Perancangan dan Simulasi Deteksi Kerusakan *Bearing* Pada Motor Induksi Tiga Fasa Menggunakan FFT dan ANN

Sandi Hardiansyah[1], Sofian Yahya[2]

[1,2]Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bandung, Bandung 40559
E-mail : [1]sandi.hardiansyah.toi20@polban.ac.id
E-mail : [2]sofianyahya@polban.ac.id

ABSTRAK

Penggunaan motor induksi banyak digunakan di dunia industri, dikarenakan harga yang relatif murah dan pengoperasiannya yang mudah. Namun, seringkali terjadi kegagalan yang tidak dapat diprediksi dan menimbulkan kegagalan sistem yang fatal. Kegagalan yang paling banyak terjadi adalah kegagalan pada komponen bearing. Maka perlu suatu sistem yang dapat memonitoring kondisi kesehatan pada motor induksi. Penelitian ini bertujuan untuk mendeteksi dan mengklasifikasikan kerusakan bearing yang terjadi pada motor induksi berdasarkan Sinyal Vibrasi dan ANN. Metode ini dilakukan dengan mengakuisisi sinyal vibrasi yang diukur dan diolah menggunakan transformasi fourier untuk mengubah domain waktu menjadi domain frekuensi. Data tersebut kemudian digunakan untuk melatih model ANN untuk mengenali pola-pola karakteristik kerusakan pada bearing. Setelah pelatihan, model ANN ini akan digunakan untuk menganalisis data vibrasi dari bearing dan mendeteksi adanya tanda-tanda kerusakan. Hasil penelitian menunjukan bahwa metode deteksi kerusakan pada bearing (outer race) dalam mengklasifikasikan level kerusakan memiliki tingkat akurasi sebesar 100 %.

Kata Kunci
Artificial Neural Network (ANN), Transformasi Fourier, Vibrasi, Bearing

The use of induction motors is widely used in the industrial world, due to their relatively cheap price and easy operation. However, unpredictable failures often occur and cause fatal system failures. The most common failures are failures in bearing components. So we need a system that can monitor the health condition of the induction motor. This research aims to detect and classify bearing damage that occurs in induction motors based on vibration signals and ANN. This method is carried out by acquiring a vibration signal which is measured and processed using the Fourier transform to convert the time domain to the frequency domain. This data is then used to train an ANN model to recognize characteristic patterns of damage to bearings. After training, this ANN model will be used to analyze vibration data from the bearing and detect signs of damage. The research results show that the method for detecting damage to the bearing (outer race) in classifying the level of damage has an accuracy rate of 100%.

Keywords
Artificial Neural Network (ANN), Fourier Transform, Vibration, Bearing

1. PENDAHULUAN

Penggunaan motor induksi di dunia industri telah banyak digunakan dikarenakan harganya yang relatif murah, pemasangan dan pengoperasiannya yang mudah. Namun, seiring dengan penggunaan yang terus menerus tanpa pemantauan dan pemeliharaan yang baik dapat menyebabkan kerusakan atau kegagalan pada motor induksi, bahkan menimbulkan kerugian. Maka diperlukan deteksi dini pada motor induksi untuk melakukan tindakan preventif dan prediktif terhadap kegagalan yang mungkin terjadi pada motor induksi, dan hal tersebut dapat membantu para teknisi untuk mengambil tindakan.

Berbagai metode penelitian mengenai analisa deteksi kegagalan dan diagnosa pada motor induksi tiga fasa telah banyak dilakukan oleh peneliti dengan tujuan untuk mendapatkan metode dan hasil yang terbaik. Morales-Perez C, Rangel-Magdaleno J, Peregrina-Barreto H, Ramirez-Cortes J, Vazquez-Pacheco E. (1) melakukan penelitian untuk mengetahui kondisi motor secara non-kontak atau non-invasif menggunakan *Infra Red Thermograf* (IRT) yang didasarkan pada pendeteksian radiasi infra merah. Penelitian dengan metode yang lain dilakukan oleh Song X, Wang Z, Hu J. (2) dan Kompella KCD, Mannam VGR, Rayapudi SR (3) dengan

memanfaatkan pengukuran arus stator, yaitu membandingkan dan menguraikan sinyal arus stator dari motor yang sehat dan yang rusak.

Selain itu, dapat dilakukan menggunakan getaran/vibrasi pada motor. Seperti yang dilakukan oleh X. Wen, L. You (4) dan Romdhoni, Mardiansyah, Kusnadi H (5) melakukan pengukuran vibrasi pada motor induksi, kemudian data tersebut diolah menggunakan transformasi *wavelet* sehingga sinyal dapat diolah dengan baik dan terlihat jelas perbedaan kerusakan pada motor induksi.

Kemudian dapat ditambahkan *machine learning*, seperti Liu K, Xing J, Ji M. (6) menggunakan *Convolutional Neural Network* untuk mendeteksi kesalahan dengan akurasi 99.7% untuk diagnosis kesalahan. Peneliti lain Borhana AA, Bin Mustaffa Kamal DD, Latif SD, Ali YH, Ahmed Almahfoodh AN, El-Shafie A (7) menggunakan *Support Vector Machine* (SVM), dengan hasil dapat memperoleh karakteristik sinyal getaran, serta dengan akurasi yang tinggi dalam prediksi diameter patahan.

Penggunaan metode transformasi *wavelet* dan *fourier* dapat digabungkan dengan *Artificial Neural Network* (ANN) seperti yang dilakukan oleh G. Priyandoko (8) menggunakan *Discrete Wavelet Trasform* (DWT) untuk mengolah sinyal dan diklasifikasikan dengan *K-Nearest Neighbor* (KNN). Selain menggunakan transformasi *wavelet*, peneliti W. P. Hastuti (9) dan Lawbootsa S, Chommaungpuck P, Srisertpol J (10) juga melakukan analisa mengenai karakteristik getaran pada motor induksi menggunakan metode *Fast Fourier Transform* (FFT) dengan hasil mampu mengenali kerusakan *bearing*.

