

Analisa Gangguan Belitan Stator Pada Motor *Brushless DC* Menggunakan Matlab *Simulink*

Didit Lestyo Kurniawan¹, Iradiratu Diah PK², Belly Yan Dewantara³

^{1,2,3}Universitas Hang Tuah, Surabaya

e-mail: Diditlestyo917@gmail.com¹, bellyyandewantara@hangtuah.ac.id², iradiratu@hangtuah.ac.id³

Diterima: 14-08-2020

Disetujui: 21-01-2021

Diterbitkan: 13-02-2021

Abstract

Motorcycle Brushless Direct Current is known as an electric machine that widely used in industry. In condition loaded, the motor speed will change and affect the motor transfer function. The most common breakdown mechanisms in BLDC motors categorising based on the main components of the engine as stator windings disturbances, rotors, and bearings. The disturbance in the stator winding section is caused by the stator winding's short circuit. This study aims to discuss and analyze the disturbance in the stator winding section. This disturbance is carried out in several variations of loading conditions by using software Matlab R2013a. The load used is 10 Nm and 20 Nm. The results of the data are processed by using the method Fast Fourier Transform (FFT) for analyzing the stator currents from the time to the frequency domain. The data analysis is showed in the form of characteristics of the current values against the frequency. The detection of stator winding disturbances on a BLDC motor is carried out by observing the amplitude at the frequency of the stator winding disturbance that appears around the fundamental frequency. The frequency resolution was used to adjust the accuracy of amplitude observations in the frequency spectrum. The average percentage presented the success rate for detection of the stator winding short circuit for loading and had no loading in rate 94%. However, the positive impact of the stator winding disturbance could anticipate the fatal damage to the BLDC motor.

Keywords: BLDC motor, matlab, stator winding, FFT

Abstrak

Motor *Brushless Direct Current* merupakan salah satu mesin listrik yang banyak digunakan di industri. Pada saat diberi pembebanan menyebabkan kecepatan motor akan berubah sehingga fungsi alih motor juga mengalami perubahan. Mekanisme kerusakan pada motor BLDC yang paling umum dapat dikategorikan menurut komponen utama mesin seperti gangguan pada belitan stator, rotor dan bearing. Gangguan pada bagian belitan stator hal ini disebabkan adanya hubung singkat belitan stator. Atas dasar itulah, penelitian ini membahas analisa gangguan pada bagian belitan stator yang dilakukan dalam beberapa variasi kondisi pembebanan dengan menggunakan *software* Matlab R2013a. Beban yang digunakan adalah tanpa beban, 10 N.m dan 20 N.m. Pengolahan data menggunakan metode *Fast Fourier Transform* (FFT) untuk menganalisis arus stator dari domain waktu ke dalam domain frekuensi. Data analisa berupa karakteristik nilai-nilai arus terhadap frekuensi. Deteksi gangguan belitan stator pada motor BLDC dilakukan dengan mengamati amplitudo pada frekuensi terjadinya gangguan belitan stator yang muncul disekitar frekuensi fundametal. Resolusi frekuensi digunakan untuk mengatur tingkat akurasi pengamatan amplitudo pada spectrum frekuensi. Persentase tingkat keberhasilan deteksi hubung singkat belitan stator untuk pembebanan dan tanpa beban berada pada nilai rata-rata 94 %. Dampak positif adanya sistem analisa gangguan belitan stator dapat mengantisipasi kerusakan fatal pada motor BLDC.

Kata kunci: motor BLDC, matlab, belitan stator, FFT

Pendahuluan

Aplikasi dari motor listrik telah menyebar keberbagai macam bidang dalam kehidupan kita sebagai alat konversi energi utama listrik menjadi mekanik. Motor listrik banyak digunakan dalam berbagai peralatan seperti *air conditioning*, *vacuum cleaner*, *conveyor*, lemari pendingin dan lain sebagainya. Seiring dengan masa pakai dari motor tersebut maka memungkinkan motor mengalami kerusakan pada komponen-komponen tertentu (Park dan Jin Hur, 2015). Maka dari itu perlu dilakukan pengecekan pada motor *brushless Direct Current* setiap saat untuk mengantisipasi kerusakan.

Mekanisme kerusakan pada mesin BLDC dikategorikan menurut komponen utama mesin seperti gangguan pada belitan stator, rotor dan bearing. Belitan stator merupakan tempat terjadinya medan magnet yang ditempatkan pada alur stator motor. Kumputan stator di rancang agar membentuk jumlah kutub tertentu untuk menghasilkan putaran. Belitan stator ini ditutup dengan bahan isolasi untuk mencegah hubung sikat antar belitan stator. Bahan isolasi dalam pemakaian yang lama dapat mengalami penurunan kualitas sehingga mengakibatkan hubung singkat belitan stator pada motor BLDC (Kimkyung, 2014).

Pada Penelitian Jin Hur (2013), melakukan deteksi kesalahan belitan motor dan kesalahan *eksentrisitas dinamis* pada motor BLDC type *Interior Permanent Magnet* (IPM). Kesalahan belitan stator dan kesalahan eksentrisitas dinamis yang digabungkan pada *system hybrid* atau sistem kombinasi. Motor BLDC terdapat magnet permanen yang tempat terjadinya medan elektro magnetik. Pengukuran arus input pada stator motor BLDC dapat mengetahui pola gelombang frekuensi. Analisa pola frekuensi arus inputan stator dengan menggunakan alat ukur berupa Osiloskop. Dengan menggunakan metode 2-D *finitit element methods* dan sistem matriks kemudian melakukan konfigurasi pola frekuensi dan diagnosa arus stator oleh FFT. Pada analisa pola frekuensi ada beberapa jenis kesalahan pada motor BLDC yang diverifikasi oleh hasil eksperimen (Jin Hur dkk. 2013)

Pada penelitian sebelumnya, membahas tentang deteksi kerusakan belitan stator pada motor BLDC dengan menggunakan metode 2-D *finitit element methods* dan sistem matriks. Analisa pola frekuensi arus inputan stator dengan menggunakan alat ukur berupa Osiloskop yang dikonfigurasi pola frekuensi dan diagnosa arus stator oleh FFT (Hosseini dkk., 2019). Penelitian ini akan membahas mengenai analisa gangguan belitan *stator pada motor* BLDC yang dilengkapi dengan algoritma FFT menggunakan simulasi Matlab R2013a. Metode algoritma FFT diaplikasikan pada motor BLDC untuk melakukan beberapa eksperimen percobaan simulasi berupa rekonstruksi gangguan belitan stator antar fasanya serta pemberian beban mekanis yang bervariasi mulai dari *tanpa* beban dan menggunakan variasi beban. Salah satu cara mengetahui performa motor BLDC dilakukan eksperimen percobaan simulasi dengan menggunakan beberapa komponen yang ada pada *Software* Matlab R2013a (Diwatelwar dkk., 2018) untuk memudahkan proses pengukuran dan pengolahan sinyal arus stator motor BLDC. Hasil dari penelitian ini dapat digunakan sebagai data awal dalam melakukan deteksi kerusakan pada motor BLDC dalam proses perawatan dan penggunaan (Alham dkk. 2018).

