
DETEKSI KERUSAKAN *INNER RACE BEARING* GENERATOR SINKRON MELALUI ANALISA ARUS STATOR DENGAN *FAST FOURIER TRANSFORM*

Belly Yan Dewantara

Fakultas Teknik dan Ilmu Kelautan, Program Studi Teknik Elektro
Universitas Hang Tuah

Email: bellyyandewantara@hangtuah.ac.id

Iradiratu Diah Prahmana Karyatanti

Fakultas Teknik dan Ilmu Kelautan, Program Studi Teknik Elektro
Universitas Hang Tuah

Email: iradiratu@hangtuah.ac.id

Muhammad Haidar Rosyid

Fakultas Teknik dan Ilmu Kelautan, Program Studi Teknik Elektro
Universitas Hang Tuah

Email: haidarrsyd@gmail.com

Muhammad Salahuddin Al Mishbah

Fakultas Teknik dan Ilmu Kelautan, Program Studi Teknik Elektro
Universitas Hang Tuah

Email: sholahuddin351@gmail.com

ABSTRAK

Generator sinkron merupakan mesin listrik yang menkonversi energi mekanik menjadi energi listrik. Di pembangkitan energi listrik generator sinkron merupakan komponen utama yang menghasilkan energi listrik, sehingga keandalannya perlu benar-benar dijaga. Kerusakan pada *bearing* merupakan salah satu jenis kerusakan yang sering ditemui pada generator sinkron. Kerusakan *bearing* dapat menyebabkan getaran berlebih, gangguan putaran rotor, dan dapat menimbulkan ketidakseimbangan poros rotor yang mengakibatkan daya yang dihasilkan tidak maksimal. Penelitian ini bertujuan untuk mendeteksi kerusakan *inner race bearing* pada generator sinkron dengan menganalisa *output* sinyal arus pada stator pada kondisi *steady state*. Metode pendekatan yang digunakan didasarkan pada metode *Fast Fourier Transform* (FFT) sebagai pemrosesan sinyal untuk mendapatkan generator dalam kondisi sehat atau rusak. Variasi beban dilakukan pada generator untuk mendapatkan hasil analisis terperinci. Sedangkan untuk level kerusakan *bearing* adalah memberikan kecacatan pada bagian *inner race bearing* dengan variasi diameter lubang yang berbeda, yakni diameter 3 mm, 4,5 mm, dan 6 mm. Hasil pengujian deteksi kerusakan *inner race bearing* menggunakan metode FFT berhasil mendeteksi kerusakan dengan tingkat keberhasilan sebesar 85%.

Kata kunci: Generator Sinkron, Analisa Arus Stator, *Inner Race bearing*, *Fast Fourier Transform*

ABSTRACT

Synchronous generator is an electric machine that converts mechanical energy into electrical energy. In the generation of electrical energy, the synchronous generator is the main component that produces electrical energy, so its reliability needs to be really maintained. Bearing damage is one type of damage that is often found in synchronous generators. Bearing damage can cause excessive vibration, interference with the rotation of the rotor, and can cause an imbalance in the rotor shaft which results in the power being generated not being maximized. This study aims to

detect damage to the inner race bearing of a synchronous generator by analyzing the output current signal on the stator under steady state conditions. The approach method used is based on the Fast Fourier Transform (FFT) method as signal processing to obtain a generator in good or damaged condition. Load variations are carried out on the generator to obtain detailed analysis results. Meanwhile, the level of bearing damage is to give defects to the inner race bearing with different hole diameter variations, namely 3 mm, 4.5 mm and 6 mm in diameter. The test results for detecting damage to the inner race bearing using the FFT method succeeded in detecting damage with a success rate of 85%.