Maka dari itu, meninjau dari beberapa penelitian yang telah dilakukan di atas. tulisan ini akan menyajikan deteksi kesalahan *bearing* pada motor induksi tiga fasa 1,5 kW 220 V menggunakan transformasi *fourier* dengan parameter *vibration* menggunakan sensor akselerometer CA-YD-185TNC, setelah data diolah dengan transformasi *fourier*, maka data tersebut akan digunakan untuk *dataset neural network* berbasis Matlab dengan tingkat akurasi alat sebesar 95%.

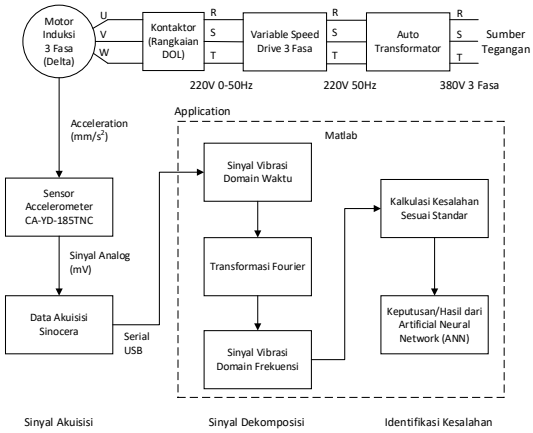
2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Ruang Lingkup Penelitian

Penulis berfokus pada pendeteksian bearing tipe 6205 *single deep groove ball* pada motor induksi 3 fasa menggunakan metode transformasi *fourier* dan ANN. Kemudian perancangan dan simulasi ini dilakukan dengan merancang rangkaian kendali motor induksi 3 fasa serta sistem akuisisi data vibrasi, selanjutnya data tersebut diolah dan disimulasikan menggunakan ANN dengan MATLAB.

2.2 Deskripsi Kerja Sistem

Berikut merupakan diagram blok yang merepresentasikan mengenai prinsip kerja pada sistem yang tercantum pada gambar 1.



Gambar 1. Deskripsi Kerja Sistem

Untuk mendeteksi kegagalan pada motor induksi, parameter yang digunakan adalah memanfaatkan getaran sebagai tolak ukur mengenai kerusakan bearing pada motor induksi dengan pengukuran getaran secara langsung pada sisi NDE. Terdapat tiga bagian alur proses deskripsi kerja sistem diantaranya:

1) Sinyal Akuisisi

Pada bagian ini merupakan bagian hardware, yaitu rangkaian motor induksi 3 fasa 1,5 kW dihubung secara delta, kemudian dihubungkan dengan *variable speed drive* (VSD) dengan sumber tegangan 220 VAC 3 fasa menggunakan auto transformator. Bearing yang terpasang pada motor induksi merupakan bearing 6205. Yaitu bearing dengan jenis Single Row Deep Groove Ball dengan ukuran diameter dalam 25 mm, dan diameter luar 52 mm.

Kemudian, Sensor yang akan dipakai untuk pengukuran vibrasi ini adalah sensor akselerometer CA-YD-185TNC dengan sensitivitas 4,96 mV/ms2. Sinyal tersebut akan diterima oleh data akuisisi sinocera. Fungsi dari data akuisisi ini adalah untuk mengakuisisi setiap perubahan getaran yang diukur oleh sensor, dan data tersebut akan diteruskan dan diolah menggunakan aplikasi Matlab.

2) Sinyal Dekomposisi

Pada tahapan sinyal dekomposisi ini, sinyal yang masuk masih dalam domain waktu. Sinyal vibrasi dalam domain waktu kurang informatif mengenai kerusakan yang terjadi. Maka sinyal tersebut perlu diolah menjadi sinyal yang mudah untuk dipahami dan dianalisa dalam domain frekuensi (Hz). Maka metode yang digunakan untuk mengolah dinyal tersebut adalah transformasi fourier.

Transformasi fourier merupakan salah satu metode untuk mengubah sinyal dalam domain waktu menjadi

domain frekuensi. Setelah, sinyal vibrasi berada dalam domain frekuensi. Maka, pada beberapa spektrum frekuensi merepresentasikan kerusakan tertentu pada kondisi bearing.

3) Identifikasi Kesalahan

Dalam mengidentifikasi kesalahan pada sistem deteksi kerusakan bearing, menggunakan artificial neural network. Dimana, ANN tersebut akan dilatih terlebih dahulu belajar mengenai pola pola tertentu yang mengidentifikasikan kerusakan pada bearing menggunakan data hasil pengukuran sebanyak 70% untuk pelatihan, dan 30% untuk validasi dan pengujian. Setelah ANN dapat mengenal pola, maka dapat dilakukan pengujian dengan pengukuran sinyal vibrasi pada bearing. Dan ANN akan melakukan kalkulasi perhitungan kesalahan sesuai standar, serta memutuskan kesalahan jenis kesalahan pada bearing berdasarkan pelatihan yang dilakukan sebelumnya.

2.3 Kerusakan *Bearing Outer Race Defect*

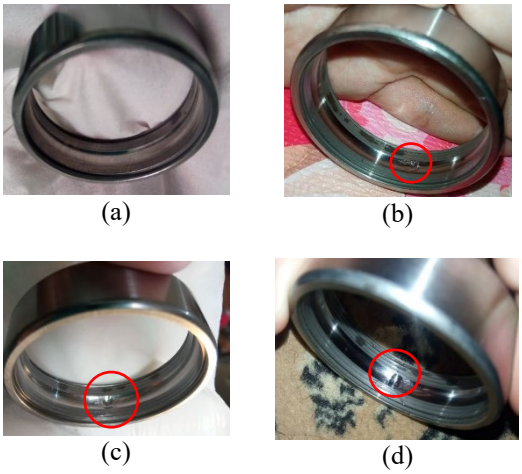
Frekuensi kerusakan pada bearing dapat dihitung, dan dinyatakan pada persamaan berikut ini terutama pada bagian *outer race*.

$$\text{BPFO} = \left(\frac{Nb}{2}\right)(fr)\left(1 - \text{Bd}\frac{\cos\varphi}{\text{Pd}}\right) \quad (1)$$

Di mana:

Nb : *Number of balls*
Fr : *Speed of rotor* (Hz)
Bd : *Ball diameter* (mm)
Pd : *Pitch diameter* (mm)
φ : *contact angle* (°), bernilai nol derajat untuk bantalan seri 6xxx)

Gambar 2 menunjukkan *bearing* dalam kondisi normal, rusak ringan, sedang, dan berat.



