



TESIS - TE142599

**EKSPERIMEN DETEKSI EKSENTRISITAS STATIS CELAH
UDARA MOTOR INDUKSI MELALUI ANALISA FREKUENSI
RESOLUSI PADA ARUS STATOR**

BELLY YAN DEWANTARA
2215201341

DOSEN PEMBIMBING
Dr. Dimas Anton Asfani, S.T., M.T
Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, S.T., M.Sc

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN TEKNIK SISTEM TENAGA
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI ELEKTRO
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2017



TESIS - TE142599

**EKSPERIMEN DETEKSI EKSENTRISITAS STATIS CELAH
UDARA MOTOR INDUKSI MELALUI ANALISA FREKUENSI
RESOLUSI PADA ARUS STATOR**

BELLY YAN DEWANTARA
2215201341

DOSEN PEMBIMBING
Dr. Dimas Anton Asfani, S.T., M.T
Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, S.T., M.Sc

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN TEKNIK SISTEM TENAGA
DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI ELEKTRO
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2017

LEMBAR PENGESAHAN

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (M.T)
di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

oleh:

Belly Yan Dewantara
NRP. 2215201341

Tanggal Ujian : 07 Juni 2017
Periode Wisuda : September 2017

Disetujui oleh:

- 
1. Dr. Dimas Anton Asfani, S.T, M.T (Pembimbing I)
NIP: 198109052005011002
 2. Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, S.T., M.Sc (Pembimbing II)
NIP: 197007121998021001
 3. Prof. Dr. Ir. Imam Robandi, MT. (Penguji I)
NIP: 196308171990031001
 4. Dr. Ir. Soedibjo, M.MT. (Penguji II)
NIP: 195512071980031004
 5. Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D (Penguji III)
NIP: 197311192000031001


Dekan Fakultas Teknologi Elektro

Dr. Tri Anief Sardjono, S.T., M.T.
NIP. 197002121995121001

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tesis saya dengan judul “**EKSPERIMEN DETEKSI EKSENTRISITAS STATIS CELAH UDARA MOTOR INDUKSI MELALUI ANALISA FREKUENSI RESOLUSI PADA ARUS STATOR**” adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, 07 Juni 2017

Belly Yan Dewantara
NRP. 2215201341

Halaman ini sengaja dikosongkan

EKSPERIMEN DETEKSI EKSENTRISITAS STATIS CELAH UDARA MOTOR INDUKSI MELALUI ANALISA FREKUENSI RESOLUSI PADA ARUS STATOR

Nama mahasiswa : Belly Yan Dewantara
NRP : 2215202341
Pembimbing : 1. Dr. Dimas Anton Asfani, S.T, M.T
2. Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, S.T, M.Sc

ABSTRAK

Penelitian ini membahas tentang eksperimental deteksi gangguan eksentrisitas celah udara pada motor induksi dengan menggunakan analisis frekuensi pada arus stator. Algoritma *fast fourier transform* digunakan untuk analisis arus stator dari domain waktu kedalam domain frekuensi. Deteksi eksentrisitas celah udara dilakukan dengan mengamati amplitudo pada frekuensi eksentrisitas yang muncul disekitar frekuensi fundametal. Resolusi frekuensi digunakan untuk mengatur tingkat akurasi pengamatan amplitudo pada spektrum frekuensi. Penelitian ini juga menganalisa kegunaan resolusi frekuensi yang tepat untuk diterapkan pada sistem deteksi eksentrisitas agar supaya tidak ada frekuensi yang tidak diinginkan muncul di sekitar frekuensi fundamental, hal ini digunakan untuk mengidentifikasi frekuensi eksentrisitas dengan jelas. Hasil percobaan menunjukkan bahwa metode analisis melalui frekuensi arus stator pada motor induksi dapat dengan jelas mendeteksi gangguan eksentrisitas celah udara dengan menerapkan frekuensi resolusi 0,5 hz hingga 1 hz.

Kata kunci : Motor induksi, eksentrisitas celah udara, *motor current spectrum analysis* (MCSA), *Fast Fourier Transform* (FFT), frekuensi resolusi.

Halaman ini sengaja dikosongkan

EXPERIMENT DETECTION OF STATIC AIR GAP ECCENTRICITY IN INDUCTION MOTOR BASED ON RESOLUTION FREQUENCY ANALYSIS ON STATOR CURRENT

By : Belly Yan Dewantara
Student Identity Number : 2215201341
Supervisors : 1. Dr. Dimas Anton Asfani, S.T, M.T
2. Dr.Eng. I Made Yulistya Negara, S.T, M.Sc

ABSTRACT

The contents of this research discusses experimental analysis to detect the air gap eccentricity faults on induction motor using frequency analysis on stator current. Fast fourier transform algorithm is used for frequency analysis on stator current. Detection of air gap eccentricity is carried out by observing the sideband frequency that seen around fundametal frequency. The frequency resolution is used to set the accuracy level in the sideband frequency observation. Improper use of frequency resolution can result the supply frequency component. This study also tested the usefulness of the appropriate frequency resolution to be applied to eliminate the supply frequency components, this is to identify the eccentricity frequency that is indicative of air gap eccentricity. The results of the experiment reported that the motor current signature analysis method can clearly detect the air gap eccentricity by applying a resolution frequency of 0,5 hz - 1 hz.

Keywords— Induction motor, air gap eccentricity, motor current spectrum analysis (MCSA), Fast Fourier Transform (FFT), resolution frequency.

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, segala puji bagi Allah SWT karena atas limpahan karunia rahmat-Nya sehingga karya akhir yang berjudul “Eksperimen Deteksi Eksentrisitas Statis Celah Udara Motor Induksi melalui Analisa Frekuensi Resolusi pada Arus Stator” ini dapat terselesaikan dengan baik tepat pada waktunya. Untuk itu penulis ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Bapak Prof. Ir. Joni Hermana M.Sc.ES., Ph.D., selaku Rektor Institut Teknolgi Sepuluh Nopember Surabaya,
2. Bapak Dr. Tri Arief Sardjono, S.T., M.T., selaku Dekan Fakultas Teknologi Elektro Institut Teknolgi Sepuluh Nopember,
3. Bapak Dr.Eng. Ardyono Priyadi, S.T., M.Eng., selaku Kepala Departemen Teknik Elektro Institut Teknolgi Sepuluh Nopember,
4. Bapak Dr. Dimas Anton Asfani, S.T, M.T dan Bapak Dr. I Made Yulistya Negara, S.T, M.Sc selaku dosen pembimbing tesis saya atas kesediaan dan kesabarannya dalam memberikan bimbingan dan ilmu pada penulis,
5. Para dosen dan karyawan Institut Teknolgi Sepuluh Nopember yang banyak membantu dalam proses perkuliahan,
6. Seluruh keluarga besar saya, Bapak, Kakak, Adek atas segala doa dan dukungan yang diberikan,
7. Teman-teman Teknik Sistem Tenaga ITS 2015 (Restu-Samarinda, Rani-Makasar, Daeng-Pamekasan, Mbak Ina-Nganjuk, Mbak Eva-Bengkalis, Abi-Sidoarjo, Evin-Sidoarjo, Ari-Pamekasan, Pak Samsudin-Sidoarjo, Samudra-Surabaya, Fajar-Lamongan, Om Hedi-Sampang dan Thoeurn Muy-Cambodia) atas kebersamaan selama ini.

Akhir kata, segala kritik dan saran penulis perlukan demi penyempurnaan karya akhir ini, dan semoga karya akhir ini bermanfaat bagi banyak pihak.

