

Monitoring Bearing Motor Induksi Pada Variasi Noise Menggunakan Pengolahan Sinyal FFT

Moch Iqbal Widjaya Ash Siddiq^a, Iradiratu Diah Prahmana Karyatanti^{a*},
 Belly Yan Dewantara^a, Adistra Shanda Syahputri^b, Muhammad Dzikri
 Akbar Bahtiar^c

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik Dan Ilmu Kelautan Universitas Hang Tuah Surabaya
 Program Studi Teknologi Laboratorium Medik, Universitas Airlangga
 Program Studi Teknik Informatika, Universitas Negeri Surabaya

^a moch.ashsiddiq86@gmail.com; bellyyandewantara@hangtuah.ac.id

^b adistra.andasyahputri-2023@vokasi.unair.ac.id

^c muhammaddzikri.23080@mhs.unesa.ac.id

* iradiratu@hangtuah.ac.id

Kata Kunci :

ABSTRAK

Motor Induksi

Bearing

Spectrum frekuensi

FFT

Sinyal Suara

Noise

Motor induksi memiliki berbagai keunggulan dibandingkan dengan motor listrik jenis yang lain karena konstruksinya yang sederhana, handal dan berharga murah. Meskipun memiliki konstruksi yang kuat, bukan berarti motor induksi tidak pernah mengalami kerusakan. Kerusakan bagian motor yang sering terjadi adalah kerusakan bearing. Fault diagnosis (FD) secara kontinue diperlukan untuk mengantisipasi terjadinya kerusakan lebih parah, menjaga keandalan, menekan biaya perawatan, dan tindakan perawatan tepat waktu. Kebisingan lingkungan tidak dapat dihindari dari lokasi motor, sehingga pada penelitian ini FD akan diuji pada beberapa tingkat kebisingan lingkungan. Penelitian ini mengusulkan pengembangan FD elemen bearing dengan teknik non-invasive berdasarkan sinyal suara dengan mempertimbangkan pengaruh kebisingan lingkungan. Filtering sinyal suara harus dilakukan dengan cermat agar hasil deteksi tidak diragukan. Band-pass filter diterapkan untuk memberikan informasi frekuensi resonansi yang menggambarkan kondisi elemen bearing. Data analisis dan feature extraction menggunakan pendekatan fast fourier transform dan analisis spectrum. FD yang dikembangkan berupa hardware yang dirancang menggunakan Raspberry pi dengan software Phyton. Pengembangan ini menawarkan FD yang real-time dimana sinyal suara langsung diproses sehingga hasil diagnosis dapat ditampilkan di LCD. Signifikasi hasil penelitian adalah menawarkan sistem monitoring kondisi motor dengan hardware yang dikembangkan sehingga hasil deteksi lebih cepat, mudah, murah, dan akurasi tinggi meskipun ada pengaruh kebisingan lingkungan. Dengan metode yang diusulkan mendapatkan akurasi deteksi sebesar 95.58%.

1. Pendahuluan

Penggunaan motor induksi merupakan jenis motor yang luas digunakan. Lamanya pemakaian dan pengoperasian yang tidak normal akan menyebabkan motor mengalami kerusakan (Saputra, et al, 2019). Kerusakan bagian motor induksi dapat dikategorikan menjadi kerusakan electrical (tegangan atau arus suplai tidak seimbang dan gangguan grounding), kerusakan mekanikal (patahnya batang rotor dan bearing), dan kerusakan yang dipengaruhi lingkungan (getaran mesin, suhu lingkungan serta kelembaban eksternal akan mempengaruhi kinerja motor induksi) (Gangsar, Purushottam, Rajiv, T, 2019). Berdasarkan survei dari EPRI (Electric Power Research and Institute) dan IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) prosentase kerusakan bagian motor terdiri dari kerusakan bearing 41% - 42%, kerusakan belitan stator 28% - 36%, kerusakan rotor 8% - 9%, dan kerusakan lainnya 14% - 28%. Dari survei tersebut dapat dilihat bahwa kerusakan paling besar adalah kerusakan bearing (El Idrissi, A., 2022). Kerusakan bagian motor harus diantisipasi dengan melakukan fault diagnosis (FD) secara kontinue.

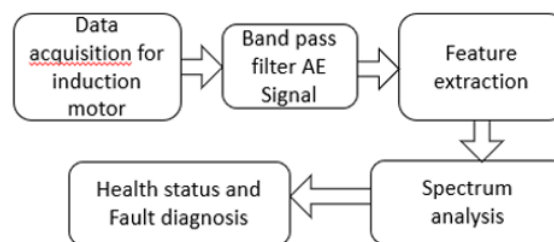
FD dapat dilakukan dengan teknik invasive dan non-invasive. Teknik non-invasive memberikan keuntungan tidak memerlukan kontak langsung pada bagian motor yang dimonitoring. FD dari data getaran, temperature, dan suara merupakan teknik non-invasive, sedangkan FD berasal dari data arus termasuk katagori teknik invasive (Choudhary, A., Mian, T. Fatima, S., 2021). Teknik FD berdasarkan arus sangat cocok digunakan untuk type kerusakan electrical karena teknik ini hanya digunakan untuk FD bagian motor yang teraliri arus saja (rotor dan stator). Meskipun demikian teknik FD berdasarkan arus memberikan keuntungan keandalan tinggi karena sinyal arus tidak mudah terkontaminasi dengan sinyal lain (Okwuosa, C.N., Akpudo, U.E., Hur, J.W., 2022). FD pada stator dan tegangan tidak seimbang dengan pengolahan sinyal fast fourier transform (FFT) dan Discrete Wavelet Energy Ratio (DWER) memberikan kontribusi pengembangan FD berdasarkan arus, dimana FD dengan pendekatan DWER menghasilkan akurasi FD lebih tinggi (Khechekhouche, A., 2020). Selain itu teknik FD berdasarkan arus digunakan untuk diagnosis kondisi rotor bar dengan pengolahan sinyal FFT dan Hilbert Huang Transform (Cherif, B.D.E., 2019). FD berdasarkan temperature menawarkan teknik FD yang mudah diimplementasikan untuk semua type kerusakan mechanical dan electrical, namun teknik ini cenderung berharga mahal dan membutuhkan waktu lama untuk mengambil data berikutnya. Teknik FD yang banyak dikembangkan akhir-akhir ini adalah FD berdasarkan sinyal getaran. Teknik ini sangat cocok untuk type kerusakan mechanical. Penerapan feature extraction menggunakan FFT untuk FD bearing motor direkomendasikan karena menghasilkan akurasi yang tinggi (Lin, H.C., Ye, Y.C., 2019), selain itu pendekatan Empirical Mode Decomposition juga dikembangkan untuk analisis frekuensi FD bearing (Singh, P., Harsha, S.P., 2019). Teknik FD yang menawarkan harga yang murah adalah teknik FD non-invasive berdasarkan sinyal suara. Hanya dibutuhkan mikropon untuk menangkap sinyal suara kemudian diolah untuk mengetahui kondisi motor (Altaf, M., 2019). Beberapa penelitian telah merekomendasikan teknik ini karena mudah dalam implementasinya dan sinyal suara dapat memberikan informasi kondisi motor. Penerapan FD berdasarkan sinyal suara sangat luas diimplementasikan, antara lain FD pada bearing Francis turbine (Vashishtha,

G., Kumar, R., 2021), bearing of belt conveyer (Zhang, X., et al, 2021), bearing dan gear (Altaf, M, et al, , 2019). Kelemahan teknik FD berdasarkan suara adalah sinyal suara sangat sensitive terhadap kebisingan suara sekitar.