Studi Pustaka (Optional)

a. Motor BLDC

Motor BLDC merupakan termasuk jenis motor sinkron yang berarti medan magnet yang dihasilkan oleh stator dan medan magnet yang dihasilkan oleh rotor berputar pada frekuensi yang sama. Motor BLDC tidak mengalami *slip* seperti yang terjadi pada motor induksi biasa (Masudi dan nang, 2014). Rotor adalah bagian pada motor yang berputar karena adanya gaya elektromagnetik dari stator, dimana pada motor DC *brushless* bagian rotornya berbeda dengan rotor pada motor DC konvensional yang hanya tersusun dari satu buah elektromagnet yang berada diantara *brushes* (sikat) yang terhubung. Stator merupakan bagian pada motor yang diam/statis dan berfungsi sebagai medan putar motor untuk memberikan gaya elektromagnetik pada rotor sehingga motor dapat berputar. Motor jenis ini mempunyai magnet permanen pada bagian rotor dan elektromagnet pada bagian stator. Setelah itu, dengan menggunakan sebuah rangkaian (*simple computer system*) yang sederhana (Namrata, 2019).

b. Inverter

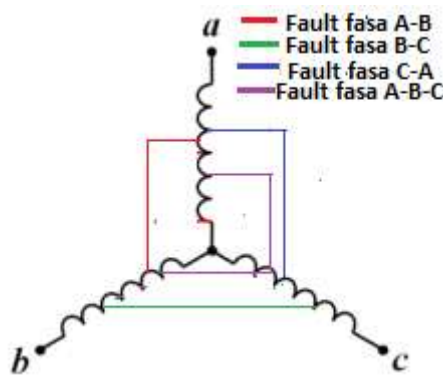
Agar dapat menghasilkan medan magnet pada stator dibutuhkan suatu alat yang dapat mengalirkan arus bolak-balik untuk menghasilkan elektromagnetik kutub utara ataupun selatan. Karena pada dasarnya stator pada motor BLDC terdiri dari tiga belitan yang disusun bintang, Oleh karena itu untuk menggerakkan motor BLDC diperlukan inverter tiga fasa. Inverter itu sendiri merupakan rangkaian elektronika daya yang berfungsi mengubah arus dan tegangan searah (DC) menjadi arus dan tegangan bolak-balik (AC). Inverter tiga fasa sendiri pada dasarnya memiliki kesamaan dengan inverter satu fasa. Akan tetapi outputnya berupa tiga gelombang AC yang saling bergeser 120° yang satu dengan yang lainnya (Kim dkk., 2011). Pada komponen simulasi inverter 3 fasa Dioda (Diode) berfungsi sebagai komponen elektronika aktif yang berfungsi untuk menghantarkan arus listrik ke satu arah dan akan menghambat atau memblokir arus listrik dari arah sebaliknya. Alat ini mempunyai dua kutub yang di sebut anoda dan katoda.

c. Matlab Simulink R2013a

MATLAB (*Matrix Laboratory*) adalah sebuah program untuk analisis dan komputasi numerik dan merupakan suatu bahasa pemrograman matematika lanjutan yang dibentuk dengan dasar pemikiran menggunakan sifat dan bentuk matriks. Namun sekarang, MATLAB merupakan produk komersial dari perusahaan Mathworks yang dalam perkembangan selanjutnya dikembangkan menggunakan bahasa C++ dan assembler (utamanya untuk fungsi-fungsi dasar MATLAB). Pemrograman yang canggih yang berisi fungsi-fungsi *built-in* untuk melakukan tugas pengolahan sinyal, aljabar linier dan kalkulasi matematis lainnya. MATLAB juga berisi *toolbox* yang berisi fungsi-fungsi tambahan untuk aplikasi khusus. MATLAB bersifat *extensible*, dalam arti bahwa seorang pengguna dapat menulis fungsi baru untuk ditambahkan pada *library* ketika fungsi-fungsi *built-in* yang tersedia tidak dapat melakukan tugas tertentu (Nanang 2014). Simulink merupakan bagian tambahan dari software MATLAB (Mathworks Inc.). Simulink dapat digunakan sebagai sarana pemodelan, simulasi dan analisa dari sistem dinamik dengan menggunakan ntarmuka grafis (GUI). Simulink terdiri dari beberapa kumpulan toolbox yang dapat digunakan untuk analisa sistem linier dan non-linier. Beberapa library yang sering digunakan dalam sistem kontrol antara lain math, sinks, dan sources (Nayar, 2019).

d. Kerusakan Sistem Motor BLDC

Rekonstruksi hubung singkat belitan dilakukan dengan memberikan pada bagian penyambungan antar fasanya belitan stator motor BLDC. Hubung singkat antar belitan yang berdekata pada kumparan stator motor serempak magnet permanen merupakan gangguan internal. Gangguan belitan stator akan muncul apabila antar belitannya terhubung singkat pada salah satu fasanya dan hal ini menyebabkan ketidak seimbangannya system karena impedansi salah satu fasanya menurun (Kim dkk., 2017). Kerusakan dibuat dengan menghubungkan *Fault* fasa A to fasa B, *Foult* fasa B to fasa C, *Fault* Fasa C to fasa A dan *Fault* fasa A to fasa BC. Pada terjadinya kerusakan dengan pemberian beban 10 N.m dan 20 N.m untuk dapat mengetahui karakteristik arus motor BLDC. Pada simulasi ini bertujuan agar data yang dihasil dapat terukur tingkatanya pada saat terjadi gangguan. (Kyung-Tae K, Jin Hur, and Gyu-Hong K) Untuk lebih jelasnya menghubungkan antara fasa 1 dengan yang lainnya seperti Gambar 1.



Gambar 1. Kerusakan belitan sator pada motor BLDC

e. Letak Kerusakan belitan Stator

Gangguan belitan stator akan muncul apabila antar belitannya terhubung singkat pada salah satu fasanya dan hal ini menyebabkan ketidak seimbangannya sistem karena impedansi salah satu fasanya menurun. Gangguan belitan stator dapat mengakibatkan lonjakan arus. Jika belitan stator terhubung singkat maka arus akan mengalami peningkatan yang akan menyebabkan overloading thermal pada sistem. Hal ini pada akhirnya akan menyebabkan kerusakan motor. Oleh karena itu tujuan identifikasi gangguan belitan secara dini adalah untuk mendeteksi gangguan pada tahap proses berbagai variasi kerusakan untuk mengetahui kerusakan yang lebih serius (Park dan Jin Hur, 2015).

$$f_{SITF} = (2k-1)ff \dots \dots \dots (1)$$

f_{SITF} = frekuensi prediksi gangguan belitan stator
 K = Nilai konstanta
 ff = Frekuensi fundamental

frekuensi fundamental digunakan sebagai perhitungan dalam menganalisis pola frekuensi arus stator pada motor BLDC dan sebagai frekuensi dasar.

$$ff = \frac{RPM}{f_s [Hz]} \times P \dots \dots \dots (2)$$

RPM = kecepatan

Fs= Frekuensi Sumber Listrik (50 atau 60 Hz)