Surabaya, Juni 2017

Penulis

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN.....	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS.....	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xvii
DAFTAR SINGKATAN DAN SIMBOL.....	xix
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	3
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	4
1.5 Kontribusi	4
1.6 Metodologi Penelitian.....	4
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI	7
2.1 Motor Induksi.....	7
2.1.1 Kontruksi motor induksi	7
2.1.2 Prinsip kerja motor induksi	8
2.2 Eksentrisitas Celah Udara.....	10
2.2.1 Eksentrisitas akibat kecacatan stator.....	11
2.2.2 Eksentrisitas akibat kerusakan <i>bearing</i>	12
2.3 Hubungan Kerusakan Komponen dengan Celah Udara	15
2.3.1 Pengaruh kerusakan <i>outer bearing</i> terhadap celah udara	15
2.3.2 Pengaruh kerusakan <i>inner bearing</i> terhadap celah udara	15
2.4 <i>Airgap Permeance</i>	16
2.5 Kerapatan Fluks Celah Udara	16
2.6 Hubungan Eksentrisitas Celah Udara dengan Arus Stator	17
2.7 Pengolah Sinyal.....	18

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN.....	21
3.1 Diagram Alir Penelitian	21
3.2 Pembebanan pada Motor	23
3.3 Proses Akuisisi Data.....	25
3.4 Rekontruksi Eksentrisitas Celah Udara	28
3.5 Perancangan Sistem Pengukuran dan Pengolahan Data.....	30
BAB 4 HASIL PENGUJIAN DAN ANALISA DATA	33
4.1 Perhitungan Presentasi Pembebanan	34
4.2 Analisa Arus Stator pada Kondisi Normal dan Eksentrisitas	35
4.3 Pengukuran Slip pada Motor Kondisi Normal dan Kondisi Eksentrisitas	36
4.4 Analisa Letak Frekuensi Eksentrisitas Celah Udara	37
4.5 Hasil Analisa Deteksi Frekuensi Eksentrisitas Celah Udara	38
4.5.1 Analisa spektrum frekuensi eksentrisitas pada beban 0%	39
4.5.2 Analisa spektrum frekuensi eksentrisitas pada beban 25%	46
4.5.3 Analisa spektrum frekuensi eksentrisitas pada beban 50%	54
4.5.4 Analisa spektrum frekuensi eksentrisitas pada beban 75%	59
4.5.5 Analisa spektrum frekuensi eksentrisitas pada beban 100%	64
BAB 5 PENUTUP	71
5.1 Simpulan	71
5.2 Saran	72
DAFTAR PUSTAKA	73

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Komponen Motor Induksi, (a) Stator, (b) Rotor.....	8
Gambar 2.2	(a) Motor normal, (b) Eksentrisitas statis, (c) Eksentrisitas dinamis	10
Gambar 2.3	Eksentrisitas tipe <i>cylindrical whirling motion</i>	12
Gambar 2.4	Kesalahan instalasi <i>bearing</i>	13
Gambar 2.5	Eksentrisitas celah udara tipe <i>Symetrical conical whirling motion</i>	13
Gambar 2.6	Konstruksi <i>bearing</i> motor induksi	14
Gambar 2.7	Eksentrisitas akibat kerusakan <i>outer ring</i>	14
Gambar 2.8	Eksentrisitas akibat kerusakan <i>inne ring</i>	14
Gambar 3.1	Diagram alir percobaan	21
Gambar 3.2	Konfigurasi sistem deteksi eksentrisitas celah udara	22
Gambar 3.3	Motor Induksi 3 Fasa	23
Gambar 3.4	Perangkat pembebanan berupa lampu.....	24
Gambar 3.5	Generator sinkron.....	24
Gambar 3.6	Alat akuisisi data merk NI-DAQ 9246.....	25
Gambar 3.7	Implementasi sistem deteksi eksentrisitas celah udara	26
Gambar 3.8	<i>Bearing</i> normal tanpa rekontruksi <i>outer</i> 52 mm dan <i>inner</i> 25 mm.....	28
Gambar 3.9	Ring dengan ketebalan berbeda 0.1 mm	28
Gambar 3.10	Ring dengan ketebalan berbeda 0.2 mm	29
Gambar 3.11	a) Perbandingan ukuran <i>bearing</i> normal dengan <i>bearing</i> pengganti, b) <i>Bearing</i> pengganti dengan ring eksentrik.....	29
Gambar 3.12	Skema eksentrisitas celah udara.....	30
Gambar 4.1	Perbandingan slip motor normal dan terjadi eksentrisitas.....	36
Gambar 4.2	Spektrum frekuensi pada motor dengan frekuensi resolusi 2 hz pada pembebanan 0%, (a) kondisi normal, (b) kondisi eksentrisitas 0,1 mm, (c) kondisi eksentrisitas 0,2 mm.....	40
Gambar 4.3	Spektrum frekuensi pada motor dengan frekuensi resolusi 1 hz pada pembebanan 0%, (a) kondisi normal, (b) kondisi eksentrisitas 0,1 mm, (c) kondisi eksentrisitas 0,2 mm.....	41
Gambar 4.4	Spektrum frekuensi pada motor dengan frekuensi resolusi 0,5 hz pada pembebanan 0%, (a) kondisi normal, (b) kondisi eksentrisitas 0,1 mm, (c) kondisi eksentrisitas 0,2 mm.....	42
Gambar 4.5	Spektrum frekuensi pada motor dengan frekuensi resolusi 0,1 hz pada pembebanan 0%, (a) kondisi normal, (b) kondisi eksentrisitas 0,1 mm, (c) kondisi eksentrisitas 0,2 mm.....	44
Gambar 4.6	Spektrum frekuensi pada motor dengan frekuensi resolusi 0,02 hz pada pembebanan 0%, (a) kondisi normal, (b) kondisi eksentrisitas 0,1 mm, (c) kondisi eksentrisitas 0,2 mm.....	45

Gambar 4.7	Spektrum frekuensi pada motor dengan frekuensi resolusi 2 hz pada pembebanan 25%, (a) kondisi normal, (b) kondisi eksentrisitas 0,1 mm, (c) kondisi eksentrisitas 0,2 mm	46
Gambar 4.8	Spektrum frekuensi pada motor dengan frekuensi resolusi 1 hz pada pembebanan 25%, (a) kondisi normal, (b) kondisi eksentrisitas 0,1 mm, (c) kondisi eksentrisitas 0,2 mm	48
Gambar 4.9	Spektrum frekuensi pada motor dengan frekuensi resolusi 0,5 hz pada pembebanan 25%, (a) kondisi normal, (b) kondisi eksentrisitas 0,1 mm, (c) kondisi eksentrisitas 0,2 mm	49
Gambar 4.10	Spektrum frekuensi pada motor dengan frekuensi resolusi 0,1 hz pada pembebanan 25%, (a) kondisi normal, (b) kondisi eksentrisitas 0,1 mm, (c) kondisi eksentrisitas 0,2 mm.....	51
Gambar 4.11	Spektrum frekuensi pada motor dengan frekuensi resolusi 0,02 hz pada pembebanan 25%, (a) kondisi normal, (b) kondisi eksentrisitas 0,1 mm, (c) kondisi eksentrisitas 0,2 mm.....	52
Gambar 4.12	Spektrum frekuensi pada motor dengan frekuensi resolusi 2 hz pada pembebanan 50%, (a) kondisi normal, (b) kondisi eksentrisitas 0,1 mm, (c) kondisi eksentrisitas 0,2 mm	54
Gambar 4.13	Spektrum frekuensi pada motor dengan frekuensi resolusi 1 hz pada pembebanan 50%, (a) kondisi normal, (b) kondisi eksentrisitas 0,1 mm, (c) kondisi eksentrisitas 0,2 mm.....	55
Gambar 4.14	Spektrum frekuensi pada motor dengan frekuensi resolusi 0,5 hz pada pembebanan 50%, (a) kondisi normal, (b) kondisi eksentrisitas 0,1 mm, (c) kondisi eksentrisitas 0,2 mm.....	56
Gambar 4.15	Spektrum frekuensi pada motor dengan frekuensi resolusi 0,1 hz pada pembebanan 50%, (a) kondisi normal, (b) kondisi eksentrisitas 0,1 mm, (c) kondisi eksentrisitas 0,2 mm.....	57
Gambar 4.16	Spektrum frekuensi pada motor dengan frekuensi resolusi 0,02 hz pada pembebanan 50%, (a) kondisi normal, (b) kondisi eksentrisitas 0,1 mm, (c) kondisi eksentrisitas 0,2 mm	58
Gambar 4.17	Spektrum frekuensi pada motor dengan frekuensi resolusi 2 hz pada pembebanan 75%, (a) kondisi normal, (b) kondisi eksentrisitas 0,1 mm, (c) kondisi eksentrisitas 0,2 mm	59
Gambar 4.18	Spektrum frekuensi pada motor dengan frekuensi resolusi 1 hz pada pembebanan 75%, (a) kondisi normal, (b) kondisi eksentrisitas 0,1 mm, (c) kondisi eksentrisitas 0,2 mm.....	60
Gambar 4.19	Spektrum frekuensi pada motor dengan frekuensi resolusi 0,5 hz pada pembebanan 75%, (a) kondisi normal, (b) kondisi eksentrisitas 0,1 mm, (c) kondisi eksentrisitas 0,2 mm.....	61
Gambar 4.20	Spektrum frekuensi pada motor dengan frekuensi resolusi 0,1 hz pada pembebanan 75%, (a) kondisi normal, (b) kondisi eksentrisitas 0,1 mm, (c) kondisi eksentrisitas 0,2 mm.....	62