Keywords: *Synchronous Generator, Stator Current Analysis, Inner Race Bearing, Fast Fourier Transform*

1. PENDAHULUAN

Generator merupakan komponen utama dalam pembangkitan energi listrik karena sebagian besar energi listrik yang digunakan untuk kebutuhan sehari-hari dihasilkan oleh generator sinkron yang terdapat di pusat pembangkit tenaga listrik. Mengingat penggunaan generator sinkron yang menjadi objek vital, maka kondisi serta performa generator sinkron harus tetap terjaga, agar dapat bekerja secara optimal dan dapat memperpanjang masa pakai generator. Seiring berjalannya waktu dalam pengoperasiannya banyak sekali gangguan yang terjadi sehingga dapat mengganggu kinerja generator dan dapat merusak beberapa komponen dari generator tersebut [1]. Maka dari itu perlu adanya pengawasan secara rutin sehingga kondisi generator sinkron dapat dipantau dengan baik.

Berdasarkan presentase kerusakan yang sering terjadi pada generator sinkron adalah 60% disebabkan oleh kerusakan belitan stator, 13% kerusakan belitan rotor, 13% kerusakan *bearing*, 1% kerusakan inti stator dan 13% kerusakan lainnya [2]. Kerusakan *bearing* dapat menyebabkan kerusakan pada belitan stator dan rotor karena kerusakan *bearing* mempengaruhi sudut rotor sehingga dapat menimbulkan gesekan antara rotor dengan belitan stator [3]. Kerusakan *bearing* juga mengakibatkan terjadinya getaran berlebih dan gangguan pada kecepatan putar rotor [3].

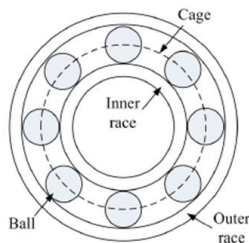
Untuk mencegah kerusakan pada *bearing* generator maka perlu adanya suatu sistem yang dapat mendeteksi kerusakan sedini mungkin dan dapat meminimalkan terjadinya kerusakan yang serius. Berdasarkan penelitian sebelumnya pendeteksian kerusakan *bearing* dapat dilakukan dengan menggunakan getaran, kemudian data tersebut dianalisa pada domain frekuensi dengan menggunakan metode *poincare maps* [4]. Pendeteksian kerusakan pada *bearing* juga dapat dilakukan dengan menganalisa output sinyal arus pada generator, kemudian sinyal tersebut dianalisa menggunakan metode *Hilbert Transform* [5] dan dapat juga menggunakan metode *Fast Fourier Transform* (FFT) [6].

Berdasarkan penelitian di atas maka pada penelitian ini akan melakukan, deteksi kerusakan *inner race bearing* pada generator sinkron berbasis *Fast Fourier Transform* (FFT) berdasarkan analisa *output* sinyal arus. Untuk pengambilan data menggunakan peralatan akuisisi data dan pengolahan data sinyal arus menggunakan metode FFT. Hasil dari penelitian adalah metode analisa generator sinkron menggunakan metode FFT berhasil mendeteksi kerusakan pada *inner race bearing* dengan tingkat keberhasilan sebesar 85%.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Kerusakan *Bearing*

Bearing adalah suatu komponen yang berfungsi untuk mengurangi gesekan pada *machine* atau komponen-komponen yang bergerak dan saling menekan antara satu dengan yang lainnya [7]. Konstruksi *bearing* terdiri dari 4 bagian utama, yaitu *outer race*, *inner race*, *ball*, dan *cage bearing* yang dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Konstruksi bearing pada generator sinkron [8]

Frekuensi kerusakan *bearing* pada generator memiliki nilai frekuensi kerusakan yang berbeda-beda tergantung letak kerusakannya. Frekuensi kerusakan untuk setiap bagian dari *bearing* dapat dilihat pada persamaan berikut [8].

$$f_i f_i = \frac{N_B N_B}{f_r f_r} \left(1 + \frac{D_b \cdot \cos \theta}{D_c}\right) \left(1 + \frac{D_b \cdot \cos \theta}{D_c}\right) = 0,5 \quad (1)$$

$$f_o f_o = \frac{N_B N_B}{f_r f_r} \left(1 - \frac{D_b \cdot \cos \theta}{D_c}\right) \left(1 - \frac{D_b \cdot \cos \theta}{D_c}\right) = 0,5 \quad (2)$$

$$f_b f_b = \frac{f_r f_r}{\left(\frac{D_c}{D_b}\right)} \cdot \left[\left(1 - \frac{D_b \cdot \cos \theta}{D_c}\right)\right] \left(\frac{D_c}{D_b}\right) \cdot \left[\left(1 - \frac{D_b \cdot \cos \theta}{D_c}\right)\right] = 0,5 \quad (3)$$

$$f_c f_c = \frac{f_r f_r}{\left(1 - \frac{D_b \cdot \cos \theta}{D_c}\right)} \left(1 - \frac{D_b \cdot \cos \theta}{D_c}\right) = 0,5 \quad (4)$$