Kelemahan ini merupakan tantangan kedepan untuk diteliti agar akurasi FD tidak terabaikan. Menjawab tantangan tersebut maka penelitian ini mengusulkan mengembangkan sistem FD bearing motor induksi dengan mempertimbangkan pengaruh kebisingan lingkungan. Pengujian dilakukan pada lima kondisi lingkungan dengan level kebisingan yang berbeda. Kebisingan lingkungan sekitar akan difilter dengan pendekatan band-pass filter dan feature extraction menggunakan FFT. Untuk menentukan kondisi kesehatan bearing menggunakan pendekatan analisis spectrum. Sistem FD yang dikembangkan dilakukan secara realtime dimana semua proses dilakukan di miniPC raspberry dengan software phyton. Signifikasi hasil penelitian adalah pengembangan FD dengan biaya murah, tidak memerlukan kontak, realtime sehingga tindakan FD dapat dilakukan setiap saat dan tidak memerlukan waktu lama untuk mendapatkan hasil status kesehatan motor. Selain itu hasil FD dari metode yang ditawarkan memberikan kontribusi hasil dengan akurasi yang tinggi.

2. Metode

Gambaran methodology penelitian yang diusulkan ditunjukkan pada Gambar 1. Sinyal suara merupakan sinyal yang memberikan informasi kondisi bearing yang didapat dari suara pengoperasi motor induksi. Band-pass filter diterapkan untuk menentukan frekuensi karakteristik bearing. Tahap ini memberikan informasi frekuensi bearing sebagai lokasi yang dimonitoring. Feature extraction menggunakan algoritma FFT diterapkan untuk menstransformasi sinyal suara domain waktu ke domain frekuensi. Sinyal suara dalam domain frekuensi akan dianalisis untuk menentukan status kesehatan dan FD bearing.



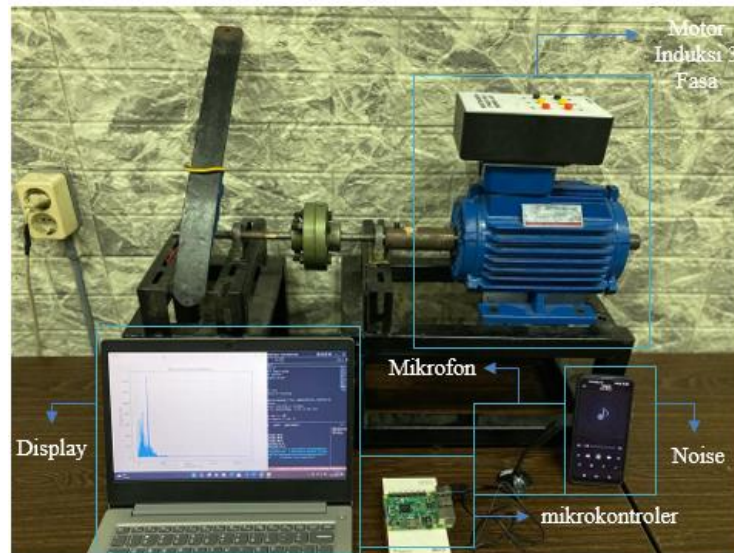
Gambar 1. Metode penelitian

2.1 Monitoring bearing

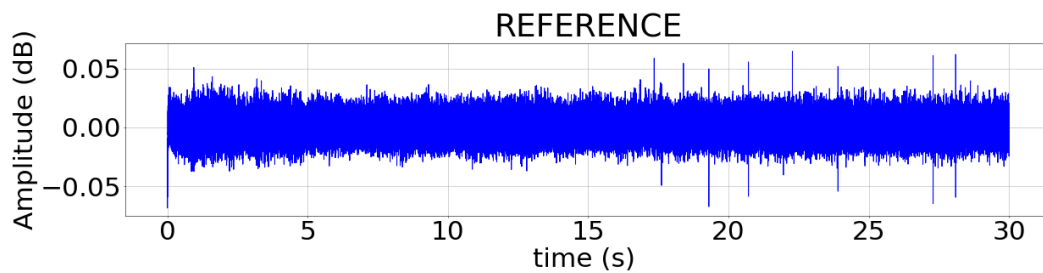
Experimental set up untuk FD terdiri dari motor induksi 3 fasa dengan rating tegangan 220/380 V, tipe rotor sangkar, 1.5 kW, 6,36/3,68 A, dan jumlah kutub sebanyak 4 buah. Microphone sebagai sensor suara yang akan menangkap sinyal suara motor saat beroperasi. Raspberry pi sebagai miniPC yang akan mengolah sinyal dan analisis kesehatan bearing motor. Proses diagnosis dan FD dilakukan secara realtime sehingga hasil FD dapat ditampilkan secara langsung pada layer LCD. Gambar 2 menunjukkan experimental set up FD.

Pengujian kondisi lingkungan pengoperasian motor dilakukan pada tingkat kebisingan yang berbeda yaitu kebisingan pada 40 dBA – 50 dBA (case1), 51 dBA – 60 dBA (case2), 61 dBA

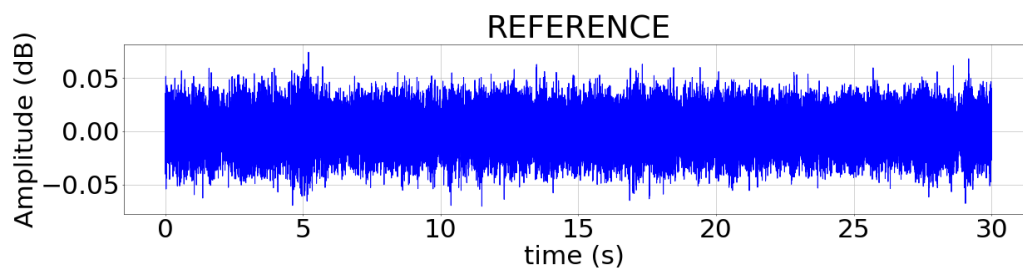
– 70 dBA (case3), 71 dBA – 80 dBA (case4) dan 81 dBA – 90 dBA (case5). Tingkat kebisingan diukur dengan Sound Power Level meter. Tingkat kebisingan ruangan uji didapatkan dari pengoperasian mesin diluar mesin uji (bor, music, dan suara percakapan). Gambar 3 menunjukkan sinyal suara yang ditangkap oleh microphone dari pengoperasian motor sehat dengan tingkat kebisingan lingkungan yang berbeda.