Gambar 4.21	Spektrum frekuensi pada motor dengan frekuensi resolusi 0,02 hz pada pembebanan 75%, (a) kondisi normal, (b) kondisi eksentrisitas 0,1 mm, (c) kondisi eksentrisitas 0,2 mm.....	63
Gambar 4.22	Spektrum frekuensi pada motor dengan frekuensi resolusi 2 hz pada pembebanan 100%, (a) kondisi normal, (b) kondisi eksentrisitas 0,1 mm, (c) kondisi eksentrisitas 0,2 mm	64
Gambar 4.23	Spektrum frekuensi pada motor dengan frekuensi resolusi 1 hz pada pembebanan 100%, (a) kondisi normal, (b) kondisi eksentrisitas 0,1 mm, (c) kondisi eksentrisitas 0,2 mm.....	65
Gambar 4.24	Spektrum frekuensi pada motor dengan frekuensi resolusi 0,5 hz pada pembebanan 100%, (a) kondisi normal, (b) kondisi eksentrisitas 0,1 mm, (c) kondisi eksentrisitas 0,2 mm.....	66
Gambar 4.25	Spektrum frekuensi pada motor dengan frekuensi resolusi 0,1 hz pada pembebanan 100%, (a) kondisi normal, (b) kondisi eksentrisitas 0,1 mm, (c) kondisi eksentrisitas 0,2 mm.....	67
Gambar 4.26	Spektrum frekuensi pada motor dengan frekuensi resolusi 0,02 hz pada pembebanan 100%, (a) kondisi normal, (b) kondisi eksentrisitas 0,1 mm, (c) kondisi eksentrisitas 0,2 mm.....	68

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Spesifikasi Motor Induksi 3 Fasa	23
Tabel 4.1	Frekuensi resolusi	33
Tabel 4.2	Skema pengambilan data	34
Tabel 4.3	Perbandingan pembebanan pada motor induksi dalam persen.....	34
Tabel 4.4	Hasil pengukuran arus stator pada kondisi normal dan kondisi eksentrisitas	35
Tabel 4.5	Hasil pengukuran slip pada motor induksi.....	36
Tabel 4.6	Letak spektrum frekuensi eksentrisitas pada kondisi normal	37
Tabel 4.7	Letak spektrum frekuensi eksentrisitas pada kondisi eksentrisitas 0,1 mm	38
Tabel 4.8	Letak spektrum frekuensi eksentrisitas pada kondisi eksentrisitas 0,2 mm	38
Table 4.9	Perbandingan nilai amplitudo pada tiap pengujian.....	69

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR SINGKATAN DAN SIMBOL

A. SINGKATAN

FFT	: <i>Fast Fourier Transform</i>
DFT	: <i>Discrete Fourier Transform</i>
GGL	: <i>Gaya Gerak Listrik</i>
DC	: <i>Direct Current</i>
AC	: <i>Alternating Current</i>
HP	: <i>Horse power</i>
DAQ	: <i>Data acquisition system</i>
ADC	: <i>Analog to Digital Converter</i>
TDMS	: <i>Technical Data Management Streaming</i>
VI	: <i>Virtual Instruments</i>

B. SIMBOL

p	: Jumlah kutub
F	: Gaya
I	: Arus
n_s	: Kecepatan sinkron
n_r	: Kecepatan rotor
f_s	: Frekuensi sumber (50 hz)
f_r	: Frekuensi rotor
s	: Slip
π	: Nilai derajat dalam setengah ayunan
V_a	: Tegangan pada fasa A
V_b	: Tegangan pada fasa B
V_c	: Tegangan pada fasa C
V_m	: Nilai puncak dari frekuensi fundamental dari masing-masing tegangan fasa
I_a	: Arus pada fasa A
I_b	: Arus pada fasa B
I_c	: Arus pada fasa C
I_m	: Nilai puncak dari frekuensi fundamental dari masing-masing arus fasa
ω	: Frekuensi elektrik fundamental (<i>rad/s</i>)
t	: waktu (detik)
f_{HE}	: Frekuensi eksentrisitas pada frekuensi orde tinggi
f_{LE}	: Frekuensi eksentrisitas pada frekuensi sekitar fundamental
k	: Konstanta (1, 2, 3, . . .)
R	: Jumlah slot
n_d	: Orde eksentrisitas
v	: Orde dari waktu harmonisa stator yang terjadi pada motor
f_{bng}	: Frekuensi <i>bearing</i>
f_v	: Frekuensi kerusakan <i>bearing</i>
f_o	: Frekuensi kerusakan <i>outer race</i>
f_i	: Frekuensi kerusakan <i>inner race</i>

f_b	: Frekuensi kerusakan bola <i>bearing</i>
f_c	: Frekuensi kerusakan rumah <i>bearing</i>
N_B	: Jumlah bola
f_{rm}	: Frekuensi kecepatan putaran rotor
D_B	: Diameter bola
D_P	: Diameter antar bola
θ	: Sudut kontak bola (diasumsikan 0^0)
$X(k)$: Sinyal diskrit
Δf	: Frekuensi resolusi
F_s	: Frekuensi <i>sampling</i>
T_s	: Periode <i>sampling</i>
N_s	: Jumlah <i>sampling</i>
Hp	: Satuan daya setara 0,735 kilowatt
A	: Satuan arus ampere
V	: Satuan tegangan dalam volt
Rpm	: Satuan kecepatan dalam radian per menit
Hz	: Satuan frekuensi
AMB	: <i>Maximum ambient temperature in centigrade</i>
Ins	: Kelas isolasi pada motor
LR	: Panjang data yang diambil

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Motor induksi merupakan peralatan yang penting dalam industri karena sebagian besar proses kerja dalam industri menggunakan motor induksi. Oleh karena itu kondisi motor induksi harus selalu dijaga sehingga motor tetap bekerja secara optimal serta memperpanjang masa pakai motor induksi [1]. Meski demikian, seiring dengan masa pakai dari motor tersebut maka memungkinkan motor mengalami kerusakan pada komponen-komponen tertentu dan harus dihentikan operasinya. Hal ini tentunya akan menyebabkan kerugian finansial yang besar bagi industri serta dapat juga membahayakan pekerja yang ada disekitarnya, terutama pada motor kapasitas besar yang memakan waktu dan biaya yang cukup besar untuk perbaikan [2]. Maka dari itu perlu dilakukan pengawasan secara rutin sehingga perkembangan kondisi motor induksi dapat dipantau dengan baik.