Gambar 2. Kondisi *Bearing* (a) Normal (b) *Outer Race Defect Level* 1 (c) *Outer Race Defect Level* 2 (d) *Outer Race Defect Level* 3

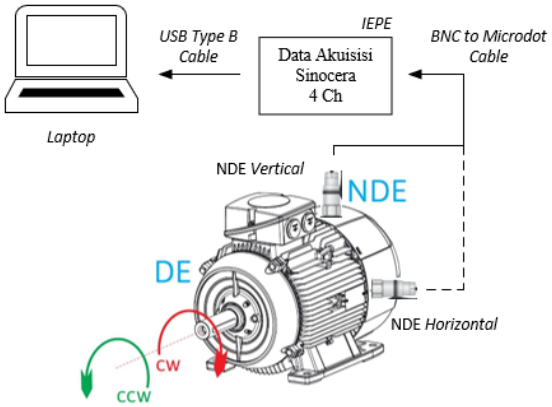
Kerusakan yang terjadi setiap *level* adalah lamanya proses mengikis pada jalur lintasan luar. Serta berdasarkan kedalaman kikisan yang dibuat. Masing-masing terlihat mirip satu sama lain, tetapi terdapat perbedaan yang cukup signifikan tiap kondisi.

2.4 Tahap Pengambilan Data

Pada tahap pengambilan data, dilakukan sebanyak 4x. yaitu pada kondisi bearing normal, rusak ringan, rusak sedang, dan rusak berat. Dalam setiap pengambilan data, motor dibongkar dan dipasang dengan bearing yang akan diuji. Berikut merupakan tahapan pengambilan data.

1) Pembongkaran motor, penggantian *bearing*, dan pemasangan kembali.
2) Menghidupkan motor.
3) Mengukur putaran poros dengan mengguna-kan tachometer.
4) Memasang sensor accelerometer pada posisi NDEH dan NDEV.
5) Melakukan pengambilan data.
6) Data disimpan dan diolah menggunakan Matlab

Gambaran proses pengambilan data dapat dilihat pada gambar dibawah ini.



Gambar 3. Pick Up Point Pengukuran

2.5 Tahap Pengolahan dan Pengujian Data

Data yang sudah dikumpulkan pada setiap kondisi bearing, diolah menggunakan ANN untuk dijadikan dataset training. Setelah training ANN dilakukan, maka akan dilakukan simulasi pengujian ANN dengan angka secara manual pada aplikasi Matlab

2.6 Tahap Analisa Data

Membandingkan karakteristik getaran antara bantalan kondisi baik dengan bantalan kondisi rusak, pada domain frekuensi. Parameter yang di-bandingkan adalah amplitudo dan frekuensi. Karena amplitudo sebanding dengan besarnya gaya eksitasi yang terjadi pada komponen bantalan. Apabila terjadi kerusakan pada komponen bantalan, maka timbul amplitudo tinggi pada frekuensi tertentu.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

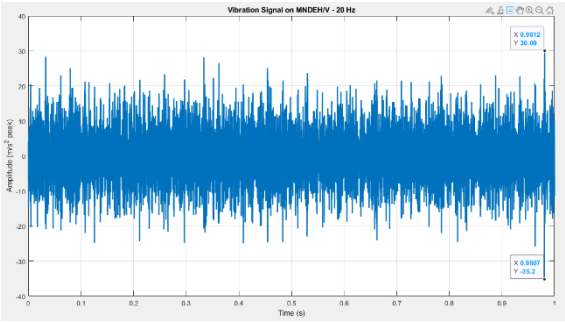
3.1 Pengujian Vibrasi Kondisi Bearing Normal

Pada pengujian *bearing* kondisi normal, dilakukan dengan kondisi kecepatan 1200 RPM konstan tanpa beban, diukur pada posisi NDEH dan NDEV. Hasil grafik diambil beberapa kali pengukuran untuk dianalisis secara spektrum frekuensi.

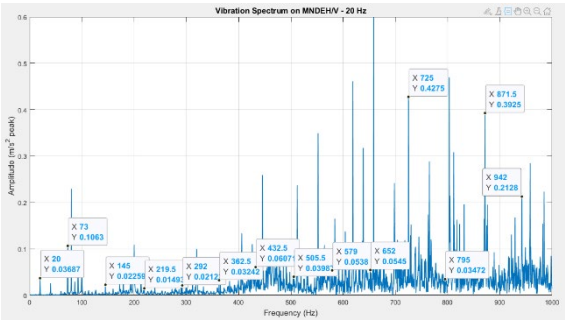
Tabel 1. Data Frekuensi BPFO Bearing Normal

Freq. (Hz)	NDEH (m/s^2 *peak*)	NDEV (m/s^2 *peak*)	NDEH (mm/s rms)	NDEV (mm/s rms)	*ISO-10816 (mm/s rms)*
72.5	0.107158	0.055621	0.602735	0.312854	A = 0 s/d 1.4 B = 1.4 s/d 2.8 C = 2.8 s/d 4.5 D = > 4.5
145	0.022505	0.242167	0.126584	1.362121	
217.5	0.013656	0.083921	0.076811	0.472033	
290	0.024065	0.185173	0.135361	1.041545	
362.5	0.026156	0.077917	0.147118	0.438262	
435	0.044853	0.030965	0.252287	0.174167	
507.5	0.032602	0.024716	0.183377	0.13902	
580	0.063548	0.020015	0.357441	0.11258	
652.5	0.095621	0.048654	0.53784	0.273666	
725	0.325698	0.312517	1.831959	1.757821	
797.5	0.07667	0.045322	0.431244	0.254925	
870	0.312133	0.569819	1.755657	3.205069	
942.5	0.128488	0.150363	0.722706	0.84575	
Result				0.675036	

Pada tabel 1 hasil pengukuran, nilai amplitudo pada frekuensi BPFO relatif sama. Kemudian, nilai amplitudo terbesar pada frekuensi 870Hz yaitu 0.569 m/s^2. Lalu, dibandingkan dengan standar ISO 10816 dan hasilnya secara keseluruhan menunjukkan masih dalam rentang kondisi normal.