P = Jumlah kutub

f. Fast Fourier Transform

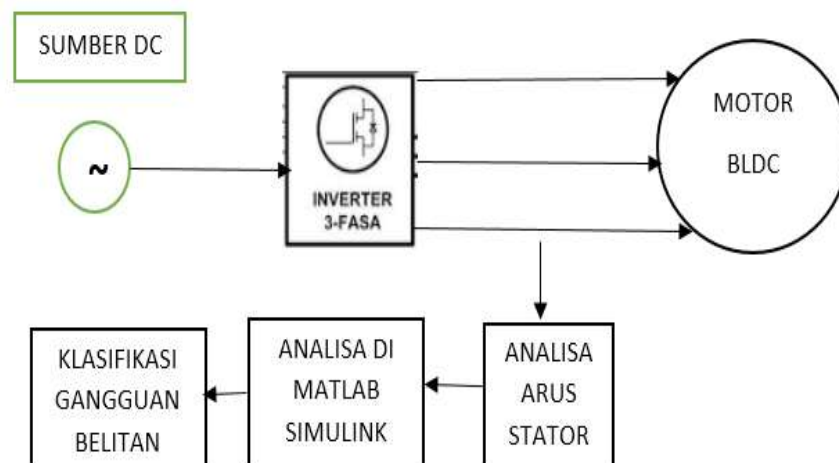
Fast Fourier Transform merupakan suatu metode perhitungan cepat dari *Discrete Fourier Transform* (DFT) atau dengan kata lain FFT merupakan pengembangan dari DFT. DFT merupakan suatu metode perhitungan yang mengubah sinyal dari domain waktu ke domain frekuensi. Biasanya FFT digunakan untuk keperluan analisis spektrum dalam domain frekuensi (Abduh dkk., 2019). Dengan menggunakan FFT, suatu sinyal dapat dilihat sebagai objek dalam domain frekuensi. FFT lebih cocok digunakan pada sinyal diskrit yang periodik dan simetri. Sinyal diskrit yang periodik dan simetri adalah sinyal diskrit yang terus berulang pada rentang waktu tertentu dan memiliki pencerminan disekitar titik tengahnya (Marcin dkk., 2019).

Metodologi Penelitian

Pada penelitian ini akan dilakukan analisa untuk mendeteksi terjadinya kerusakan belitan stator pada motor BLDC melalui analisa pola frekuensi pada arus input rangkaian motor BLDC yang dilengkapi dengan algoritma *Fast Fourier Transform* (FFT). Pada saat simulasi menggunakan program simulink MATLAB 2013a. Namun melalui beberapa penyesuaian yang harus dilakukan karena ada beberapa parameter yang harus diganti untuk mendapatkan parameter yang sesuai dengan motor BLDC yang dimiliki.

a. Perancangan Sistem

Perancangan sistem pada gambar 3.2 menunjukan menggunakan sumber DC dan beberapa bagian seperti pemasangan inverter motor BLDC sebagai pengubah teggangan dan pengolahan arus DC menjadi arus AC untuk mengoprasikan motor BLDC

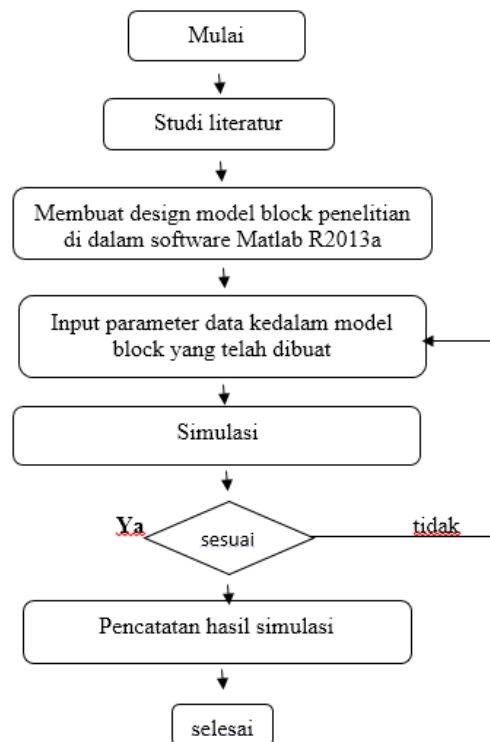


Gambar 2. Konfigurasi sistem gangguan belitan stator motor BLDC

Penjelasan Gambar 2 Konfigurasi sistem gangguan belitan stator motor BLDC. Dalam simulasi sumber yang digunakan sumber DC merupakan tegangan dengan aliran arus searah. Tegangan DC memiliki notasi dan tanda positif pada satu titiknya dan negatif pada titik lainnya. Karena stator pada motor BLDC terdiri dari tiga belitan yang disusun bintang, Oleh karena dalam simulasi untuk menggerakkan motor BLDC diperlukan inverter tiga fasa Inverter itu sendiri merupakan rangkaian elektronika daya yang berfungsi mengubah arus dan tegangan searah (DC) menjadi arus dan tegangan bolak-balik (Tashakori, 2012). Dari analisis arus stator pada simulasi bahwa selama motor BLDC beroperasi pembacaan singal arus tiga fasa. Kemudian pengujian atau simulasi dengan analisa berdasarkan hasil karakterisasi yang telah dilakukan. Simulink adalah aplikasi dalam MATLAB untuk melakukan modeling, simulasi, dan untuk melakukan analisis dinamik pada suatu sistem (Jain, 2017). Dengan simulink kita dimudahkan untuk membuat sebuah simulasi secara lebih interaktif. Sehingga dengan simulink ini kita dapat lebih mudah atau dengan kata lain memperoleh hasil analisa kerusakan pada motor BLDC. *Sim Power Systems* adalah salah satu blok simulasi khusus untuk sistem tenaga listrik yang terdapat dalam toolbox aplikasi Simulink (Suganti dkk. 2017).

b. Diagram Alir Perancangan Sistem

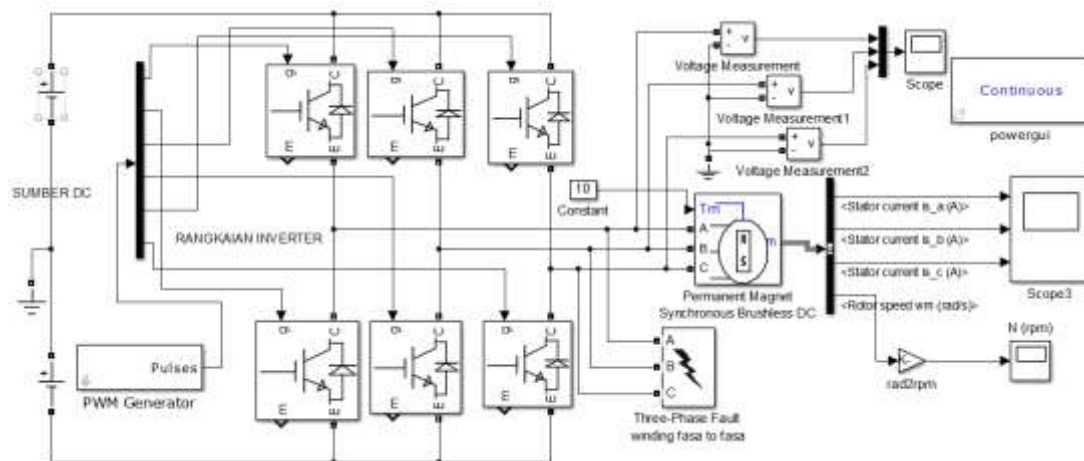
Langkah pertama sebelum melakukan percobaan adalah membuat design sesuai dengan konsep penelitian didalam software matlab. Kemudian pengujian atau simulasi dengan memasukkan parameter dengan nilai awal (berdasarkan hasil karakterisasi yang telah dilakukan pada penelitian sebelumnya).pecatatan hasil pengujian, apakah sesuai dengan hasil yang diinginkan Jika hasil yang diperoleh tidak memuaskan berikutnya akan dilakukan input parameter dengan variabel yang berbeda hingga diperoleh hasil yang optimum. Setelah semua selesai kemudian dilakukan pencatatan hasil dari analisa gangguan belitan stator motor BLDC.