Berdasarkan [2], persentase kerusakan yang sering terjadi pada motor induksi adalah 41% dikarenakan kerusakan *bearing*, 37% dikarenakan kerusakan stator, 10% dikarenakan kerusakan rotor dan 12% kerusakan lain-lainnya. Dari beberapa tipe kerusakan pada motor induksi dapat menyebabkan terjadinya eksentrisitas pada celah udara motor seperti kerusakan *bearing* yang diakibatkan pemasangan *bearing* yang tidak benar, kerusakan stator yang disebabkan oleh keovalan pada inti stator, kerusakan rotor yang biasanya disebabkan oleh ketidaksejajaran poros rotor akibat kesalahan pengkopelan pada beban [3]. Eksentrisitas celah udara mengakibatkan daya tarik magnetik jadi tidak seimbang. Eksentrisitas celah udara yang tidak terdeteksi sejak dini memungkinkan terjadinya gesekan antara rotor dan inti stator dan menjadi kerusakan yang serius pada komponen motor lainnya [4].

Dari permasalahan yang telah dijabarkan sebelumnya, maka perlu adanya suatu sistem yang dapat mendeteksi gangguan pada motor induksi sehingga kerusakan dapat terdeteksi lebih awal dan dapat meminimalkan terjadinya

kerusakan yang serius. Terdapat beberapa cara untuk mendeteksi gangguan pada motor induksi, diantaranya melalui analisa perubahan pola getaran, perubahan arus, perubahan frekuensi, perubahan kecepatan, perubahan temperatur, dan perubahan torsi [5].

Beberapa peneliti telah melakukan pendeteksian pada kerusakan motor induksi, diantaranya: Deteksi melalui spektrum sinyal kebisingan [6], metode ini digunakan melalui pengukuran sinyal kebisingan pada motor yang mengalami eksentrisitas celah udara namun pengukuran melalui kebisingan ini secara praktek dilapangan tidak akurat karena banyaknya kebisingan lain dari lingkungan sekitar. Deteksi melalui pengamatan torsi oleh [7], metode ini berhasil digunakan untuk mendeteksi retak rotor bar, kerusakan belitan, namun metode ini menjadi tidak cukup akurat ketika reaktansi magnetik bocor dan alur magnetik dari ketiga fasa menjadi tidak simetris. Deteksi melalui pengamatan fluks [8], fluks celah udara dari motor induksi mengandung banyak harmonisa. Pengamatan melalui fluks memberikan data akurat mengenai kondisi mesin, seperti perubahan pada celah udara, belitan stator, tegangan dan arus dapat terdeteksi dalam spektrum harmonisa. Fluks celah udara diukur dengan menggunakan komponen tambahan yang dipasang pada inti stator dan juga metode ini memerlukan pemutusan tegangan sumber untuk pemasangan komponen, sehingga metode ini sangat tidak praktis dan tidak ekonomis ketika motor sudah beroperasi terlebih dahulu dan juga karena celah udara yang kecil pemasangan lilitan memerlukan modifikasi desain sehingga tidak mudah untuk diimplementasikan. Deteksi melalui pola getaran, pada penelitian [9] berhasil mendeteksi eksentrisitas celah udara dengan menggunakan frekuensi getaran yang muncul. Data getaran diambil menggunakan sensor getaran yang dipasang pada badan stator, namun metode ini tidak efektif dalam segi ekonomis karena sensor getaran khususnya akselerometer harganya mahal. Pada [5,6,11] menggunakan metoda analisa pada arus stator atau biasa dikenal dengan metode *Motor Current Spectrum Analysis* (MCSA), metode analisa arus stator untuk mendeteksi gangguan pada motor dilakukan dengan mengamati karakteristik frekuensi pada arus stator. Motor yang mengalami gangguan memiliki karakteristik frekuensi tertentu yang membedakan dengan karakteristik motor normal. Metode ini paling banyak digunakan oleh beberapa

peneliti, hal ini dikarenakan metode ini tidak memerlukan peralatan tambahan pada komponen motor sehingga tidak memerlukan biaya yang mahal dan mudah juga diimplementasikan. Metode ini juga dilakukan pada penelitian kami dalam pendeteksian eksentrisitas celah udara pada motor induksi.

Berdasarkan [10], metode analisa arus stator memerlukan pengamatan frekuensi arus stator pada saat motor beroperasi dalam keadaan normal, karakteristik frekuensi arus stator yang didapat dijadikan referensi penentu kondisi gangguan motor. Karakteristik frekuensi arus stator dipengaruhi oleh pemberian nilai frekuensi resolusi. Hal ini tentu menjadi keterbatasan kemampuan pada sistem pendeteksi, dimana sistem tidak dapat bekerja pada motor yang belum diketahui karakteristik frekuensi pada saat keadaan normal. Penelitian ini dilakukan percobaan deteksi gangguan pada motor induksi melalui analisa arus stator dengan memfokuskan pada penggunaan frekuensi resolusi. Penentuan frekuensi resolusi yang tepat untuk diterapkan pada analisa deteksi eksentrisitas bertujuan untuk membuat sistem deteksi dapat mengidentifikasi eksentrisitas celah udara tanpa lagi memerlukan referensi spektrum frekuensi pada motor normal.

1.2 Rumusan Masalah

Bagaimana eksentrisitas celah udara pada motor dapat dideteksi dengan menggunakan analisa arus stator dan bagaimana pengaruh resolusi frekuensi terhadap analisa deteksi eksentrisitas celah udara.

1.3 Tujuan Penelitian

Mendeteksi eksentrisitas celah udara dengan menggunakan analisa pada arus stator dan mencari nilai resolusi frekuensi yang tepat untuk diterapkan pada sistem deteksi eksentrisitas.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah percobaan dilakukan pada motor induksi tiga fasa, kasus yang diteliti adalah eksentrisitas celah udara, toleransi tegangan tidak seimbang kurang dari -5% dan +10% dari tegangan sumber, eksentrisitas celah udara yang digunakan adalah tipe statis, metoda analisa menggunakan algoritma FFT.

1.5 Kontribusi

Dengan adanya sistem deteksi kerusakan pada motor ini khususnya pada kasus eksentrisitas celah udara maka gangguan eksentrisitas celah udara pada motor induksi dapat dideteksi lebih dini sehingga motor terhindari dari kerusakan serius pada komponen lainnya.

1.6 Metodologi Penelitian

Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur

Melakukan pengumpulan literatur yang dibutuhkan untuk pengerjaan dan penelitian penelitian yang terkait dengan sistem deteksi eksentrisitas celah udara. Literatur yang digunakan meliputi jurnal, *proceeding*, dan *text book*.

2. Perancangan Sistem

Perancangan sistem melibatkan beberapa eksperimen seperti melakukan rekonstruksi celah udara dengan tingkat kecacatan, perencanaan pembebanan yang akan digunakan, perancangan sistem pengukuran, dan pengolahan sinyal arus stator.

3. Pengujian Sistem

Segala parameter yang sudah dibuat saat perancangan sistem akan diuji sehingga diperoleh data-data sinyal arus stator pada berbagai tingkat kecacatan dan variasi pembebanan yang akan diolah dan dilakukan analisa data untuk menentukan kondisi motor induksi.

4. Analisis Data

Analisa data dilakukan untuk mengidentifikasi hasil pengujian yang telah dilakukan. Analisa sinyal arus stator dilakukan dengan panjang data yang telah ditentukan untuk tingkatan frekuensi resolusi, eksentrisitas celah udara yang berbeda dan kondisi pembebanan yang juga bervariasi akan dianalisis.

5. Penulisan Laporan Penelitian

Sebagai hasil akhir dari penelitian ini, dilakukan penulisan laporan sebagai hasil dari penelitian ini.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 2

KAJIAN PUSTAKA

2.1 Motor Induksi

Motor induksi adalah motor yang arus medannya berasal dari induksi elektromagnetik, yang mana induksi elektromagnetik tersebut dihasilkan oleh sumber 3 fasa yang dihubungkan pada kumparan stator, sehingga tidak memerlukan sumber DC untuk bisa menjalankan motor. Motor ini bekerja pada kecepatan konstan dari nol sampai beban penuh. Kecepatannya sangat tergantung pada frekuensi sehingga motor ini mudah untuk dikemudikan secara elektrik [1].