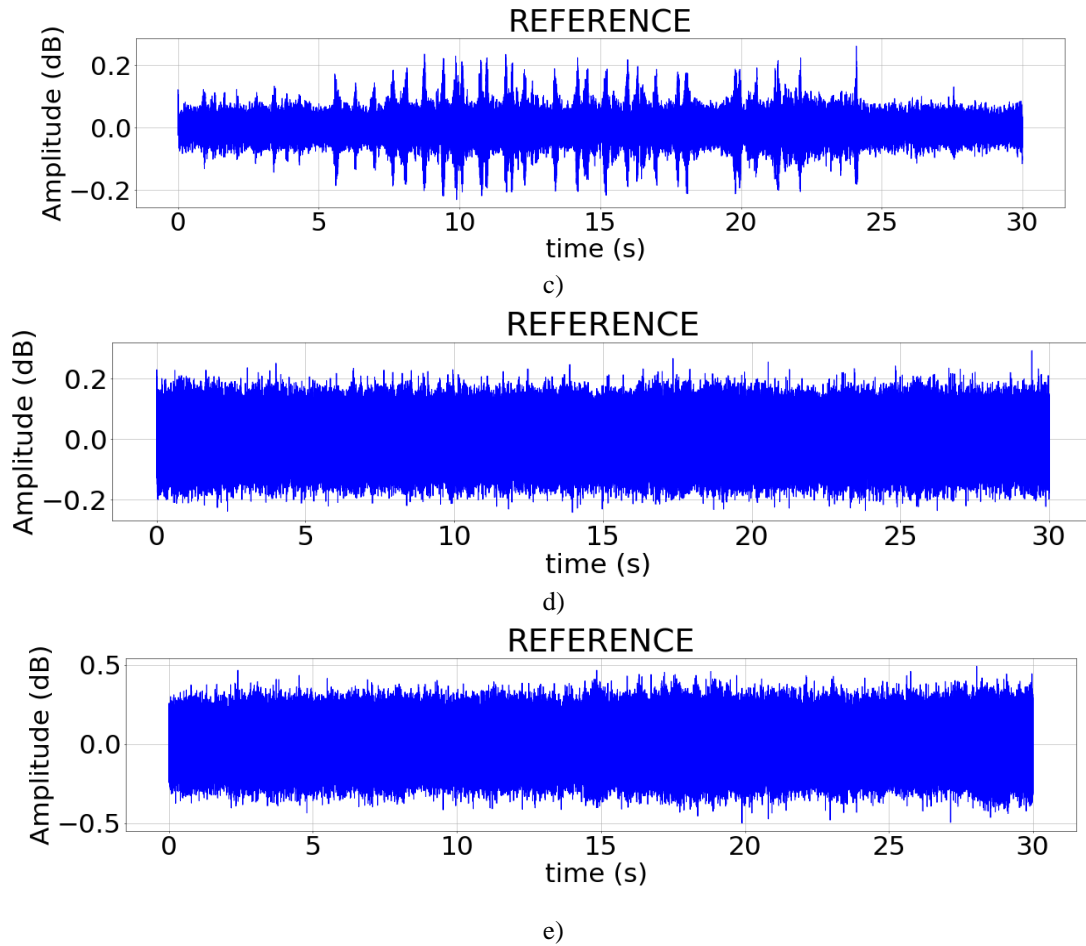
Gambar 1. Sistem monitoring bearing



a)



b)



Gambar 3. Sinyal suara pada tingkat kebisingan ruangan berbeda (a) case1, (b) case2, (c) case3, (d) case3, dan (e) case 4.

Untuk memberikan gambaran bearing pada kondisi rusak maka pada penelitian ini melakukan rekondisi bearing dengan memberikan kecacatan pada outer-race (Fault#1) dan inner-race (Fault#2). Spesifikasi bearing uji adalah mempunyai jumlah ball bearing sebanyak 9 buah dengan type bearing 6205 2R, diameter inner 25mm, diameter outer 52 mm, dan diameter ball 7.25mm. Gambar 4 menunjukkan rekondisi bearing sebagai objek pengujian.



Gambar 4. Rekondisi outer race dan inner bearing uji

2.2 Band-pass filter

Sinyal suara merupakan sinyal yang dapat memberikan informasi kondisi motor namun sangat sensitive terhadap suara lingkungan. Band-pass filter diterapkan sebagai preprosesing untuk mendapatkan informasi kondisi bearing dari suara yang dikeluarkan oleh operasional motor. Langkah ini merupakan proses untuk menentukan frekuensi yang berasal dari putaran bearing sehingga sinyal yang berasal dari frekuensi non bearing akan diabaikan. Perhitungan ini harus dilakukan dengan cermat agar frekuensi sinyal yang dianalisis memang berasal dari frekuensi bearing saja mengingat kebisingan suara yang berasal dari lingkungan akan mempengaruhi karakteristik sinyal yang ditangkap microphone.

Bearing terdiri dari outer race, inner race, cage, dan ball bearing yang memberikan peran sebagai penopang dan membantu rotor berputar. Pada badan motor terdapat dua bearing yang terletak di drive end dan non-drive end shaft rotor. Ketika motor berputar pada kondisi bearing mengalami kerusakan maka akan terjadi frekuensi resonansi secara periodik. Frekuensi resonansi tersebut dikenal dengan frekuensi kerusakan bearing. Sesuai dengan elemen bearing, frekuensi kerusakan terdiri dari empat komponen yaitu Ball Pass Frequency Outer (BPFO), Ball Pass Frequency inner (BPFI), Fundamental Train Frequency (FTF), dan Ball Spin Frequency (BSF) (Barusu, M.R., Deivasigamani, M., 2020).

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

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

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

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

Dimana nm adalah kecepatan putar dalam rev/sec, D_p adalah diameter pitch, db adalah diameter ball, N_b adalah jumlah ball, dan α adalah sudut kontak bola. Pengulangan frekuensi kerusakan bearing secara periodic sesuai persamaan berikut (Ewert, P., et al, 2020):

$$f_p = |k \cdot f_v| \quad k=1,2,3,\dots \quad (5)$$

Dimana f_p adalah frekwensi harmonik, f_v adalah frekwensi elemen bearing sesuai persamaan (1)-(4). Tabel 1 merupakan frekuensi kerusakan bearing uji berdasarkan implementasi persamaan (1)-(5) dan spesifikasi bearing uji.

Table 1 Frekuensi kerusakan bearing

harmonic	BPFO (Hz)	BPFI (Hz)
f_p	91,3	133,6
$f_p \times 2$	182,6	267,3
$f_p \times 3$	273,9	401,0
$f_p \times 4$	365,2	534,6
$f_p \times 5$	456,5	668,3
$f_p \times 6$	547,8	802,0
$f_p \times 7$	639,1	935,7

$$\frac{f_p \times 8 \quad 730,4 \quad 1069,3}{\text{-----}}$$

Sinyal yang ditangkap oleh microphone merupakan sinyal dalam domain waktu. Analisis sinyal akan lebih mudah dilakukan pada domain frekuensi karena dapat memberikan informasi karakteristik sinyal (Nakamura, H., et al, 2019). FFT merupakan algoritma pengolahan sinyal yang banyak digunakan untuk FD motor karena sederhana, cepat dan dapat memberikan informasi karakteristik sinyal yang handal. Meskipun FFT merupakan teknik tradisional namun algoritma ini sangat handal dan mengurangi penggunaan teknologi computer dengan spesifikasi tinggi (Qiao, M., Yan, S., Tang, X. & Xu, C., 2020). FFT merupakan pengembangan dari discrete fourier transform (DFT) yang memberikan pengolahan sinyal lebih cepat. Prinsip kerja FFT adalah membagi sinyal sampling menjadi dua bagian kemudian masing-masing bagian diselesaikan dengan algoritma DFT (Gangsar, P. and Tiwari, R., 2020).. Persamaan DFT adalah :

$$X_{(k)} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-i2\pi \frac{k}{N}n} \quad , k = 1, 2, \dots (N - 1) \quad (6)$$