Gambar 3. FlowChart gangguan belitan stator pada motor BLDC

c. Rangkain keseluruhan Simulink Motor Brushless DC

Seperti komponen – komponen dari simulasi pada motor BLDC diperlukan tahapan-tahapan permodelan pada masing-masing poin, karena masing-masing point saling terhubung antara satu dengan yang lain. Untuk melakukan pengujian dan simulasi pada penelitian analisa gangguan belitan stator motor BLDC dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak Matlab *Simulink*. Perencanaan desain simulasi gangguan belitan stator pada motor BLDC dilakukan menggunakan program symulink pada Matlab 2013a. Namun melalui beberapa penyesuaian yang harus dilakukan karena ada beberapa parameter yang harus diganti untuk mendapatkan parameter yang sesuai dengan motor BLDC yang dimiliki (lee dkk., 2017). Pada simulasi blok powergui memungkinkan memilih salah satu dari metode ini untuk menyelesaikan rangkaian Continuous, yang menggunakan pemecah langkah variabel dari Simulink .Diskritisasi sistem kelistrikan untuk solusi pada langkah waktu yang tetap Blok powergui juga membuka alat untuk kondisi mapan dan analisis hasil simulasi dan untuk desain parameter lanjutan (Diwatelwar dkk., 2018).



Gambar 4. Rangkain simulink gangguan hubung singkat pada motor BLDC

d. Pemodelan Motor Brushless DC

Simulasi percobaan kali ini menggunakan fitur permanent brushless DC motor yang didapat dari *Simulink library*. Pada data tabel spesifikasi motor yang digunakan untuk nilai input yang akan digunakan pada simulasi percobaan kali ini. Adapun nilai yang diperoleh berdasarkan spesifikasi dari motor sebagai bahan input ke dalam block diagram yang telah dibuat didalam *software* matlab (Jain, 2017) dengan rincian sebagai berikut;

Tabel 1. Parameter Motor Brushless DC

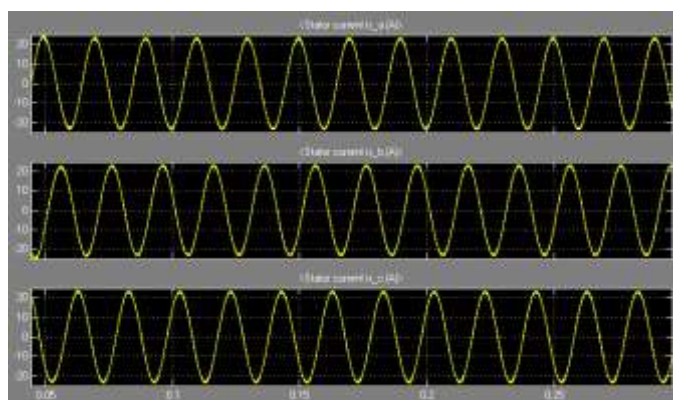
Tengangan sumber	72	Volt
Frekuensi	50	Hz
Daya	500	watt
Stator phase resistansi	0.18	Ohm
Inductance	0.000835	H
Flux magnet	0.07145	Vs
Voltage constant	51.8384	V_peak / Krpm
Torque constant	0.4287	N.m/ A_peak
Inertia	0.00062	Kg.m ²
Viscous damping	0.003035	F(N.m.s)
Pole	2	p

Hasil dan Pembahasan

Hasil pengujian sistem yang telah dilakukan akan dilakukan analisis mengenai gangguan belitan motor BLDC menggunakan simulasi matlab. Pengujian dilakukan dengan menentukan frekuensi pada simulasi matlab untuk mengetahui kondisi motor BLDC dalam kondisi normal dan kondisi gangguan belitan. Dalam pengujian simulasi supaya mendapatkan variasi pengambilan data pada penelitian dan membandingkan hasil analisa spektrum frekuensi pada motor BLDC kondisi normal dan kondisi gangguan belitan. Kondisi kerusakan dibuat dengan menghubungkan antar fasa dengan fasa dengan variasi beban. Desain matematis melalui simulasi dapat diamati melalui data grafik yang ditampilkan melalui fitur scope yang terdapat didalam software tersebut. Metode yang digunakan adalah dengan menggunakan metode *Fast Fourier Transform* (FFT) untuk Analisa arus pada input motor BLDC yang mengubah sinyal tegangan dari domain waktu ke domain frekuensi.

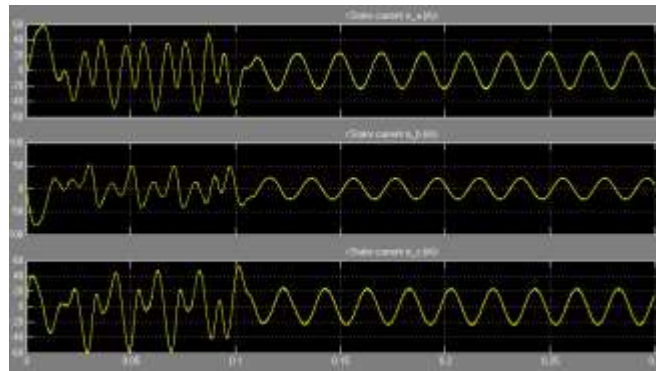
a. Hasil Arus Stator Current dalam kondisi normal dan gangguan

Output yang dihasilkan dari simulasi percobaan kali ini adalah data berupa grafik yang menjelaskan efek yang terjadi ketika tabel parameter dimasukkan kedalam block diagram, yang kemudian dicatat oleh scope sebagai monitor dari simulasi



Gambar 5. Hasil arus kondisi normal

Pada Gambar 4 menunjukkan karakteristik beberapa grafik hasil scope simulasi pada saat simulasi dijalankan. dengan waktu simulasi 0.3 detik menunjukkan bahwa hasil gelombang arus tidak terdapat *ripple*.