Dimana f_i merupakan frekuensi kerusakan pada *inner race*, f_o merupakan frekuensi kerusakan pada *outer race*, f_b merupakan frekuensi kerusakan pada *ball*, f_c merupakan frekuensi kerusakan pada *cage*, N_B merupakan jumlah *ball*, f_r merupakan frekuensi kecepatan rotor, D_B merupakan diameter *ball*, D_P merupakan diameter antar *ball*, dan $\cos \theta$ merupakan sudut kontak *ball* [8].

Persamaan (1) sampai (5) merupakan persamaan yang digunakan untuk menentukan nilai frekuensi kerusakan pada *bearing* berdasarkan konstruksinya. Untuk jumlah *ball* sebanyak 6 sampai 12 buah, frekuensi karakteristik kerusakan untuk *inner race* dan *outer race* dapat ditentukan dengan persamaan (5) dan (6) [9].

$$f_i f_i = \frac{N_B N_B}{f_r f_r} = 0,6 \quad (5)$$

$$f_o f_o = \frac{N_B N_B}{f_r f_r} = 0,4 \quad (6)$$

Dimana f_i merupakan frekuensi kerusakan pada *inner race*, f_o merupakan frekuensi kerusakan pada *outer race*, N_B merupakan jumlah *ball* dan f_r merupakan frekuensi kecepatan rotor. Kerusakan pada generator sinkron menyebabkan terjadinya gerakan radial [8]. Hal tersebut menyebabkan kerapatan fluks pada *air gap* menjadi tidak simetri dan mempengaruhi induktansi di stator sehingga arus stator mengandung harmonisa dengan frekuensi kerusakan yang dapat diprediksi dengan persamaan (7).

$$F_{bn_g} = |f_s \pm m \cdot f_v| F_{bn_g} = |f_s \pm m \cdot f_v| \quad (7)$$

Dimana f_{bng} merupakan frekuensi prediksi kerusakan *bearing*, f_s merupakan frekuensi stator, m merupakan konstanta (1,2,3,...) dan f_v merupakan frekuensi kerusakan bagian *bearing* [6].

2.2 Fast Fourier Transform

Fast Fourier Transform (FFT) merupakan suatu pengembangan metode perhitungan cepat dari *Discrete Fourier Transform* (DFT). DFT merupakan suatu metode perhitungan yang mengubah sinyal dari domain waktu ke domain frekuensi. Dengan menggunakan FFT, suatu sinyal dapat dilihat sebagai objek dalam domain frekuensi. FFT sangat cocok digunakan pada sinyal diskrit yang periodik dan simetri. Secara matematis FFT dari suatu sinyal diskrit $X[n]$ dengan menggunakan N sebagai titik dapat dilihat dari persamaan berikut [10] :

$$X(n) = \sum_{k=0}^{N-1} X_o(k) W_n^{nk} \quad (8)$$

Dengan $n = 0, 1, 2, \dots, N-1$

$$W_n = e^{-j \frac{2\pi}{n}} W_n = e^{-j \frac{2\pi}{n}} \quad (9)$$

Frekuensi resolusi dari FFT berhubungan dengan total panjang rentang waktu untuk memperhatikan banyaknya jumlah sampel dan frekuensi sampling yang digunakan. Semakin banyak jumlah sampel yang digunakan maka representasi sinyal akan semakin detail, sedangkan semakin besar frekuensi sampling yang digunakan maka rentang frekuensi dalam FFT akan semakin panjang. Secara matematis frekuensi resolusi dapat dilihat pada persamaan berikut [10] :

$$\Delta f = \frac{F_s F_s}{N N} = \frac{1}{N \cdot T_s N \cdot T_s} \quad (10)$$