Dimana k adalah indeks frekuensi dan N adalah jumlah data. Sesuai dengan prinsip FFT maka :

$$FFT(N) = DFT\left(\frac{N}{2}\right) + DFT\left(\frac{N}{2}\right) \quad (7)$$

Sehingga jumlah perhitungan FFT adalah

$$FFT(N) = DFT\left(\frac{N}{2}\right)^2 + DFT\left(\frac{N}{2}\right)^2 \quad (8)$$

$$FFT(N) = \frac{N^2}{2} \quad (9)$$

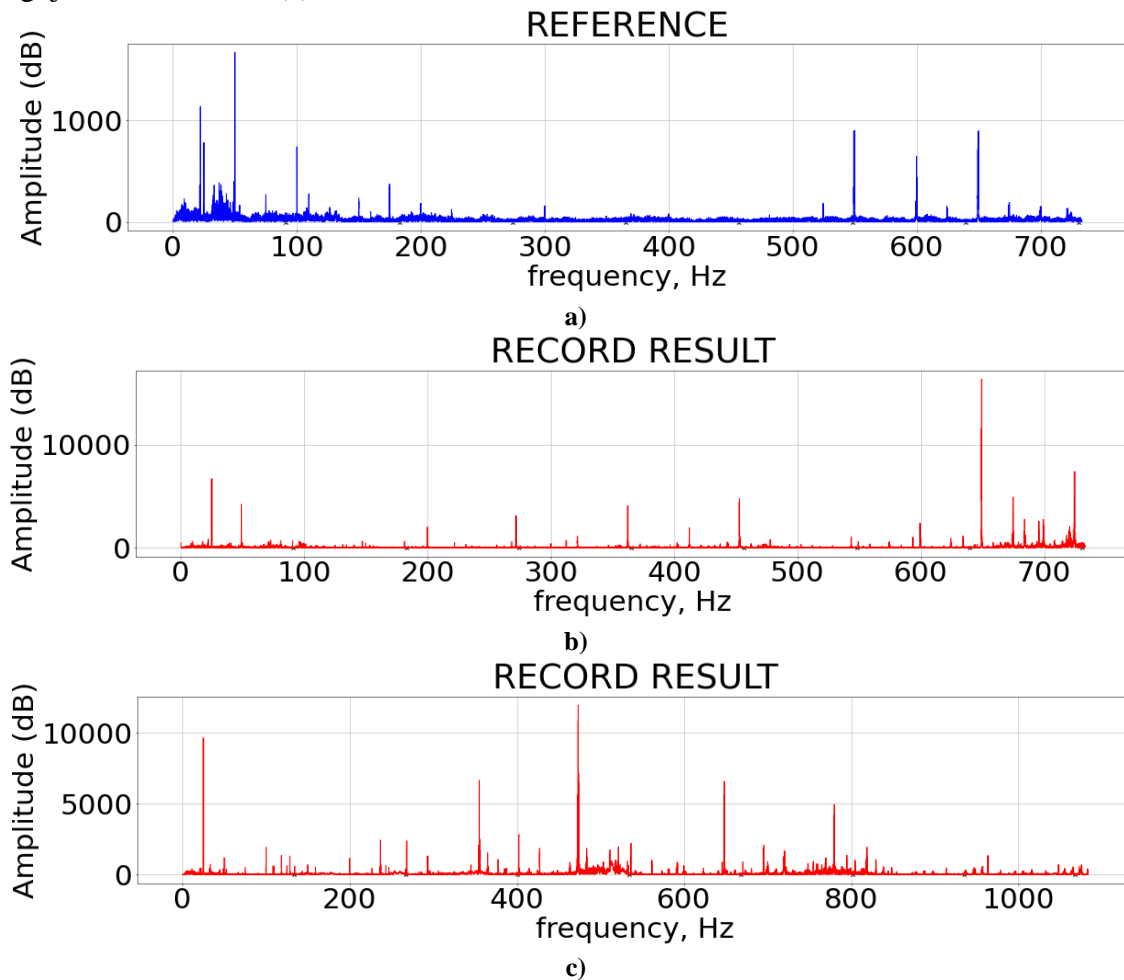
Terlihat bahwa FFT menawarkan proses yang lebih singkat dibandingkan DFT. Sinyal suara yang telah melalui tahap feature extraction akan dilanjutkan ketahap analisis spectrum dengan cara membandingkan amplitude pada frekuensi kerusakan bearing dengan amplitude referensi yang berasal dari spectrum suara motor sehat.

3. Hasil dan pembahasan

Berdasarkan frekuensi kerusakan yang ditampilkan pada Tabel 1 maka dilakukan pengamatan frekuensi resonansi pada seluruh komponen harmoniknya. Analisis spectrum untuk menentukan status kesehatan bearing yaitu dengan membandingkan nilai amplitude referensi dengan amplitude uji. Jika terjadi frekuensi resonansi (amplitude uji melebihi amplitude referensi) maka dinyatakan bearing mengalami kerusakan. Sesuai dengan langkah band pass filter maka frekuensi yang diamati hanya pada frekuensi lintasan elemen bearing. Jika terjadi frekuensi resonansi pada frekuensi selain frekuensi bearing dapat dipastikan bahwa lonjakan tersebut berasal dari suara non mesin (selain motor uji).

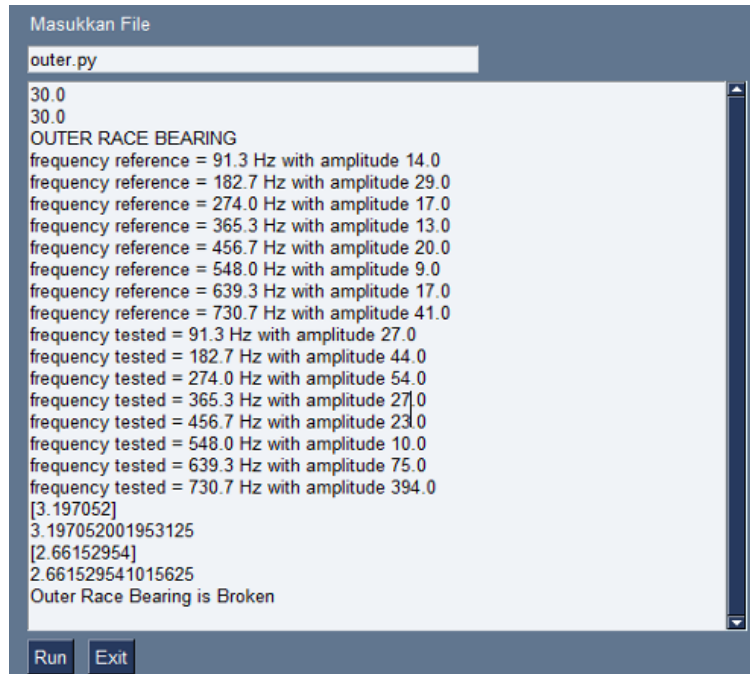
Pengujian FD dilakukan pada tingkat kebisingan lingkungan case1 sampai case5, dimana kondisi outer race dan inner race mengalami kerusakan (Fault#1 dan Fault#2). Spectrum suara

pengujian case1 Fault#1 ditunjukkan pada Gambar 5, dimana (a) adalah spectrum referensi, (b) pengujian Fault#1, dan (c) Fault#2.

