	100	91.5	83.3
60 cm	83.3	100	83.3	79.1	95.8
110 cm	95.8	100	95.8	95.8	83.3
160 cm	75	75	79.1	79.1	70.8
210 cm	75	66.6	70.8	75	79.1

Table 3. Analysis of variance placement sensor

Source of Diversity	Degrees Free	Sum of squares	Middle square	F-Value	P-Value
Treatment	4	1420.6	355.16	7.85	0.001
Galat	20	90.4	45.22		
Total	24	2325.1			

Table 4. Penelitian serupa

Reference	Feature generation	Feature extraction method	Placement strategy	highlight
Vanraj, et al, 2017	Sound signal	No discussion	RSM	Strategi placement sensor = 112.5-cm
Zhong, J.H, et al, 2018	Sound signal	Ensemble empirical mode decomposition	No discussion	Placement sensor fixed 50cm
Glowacs et al, 2018	Sound signal	MSAF-20-MULTIEXPANDED	No discussion	Placement sensor fixed 30cm
Goyal et al, 2019	Vibration signal	FFT	NC-OSP strategy	-
Proposed method	Sound signal	Spectrum analysis	HSD	Strategi placement sensor = 110cm, monitoring accuracy = 94.14%

DAFTAR GAMBAR

Figure 1. Flowchat monitoring kondisi motor dengan pengembangan strategi penempatan sensor yang optimal	59
Figure 2. Konfigurasi Sistem Monitoring motor	59
Figure 3. Bearing kondisi rusak sebagai pengujian	59
Figure 4. Sinyal Suara Referensi dan kasus Fault#1	60
Figure 5. Sinyal Suara Referensi dan kasus Fault#2	60
Figure 6. Sinyal Suara Referensi dan kasus Fault#3	60
Figure 7. Spektrum suara Referensi dan pengujian Fault#1	60
Figure 8. Spektrum Suara Referensi dan pengujian Fault#2	61
Figure 9. Spektrum Suara Referensi dan pengujian Fault#3	61
Figure 10. Frekuensi dan amplitude pengujian Fault#1	61
Figure 11. Frekuensi dan amplitude pengujian Fault#2	61
Figure 12. Frekuensi dan amplitude pengujian Fault#3	62
Figure 13. Honestly Significant Difference	62

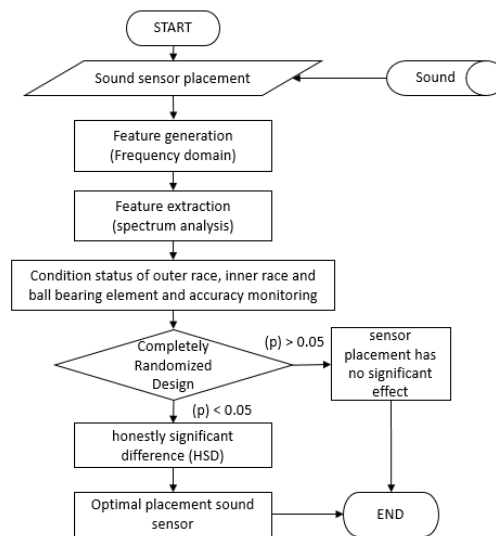


Figure 1. Flowchat monitoring kondisi motor dengan pengembangan strategi penempatan sensor yang optimal