Gambar 4. Sinyal Domain Waktu MNDEH pada *Bearing* Normal



Gambar 5. Sinyal Domain Frekuensi MNDEH pada *Bearing* Normal

Pada gambar 4, menunjukkan gelombang cukup konstan dan amplitudo yang cukup kecil, namun belum cukup informatif untuk dilihat dan dianalisis. Kemudian grafik tersebut dianalisis pada frekuensi BPFO dan harmoniknya. Terlihat tidak ada nilai signifikan, dengan rentang 0 hingga 0.4 m/s^2 *peak*. Dapat kita simpulkan bahwa kondisi bearing masih dalam keadaan normal.

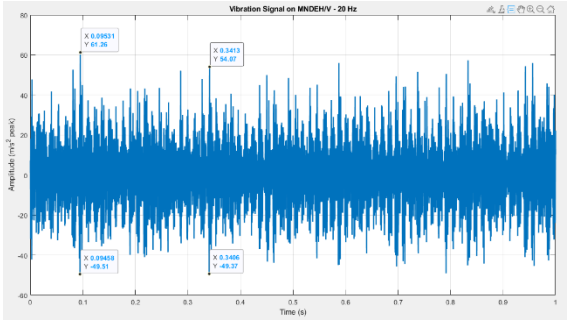
3.2 Pengujian Vibrasi Kondisi Kerusakan *Outer Level* 1

Data pengujian frekuensi BPFO *Bearing Outer Race Level* 1 tercantum pada tabel 2.

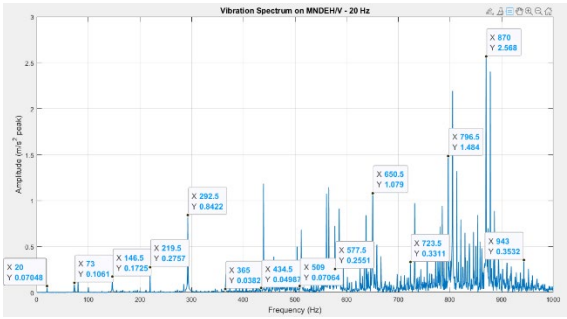
Tabel 2. Data Frekuensi BPFO Bearing Outer Race Level 1

Freq. (Hz)	NDEH (m/s^2 *peak*)	NDEV (m/s^2 *peak*)	NDEH (mm/s rms)	NDEV (mm/s rms)	*ISO-10816 (mm/s rms)*
72.5	0.106123	0.072601	0.596909	0.408358	A = 0 s/d 1.4 B = 1.4 s/d 2.8 C = 2.8 s/d 4.5 D = > 4.5
145	0.172497	0.243251	0.970248	1.368217	
217.5	0.275737	0.384287	1.550941	2.161505	
290	0.842188	0.829901	4.737065	4.667956	
362.5	0.038198	0.220457	0.214852	1.240006	
435	0.049872	0.133796	0.280513	0.752564	
507.5	0.070636	0.299742	0.397305	1.685964	
580	0.255132	0.525083	1.435047	2.953442	
652.5	1.079173	1.178404	6.070039	6.628183	
725	0.331116	1.386143	1.862431	7.796659	
797.5	1.484207	3.395681	8.348236	19.09973	
870	2.568083	3.944594	14.44473	22.18721	
942.5	0.353153	0.708219	1.986386	3.983528	
Result				4.493183	

Pada tabel 2, dapat dilihat bahwa yang dijadikan acuan adalah dengan satuan *velocity* rms. Dapat dibandingkan dengan standar ISO 10816, kemudian kesimpulan secara keseluruhan, bahwa kondisi *bearing* tersebut menunjukkan kerusakan yang penulis sebuat kerusakan tiruan *outer race level* 1.



Gambar 6. Sinyal Domain Waktu MNDEH pada Kerusakan *Bearing Outer Race Level* 1



Gambar 7. Sinyal Domain Frekuensi MNDEH pada Kerusakan Bearing Outer Race Level 1

Pada gambar 6, gelombang mulai menunjukkan kenaikan amplitudo dibandingkan *bearing* normal. Pada gambar 7 terdapat amplitudo yang signifikan nilainya, mencapai 2.5 m/s^2 *peak* frekuensi 870Hz.

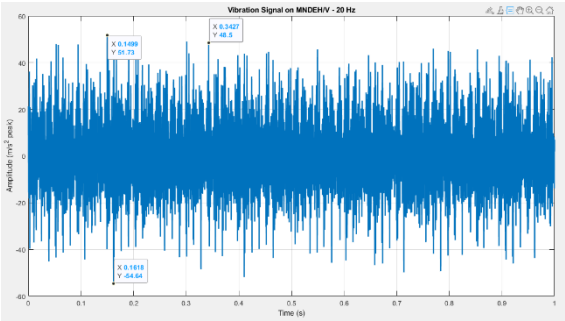
3.3 Pengujian Vibrasi Kondisi Kerusakan *Outer Level* 2

Berikut data pengujian frekuensi BPFO *Bearing Outer Race Level* 2 yang tercantum pada tabel 3.