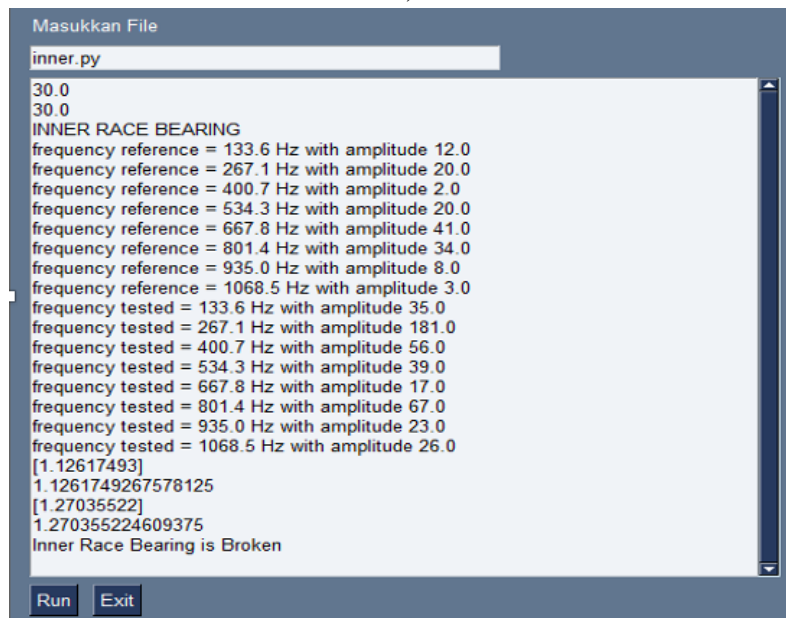


Gambar 5. Spektrum suara pengujian case1: a) Referensi, b) Fault#1, c) Fault#2

Secara realtime hasil FD ditampilkan pada LCD berupa spectrum frekuensi dan analisis FD dengan membandingkan amplitude referensi dan amplitude uji. Dari analisis spectrum tersebut akan diketahui status kondisi bearing. Gambar 6 menunjukkan tampilan FD dimana dari metode yang diusulkan menyatakan bearing dalam kondisi rusak. Hal ini dinyatakan valid karena sesuai dengan kondisi bearing uji yaitu dalam kondisi fault#1 dan fault#2. Presentase akurasi FD sebesar 100% karena pada semua komponen frekuensi harmonic mengalami frekueansi resonansi. Pengulangan pengujian dilakukan sebanyak 5 kali, Tabel 2 adalah hasil akurasi FD pada case1. Dari pengujian 5 kali pada case#1 menghasilkan rata-rata akurasi FD sebesar 97.5% untuk fault#1 dan 92.5% untuk fault#2.



a)



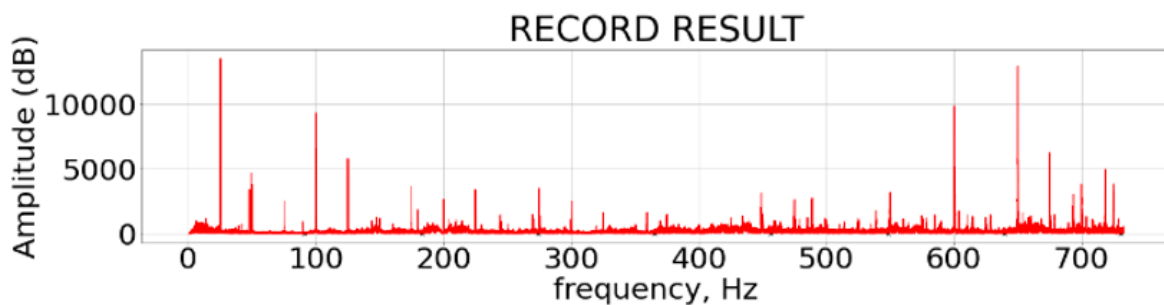
b)

Gambar 6. Analisis spectrum pengujian case1 (a) fault#1, b) fault#2

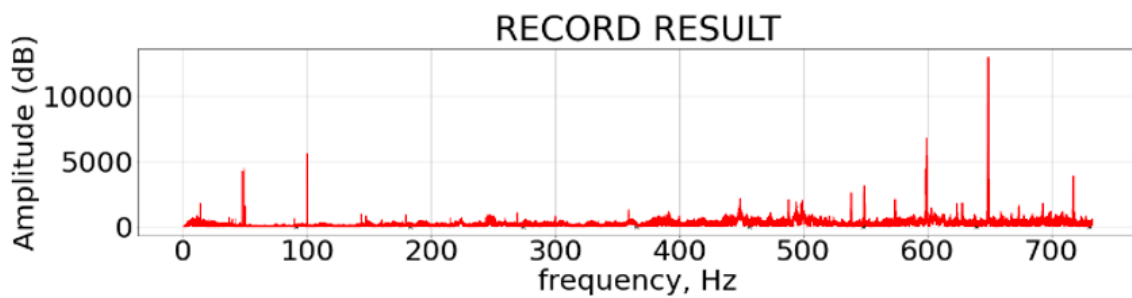
Tabel 2 Akurasi FD bearing pada case1

Case	% FD accuracy					average
	Test repetition					
	1	2	3	4	5	
Fault#1	100%	100%	100%	87,5%	100%	97,5%
Fault#2	87,5%	87,5%	100%	87,5%	100%	92,5%

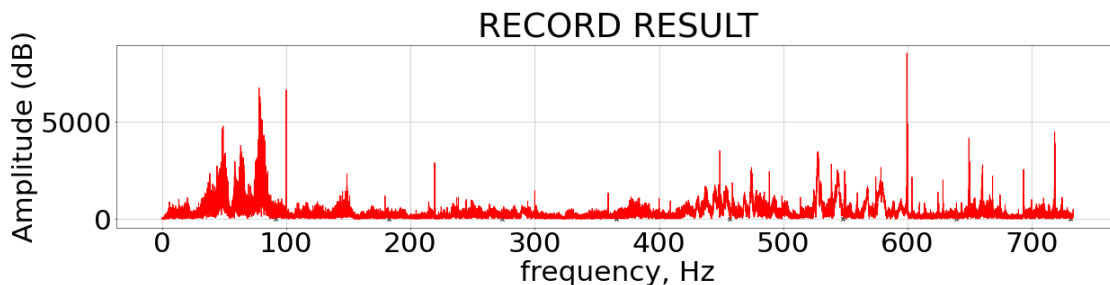
Dengan cara yang sama maka pengujian dilakukan pada tingkat kebisingan yang berbeda untuk mengetahui pengaruh kebisingan terhadap akurasi FD. Gambar 7 menunjukkan spectrum suara pengujian Fault#1 pada kondisi tingkat kebisingan yang berbeda. Dari grafik terlihat bahwa kebisingan lingkungan memberikan pengaruh kenaikan amplitude, namun perlu diamati apakah frekuensi resonansi tersebut terjadi pada frekuensi bearing. Analisis spectrum untuk FD pengujian Fault#1 ditunjukkan pada Gambar 8. Sedangkan spectrum dan hasil analisis spectrum untuk FD pada pengujian Fault#2 ditunjukkan pada Gambar 9 dan Gambar 10. Dari pengujian didapatkan bahwa sinyal suara pada domain waktu mengalami lonjakan seiring dengan kebisingan yang meningkat. Setelah melalau proses filtering, pengolahan sinyal, dan analisis maka suara kebisingan non mesin memberikan lonjakan amplitude pada frekuensi selain frekuensi bearing.