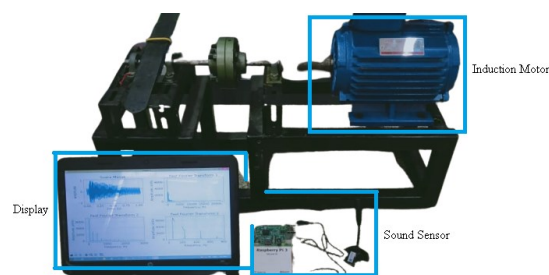


Figure 2. Konfigurasi Sistem Monitoring motor



Figure 3. Bearing kondisi rusak sebagai pengujian

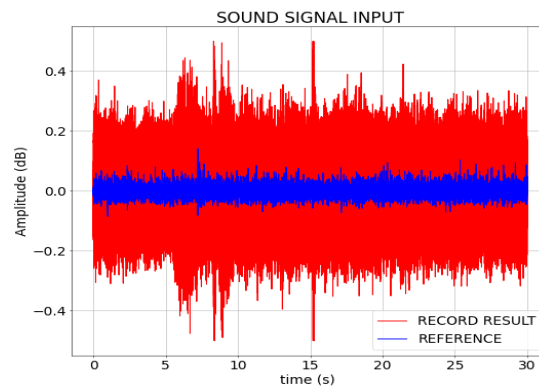


Figure 4. Sinyal Suara Referensi dan kasus Fault#1

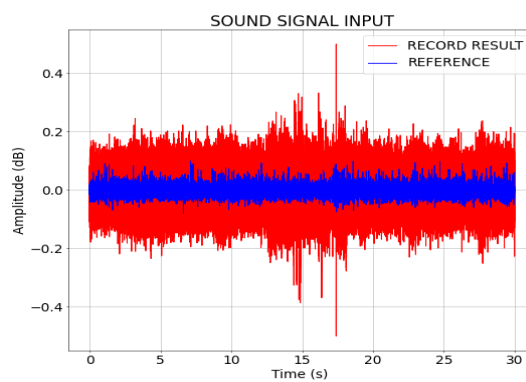


Figure 5. Sinyal Suara Referensi dan kasus Fault#2

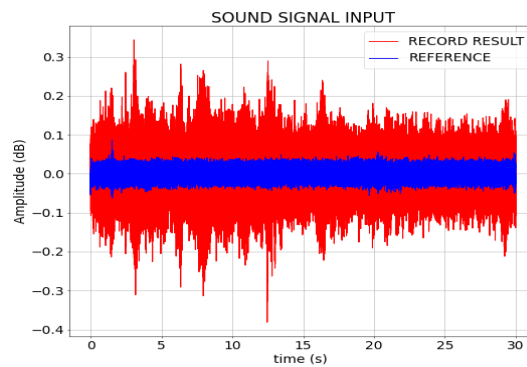


Figure 6. Sinyal Suara Referensi dan kasus Fault#3

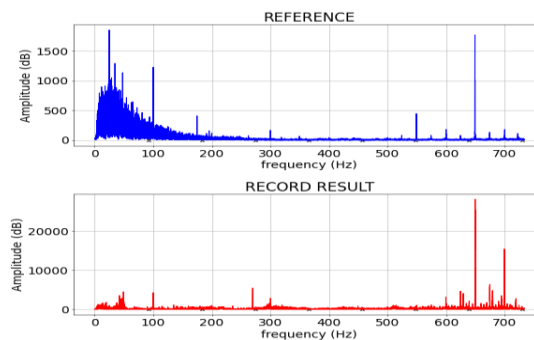


Figure 7. Spektrum suara Referensi dan pengujian Fault#1

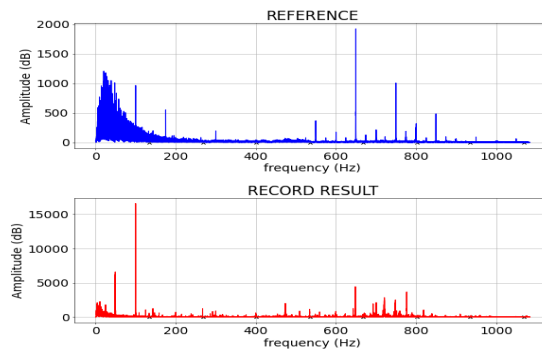