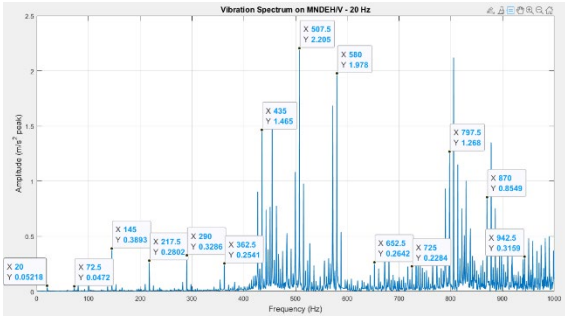
Tabel 3. Data Frekuensi BPFO Bearing Outer Race Level 2

Freq. (Hz)	NDEH (m/s^2 *peak*)	NDEV (m/s^2 *peak*)	NDEH (mm/s rms)	NDEV (mm/s rms)	*ISO-10816 (mm/s rms)*
72.5	0.047203	0.062409	0.265501	0.35103	A = 0 s/d 1.4 B = 1.4 s/d 2.8 C = 2.8 s/d 4.5 D = > 4.5
145	0.389314	0.592377	2.189778	3.331949	
217.5	0.280175	0.886654	1.575904	4.987172	
290	0.32859	1.569593	1.848223	8.828509	
362.5	0.254071	2.342227	1.429079	13.17436	
435	1.464941	4.246863	8.239873	23.88739	
507.5	2.205228	2.647125	12.40377	14.88932	
580	1.977993	8.597223	11.12565	48.35691	
652.5	0.264219	1.300976	1.486157	7.317616	
725	0.228434	0.985255	1.284875	5.541775	
797.5	1.268475	2.029273	7.134808	11.41408	
870	0.854887	2.580366	4.808497	14.51382	
942.5	0.315861	0.643188	1.776629	3.61775	
Result				8.275534	

Pada tabel 3, dapat dilihat bahwa yang dijadikan acuan adalah dengan satuan *velocity* rms. Setelah diubah kedalam *velocity*, dapat dibandingkan dengan standar ISO 10816, kemudian jika ditarik kesimpulan secara keseluruhan rata-ratanya bahwa kondisi *bearing* tersebut menunjukkan kerusakan yang penulis sebut kerusakan tiruan *outer race level* 2.



Gambar 8. Sinyal Domain Waktu MNDEH pada Kerusakan *Bearing Outer Race Level* 2



Gambar 9. Sinyal Domain Frekuensi MNDEH pada Kerusakan *Bearing Outer Race* Level 2

Gambar 8 menunjukkan gelombang memiliki amplitudo tertinggi sebesar 48.5 m/s^2 *peak*, dan kurang informatif. Pada gambar 9 bahwa amplitudo pada frekuensi BPFO dan harmoniknya naik secara signifikan dibandingkan sebelumnya mencapai 2.2 m/s^2 *peak* pada frekuensi 507.5Hz.

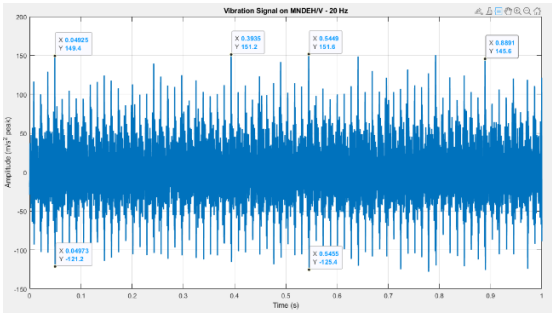
3.4 Pengujian Vibrasi Kondisi Kerusakan *Outer Level* 3

Berikut data pengujian frekuensi BPFO *Bearing Outer Race Level* 3 yang tercantum pada tabel 4.

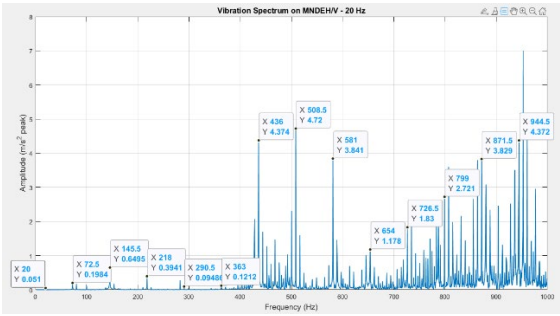
Tabel 4. Data Frekuensi BPFO Bearing Outer Race Level 3

Freq. (Hz)	NDEH (m/s^2 *peak*)	NDEV (m/s^2 *peak*)	NDEH (mm/s rms)	NDEV (mm/s rms)	*ISO-10816 (mm/s rms)*
72.5	0.198445	0.117018	1.116198	0.658191	A = 0 s/d 1.4 B = 1.4 s/d 2.8 C = 2.8 s/d 4.5 D = > 4.5
145	0.649485	0.773456	3.653168	4.35047	
217.5	0.394132	0.99323	2.216881	5.586631	
290	0.09486	1.034015	0.533559	5.816038	
362.5	0.121248	0.1067	0.681984	0.600156	
435	4.373552	2.698715	24.59998	15.1795	
507.5	4.720346	5.345695	26.55059	30.068	
580	3.841453	8.787064	21.60707	49.42471	
652.5	1.177992	1.950641	6.625864	10.9718	
725	1.829763	1.688595	10.29189	9.497864	
797.5	2.720861	1.705017	15.30406	9.590234	
870	3.828517	0.568065	21.53431	3.195204	
942.5	4.371796	0.999255	24.5901	5.620522	
Result				11.84964	

Pada tabel 4, setelah diubah kedalam *velocity*, dapat dibandingkan dengan standar ISO 10816, dapat ditarik kesimpulan secara keseluruhan rata-ratanya bahwa kondisi *bearing* tersebut menunjukkan kerusakan yang penulis sebut kerusakan tiruan *outer race level* 3. Dari data tersebut disatukan dan melihat pola dari tiap frekuensi BPFO dan harmoniknya.