Gambar 6. Hasil arus kondisi gangguan

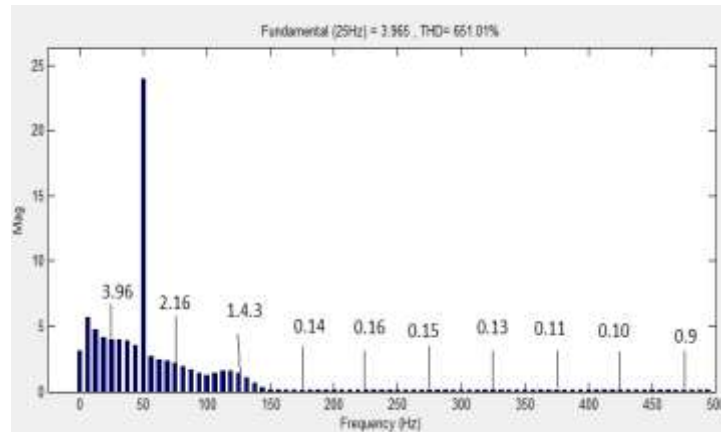
Pada Gambar 5 menunjukkan karakteristik beberapa grafik hasil scope simulasi menunjukkan bahwa hasil gelombang arus terdapat *ripple* pada waktu 0 detik sampai 0, 1 detik.

b. Analisa Letak Frekuensi gangguan belitan fasa to fasa pada motor BLDC

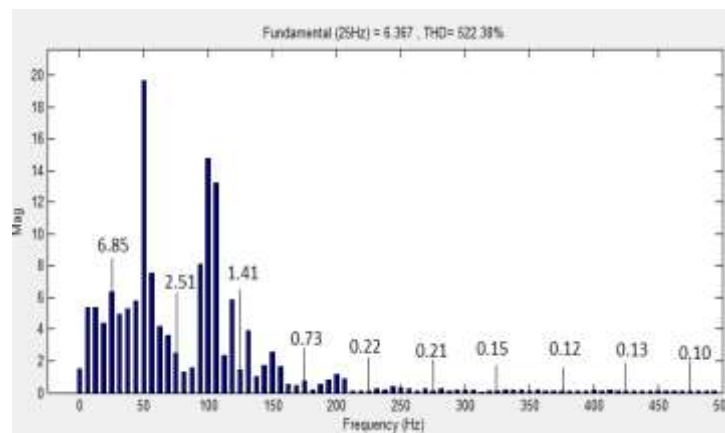
Metode deteksi analisa gangguan belitan stator pada motor BLDC dengan melalui analisa sinyal arus fasa memiliki karakteristik spektrum frekuensi yang berbeda-beda disetiap kerusakan motor. Letak spektrum kerusakan motor dalam kasus deteksi gangguan belitan stator pada motor BLDC perlu diperhatikan untuk awal dari analisa. Berdasarkan persamaan (2) dapat menentukan jumlah frekuensi fundamental (ff) yang digunakan sebagai perhitungan dalam menganalisa pola frekuensi arus stator pada motor BLDC. Sehingga dapat menghitung Letak gangguan belitan stator pada spektrum frekuensi tertentu. Untuk menentukan letak spektrum pada penelitian ini menggunakan persamaan (1), dimana letak spektrum frekuensi muncul pada frekuensi rendah atau di sekitar frekuensi fundamental (Park dan Jin Hur, 2016). Pada persamaan diatas tersebut sehingga Letak spektrum frekuensi dapat di ketahui karakteristiknya. maka dapat disimpulkan bahwa dengan menggunakan analisa perhitungan, karakteristik letak spektrum frekuensi gangguan belitan stator berada di frekuensi 25Hz, 75Hz, 125Hz, 175Hz, 225Hz, 275Hz, 325Hz, 375Hz, 425Hz dan 475Hz. Dalam kondisi terjadinya gangguan pada belitan stator nilai amplitudo semakin meningkat dari kondisi normal.

c. Analisa Dalam Kondisi Tanpa Beban

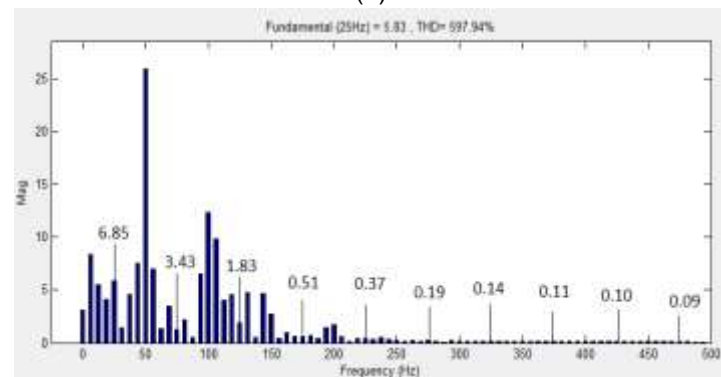
Analisa nilai total distorsi harmonisa dalam sistem yang ditunjukkan dengan spectrum frekuensi. Pada simulasi menggunakan metode *fast fourier transform* (FFT) dengan kondisi tanpa beban. Pengambilan data dimulai dari motor dalam kondisi normal pada keluaran sinyal frekuensi saat simulasi. Pada hasil simulasi ini kondisi motor BLDC terjadi dalam kondisi Normal tanpa beban dan hubung singkat antar fasa A-B, fasa B-C, fasa A-C dan hubung singkat fasa A-B-C. Berikut ini adalah gambar hasil spektrum motor BLDC sebagai berikut;



(a)



(b)



Gambar 4. Spektrum frekuensi pada motor dengan kondisi tanpa beban

Pada gambar 4. adalah contoh perbandingan jika diambil salah satu sampel. Hasil menunjukkan terdapat perbedaan pola spektrum frekuensi pada motor kondisi tanpa beban dan kondisi gangguan belitan stator pada motor BLDC. Pada perbandingan antara hasil kondisi normal dan terjadinya gangguan belitan stator untuk lebih jelasnya terdapat pada tabel berikut;

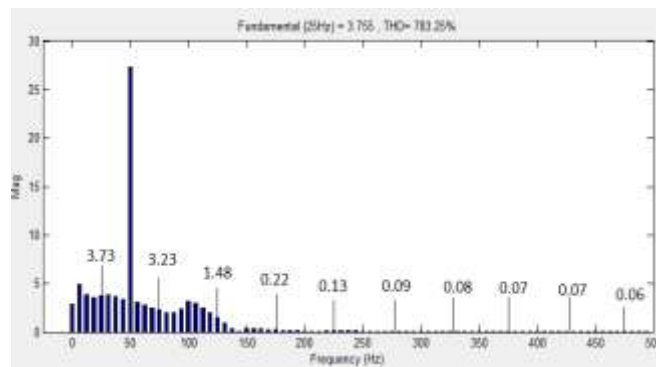
Tabel 4. Hasil Analisa deteksi kerusakan pada kondisi tanpa beban

Sampel	Frekuensi Hz	Amplitudo (A)				
		Normal	Fault fasa A-B	Fault fasa B-C	Fault fasa A-C	Fault fasa A-B-C
1	25	3.96	6.37	6.85	5.22	7.40
2	75	2.16	2.51	3.43	3.40	2.11
3	125	1.43	1.41	1.83	1.85	1.99
4	175	0.14	0.73	0.51	0.55	0.34
5	225	0.16	0.22	0.37	0.46	0.34
6	275	0.15	0.21	0.19	0.19	0.18
7	325	0.13	0.15	0.14	0.14	0.19
8	375	0.11	0.12	0.11	0.09	0.07
9	425	0.10	0.13	0.10	0.14	0.12
10	475	0.9	0.10	0.09	0.13	0.11