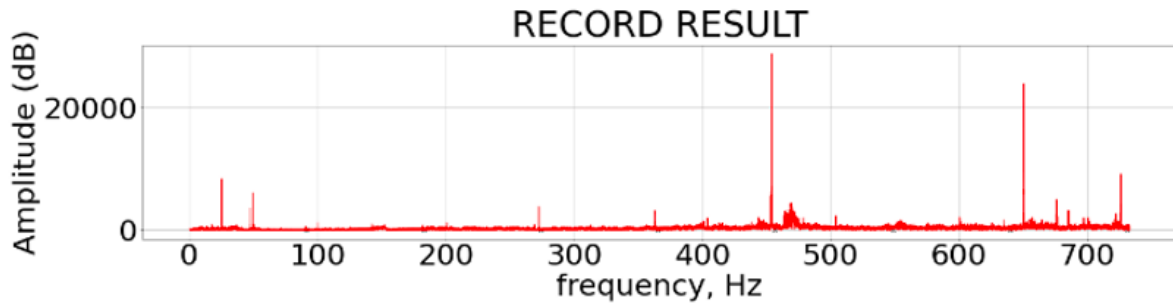
(a) Case2



(b) Case3



(c) Case4



(d) Case5

Gambar 7. Spectrum suara pada pengujian fault#1 pada tingkat kebisingan yang bervariasi

```

Masukkan File
outer.py
30.0
30.0
OUTER RACE BEARING
frequency reference = 91.3 Hz with amplitude 23.0
frequency reference = 182.7 Hz with amplitude 71.0
frequency reference = 274.0 Hz with amplitude 44.0
frequency reference = 365.3 Hz with amplitude 37.0
frequency reference = 456.7 Hz with amplitude 42.0
frequency reference = 548.0 Hz with amplitude 12.0
frequency reference = 639.3 Hz with amplitude 18.0
frequency reference = 730.7 Hz with amplitude 31.0
frequency tested = 91.3 Hz with amplitude 32.0
frequency tested = 182.7 Hz with amplitude 166.0
frequency tested = 274.0 Hz with amplitude 184.0
frequency tested = 365.3 Hz with amplitude 156.0
frequency tested = 456.7 Hz with amplitude 316.0
frequency tested = 548.0 Hz with amplitude 265.0
frequency tested = 639.3 Hz with amplitude 160.0
frequency tested = 730.7 Hz with amplitude 264.0
[2.45588684]
2.4558868408203125
[1.62149048]
1.621490478515625
Outer Race Bearing is Broken
Run Exit

```

(a) Case2

```

Masukkan File
outer.py
30.0
30.0
OUTER RACE BEARING
frequency reference = 91.3 Hz with amplitude 47.0
frequency reference = 182.7 Hz with amplitude 77.0
frequency reference = 274.0 Hz with amplitude 44.0
frequency reference = 365.3 Hz with amplitude 18.0
frequency reference = 456.7 Hz with amplitude 37.0
frequency reference = 548.0 Hz with amplitude 18.0
frequency reference = 639.3 Hz with amplitude 32.0
frequency reference = 730.7 Hz with amplitude 20.0
frequency tested = 91.3 Hz with amplitude 43.0
frequency tested = 182.7 Hz with amplitude 85.0
frequency tested = 274.0 Hz with amplitude 107.0
frequency tested = 365.3 Hz with amplitude 222.0
frequency tested = 456.7 Hz with amplitude 278.0
frequency tested = 548.0 Hz with amplitude 33.0
frequency tested = 639.3 Hz with amplitude 401.0
frequency tested = 730.7 Hz with amplitude 43.0
[2.46879578]
2.4687957763671875
[2.83547974]
2.835479736328125
Outer Race Bearing is Broken
Run Exit

```

(b) Case3

```

Masukkan File
outer.py
30.0
30.0
OUTER RACE BEARING
frequency reference = 91.3 Hz with amplitude 20.0
frequency reference = 182.7 Hz with amplitude 30.0
frequency reference = 274.0 Hz with amplitude 59.0
frequency reference = 365.3 Hz with amplitude 57.0
frequency reference = 456.7 Hz with amplitude 17.0
frequency reference = 548.0 Hz with amplitude 130.0
frequency reference = 639.3 Hz with amplitude 50.0
frequency reference = 730.7 Hz with amplitude 147.0
frequency tested = 91.3 Hz with amplitude 389.0
frequency tested = 182.7 Hz with amplitude 161.0
frequency tested = 274.0 Hz with amplitude 82.0
frequency tested = 365.3 Hz with amplitude 235.0
frequency tested = 456.7 Hz with amplitude 596.0
frequency tested = 548.0 Hz with amplitude 250.0
frequency tested = 639.3 Hz with amplitude 542.0
frequency tested = 730.7 Hz with amplitude 204.0
[1.99612427]
1.996124267578125
[3.27667236]
3.27667236328125
Outer Race Bearing is Broken
Run Exit

```

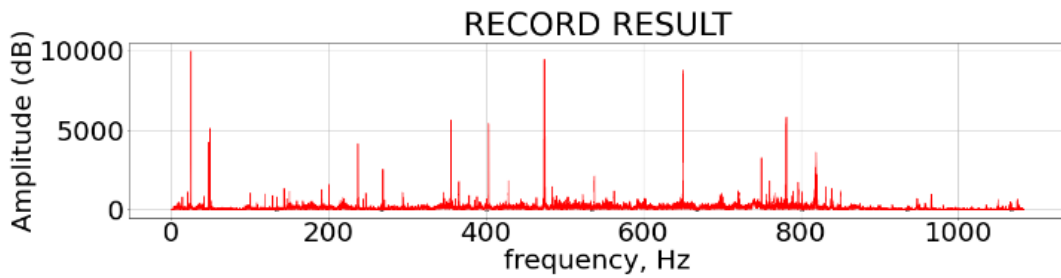
(c) Case4

```

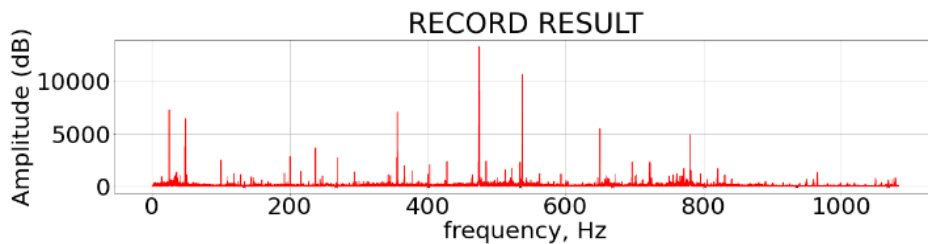
Masukkan File
outer.py
30.0
30.0
OUTER RACE BEARING
frequency reference = 91.3 Hz with amplitude 65.0
frequency reference = 182.7 Hz with amplitude 47.0
frequency reference = 274.0 Hz with amplitude 17.0
frequency reference = 365.3 Hz with amplitude 120.0
frequency reference = 456.7 Hz with amplitude 128.0
frequency reference = 548.0 Hz with amplitude 64.0
frequency reference = 639.3 Hz with amplitude 68.0
frequency reference = 730.7 Hz with amplitude 428.0
frequency tested = 91.3 Hz with amplitude 74.0
frequency tested = 182.7 Hz with amplitude 265.0
frequency tested = 274.0 Hz with amplitude 129.0
frequency tested = 365.3 Hz with amplitude 256.0
frequency tested = 456.7 Hz with amplitude 273.0
frequency tested = 548.0 Hz with amplitude 229.0
frequency tested = 639.3 Hz with amplitude 269.0
frequency tested = 730.7 Hz with amplitude 300.0
[3.36146545]
3.3614654541015625
[16.62802124]
16.628021240234375
Outer Race Bearing is Broken
Run Exit
    
```