Gambar 10. Sinyal Domain Waktu MNDEH pada Kerusakan *Bearing Outer Race Level* 3

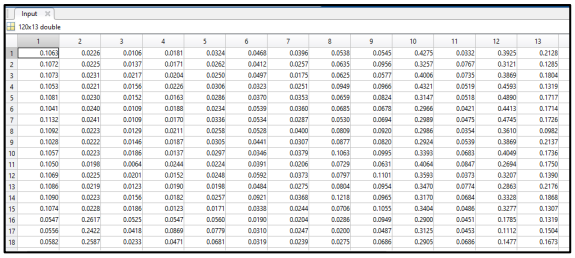


Gambar 11. Sinyal Domain Frekuensi MNDEH pada Kerusakan Bearing Outer Race Level 3

Pada gambar 10, terlihat bahwa gelombang memiliki amplitudo tertinggi sebesar ±150 m/s^2 *peak*. Kemudian, dapat dilihat pada gambar 11 amplitudo pada frekuensi BPFO dan harmoniknya naik secara signifikan dibandingkan sebelumnya mencapai 4.72 m/s^2 *peak* pada frekuensi 507.5Hz.

3.5 Pelatihan *Artificial Neural Network*

Dari data yang telah dikumpulkan, lalu disimpan dan dimasukkan kedalam *Workspace* MATLAB. Beikut merupakan tampilan *input* dan target dalam *variables* di *workspace*.



Input

120x13 double

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	0.1063	0.0226	0.0106	0.0181	0.0324	0.0468	0.0396	0.0538	0.0545	0.4275	0.0332	0.3925	0.2128
2	0.1072	0.0225	0.0137	0.0171	0.0262	0.0412	0.0257	0.0635	0.0956	0.3257	0.0767	0.3121	0.1285
3	0.1073	0.0231	0.0217	0.0204	0.0250	0.0497	0.0175	0.0625	0.0577	0.4006	0.0735	0.3869	0.1804
4	0.1053	0.0221	0.0156	0.0226	0.0306	0.0323	0.0251	0.0949	0.0966	0.4321	0.0519	0.4593	0.1319
5	0.1081	0.0230	0.0152	0.0163	0.0286	0.0370	0.0353	0.0659	0.0824	0.3147	0.0518	0.4890	0.1717
6	0.1041	0.0240	0.0109	0.0188	0.0234	0.0539	0.0360	0.0685	0.0678	0.2966	0.0421	0.4413	0.1714
7	0.1132	0.0241	0.0109	0.0170	0.0336	0.0534	0.0287	0.0530	0.0684	0.2989	0.0475	0.4745	0.1726
8	0.1092	0.0223	0.0129	0.0211	0.0258	0.0528	0.0400	0.0809	0.0920	0.2986	0.0354	0.3610	0.0982
9	0.1028	0.0222	0.0146	0.0187	0.0305	0.0441	0.0307	0.0877	0.0820	0.2924	0.0539	0.3869	0.2137
10	0.1057	0.0223	0.0186	0.0137	0.0297	0.0346	0.0379	0.1063	0.0995	0.3393	0.0683	0.4049	0.1736
11	0.1050	0.0198	0.0064	0.0244	0.0224	0.0391	0.0206	0.0729	0.0631	0.4064	0.0847	0.2694	0.1750
12	0.1069	0.0225	0.0201	0.0152	0.0248	0.0592	0.0373	0.0797	0.1101	0.3593	0.0373	0.3207	0.1390
13	0.1086	0.0219	0.0123	0.0190	0.0198	0.0484	0.0275	0.0804	0.0954	0.3470	0.0774	0.2863	0.2176
14	0.1090	0.0223	0.0156	0.0182	0.0257	0.0921	0.0368	0.1218	0.0965	0.3170	0.0684	0.3328	0.1868
15	0.1074	0.0228	0.0186	0.0123	0.0171	0.0338	0.0244	0.0706	0.1055	0.3404	0.0486	0.3277	0.1307
16	0.0547	0.2617	0.0525	0.0547	0.0560	0.0190	0.0204	0.0286	0.0949	0.2900	0.0451	0.1785	0.1319
17	0.0556	0.2422	0.0418	0.0869	0.0779	0.0310	0.0247	0.0200	0.0487	0.3125	0.0453	0.1112	0.1504
18	0.0582	0.2587	0.0233	0.0471	0.0681	0.0319	0.0239	0.0275	0.0686	0.2905	0.0686	0.1477	0.1673

Gambar 12.Tabel *Input.mat* pada MATLAB

Di mana, jumlah data pada *input* dan target sama. Jika dilihat pada perkalian matrix. Matrix *Input* sebanyak 120 x 13 sedangkan Matrix Target sebanyak 120 x 4 data. Target pada rentang 0 sampai 1 menjadi pertimbangan, hal ini dikarenakan ketika dimasukkan ke dalam target, target tidak dapat *non-biner*.

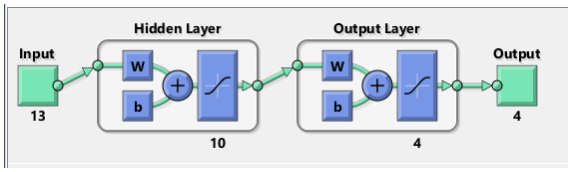
Tabel 5. Parameter Pelatihan ANN

Architecture	*2 Layer (1 Hidden Layer 1 Output)*
Training Algorithm	*Feed-Forward Back-Propagation*
Transfer Function	*TANSIG*
Maximum Training Epoch	*100*
Performance Function	*Mean Square Error (MSE)*
Hidden Neurons	*10*

Parameter pelatihan *training* yang digunakan menggunakan *Feed-Forward Back-Propagation*. Dengan *hidden neurons* sebanyak 10, dan parameter *performance* berdasarkan *Mean Square Error (MSE)*.