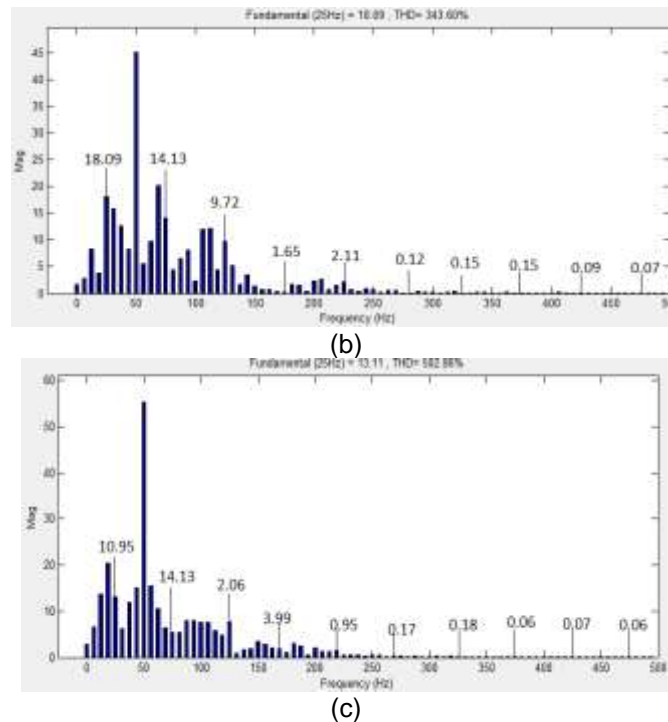
Hasil menunjukkan terdapat perbedaan pola spektrum frekuensi pada motor kondisi tanpa beban dan kondisi gangguan belitan stator pada motor BLDC. Pada pengambilan data menggunakan simulasi Matlab R2013 terlihat pada kondisi normal frekuensi di koordinat x 25 Hz, 75, 125 hz, 175 Hz, 225 Hz, 275 Hz, 325 Hz, 375 Hz, 375 Hz, 425 Hz dan 475 Hz dengan nilai *amplitude* pada koordinat y 3.93, 2.16, 1.43, 0.14, 0.16, 0.15, 0.13, 0.11, 0.10, dan 0.9 dalam satuan ampere dengan percobaan tanpa menggunakan beban. Dari hasil simulasi menunjukkan bahwa terjadinya perubahan nilai *amplitude* pada kondisi normal dan kondisi gangguan belitan setiap nilai-nilai fasanya. Pada motor BLDC dimana terlihat keberhasilan prediksi frekuensi pada persamaan $f_{SITF} = (2k-1) ff$. Pada perbandingan antara hasil kondisi normal dan terjadinya gangguan.

d. Analisa Dalam Kondisi Dengan Beban 10 N.m

Analisa nilai total distorsi harmonisa dalam sistem yang ditunjukkan dengan spectrum frekuensi kondisi menggunakan beban 10 N.m. Pengambilan data dimulai dari motor dalam kondisi normal pada keluaran sinyal frekuensi saat simulasi. Berikut adalah gambar hasil spektrum motor BLDC dalam kondisi menggunakan beban 10 N.m sebagai berikut;



(a)



Gambar 5. Spektrum frekuensi pada motor dengan kondisi denga beban 10 N.m

Penjelasan gambar 5 merupakan percobaan menggunakan beban 10 N.m memiliki perbedaan dengan percobaan tanpa beban, yaitu frekuensi terdapat lonjakan di koordinat x 25 Hz, 75, 125 hz, 175 Hz, 225 Hz, 275 Hz, 325 Hz, 375 Hz , 375 Hz, 425 Hz dan 475 Hz dengan nilai *amplitude* pada koordinat y adalah 18.09, 14.13, 9.72. 1.65, 2.11, 0.12, 0.15, 0.15, 0.9, 0.7 dari Kondisi *Fault* fasa A to fasa.

Tabel 5. Hasil Analisa deteksi kerusakan pada kondisi dengan menggunakan beban 10 N.m

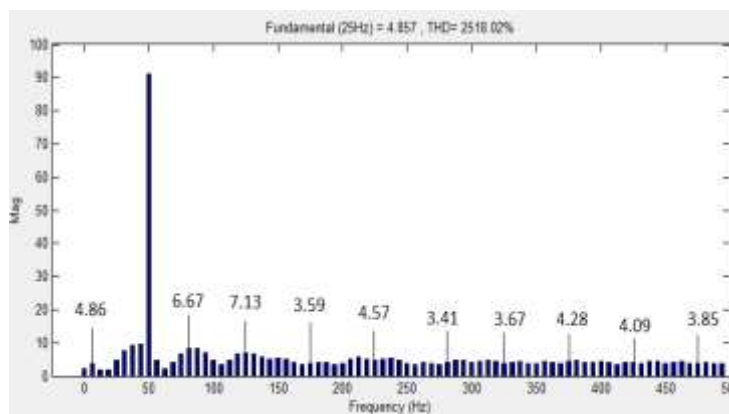
Sampel	Frekuensi Hz	Amplitudo (A)				
		Normal	Fault fasa A-B	Fault fasa B-C	Fault fasa A-C	Fault fasa A-B-C
1	25	3.75	18.09	13.11	10.95	4.51
2	75	3.25	14.13	5.34	14.13	2.16
3	125	1.48	9.72	7.86	2.06	1.93
4	175	0.22	1.65	1.13	3.99	2.37
5	225	0.13	2.11	0.46	0.95	0.47
6	275	0.0.9	0.12	0.18	0.17	0.21
7	325	0.08	0.15	0.10	0.18	0.11
8	375	0.07	0.15	0.09	0.06	0.05
9	425	0.07	0.09	0.8	0.07	0.04
10	475	0.06	0.07	0.07	0.06	0.09

Pada Tabel 5. Hasil dari percobaan menggunakan beban 10 N.m terlihat ada beberapa letak nilai frekuensi spectrum yang tidak terdeteksi tapi lebih sedikit. Pada tabel di atas terjadi kenaikan amplitudo ada juga beberapa titik fekuensi tidak mengalami kenaikan. Masing-masing kondisi terlihat jelas lonjakan yang terjadi dari kondisi normalnya. Hasil nilai-nilai *amplitude* pada simulasi dapat dilihat pada tabel diatas. Dari hasil keterangan diatas berwarna biru merupakan hasil *Amplitude* arus motor yang tidak terdeteksi. Perbandingan hasil perhitungan menunjukkan