(d) Case5

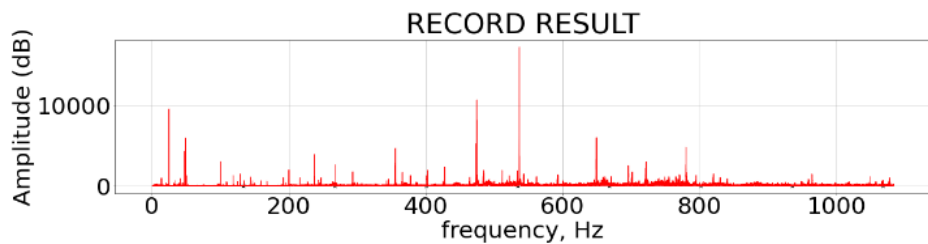
Gambae 8. Analisis spectrum pada pengujian fault#1 pada tingkat kebisingan yang bervariasi



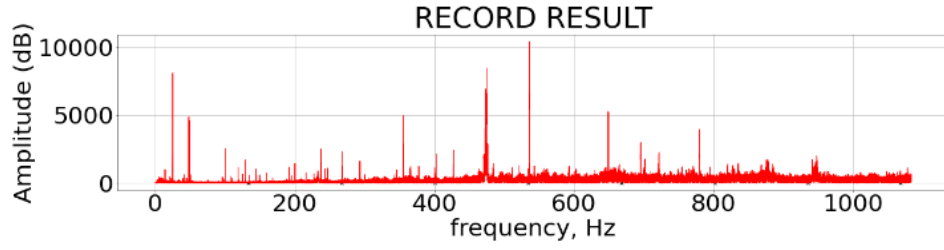
(a) Case2



(b) Case3



(c) Case4



(d) Case5

Gambar 9. Spectrum suara pada pengujian fault#2

```

Realtime Data
Masukkan File
inner.py
30.0
30.0
INNER RACE BEARING
frequency reference = 133.6 Hz with amplitude 14.0
frequency reference = 267.1 Hz with amplitude 9.0
frequency reference = 400.7 Hz with amplitude 49.0
frequency reference = 534.3 Hz with amplitude 39.0
frequency reference = 667.8 Hz with amplitude 17.0
frequency reference = 801.4 Hz with amplitude 15.0
frequency reference = 935.0 Hz with amplitude 4.0
frequency reference = 1068.5 Hz with amplitude 6.0
frequency tested = 133.6 Hz with amplitude 42.0
frequency tested = 267.1 Hz with amplitude 148.0
frequency tested = 400.7 Hz with amplitude 497.0
frequency tested = 534.3 Hz with amplitude 72.0
frequency tested = 667.8 Hz with amplitude 61.0
frequency tested = 801.4 Hz with amplitude 426.0
frequency tested = 935.0 Hz with amplitude 22.0
frequency tested = 1068.5 Hz with amplitude 27.0
[0.23840332]
0.2384033203125
[3.1598053]
3.1598052978515625
Inner Race Bearing is Broken
Run Exit
    
```

(a) Case2

```

Realtime Data
Masukkan File
inner.py
30.0
30.0
INNER RACE BEARING
frequency reference = 133.6 Hz with amplitude 14.0
frequency reference = 267.1 Hz with amplitude 60.0
frequency reference = 400.7 Hz with amplitude 33.0
frequency reference = 534.3 Hz with amplitude 10.0
frequency reference = 667.8 Hz with amplitude 18.0
frequency reference = 801.4 Hz with amplitude 17.0
frequency reference = 935.0 Hz with amplitude 6.0
frequency reference = 1068.5 Hz with amplitude 7.0
frequency tested = 133.6 Hz with amplitude 50.0
frequency tested = 267.1 Hz with amplitude 180.0
frequency tested = 400.7 Hz with amplitude 209.0
frequency tested = 534.3 Hz with amplitude 1323.0
frequency tested = 667.8 Hz with amplitude 104.0
frequency tested = 801.4 Hz with amplitude 31.0
frequency tested = 935.0 Hz with amplitude 58.0
frequency tested = 1068.5 Hz with amplitude 271.0
[0.52722168]
0.5272216796875
[0.5617981]
0.561798095703125
Inner Race Bearing is Broken
Run Exit
    
```

(b) Case3

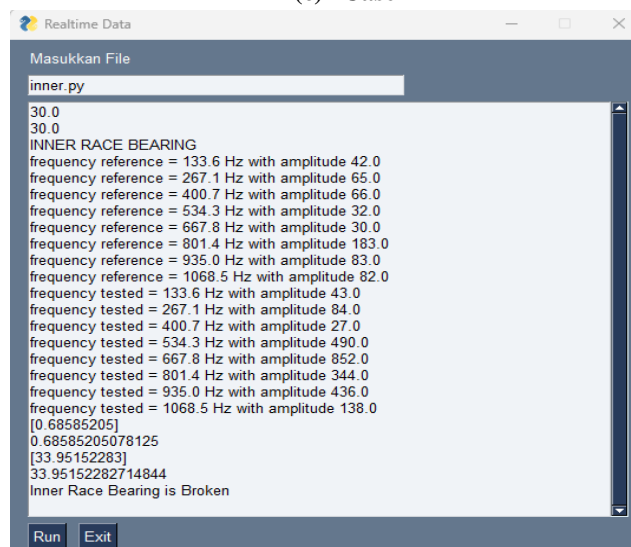


```

Masukkan File
inner.py
30.0
30.0
INNER RACE BEARING
frequency reference = 133.6 Hz with amplitude 14.0
frequency reference = 267.1 Hz with amplitude 42.0
frequency reference = 400.7 Hz with amplitude 19.0
frequency reference = 534.3 Hz with amplitude 19.0
frequency reference = 667.8 Hz with amplitude 22.0
frequency reference = 801.4 Hz with amplitude 7.0
frequency reference = 935.0 Hz with amplitude 23.0
frequency reference = 1068.5 Hz with amplitude 12.0
frequency tested = 133.6 Hz with amplitude 39.0
frequency tested = 267.1 Hz with amplitude 130.0
frequency tested = 400.7 Hz with amplitude 164.0
frequency tested = 534.3 Hz with amplitude 256.0
frequency tested = 667.8 Hz with amplitude 182.0
frequency tested = 801.4 Hz with amplitude 109.0
frequency tested = 935.0 Hz with amplitude 125.0
frequency tested = 1068.5 Hz with amplitude 66.0
[1.11009216]
1.1100921630859375
[0.724823]
0.724822998046875
Inner Race Bearing is Broken
Run Exit

```

(c) Case4



```

Masukkan File
inner.py
30.0
30.0
INNER RACE BEARING
frequency reference = 133.6 Hz with amplitude 42.0
frequency reference = 267.1 Hz with amplitude 65.0
frequency reference = 400.7 Hz with amplitude 66.0
frequency reference = 534.3 Hz with amplitude 32.0
frequency reference = 667.8 Hz with amplitude 30.0
frequency reference = 801.4 Hz with amplitude 183.0
frequency reference = 935.0 Hz with amplitude 83.0
frequency reference = 1068.5 Hz with amplitude 82.0
frequency tested = 133.6 Hz with amplitude 43.0
frequency tested = 267.1 Hz with amplitude 84.0
frequency tested = 400.7 Hz with amplitude 27.0
frequency tested = 534.3 Hz with amplitude 490.0
frequency tested = 667.8 Hz with amplitude 852.0
frequency tested = 801.4 Hz with amplitude 344.0
frequency tested = 935.0 Hz with amplitude 436.0
frequency tested = 1068.5 Hz with amplitude 138.0
[0.68585205]
0.68585205078125
[33.95152283]
33.95152282714844
Inner Race Bearing is Broken
Run Exit