Dengan :

Δf = frekuensi resolusi

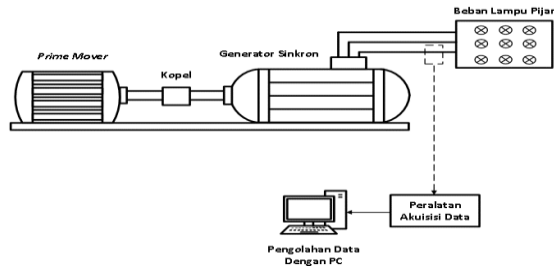
$F_s F_s$ = frekuensi sampling

$T_s T_s$ = periode sampling

N = jumlah sampel

2.3 Perancangan Sistem

Dalam penelitian ini, sistem yang dibuat memiliki beberapa urutan cara kerja yang dapat dipahami melalui diagram blok yang terdapat pada Gambar 2.



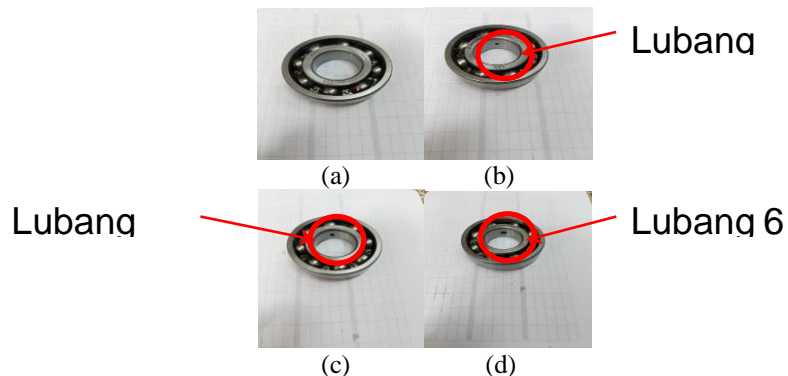
Gambar 2. Diagram blok sistem deteksi kerusakan *inner race bearing*.

Pada Gambar 2 dapat dijelaskan proses pertama dimulai dari generator yang dikopel dengan *primer mover*. *Output* fasa generator terhubung dengan peralatan akuisisi data dan pembebanan listrik berupa lampu pijar. Peralatan akuisisi data akan mengambil data pada seluruh fasanya, namun untuk pendeteksian kerusakan mengambil data pada salah satu fasa *output* generator. Peralatan akuisisi data terhubung dengan komputer yang didalamnya terdapat *software* LabVIEW, DIAdem, Microsoft Excel dan MATLAB. Peralatan akuisisi data digunakan sebagai sensor arus, dimana pengaturan proses sampling diatur pada *software* LabVIEW. Transformasi data dari domain waktu ke domain frekuensi dilakukan dengan algoritma FFT dengan *software* DIAdem dan penganalisaan kerusakan dilakukan dengan *software* MATLAB. Implementasi sistem deteksi kerusakan *bearing* dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Implementasi sistem deteksi kerusakan *inner race bearing*.

Dalam penelitian ini dibuat 3 kasus kerusakan pada bagian *inner race*, kerusakan 1 (lubang ukuran 3 mm), kerusakan 2 (lubang ukuran 4,5 mm), dan kerusakan 3 (lubang ukuran 6 mm). Gambar 4 merupakan gambaran kerusakan *bearing* yang dibuat pada penelitian ini.