Figure 8. Spektrum Suara Referensi dan pengujian Fault#2

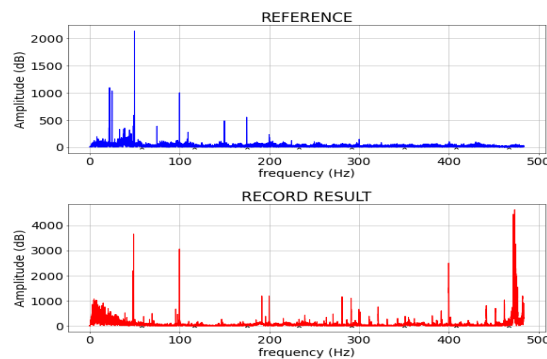


Figure 9. Spektrum Suara Referensi dan pengujian Fault#3

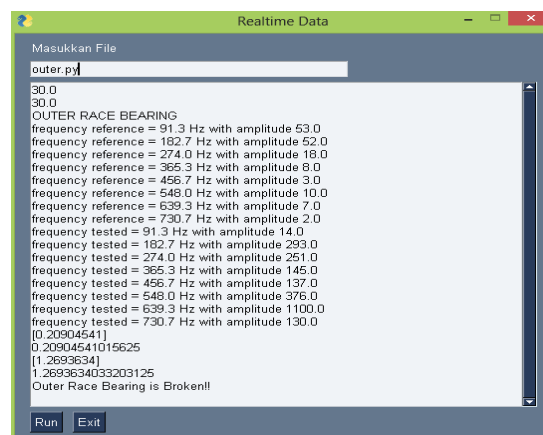


Figure 10. Frekuensi dan amplitude pengujian Fault#1

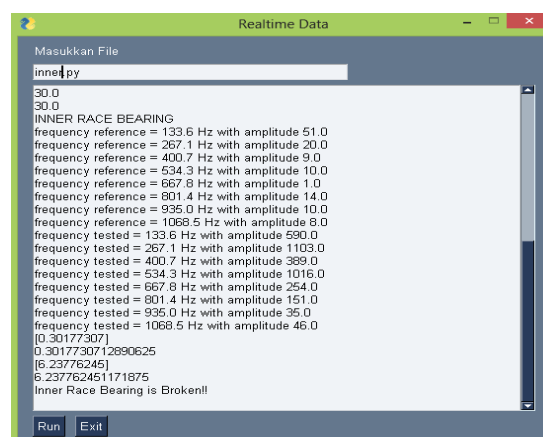


Figure 11. Frekuensi dan amplitude pengujian Fault#2

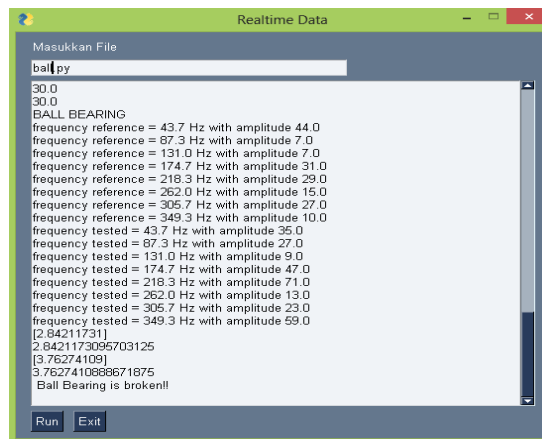


Figure 12. Frekuensi dan amplitude pengujian Fault#3

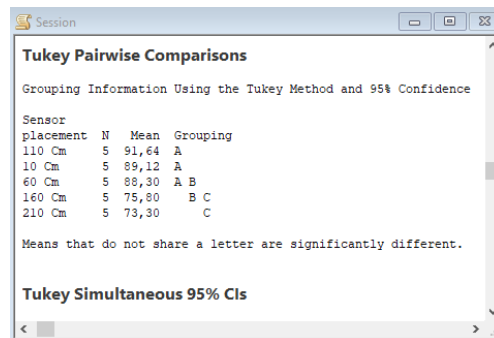


Figure 13. Honestly Significant Difference