2.1.1 Kontruksi motor induksi

Terdapat dua komponen utama dalam motor induksi yaitu bagian yang didalam yang disebut rotor dan bagian luar yang disebut stator seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.1. Antara rotor dan stator dipisahkan oleh celah udara yang dibuat seminimum mungkin untuk mengoptimalkan kerja dari motor induksi, besarnya celah udara bergantung pada daya keluaran motor [2].

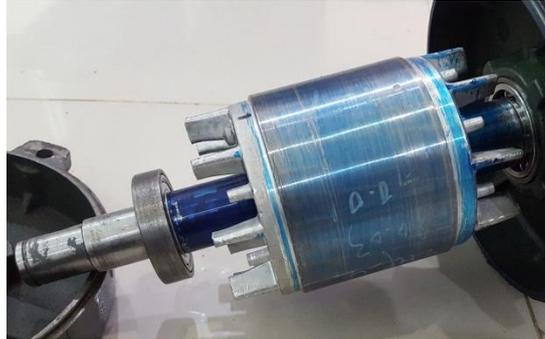
Stator merupakan bagian yang diam dan mempunyai kumparan yang dapat menginduksikan medan elektromagnetik kepada kumparan rotornya. Stator terbuat dari rangka baja yang berlubang dan pada inti stator dibuat berlaminasi dan juga terdapat beberapa slot yang digunakan sebagai tempat belitan. Belitan stator terdiri atas belitan belitan yang terbagi tiga secara seimbang yang terdistribusi dalam slot stator dan dihubungkan dengan sumber tegangan. Energi untuk rotor dihantarkan secara induksi oleh rotasi sinkron dari medan magnetik stator. Stator yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada gambar 2.1 (a).

Rotor adalah bagian bergerak pada motor induksi yang terbuat dari aluminium dan tembaga, rotor dibuat berlaminasi dan terdapat slot yang disusun paralel dan diisi oleh konduktor. Terdapat dua tipe rotor pada motor induksi yaitu rotor lilit (*wound rotor*) dan rotor sangkar (*square cage rotor*). Pada penelitian ini menggunakan rotor jenis rotor sangkar seperti yang ditunjukkan gambar 2.1 (b). Hampir 90% dari motor induksi banyak menggunakan rotor dengan jenis ini

karena kontruksi yang sederhana dan kuat, rotor jenis ini dibuat dari baja silikon dan terdiri dari inti yang berbentuk silinder yang sejajar dengan slot rotor dan diisi konduktor berbentuk batangan yang terbuat dari dengan tembaga atau alumunium.



(a)



(b)

Gambar 2.1. Komponen motor induksi, (a) stator, (b) rotor.

Diantara stator dan rotor terdapat celah udara yang merupakan ruangan antara stator dan rotor. Pada celah udara ini lewat fluks induksi stator yang memotong kumparan rotor sehingga meyebabkan rotor berputar. Celah udara yang terdapat antara stator dan rotor diatur sedemikian rupa sehingga didapatkan hasil kerja motor yang optimum. Bila celah udara antara stator dan rotor terlalu besar akan mengakibatkan efisiensi motor induksi rendah, sebaliknya bila jarak antara celah terlalu kecil atau sempit akan menimbulkan kesukaran mekanis pada mesin.

2.1.2 Prinsip kerja motor induksi

Prinsip kerja motor induksi berdasarkan induksi medan magnet stator ke rotornya. Ketika Tegangan AC tiga fasa yang diberikan ke stator menghasilkan medan putar (*rotating magnetic field*) pada stator. Medan putar tersebut memotong konduktor pada rotor sehingga menghasilkan induksi GGL (gaya gerak listrik) pada rotor (berdasarkan hukum *Faraday*). Karena kumparan rotor merupakan rangkaian tertutup maka ggl akan menghasilkan arus. Adanya arus di dalam medan magnet menimbulkan gaya pada rotor sehingga rotor berputar.

Perbedaan putaran relatif antara stator dan rotor disebut slip. Bertambahnya beban akan memperbesar torsi motor, sehingga slip antara medan putar stator dan putaran rotor pun akan bertambah besar. Jadi, bila beban motor bertambah, putaran rotor cenderung menurun. Secara matematis medan putar stator, kecepatan putaran rotor, dan slip dapat dilihat pada persamaan (2.1) sampai (2.3).

Kecepatan dari medan putar disebut kecepatan sinkron. Untuk motor induksi dengan p kutub, kecepatan sinkron dalam rpm adalah:

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{p} \quad (2.1)$$

dimana f_s adalah frekuensi stator dalam hz, n adalah kecepatan sinkron. Karena rotor berputar pada kecepatan asinkron yang biasanya lebih lambat dari kecepatan sinkron.

$$n_r = n_s - \frac{120 \cdot f}{p} \quad (2.2)$$

Perbedaan kecepatan disebut dengan kecepatan slip. Kecepatan slip dapat ditulis sebagai s yaitu slip per unit:

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (2.3)$$

Kecepatan sinkron tergantung pada frekuensi dari tegangan sumber dan jumlah kutub. Kecepatan asinkron atau kecepatan rotor tidak hanya tergantung pada frekuensi dan jumlah kutub tetapi juga terpengaruh pada torsi beban motor. Semakin tinggi torsi beban maka slip menjadi lebih tinggi dan kecepatan rotor menjadi lebih lambat.

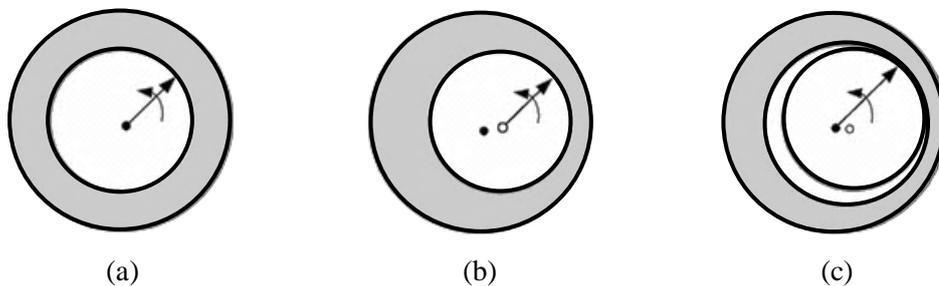
Frekuensi rotor tidak persis sama seperti frekuensi stator. Jika rotor motor terkunci sehingga tidak dapat bergerak $n_r = 0$ rpm, maka rotor akan mempunyai frekuensi yang sama seperti stator $f_r = f_s$, dimana pada kondisi ini slip $s = 1$. Akan tetapi, jika rotor berputar pada kecepatan (mendekati) sinkron $n_s \approx n_r$ maka frekuensi rotor akan menjadi (mendekati) nol $f_r \approx 0$, dimana pada kondisi ini slip $s = 0$. Persamaan frekuensi rotor pada motor induksi 3 fasa sebagai berikut :

$$f_r = \left(\frac{n_s - n_r}{n_s} \right) \cdot f_s \quad (2.4)$$

$$f_r = (n_s - n_r) \cdot \frac{P}{120 \cdot f_s} \cdot f_s \quad (2.5)$$

2.2 Eksentrisitas Celah Udara

Eksentrisitas celah udara merupakan kondisi lebar celah udara pada motor induksi tidak memiliki lebar yang sama. Terdapat dua tipe eksentrisitas celah udara pada motor yaitu statis dan dinamis. Pada eksentrisitas celah udara statis posisi dari panjang radial minimum dari celah udara tetap pada jarak tertentu. Jika terus dibiarkan eksentrisitas statis dapat menyebabkan eksentrisitas dinamis di mana pusat rotor tidak di pusat rotasi, dan posisi minimum celah udara berputar dengan rotor.