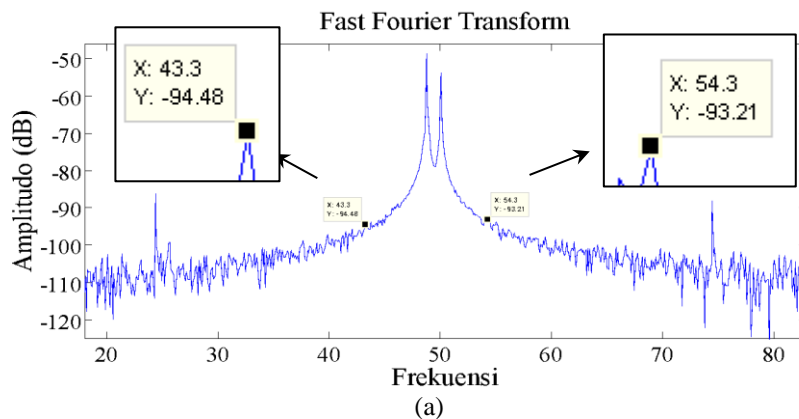


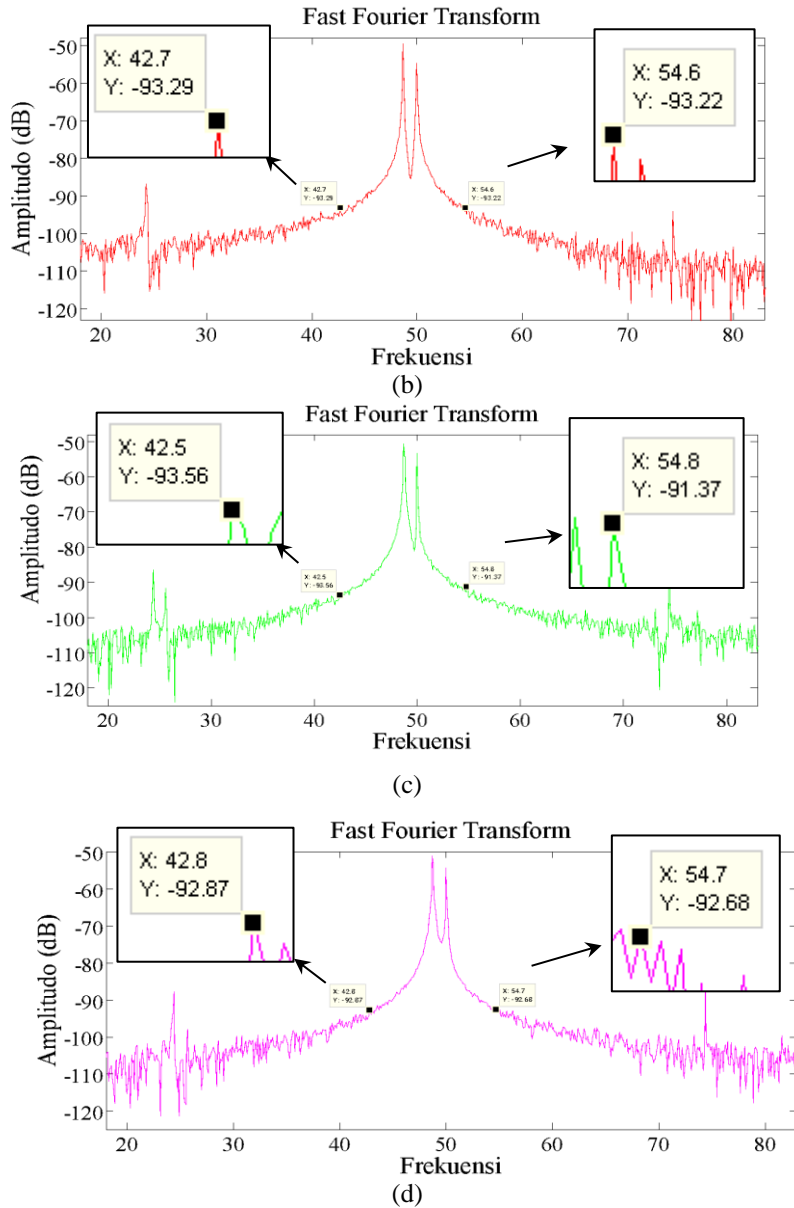
Gambar 4. Rekonstruksi *inner race bearing*. Gambar (a) *Bearing normal*, (b) *Bearing* lubang ukuran 3mm, (c) *Bearing* lubang ukuran 4,5mm, dan (d) *Bearing* lubang ukuran 6mm.