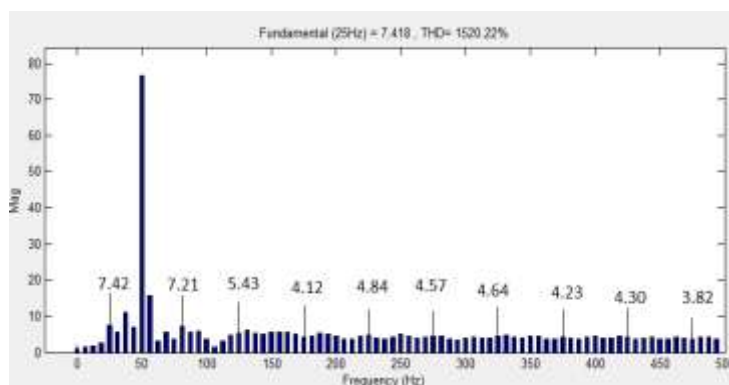
dapat mendeteksi hubung singkat belitan stator saat terjadi kenaikan amplitude lebih tinggi dibandingkan kondisi motor normal sehingga terdapat perbedaanya.

e. Analisa Dalam Kondisi Dengan Beban 20 N.m

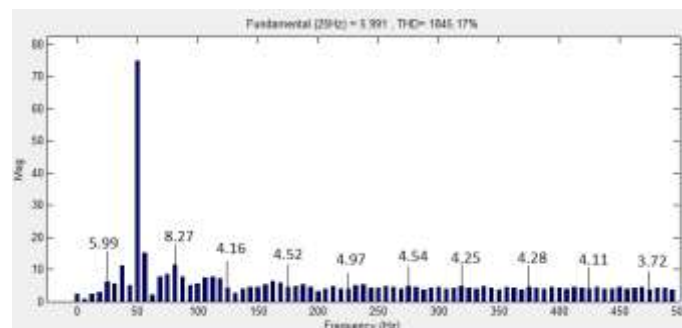
Pada percobaan ketiga hasil simulasi ini kondisi motor BLDC terjadi dalam kondisi Normal tanpa beban dan hubung singkat antar fasa A-B, fasa B-C, fasa A-C dan hubung singkat fasa A-B-C dengan kondisi menggunakan beban 20 N.m. Pengambilan data dimulai dari motor dalam kondisi normal pada keluaran sinyal frekuensi saat simulasi. Dari hasil percobaan dapat sebagai perbandingan nilai-nilai harmonisa dalam sistem yang ditunjukkan dengan spectrum frekuensi. Sehingga Berikut ini adalah gambar hasil spektrum motor BLDC menggunakan beban 20 N.m sebagai berikut;



(a)



(b)



(c)

Gambar 6. Spektrum frekuensi pada motor dengan kondisi dengan beban 20 N.m

Pejelasan gambar 6. adalah data pertama hasil analisa menggunakan beban semakin besar yaitu 20 N.a. Kondisi *Fault fasa A to Fasa B* menunjukkan bahwa frekuensi dikoordinat x 1.25 Hz, 3.75 Hz dan 4.75 Hz mengalami penurunan *amplitude* pada koordinat y 5.43 A, 4.24 A dan 3.82 A. Dapat Terlihat juga pada sampel 10 pada frekuensi dikoordinat x 475 Hz terjadi penurunan jumlah *amplitude* sebesar 3.82 A, 3.59 A, 3.75 dan 3.72 A. Pada perhitungan perbandingan antara hasil kondisi normal dan terjadinya gangguan belitan stator menunjukkan terdapat lonjakan *amplitude* dari kondisi normal. Untuk mengetahui Perhitungan didapat dari selisih hasil data normal dengan data menggunakan tanpa beban 20 N.m dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Hasil Analisa deteksi kerusakan pada kondisi dengan menggunakan beban 20 N.m

Sampel	Frekuensi Hz	Amplitudo (A)				
		Normal	Fault fasa A-B	Fault fasa B-C	Fault fasa A-C	Fault fasa A-B-C
1	25	4.86	7.42	5.83	7.05	5.99
2	75	6.67	7.21	11.22	7.90	8.27
3	125	7.13	5.43	8.09	5.90	4.16
4	175	3.59	4.12	4.05	3.86	4.52
5	225	4.57	4.84	4.86	4.81	4.97
6	275	3.41	4.57	4.28	4.55	4.54
7	325	3.67	4.64	3.88	3.75	4.25
8	375	4.28	4.23	4.04	4.65	4.28
9	425	4.09	4.30	4.30	4.30	4.11
10	475	3.85	3.82	3.59	3.75	3.72

Pada Tabel 6 hasil tabel pada tabel di atas terjadi kenaikan *amplitude* juga beberapa titik fekuensi tidak mengalami kenaikan, dikarenakan pemberian beban semakin besar dari percobaan sebelumnya. Dari masing-masing kondisi terlihat jelas lonjakan yang terjadi pada kondisi beban dari kondisi normal. Hasil nilai-nilai *amplitude* pada simulasi dapat dilihat pada tabel diatas. Berwarna biru merupakan hasil Amplitudo arus motor yang tidak terdeteksi. Perbandingan hasil perhitungan menunjukkan dapat mendeteksi hubung singkat belitan stator saat terjadi kenaikan *amplitude* lebih tinggi dibandingkan kondisi motor normal.

f. Persentase keberhasilan deteksi gangguan belitan stator Pada Motor Brushless DC

Untuk melihat keberhasilan dalam mendeteksi gangguan hubung singkat fasa to fasa dapat dihitung dengan menggunakan persamaan dibawah ini:

$$\text{Persentase keberhasilan \%} = \frac{\text{jumlah deteksi gangguan belitan stator}}{\text{Banyak data}} \times 10$$

Jumlah data terdeteksi gangguan belitan stator pada motor BLDC tergantung dari banyaknya data motor gangguan yang mempunyai nilai-nilai *amplitude* dari setiap sampel. Tabel rangkuman *amplitude* dari data motor gangguan akan ditunjukkan pada dua sub bab. Hal tersebut merupakan hasil dari setiap sampel sudah dipersentase berdasarkan pembebanan dengan variasi kerusakan. Dengan kondisi motor BLDC terjadi dalam kondisi Normal tanpa beban dan hubung singkat antar fasa A-B, fasa B-.C, fasa A-C dan hubung singkat fasa A-B-C. Berdasarkan hasil pada simulasi perhitungan dan pengujian diatas didapatkan bahwa pengambilan data dengan variasi pembebanan. Pada saat simulasi untuk mendeteksi gangguan belitan stator pada motor BLDC memiliki hasil yang sangat maksimal baik, terbukti saat kondisi normal tanpa beban terdapat lonjakan di frekuensi prediksi gangguan belitan stator pada motor BLDC. Persentase keberhasilan dapat dilihat pada tabel berikut ini;

Tabel 7. Persentase keberhasilan Pada simulasi berdasarkan pembebanan

Persentase terdeteksi gangguan belitan stator				
Kondisi motor	Fault fasa A-B	Fault fasa B-C	Fault fasa A-C	Fault fasa A-B-C
Tanpa Beban	90 %	80%	90%	90%
Dengan beban 10 newton/ms	100%	90%	80%	80%
Dengan beban 20 Newton/ms	70%	80%	80%	70%
Ratat-Rata	94%			