Gambar 2.2. (a) Motor normal, (b) Eksentrisitas statis, (c) Eksentrisitas dinamis

Eksentrisitas statis dapat disebabkan oleh keovalan dari inti stator atau posisi yang tidak benar dari rotor dan stator saat komisioning. Dengan asumsi bahwa rotor sangat padat sehingga level eksentrisitas statik tidak berubah. Eksentrisitas dinamik dapat diakibatkan beberapa faktor. Misalnya toleransi pabrik, pemasangan bantalan, ketidak selarasan poros, resonansi mekanik pada kecepatan kritis dan komponen yang tidak baik saat produksi. Eksentrisitas celah udara menginduksi stator harmonisa arus pada spesifik frekuensi tinggi dan rendah [15]. Frekuensi harmonisa akibat eksentrisitas dapat dihitung menurut persamaan:

$$f_{HE} = \frac{1-s}{p} \cdot (kR \pm n_d \cdot v) fs \quad (2.6)$$

Dimana k adalah angka integer, fs adalah frekuensi suplai dan R adalah jumlah slot rotor, $n_d = 0$ dalam kasus eksentrisitas statik dan $n_d = 1,2,3\dots$ pada eksentrisitas dinamik (n_d adalah orde eksentrisitas), s adalah slip, p adalah jumlah pasang kutub, dan v adalah orde dari waktu harmonisa stator yang terjadi pada motor dengan pengaturan tegangan supply ($v = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \pm 5, \dots$) [15].

Meskipun demikian hanya kombinasi jumlah pasang kutub dan jumlah slot rotor yang akan memberi kenaikan pada komponen eksentrisitas statis atau dinamik [5]. Hubungannya untuk mesin tiga fasa adalah:

$$R=2p [3 (k \pm q) \pm r] \pm k \quad (2.7)$$

Dimana, $(k \pm q)=1,2,3$ dan $r = 0, k=1$

Selanjutnya, jika kedua eksentrisitas statis dan dinamis terjadi bersamaan, terjadi di sebagian besar kegagalan celah udara, maka akan timbul komponen frekuensi rendah didekat frekuensi dasar, yang dapat dinyatakan dengan:

$$f_r = \left(\frac{1-s}{p}\right) \cdot fs \quad (2.8)$$

$$f_{LE} = | fs \pm k \cdot f_r | \quad (2.9)$$

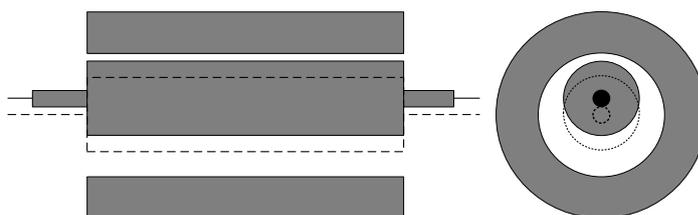
Frekuensi yang rendah ini juga akan menaikkan komponen frekuensi tinggi. Meski demikian komponen tersebut hanya kuat pada mesin yang jumlah pasang kutub dan jumlah slot rotor sesuai persamaan 2.7, dimana $k = 1$, sedang untuk mesin dengan $k = 2$ komponen frekuensi ini agak lemah. Perubahan torsi beban dapat menghasilkan harmonisa arus yang mirip dengan perhitungan diatas, sehingga diasumsikan beban adalah konstan. Ditemukan bahwa magnitud dari komponen frekuensi karena perubahan beban selalu lebih besar dari harmonisa eksentrisitas.

2.2.1 Eksentrisitas akibat kecacatan stator

Eksentrisitas merupakan kondisi terjadinya ketidaksimetrisan antara rotor dan stator. Salah satu permasalahan penyebab terjadinya eksentrisitas celah udara yang sering dijumpai adalah akibat keovalan stator, biasanya kesalahan manufaktur. Beberapa pabrikan motor menentukan level eksentrisitas celah udara yang diijinkan adalah 5 %, dan dalam kasus lain maksimum 10 % dari lebar celah udara. Meskipun demikian pabrikan biasanya menjaga tingkat gangguan eksentrisitas celah udara serendah-rendahnya untuk mengurangi getaran dan kebisingan dan meminimalkan ketidak seimbangan kekuatan tarik menarik

magnetik dalam inti stator. Karena pada motor induksi celah udara sangat kecil maka motor induksi sangat sensitif terhadap perubahan lebar celah udara [15].

Berdasarkan dari terjadinya eksentrisitas celah udara yang mengakibatkan tidak seimbang daya tarik magnetik antara rotor dan stator maka eksentrisitas celah udara statis dibedakan menjadi dua yaitu eksentrisitas celah udara berupa gerakan putar silinder pada rotor (*Cylindrical whirling motion*) dan eksentrisitas celah udara yang berupa gerakan putar kerucut simetris pada rotor (*Symmetrical conical whirling motion*). Pada kasus eksentrisitas celah udara yang diakibatkan oleh inti stator yang oval akan terjadi gerakan eksentrisitas berupa gerakan putar silinder (*Cylindrical whirling motion*) yang artinya ada bagian dimana celah udara pada bagian stator yang oval memiliki daya tarik magnetik yang berbeda namun rotor tetap selaras dengan inti stator. Gambaran dari eksentrisitas statis pada celah udara yang berupa gerakan putar rotor silinder dapat dilihat pada gambar 2.3.



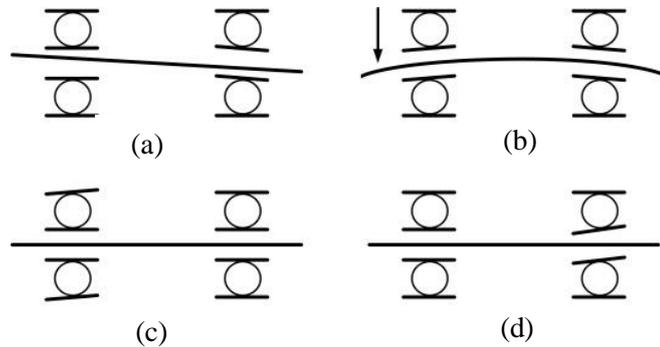
Gambar 2.3 Eksentrisitas tipe *cylindrical whirling motion*

Pada penelitian ini eksentrisitas celah udara dilakukan dengan membuat rekonstruksi yang menghasilkan eksentrisitas celah udara tipe *cylindrical whirling motion*. Eksentrisitas celah udara diasumsikan karena stator yang oval.

2.2.2 Eksentrisitas akibat kerusakan *bearing*

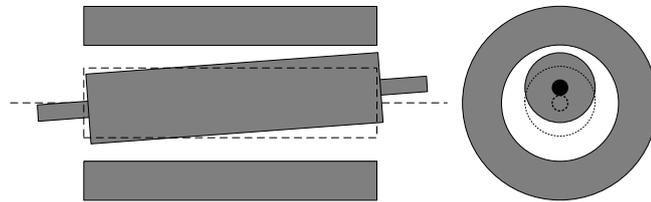
Kerusakan *bearing* adalah faktor lain penyebab terjadinya eksentrisitas celah udara yang menyebabkan rotor tidak simetri dengan inti stator sehingga timbul getaran pada rotor. Kerusakan *bearing* umumnya terjadi karena kesalahan instalasi pemasangan *bearing* pada *shaft* atau pada rumah *bearing*. Hal ini menyebabkan kerusakan fisik pada motor induksi [14]. Gambar 2.4 merupakan penyebab kerusakan *bearing* karena kesalahan instalasi dimana (a) merupakan ketidaksejajaran posisi rotor, (b) merupakan pembelokan posisi rotor, (c) merupakan kemiringan *outer race*, dan (d) merupakan kemiringan *inner race*.

Ketidaksejajaran posisi rotor yang paling sering terjadi adalah karena kemiringan *outer race* dan *inner race* [14].