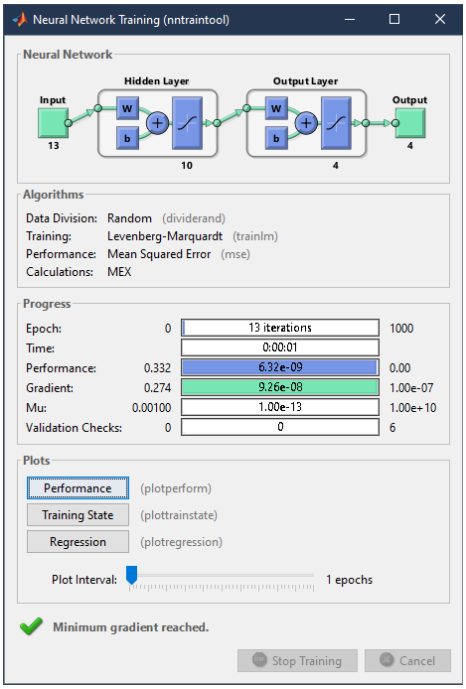
3.6 Hasil Pelatihan *Artificial Neural Network*

Data set training diolah dengan ANN, dengan hasil yang tercantum pada gambar 14.

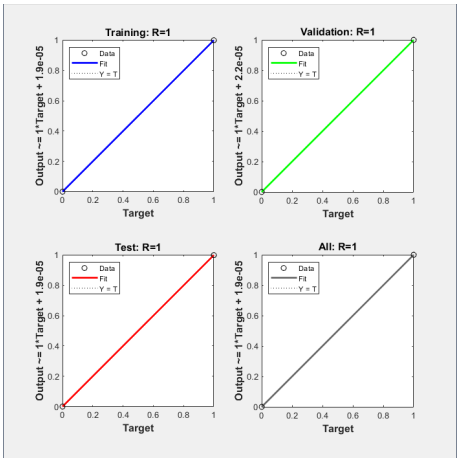


Gambar 13. Diagram Neural Network

Jumlah *input* sebanyak 13, jumlah *neuron* pada *hidden layer* sebanyak 10 dan jumlah *output* yaitu sebanyak 4 *output*.



Gambar 14. Hasil Pelatihan *Neural Network*



Gambar 15. Hasil *Regression* pada *Neural Network*

Berdasarkan gambar 16 merupakan hasil regresi yang menunjukkan bahwa hasil pelatihan untuk output dapat diklasifikasikan dengan baik sesuai target.

3.7 Simulasi Pengujian ANN

Simulasi Pengujian dilakukan beberapa kali percobaan, berikut merupakan hasil pengujian ANN dan perbandingannya dengan analisa secara spektrum frekuensi, agar dapat diuji kebenerannya dari hasil sistem ANN yang telah dibuat berdasarkan *dataset training* yang dikumpulkan

3.7. 1 Analisa dan Simulasi BPFO Bearing Normal dan Outer Race Defect Level 1

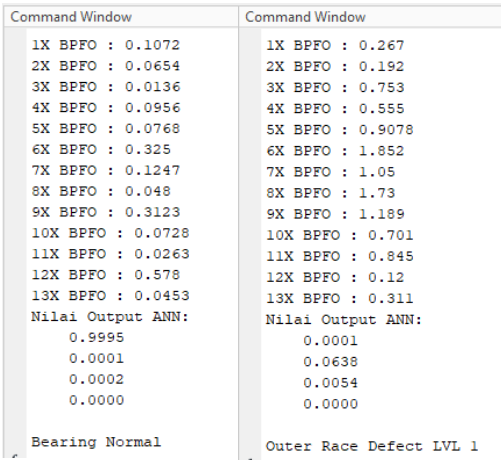
Berikut data pengujian frekuensi BPFO *Bearing* Normal dan *Outer Race Defect* Level 1 yang tercantum pada tabel 5.

Tabel 5. Data Frekuensi BPFO Bearing Normal dan Outer Race Defect Level 1

Freq. (Hz)	Normal		Outer Race Lvl. 1		*ISO-10816 (mm/s rms)*
	NDE (m/s^2 *peak*)	NDE (mm/s rms)	NDE (m/s^2 *peak*)	NDE (mm/s rms)	
72.5	0.1072	0.602969	0.267	1.501798	A = 0 s/d 1.4 B = 1.4 s/d 2.8 C = 2.8 s/d 4.5 D = > 4.5
145	0.0654	0.367856	0.192	1.079945	
217.5	0.0136	0.076496	0.753	4.235409	
290	0.956	5.377226	0.555	3.121716	
362.5	0.0768	0.431978	0.9078	5.106114	
435	0.325	1.828032	1.85	10.40572	
507.5	0.1247	0.701402	1.05	5.905949	
580	0.048	0.269986	1.73	9.730754	
652.5	0.3123	1.756598	1.18	6.637161	
725	0.0728	0.409479	0.701	3.942924	
797.5	0.0263	0.14793	0.845	4.752883	
870	0.578	3.251084	0.12	0.674966	
942.5	0.0453	0.2548	0.311	1.749286	
Result		1.190449		4.526509	

Pada table 5 diatas, dengan analisis secara spektrum frekuensi, didapatkan hasil bahwa bearing dengan kondisi normal, berada direntang *New Machine Condition* menurut ISO 10816, sedangkan pada kondisi Outer Race Defect tersebut berada direntang *Vibration Causes Damaged*. Namun masih berada dalam klasifikasi kerusakan ringan berdasarkan *dataset* yang diambil.

Berikut merupakan hasil simulasi ANN yang dilakukan pada kedua kondisi *bearing*.



Gambar 16. Hasil Simulasi Bearing Normal dan Outer Race Defect Level 1

Dapat dilihat bahwa hasil pada simulasi kondisi normal dan kerusakan ringan, sama seperti hasil pada analisa spektrum frekuensi, dimana ANN dengan tepat dapat mengklasifikasikan kerusakan.

3.7. 2 Analisa dan Simulasi BPFO Bearing Outer Race Defect Level 2 dan 3

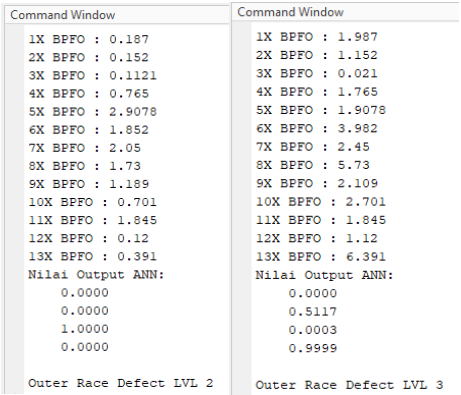
Berikut data pengujian frekuensi BPFO *Bearing Outer Race Defect* Level 2 dan 3 yang tercantum pada tabel 6.