Penjelasan dari tabel 7 didapatkan hasil simulasi dari persentase terdeteksi gangguan belitan stator setiap sampel dengan variasi pembebanan. Hasil dari persentase terdeteksi gangguan belitan digunakan supaya mendapatkan hasil *real* pada penelitian ini. Pada kondisi tanpa beban dapat mendeteksi gangguan belitan stator pada motor BLDC Fault fasa A-B 90%, *Fault* Fasa B-C 80%, *Fault* fasa A-C 90% dan *Fault* fasa A-B-C 90%. Sedangkan dengan menggunakan beban 10 Newton *Fault* fasa A-B 100%, *Fault* Fasa B-C 90%, *Fault* fasa A-C 80% dan *Fault* fasa A-B-C 80%. Pada penggunaan beban 20 Newton/ms *Fault* fasa A-B 70%, *Fault* Fasa B-C 80%, *Fault* fasa A-C 80% dan *Fault* fasa A-B-C 70%. Data tersebut dapat dianalisa bahwa deteksi gangguan Belitan stator pada motor BLDC saat dilakukan tanpa beban, memiliki hasil yang lebih baik dibandingkan saat berbeban. Rata – rata persentase pada penelitian ini dihasilkan dari 3 percobaan simulasi dari jumlah 10 sampel untuk pembebanan dan tanpa beban 94 %.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil yang didapatkan melalui proses pengambilan data, pengujian data dan analisis data mengenai sistem deteksi gangguan belitan stator pada motor BLDC didapatkan kesimpulan sebagai berikut, (1) Dari keseluruhan percobaan menggunakan variasi kerusakan gangguan belitan stator dengan kondisi tanpa beban, berbeban 10 N.m dan 20 N.m, dari hasil analisa bahwa tingkat kesensitifan yang dapat mendeteksi pada letak frekuensi prediksi $f_{SITF} = (2k-1)$ kondisi normal. (2) Dari hasil pengujian juga didapat simpulan bahwa tingkat keparahan hubung singkat belitan stator motor BLDC berdampak pada peningkatan amplitudo pada frekuensi 25 Hz, 75, 125 hz, 175 Hz, 225 Hz, 275 Hz, 325 Hz, 375 Hz, 375 Hz, 425 Hz dan 475 Hz. Karakteristik spektrum frekuensi pada gangguan belitan stator motor BLDC berada pada frekuensi sekitar fundamental yaitu di frekuensi tersebut. Keberhasilan deteksi gangguan belitan stator pada motot BLDC sangat efektif dilakukan pada tanpa beban dengan Persentase terdeteksi gangguan belitan stator pada hubung singkat Fault fasa A- B 90%, fasa B-C 80%, fasa C-A 90% dan fasa A-B-C 90%. Hasil total rata-rata dari hasil setiap sampel percobaan berdasarkan simulasi memiliki persentase tingkat keberhasilan sebesar 94%. Adapun saran dari penelitian ini adalah perlu adanya pengembangan dengan melakukan pengujian dengan jenis kerusakan yang berbeda selain kerusakan belitan stator pada motor BLDC.

Referensi

- Abduh, Muhammad, Iradiratu D.P.K, and Belly Yan Dewantara. (2019). "Deteksi Kerusakan Outer Race Bearing Pada Motor Induksi Menggunakan Analisis Arus Stator." *Seminar Nasional Inovasi dan Aplikasi Teknologi di Industri* 1(2): 1–6.
- Alham, Nur Rani, Dimas Anton Asfani, I. Made Yulistya Negara, and Belly Yan Dewantara. (2018). "Analysis of Load and Unbalance Voltage on Air Gap Eccentricity in Detection of Three Phase Induction Motor." *International Conference on Information and Communications Technology, ICOIACT 2018*.
- Diah, Iradiratu P.K. et al. (2019). "Decomposition Wavelet Transform as Identification of Outer Race Bearing Damage through Stator Flow Analysis in Induction Motor." *2019 International Conference on Information and Communications Technology, ICOIACT 2019*.
- Diwatelwar, Ketan P, and Soniya K Malode. (2018). "Fault Detection and Analysis of Three-Phase Induction Motors Using MATLAB Simulink Model."
- DPK, Iradiratu, Belly Yan Dewantara, and Achmad Misfakul Janudin. (2019). "Deteksi Kerusakan Inner Race Bearing Menggunakan Motor Current Signature Analysis Berbasis Fast Fourier Transform." *Jurnal Teknik Elektro dan Komputer TRIAC* 6(1), 6–9.
- Hosseini, Saba M., Faezeh Hosseini, and Mostafa Abedi. (2019). "Stator Fault Diagnosis of a BLDC Motor Based on Discrete Wavelet Analysis Using ADAMS Simulation." *SN Applied Sciences* 1(11). <https://doi.org/10.1007/s42452-019-1449-5>.
- Jain, A M. (2017). "Modelling and Simulation of Three Phase Bldc Motor for Electric Braking Using Matlab / Simulink Principle and Operating." (7): 48–53.
- Kim, Kyung Tae, Jin Hur, and Gyu Hong Kang. (2011). "Inter-Turn Fault Analysis of IPM Type BLDC Motor Using Fault Impedance Modeling." *8th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia: "Green World with Power Electronics", ICPE 2011-ECCE Asia: 2216–24*.
- Kim, K. H., B. G. Gu, and I. S. Jung. (2011). "Online Fault-Detecting Scheme of an Inverter-Fed Permanent Magnet Synchronous Motor under Stator Winding Shorted Turn and Inverter Switch Open." *IET Electric Power Applications* 5(6): 529–39.
- Kim, Kyung Tae, Seung Tae Lee, and Jin Hur. (2014). "Diagnosis Technique Using a Detection Coil in BLDC Motors with Interturn Faults." *IEEE Transactions on Magnetics* 50(2): 2–5.
- Lee, Seung Tae, and Jin Hur. 2017. "Detection Technique for Stator Inter-Turn Faults in BLDC Motors Based on Third-Harmonic Components of Line Currents." *IEEE Transactions on Industry Applications* 53(1): 143–50.
- Masudi, Nanang. (2014). "Desain Controller Motor Bldc Untuk Meningkatkan Performa (Daya Output) Sepeda Motor Listrik." : 1–65.
- Nayar, N. (2019). *Model-based fault detection and diagnosis of BLDC motors working at variable speed using wavelet transform* [Tesis]. The University of Texas at Austin
- Park, Jun Kyu, and Jin Hur. (2016). "Detection of Inter-Turn and Dynamic Eccentricity Faults Using Stator Current Frequency Pattern in IPM-Type BLDC Motors." *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 63(3)
- Rohan, Ali, Mohammed Rabah, and Sung Ho Kim. (2018). "An Integrated Fault Detection and Identification System for Permanent Magnet Synchronous Motor in Electric Vehicles." *International Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems* 18(1): 20–28.
- Suganthi, P., S. Nagapavithra, and S. Umamaheswari. (2017). "Modeling and Simulation of Closed Loop Speed Control for BLDC Motor." *2017 Conference on Emerging Devices and Smart Systems, ICEDSS 2017* (March)
- Tashakori, A., and M. Ektesabi. (2012). "Comparison of Different PWM Switching Modes of BLDC Motor as Drive Train of Electric Vehicles." 6(7)
- Skora, Marcin, Pawel Ewert, and Czeslaw T. Kowalski. (2019). "Selected Rolling Bearing Fault Diagnostic Methods in Wheel Embedded Permanent Magnet Brushless Direct Current Motors." *Energies* 12(21).