Gambar 2.4 Kesalahan instalasi *bearing*

Kesalahan instalasi bearing yang mengakibatkan posisi rotor tidak selaras biasanya menjadikannya eksentrisitas celah udara statis, yang berupa gerakan putar rotor kerucut simetrik. Dimana pada kasus ini terjadi eksentrisitas celah udara namun posisi rotor dan stator juga tidak selaras. Gambaran tentang eksentrisitas yang berupa gerakan putar rotor kerucut simetrik dapat kita lihat digambar 2.5 berikut:



Gambar 2.5. Eksentrisitas celah udara tipe *Symetrical conical whirling motion*

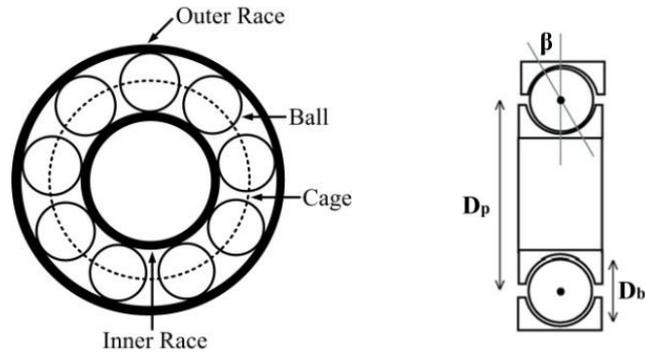
Hal ini menyebabkan kerapatan fluks pada celah udara menjadi tidak simetri dan mempengaruhi induktansi di stator sehingga arus stator motor induksi mengandung harmonisa dengan frekuensi kerusakan yang dapat diprediksi dengan persamaan (2.9)[17].

$$f_{bng} = | f_e \pm m \cdot f_v | \quad (2.9)$$

Dimana:

- f_{bng} = Frekuensi prediksi kerusakan *bearing*
- f_e = Frekuensi sumber listrik (50 atau 60 Hz)
- m = Konstanta (1, 2, 3, . . .)
- f_v = Frekuensi kerusakan *bearing*

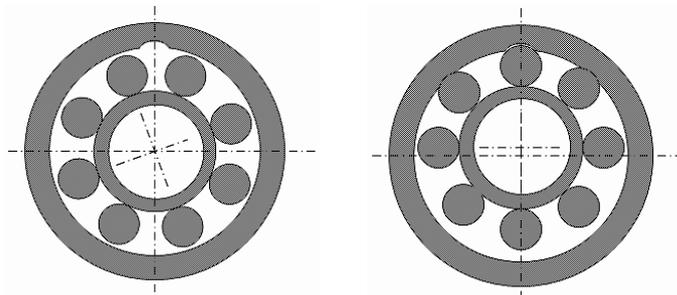
Konstruksi *bearing* dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6. Konstruksi *bearing* motor induksi

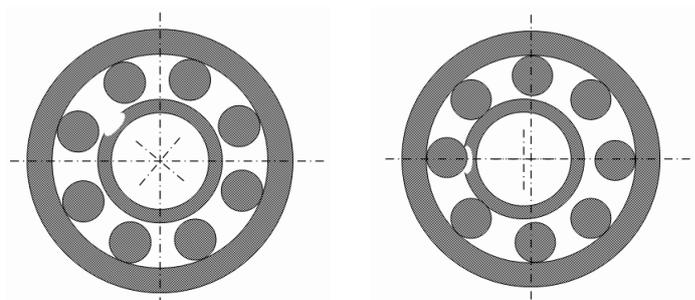
Dimana N_B adalah jumlah bola, f_{rm} adalah Frekuensi Kecepatan Putaran Rotor, D_B adalah diameter bola, D_P adalah diameter antar bola, θ adalah sudut kontak bola (Diasumsikan 0^0).

Kerusakan *outer* pada *bearing* dapat menyebabkan eksentrisitas statis, karena *outer ring* tidak berputar dengan rotor, maka kerusakan eksentrisitas statis sama dengan kerusakan *outer ring* [8]. Seperti terlihat pada gambar 2.7.



Gambar 2.7 Eksentrisitas akibat kerusakan *outer ring* [8].

Kerusakan *inner* berbeda dengan kerusakan *outer*, pada kerusakan *inner ring* rotor ikut berputar dengan *inner ring* sehingga terjadi kasus eksentrisitas dinamis. Seperti terlihat pada gambar 2.8.



Gambar 2.8 Eksentrisitas akibat kerusakan *inne ring* [8].

2.3 Hubungan Kerusakan Komponen dengan Celah Udara Motor Induksi

Kerusakan mekanik pada motor induksi menghasilkan variasi panjang celah udara yang menyebabkan perubahan medan magnet, dan akhirnya mempengaruhi arus pada stator. Langkah pertama analisis secara teori adalah menentukan pengaruh panjang celah udara g sebagai fungsi waktu dan posisi angular θ dengan referensi frame stator.

2.3.1 Pengaruh kerusakan *outer bearing* terhadap celah udara

Ketika tidak ada kontak antara bola dan daerah yang rusak, rotor adalah sangat center. Dalam hal ini panjang celah udara g memiliki nilai yang konstan g , dengan mengabaikan efek slotting rotor dan stator. Sebaliknya bila ada kontak antara bola dan daerah yang rusak setiap:

$$t = \frac{k}{f_o} \quad (2.10)$$

Nilai k integer, kontak antara bola dengan daerah yang rusak menghasilkan gerakan kecil rotor terhadap *frame* stator. Dalam hal ini panjang celah udara didekati dengan $g\theta(1-e_o\cos\theta)$, dimana e adalah tingkat relatif eksentrisitas. Pemikiran ini menghasilkan persamaan untuk panjang celah udara:

$$g_o(\theta, t) = g_o \left[1 - e_o \cos\theta \sum_{(k=-\infty)}^{(k=+\infty)} \delta \left(t = \frac{k}{f_o} \right) \right] \quad (2.11)$$

2.3.2 Pengaruh kerusakan *inner bearing* terhadap celah udara

Dalam kasus ini situasinya berbeda dengan kerusakan *outer raceway*. Kerusakan terjadi pada *inner race* posisi angular untuk minimum celah udara bergerak terhadap *frame* stator mengikuti putaran rotor pada frekuensi ω_r . Antara kedua kontak tersebut, kerusakan pindah dengan sudut:

$$\theta_i = \omega_r \cdot t = \frac{\omega_r}{f_i} \quad (2.12)$$

sehingga :

$$g_o(\theta, t) = g_o \left[1 - e_i \sum_{(k=-\infty)}^{(k=+\infty)} \cos(\theta + k \cdot \theta_i) \delta \left(t = \frac{k}{f_o} \right) \right] \quad (2.13)$$

dimana e_i adalah tingkat relatif eksentrisitas karena kerusakan *inner bearing*. Sehingga panjang celah udara menjadi :

$$g_o(\theta, t) = g_o \left[1 - e_i \cos(\theta + \omega_r t) \sum_{(k=-\infty)}^{(k=+\infty)} \delta \left(t = \frac{k}{f_i} \right) \right] \quad (2.14)$$

2.4 Air Gap Permeance

Airgap permeance Λ adalah proporsional dengan *inverse* panjang celah udara g seperti persamaan berikut:

$$\Lambda = \frac{\mu}{g} \quad (2.15)$$

Dimana μ adalah permeabilitas magnetik dari celah udara, dalam hal kerusakan *bearing* menjadi:

$$\Lambda(\theta, t) = \frac{\mu}{g} \left[1 - e_o \cos(\theta + \psi(t)) \sum_{(k=-\infty)}^{(k=+\infty)} \delta \left(t = \frac{k}{f_o} \right) \right] \quad (2.16)$$

Untuk menyederhanakan persamaan, fungsi *dirac* ditulis sebagai fungsi *Fourier Series*:

$$\sum_{k=-\infty}^{k=+\infty} \delta \left(t = \frac{k}{f_c} \right) = f_c + 2f_c \sum_{k=-\infty}^{k=+\infty} \cos(2\pi f_c t) \quad (2.17)$$

Sehingga persamaan *airgap permeance* dapat ditulis menjadi:

$$\Lambda(\theta, t) = \frac{\mu}{g} \left[1 + e f_c \cos[\theta + \psi(t)] + e \sum_{(k=-\infty)}^{(k=+\infty)} \cos[\theta + \psi(t) + k\omega_c t] \right] \quad (2.18)$$

$\psi(t)$ didefinisikan sebagai 0 (*outer bearing*), ω_c (*inner bearing*)