Variasi pembebanan perlu diberikan kepada generator sinkron agar dapat meningkatkan proses analisa dan dapat mengetahui efek pembebanan terhadap kerusakan *inner race bearing*. Kondisi pembebanan dibuat menjadi 5 pembebanan yang berbeda yakni, kondisi generator tanpa beban, kondisi generator beban 300 Watt, kondisi generator beban 420 Watt, kondisi generator beban 600 Watt, dan kondisi generator beban 720 Watt. Penentuan variasi pembebanan menyesuaikan dengan batas maksimal arus dari *prime mover*.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini hasil metode deteksi kerusakan *inner race bearing* didapat dari hasil perhitungan dan penganalisaan dilakukan dengan membandingkan nilai rata-rata generator normal dengan data generator yang telah mengalami rekonstruksi kerusakan *inner race bearing* menggunakan metode *Fast Fourier Transform* (FFT). Langkah pertama penganalisaan adalah dengan memasukkan nilai perhitungan frekuensi ke dalam grafik dimana pada penelitian ini menggunakan $m = 1$ dan untuk memvalidasi data dilakukan pengambilan data sebanyak 3 kali. Apabila nilai perhitungan berada pada posisi kurva yang turun, maka pengambilan nilai amplitudo akan mengambil pada puncak yang di depan atau di belakangnya seperti pada Gambar 5. Gambar 5 merupakan gambar pengujian pada kondisi tanpa beban, dimana grafik warna biru merupakan pengujian pada bearing normal, grafik warna merah merupakan pengujian pada *inner race bearing* rusak 3 mm, grafik berwarna hijau pengujian pada *inner race bearing* rusak 4,5 mm, dan grafik warna ungu pengujian pada *inner race bearing* rusak 6 mm. Langkah tersebut dilakukan pada seluruh kondisi kerusakan dan seluruh beban. Hasil penganalisaan ditunjukkan pada Tabel 1 sampai Tabel 5, dimana Tabel 1 merupakan kondisi generator tanpa beban, Tabel 2 pembebanan 300 Watt, Tabel 3 pembebanan 420 Watt, Tabel 4 pembebanan 600 Watt, dan Tabel 5 merupakan pembebanan 720 Watt.





Gambar 5. Spektrum arus pengujian *bearing* tanpa beban, (a) *bearing* normal, (b) rusak 3 mm, (c) rusak 4,5 mm, dan (d) rusak 6 mm

Tabel 1. Analisis kondisi tanpa beban

Tanpa beban	Amplitudo (dB)							
	Normal		3 mm		4,5 mm		6 mm	
	f_s+f_i	f_s-f_i	f_s+f_i	f_s-f_i	f_s+f_i	f_s-f_i	f_s+f_i	f_s-f_i
	-93,21	-94,48	-93,22	-93,29	-91,37	-93,56	-92,68	-92,87
	-95,56	-94,26	-96,14	-94,57	-95,27	-94,63	-93,53	-95,41
	-103,2	-101,4	-96,52	-94,5	-89,86	-90,61	-92,83	-93,29
Rata-rata	-97,02							

Tabel 2. Analisis kondisi beban 300 Watt

300 Watt	Amplitudo (dB)							
	Normal		3 mm		4,5 mm		6 mm	
	f_s+f_i	f_s-f_i	f_s+f_i	f_s-f_i	f_s+f_i	f_s-f_i	f_s+f_i	f_s-f_i
	-64,71	-63,04	-63,72	-64,14	-64,37	-62,68	-66,19	-67,35
	-65,51	-66,45	-62,53	-63,85	-69,42	-71,22	-62,32	-63,08
	-80,04	-82,33	-63,42	-63,1	-64,55	-66,09	-69,08	-69,77
Rata-rata	-70,35							

Tabel 3. Analisis kondisi tanpa beban

420 Watt	Amplitudo (dB)							
	Normal		3 mm		4,5 mm		6 mm	
	f_s+f_i	f_s-f_i	f_s+f_i	f_s-f_i	f_s+f_i	f_s-f_i	f_s+f_i	f_s-f_i
	-61,65	-62,23	-65,61	-65,01	-64,72	-63,86	-61,58	-62,5
	-101,9	-100,4	-61,32	-62,54	-65,42	-66,89	-61,26	-61,61
	-70,58	-71,76	-66,77	-65,68	-100,3	-101,7	-66,67	-64,95
Rata-rata	-78,09							