```

(d) Case5

Gambar 10. Analisis spektrum pada pengujian fault#2

Rekapitulasi akurasi FD ditampilkan pada Tabel 3 dimana nilai rata-rata akurasi didapatkan dari pengujian sebanyak 5 kali pada setiap kasus tingkat kebisingan dan kerusakan bearing. Didapatkan bahwa seluruh pengujian mendapatkan akurasi tinggi baik pada tingkat kebisingan yang tergolong senyap (case1) ataupun tingkat kebisingan tinggi (case5). Dimana rata-rata akurasi FD untuk outer race sebesar 96,5% dan inner race 94,5%. Sedangkan jika disorot dari tiap tingkat kebisingan maka akurasi FD mendapatkan 95% pada case1, 96,25% pada case2, 96,25% pada case3, 98,75% pada case4, dan 91,25% pada case5. Karena akurasi FD bearing tidak dipengaruhi kondisi kebisingan ruangan maka dapat diasumsikan bahwa monitoring kondisi bearing dapat dilakukan pada kondisi senyap atau bising. Kebisingan ruangan yang bersumber dari suara non mesin tidak mempengaruhi hasil diagnosis bearing dikarenakan dengan metode yang diusulkan sumber suara lain mempunyai frekuensi sendiri diluar frekuensi bearing. Overlapping sinyal suara terjadi pada keseluruhan sinyal dalam domain waktu, namun

setelah difilter dan dianalisis melalui analisis spectrum maka suara non mesin tidak beroverlapping tepat di frekuensi outer race dan inner race.

Tabel 3. Rekapitulasi akurasi FD

Case	Akurasi FD		Rata Rata Akurasi
	Fault#1	Fault#2	
Case1	97,5%	92,5%	95%
Case2	95%	97,5%	96.25%
Case3	97,5%	95%	96.25%
Case4	100%	97,5%	98.75%
Case5	92,5%	90%	91.25%

4. Kesimpulan

Hasil penelitian menerapkan *band-pass* filter dengan analisis spectrum sebagai solusi meningkatkan akurasi monitoring. Kebisingan suara yang ditimbulkan oleh suara non motor akan memberikan lonjakan sinyal suara pada domain waktu. Namun dengan pendekatan yang usulkan maka frekwensi sinyal suara yang dihasilkan oleh motor dapat teridentifikasi. *Band-pass* filter membantu menentukan nilai *frequency of damage* sesuai lokasi diagnosis kondisi motor. Dari pengujian didapatkan kesimpulan bahwa kebisingan lingkungan tidak mempengaruhi akurasi FD sehingga tindakan FD dapat dilakukan pada kondisi lingkungan yang bising atau senyap. Secara keseluruhan akurasi FD didapatkan sebesar 95.58%. Hasil penelitian ini berguna sebagai pengembangan *tool* monitoring kondisi motor yang efektif, mudah diimplementasikan dan berharga murah sehingga pengguna motor dapat mengetahui kondisi motor secara kontinue. Hal ini bertujuan agar diagnosis dan prognosis dapat dilakukan dengan tepat. Dari kelebihan FD yang diusulkan maka dapat dikembangkan lebih lanjut untuk FD elemen motor lainnya misalnya FD pada *rotor bar*, *cage bearing*, dan keseimbangan *shaft rotor*.

Daftar Pustaka

Altaf, M., Uzair, M., Naeem, M., Ahmad, A., Badshah, S., Shah, J.A., Anjum, A., (2019). Automatic and efficient fault detection in rotating machinery using sound signals", *Acoustics Australia*, 47(2), pp.125-139.

Barusu, M.R., Deivasigamani, M., (2020). 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.

Choudhary, A., Mian, T. Fatima, S., (2021). Convolutional neural network based bearing fault diagnosis of rotating machine using thermal images. *Measurement*, 176, p.109196.

Cherif, B.D.E., Bendiabdellah, A., Seninete, S., (2019). A Comparative Study between Two Stator Current HHT and FFT Techniques for IM Broken Bar Fault Diagnosis: In 2019 6th

International Conference on Image and Signal Processing and their Applications (ISPA), Mostaganem, Algeria, 24-25 November 2019, pp. 1-6.

Ewert, P., Kowalski, C.T., Orłowska-Kowalska, T. (2020). Low-cost monitoring and diagnosis system for rolling bearing faults of the induction motor based on neural network approach. *Electronics*, 9(9), p.1334.

El Idrissi, A., Derouich, A., Mahfoud, S., El Ouanjli, N., Chantoufi, A., Al-Sumaiti, A.S., Mossa, M.A., (2022). Bearing Fault Diagnosis for an Induction Motor Controlled by an Artificial Neural Network—Direct Torque Control Using the Hilbert Transform", *Mathematics*, 10(22), p.4258.

Gangsar, Purushottam, Rajiv, T. (2019). Diagnostics of mechanical and electrical faults in induction motors using wavelet-based features of vibration and current through support vector machine algorithms for various operating conditions, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 41(2), pp. 1-25.

Gangsar, P., Tiwari, R., (2020). 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.

Khechekhouche, A., Cherif, H., Benakcha, A., Menacer, A., Chehaidia, S.E., Panchal, H., (2020). Experimental diagnosis of inter-turns stator fault and unbalanced voltage supply in induction motor using MCSA and DWER. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences (PEN)*, 8(3), pp.1202-1216.

Lin, H.C., Ye, Y.C., (2019). Reviews of bearing vibration measurement using fast Fourier transform and enhanced fast Fourier transform algorithms. *Advances in Mechanical Engineering*, 11(1), pp.1687814018816751.

Nakamura, H., Asano, K., Usuda, S., Mizuno, Y., (2021). A diagnosis method of bearing and stator fault in motor using rotating sound based on deep learning. *Energies*, 14(5), p.1319.

Okwuosa, C.N., Akpudo, U.E., Hur, J.W., (2022). A Cost-Efficient MCSA-Based Fault Diagnostic Framework for SCIM at Low-Load Conditions. *Algorithms*, 15(6), p.212.

Qiao, M., Yan, S., Tang, X., Xu, C, (2020). Deep convolutional and LSTM recurrent neural networks for rolling bearing fault diagnosis under strong noises and variable loads. *Ieee Access*, 8, pp.66257-66269.

Saputra, P.P.S., Firmansyah, R. Irawan, D., (2019). Various and multilevel of coiflet discrete wavelet transform and quadratic discriminant analysis for classification misalignment on three phase induction motor, *Journal of Physics: Conference Series*. 1367(1), pp. 012049.

Singh, P., Harsha, S.P., (2019). Statistical and frequency analysis of vibrations signals of roller bearings using empirical mode decomposition. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics*, 233(4), pp.856-870.

Vashishtha, G., Kumar, R., (2021). Autocorrelation energy and aquila optimizer for MED filtering of sound signal to detect bearing defect in Francis turbine. *Measurement Science and Technology*, 33(1), p.015006.

Zhang, X., Wan, S., He, Y., Wang, X., Dou, L., (2021). Teager energy spectral kurtosis of wavelet packet transform and its application in locating the sound source of fault bearing of belt conveyor. *Measurement*, 173, p.108367.