Tabel 6. Data Frekuensi BPFO Outer Race Defect Level 2 dan 3

Freq. (Hz)	Outer Race Lvl. 2		Outer Race Lvl. 3		*ISO-10816 (mm/s rms)*
	NDE (m/s^2 *peak*)	NDE (mm/s rms)	NDE (m/s^2 *peak*)	NDE (mm/s rms)	
72.5	0.187	1.051821	1.98	11.13693	A = 0 s/d 1.4 B = 1.4 s/d 2.8 C = 2.8 s/d 4.5 D = > 4.5
145	0.152	0.854956	1.15	6.46842	
217.5	0.1121	0.63053	0.021	0.118119	
290	0.765	4.302905	1.76	9.899495	
362.5	2.91	16.36791	1.91	10.7432	
435	1.85	10.40572	3.98	22.38636	
507.5	2.05	11.53066	2.45	13.78055	
580	1.73	9.730754	5.73	32.22961	
652.5	1.18	6.637161	2.11	11.86814	
725	0.701	3.942924	2.71	15.24297	
797.5	1.85	10.40572	1.84	10.34947	
870	0.12	0.674966	1.12	6.299679	
942.5	0.391	2.199263	6.31	35.49194	
Result		6.056561		14.30884	

Pada table 6 diatas, dengan analisis secara spektrum frekuensi, didapatkan hasil bahwa bearing dengan kondisi rusak level 2 dan 3, berada direntang *Vibration Causes Damaged* menurut ISO 10816, Namun masih berada dalam klasifikasi kerusakan sedang dan berat berdasarkan *dataset* yang diambil.

Berikut merupakan hasil simulasi ANN yang dilakukan pada kedua kondisi *bearing*.



Gambar 17. Hasil Simulasi Bearing Outer Race Defect Level 2 dan 3

Dapat dilihat bahwa hasil pada simulasi pada kerusakan sedang dan berat, sama seperti hasil pada analisa spektrum frekuensi, dimana dapat dikatakan ANN dengan tepat dapat mengklasifikasikan kerusakan.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan pada sistem diagnosa kegagalan bearing (*outer race*) dengan jenis 6205 pada motor induksi tiga fasa dapat disimpulkan sebagai berikut.

Dari beberapa percobaan simulasi yang mewakili masing-masing kondisi bearing mulai dari kondisi normal, kerusakan ringan, sedang, dan berat. Sistem ANN mampu mengklasifikasikan dengan tepat kegagalan jenis bearing 6205 (outer race). Maka, dapat disimpulkan tingkat akurasi ANN sebesar 100%.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Politeknik Negeri Bandung melalui Wakil Direktur bidang akademik yang telah memberikan bantuan pembiayaan Penelitian mahasiswa program sarjana terapan dan diploma III tahun akademik 2023/2024 sesuai dengan SK Direktur Nomor B/295/PL1/HK.02.00/2024.

DAFTAR PUSTAKA

1. Morales-Perez C, Rangel-Magdaleno J, Peregrina-Barreto H, Ramirez-Cortes J, Vazquez-Pacheco E. Bearing Fault Detection Technique by using Thermal Images: A case of Study. Dalam: 2019 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) [Internet]. Auckland, New Zealand: IEEE; 2019 [dikutip 19 Februari 2024]. hlm. 1–6. Tersedia pada: https://ieeexplore.ieee.org/document/8826953/
2. Song X, Wang Z, Hu J. Detection of Bearing Outer Race Fault in Induction Motors using Motor Current Signature Analysis. Dalam: 2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS) [Internet]. Harbin, China: IEEE; 2019 [dikutip 19 Februari 2024]. hlm. 1–5. Tersedia pada: https://ieeexplore.ieee.org/document/8922036/
3. Kompella KCD. DWT based bearing fault detection in induction motor using noise cancellation. Journal of Electrical Systems and Information Technology. 2016;
4. Wen X, You L. A Novel Rolling Bearing Fault Detection Method based on Wavelet Transform and Empirical Mode Decomposition. Dalam: 2019 Chinese Control Conference (CCC) [Internet]. Guangzhou, China: IEEE; 2019 [dikutip 19 Februari 2024]. hlm. 5024–7. Tersedia pada: https://ieeexplore.ieee.org/document/8865967/
5. Romdhoni, Mardiansyah, Kusnadi H. Bearing Fault Detection Menggunakan Metode Wavelet Berbasis Labview. tech. 10 April 2023;22(1):49–58.
6. Liu K, Xing J, Ji M. Bearing Fault Detection Method Based on Convolutional Neural Network. Dalam: 2020 International Conference on Computer Information and Big Data Applications (CIBDA) [Internet]. Guiyang, China: IEEE; 2020 [dikutip 19 Februari 2024]. hlm. 219–23. Tersedia pada: https://ieeexplore.ieee.org/document/9148241/
7. Borhana AA, Latif SD. Fault Detection of Bearing using Support Vector Machine-SVM. 2020;
8. Priyandoko G. Klasifikasi Kerusakan Motor Induksi Menggunakan Metode Transformasi Wavelet Diskrit Dan K-Nearest Neighbor. JOINTECS. 31 Mei 2021;6(2):109.
9. Hastuti WP. EFISIENSI DARI KARAKTERISTIK GETARAN MOTOR LISTRIK MENGGUNAKAN FAST FOURIER TRANSFORM DAN NEURAL NETWORK. 2012;9(2).
10. Lawbootsa S, Chommaungpuck P, Srisertpol J. Linear Bearing Fault Detection in Operational Condition Using Artificial Neural Network. Bardis N, editor. ITM Web Conf. 2019;24:01004.