Tabel 4. Analisis kondisi beban 600 Watt

600 Watt	Amplitudo (dB)							
	Normal		3 mm		4,5 mm		6 mm	
	f_s+f_i	f_s-f_i	f_s+f_i	f_s-f_i	f_s+f_i	f_s-f_i	f_s+f_i	f_s-f_i
	-61,67	-59,66	-60,12	-60,62	-64,99	-63,04	-61,29	-59,65
	-81,97	-80,04	-59,8	-61,26	-60,2	-60,59	-59,83	-60,29
	-59,67	-61,42	-61,98	-60,51	-60,39	-59,49	-73,37	-71,38
Rata-rata	-67,41							

Tabel 5. Analisis kondisi beban 720 Watt

720 Watt	Amplitudo (dB)							
	Normal		3 mm		4,5 mm		6 mm	
	f_s+f_i	f_s-f_i	f_s+f_i	f_s-f_i	f_s+f_i	f_s-f_i	f_s+f_i	f_s-f_i
	-64,32	-61,52	-59,37	-62,2	-61,96	-63,53	-63,16	-60,69
	-65,72	-63,03	-64,81	-65,15	-85,53	-83,59	-62,48	-59,75
	-61,23	-59,37	-61,00	-60,47	-62,97	-60,59	-71,41	-69,23
Rata-rata	-62,53							

Berdasarkan Tabel 1 sampai Tabel 5 untuk kolom berwarna biru menunjukkan letak terjadinya kerusakan *inner race bearing* dimana untuk pembuktian dengan cara membandingkan nilai rata-rata dari data generator normal (sehat) dengan amplitudo pengujian yang ada pada kolom variasi kerusakan diameter lubang. Hasil rata-rata kondisi normal dijadikan sebagai nilai referensi yang kemudian dibandingkan dengan amplitudo kondisi rusak. Untuk kondisi tanpa beban kerusakan 3 mm terdeteksi 6 titik, kerusakan 4,5 mm terdeteksi 6 titik, dan rusak 6 mm terdeteksi 6 titik. Untuk kondisi beban 300 Watt kerusakan 3 mm terdeteksi 6 titik, kerusakan 4,5 mm terdeteksi 5 titik, dan rusak 6 mm terdeteksi 6 titik. Untuk kondisi beban 420 Watt kerusakan 3 mm terdeteksi 6 titik, kerusakan 4,5 mm terdeteksi 4 titik, dan rusak 6 mm terdeteksi 6 titik. Untuk kondisi beban 600 Watt kerusakan 3 mm terdeteksi 6 titik, kerusakan 4,5 mm terdeteksi 6 titik, dan rusak 6 mm terdeteksi 4 titik. Untuk kondisi beban 720 Watt kerusakan 3 mm terdeteksi 4 titik, kerusakan 4,5 mm terdeteksi 3 titik, dan rusak 6 mm terdeteksi 5 titik. Hasil keberhasilan pendeteksian dalam bentuk persen dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Keberhasilan deteksi pada seluruh kondisi kerusakan dan seluruh beban

<i>Pembebanan</i>	<i>Rusak 3 mm</i>	<i>Rusak 4,5 mm</i>	<i>Rusak 6 mm</i>	<i>Rata – rata Tiap Beban</i>
Tanpa Beban	100%	100%	100%	100%
Beban 300 Watt	100%	83%	50%	94%
Beban 420 Watt	100%	67%	100%	89%
Beban 600 Watt	100%	100%	67%	89%
Beban 720 Watt	67%	50%	83%	67%
Rata - rata Tiap Kondisi	93%	80%	90%	

Tabel 6 merupakan jumlah hasil keberhasilan dari seluruh kasus pengujian pendeteksian kerusakan *inner race*. Apabila meninjau pada rata-rata beban, sistem pendeteksian kerusakan pada *inner race bearing* lebih optimal dilakukan ketika tanpa beban, karena pada kondisi tanpa beban rata-rata keberhasilannya 100% dan semakin besar beban maka, presentase keberhasilannya semakin kecil. Apabila meninjau pada presentase keberhasilan kondisi, kerusakan 3 mm memiliki presentase yang lebih besar daripada kondisi lainnya, yakni sebesar 93% sehingga sistem lebih optimal mendeteksi kerusakan yang kecil.

4. KESIMPULAN

Hasil dari percobaan deteksi kerusakan *inner race bearing* melalui sinyal arus dapat disimpulkan bahwa sistem ini berhasil mendeteksi terjadinya kerusakan. Hal ini ditentukan dengan adanya kenaikan amplitudo ketika *inner race bearing* mengalami kerusakan. Keberhasilan deteksi kerusakan *inner race bearing* melalui sinyal arus dengan metode *Fast Fourier Transform* (FFT) memiliki tingkat keberhasilan yang tinggi yakni sebesar 85%, sehingga sistem ini dapat dijadikan alternatif untuk melakukan *monitoring* kerusakan pada generator sinkron. Keberhasilan deteksi kerusakan *bearing* untuk rekonstruksi *inner race bearing* pada kondisi 3mm memiliki tingkat keberhasilan yang tinggi, sehingga apabila terjadi kerusakan pada *bearing* generator dapat segera terdeteksi. Sistem pendeteksian lebih optimal digunakan pada generator ketika tanpa beban, karena pada saat kondisi tanpa beban presentase keberhasilannya sebesar 100% dan ketika sistem diberi pembebanan yang lebih besar persentasenya turun dari 94% sampai 67%. Penelitian selanjutnya diharapkan menggunakan *prime mover* yang memiliki daya mendekati daya generator agar pembebanan lebih variatif dan perlu adanya penstabil tegangan serta penstabil frekuensi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. A. Chandra, N. I. Jannif, S. Prakash, and V. Padiachy, "Cloud based real-time monitoring and control of diesel generator using the IoT technology," *2017 20th Int. Conf. Electr. Mach. Syst. ICEMS 2017*, pp. 0–4, 2017.
- [2] M. Mostafaei and J. Faiz, "An overview of various faults detection methods in synchronous generators," *IET Electr. Power Appl.*, vol. 15, no. 4, pp. 391–404, 2021.
- [3] M. R. Shahriar, P. Borghesani, and A. C. C. Tan, "Electrical Signature Analysis-Based Detection of External Bearing Faults in Electromechanical Drivetrains," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 65, no. 7, pp. 5941–5950, 2018.
- [4] F. K. Choy, J. Zhou, M. J. Braun, and L. Wang, "Vibration monitoring and damage quantification of faulty ball bearings," *J. Tribol.*, vol. 127, no. 4, pp. 776–783, 2005.

- [5] Y. Amirat, V. Choqueuse, M. Benbouzid, and S. Turri, "Hilbert transform-based bearing failure detection in DFIG-based wind turbines," *Int. Rev. Electr. Eng.*, vol. 6, no. 3, pp. 1249–1256, 2011.
- [6] R. W. Cox and S. Mostafavi, "Detecting generalized roughness faults in synchronous-generator bearings using the energy in the current spectrum," *2017 IEEE Int. Electr. Mach. Drives Conf. IEMDC 2017*, 2017.
- [7] B. A. D. I. Nugroho, P. Studi, T. Diploma, and P. I. Pelayaran, "Analisa Penyebab Kerusakan Bearing Pada Shaft Generator Di Mv. Armada Papua," 2019.
- [8] X. Gong and W. Qiao, "Bearing fault diagnosis for direct-drive wind turbines via current-demodulated signals," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 8, pp. 3419–3428, 2013.
- [9] X. Gong and W. Qiao, "Bearing fault detection for direct-drive wind turbines via stator current spectrum analysis," *IEEE Energy Convers. Congr. Expo. Energy Convers. Innov. a Clean Energy Futur. ECCE 2011, Proc.*, pp. 313–318, 2011.
- [10] F. Shodiq, B. Y. Dewantara, and I. D.P.K, "Deteksi Kerusakan Batang Rotor Pada Motor Induksi Menggunakan Analisis Arus Stator Berbasis Fast Fourier Transform," *CITEE 2019*, vol. 5, no. 2, 2019.