2.5 Kerapatan Fluks Celah Udara

Kerapatan fluks pada celah udara adalah perkalian antara MMF dengan gelombang *permeance*. MMF F_r didapat dengan kombinasi dasar rotor dan stator diasumsikan sebagai:

$$F_r(\theta, t) = F \cos(p\theta - \omega_r t + \varphi) \quad (2.19)$$

perkalian antara persamaan 2.18 dengan 2.19 menghasilkan persamaan distribusi kerapatan fluks:

$$B(\theta, t) = B_o \cos(p\theta - \omega_s t + \varphi) + B_1 \sum_{(k=-\infty)}^{(k=+\infty)} \cos[(p+1)\theta \pm k\omega_s t + \varphi] \quad (2.20)$$

Pengaruh dari eksentrisitas rotor disebabkan oleh kerusakan *bearing* pada kerapatan fluks. Sebagai penambah dalam gelombang sinusoidal yang fundamental (B_o), sehingga gelombang sinus yang tertumpuk terlihat di celah udara. Gelombang tambahan ini memiliki $p \pm 1$ pasang kutub dan frekuensinya adalah:

$$f_{fc} = \frac{1}{2\pi} \left(1 \pm \frac{d\psi(t)}{dt} k\omega_c \pm \omega_s \right) \quad (2.21)$$

2.6 Hubungan Eksentrisitas Celah Udara dengan Arus Stator

Penambahan komponen kerapatan fluks sesuai persamaan 2.20 ekuivalen dengan penambahan fluks magnetik $\varphi(\theta, t)$. Dengan memperhatikan realisasi dari belitan geometri mesin tambahan fluks pada masing-masing fasa dapat didapatkan. Dengan imposisi tegangan stator perubahan fluks terhadap waktu menyebabkan penambahan arus stator sesuai persamaan tegangan:

$$V_m(t) = R_s I_m(t) + \frac{d\phi_m}{dt} \quad (2.22)$$

Frekuensi dari fluks pada masing-masing fasa adalah sama dengan frekuensi yang terdapat pada airgap sesuai persamaan 2.30. Arus stator pada masing-masing fasa diberikan oleh turunan dari fluks sehingga persamaan $I_m(t)$ adalah :

$$I_m(t) = \sum_{k=0}^{\infty} I_k \cos[\pm\psi(t) \pm k\omega_s t + \varphi_m] \quad (2.23)$$

sehingga gerakan rotor akibat kerusakan *bearing* menghasilkan tambahan frekuensi pada arus stator.

2.7 Proses Pengolah Sinyal

FFT 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. 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.

Secara matematis, FFT dari suatu sinyal diskrit $x[n]$ dengan menggunakan N titik dapat dilihat pada persamaan (2.14) dan (2.15) [20].

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] \cdot W_N^{nk} \quad (2.14)$$

$$W_N = e^{-j\frac{2\pi}{N}} \quad , \quad (2.15)$$

Dimana k adalah $0, 1, 2, 3, \dots, N-1$

Secara numeris beban komputasi DFT cukup berat karena memerlukan sejumlah N^2 perkalian kompleks. Sedangkan FFT memiliki beban komputasi yang lebih ringan dengan hanya memerlukan sejumlah $\frac{N}{2} \log_2 10 N$ perkalian kompleks. FFT dengan beban komputasi tersebut adalah untuk FFT jenis radix-2 [20].

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 (2.18)[20].

$$\Delta f = \frac{F_s}{N} = \frac{1}{N \cdot T_s} \quad (2.16)$$

Dimana:

Δf = Frekuensi Resolusi

F_s = Frekuensi *Sampling*

T_s = Periode *Sampling*

N = Jumlah Sampel

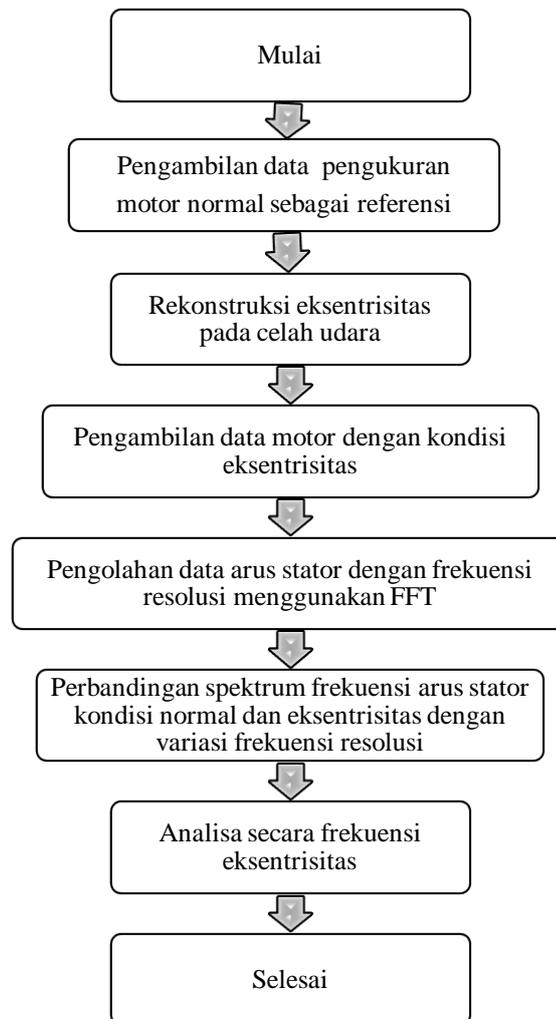
Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

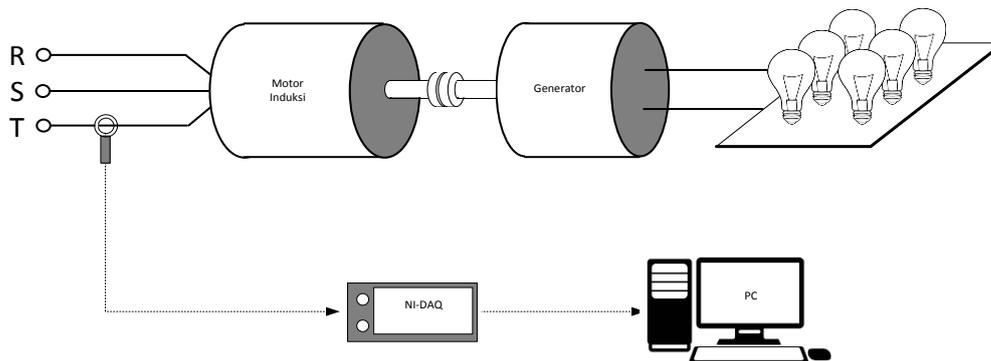
Pada penelitian ini akan dilakukan eksperimen untuk mendeteksi terjadinya eksentrisitas celah udara pada motor induksi melalui analisa frekuensi tinggi pada arus stator. Adapaun beberapa peralatan yang dibutuhkan dalam penelitian ini seperti sumber tegangan AC, motor induksi 3 fasa, perangkat pembebanan, dan peralatan akuisisi data yang secara langsung terhubung ke komputer. Berikut merupakan diagram alir pada ekseperimen ini :



Gambar 3.1 Diagram alir percobaan

Pada eksperimen ini sumber tegangan AC difungsikan sebagai sumber listrik arus bolak-balik untuk mengoperasikan motor induksi 3 fasa dengan kapasistas sebesar 2 HP atau setara dengan 1,5 KW. Sistem pengukuran dilakukan dengan memberikan pembebanan mekanik dan elektrik kepada motor induksi. Pembebanan dilakukan dengan cara motor dikopel dengan generator yang telah dibebani oleh lampu.

Beberapa alat penunjang pada pengukuran arus yaitu, komputer dengan perangkat lunak LabView, DIAdem, dan NI DAQ-9246 sebagai akuisisi data. Perangkat lunak Labview terintegrasi dengan NI DAQ-9246 untuk mempermudah dalam pemilihan frekuensi *sampling*. Hasil dari pengukuran akan diolah dengan metode pengolah *Fast Fourier Transform* dengan menggunakan perangkat lunak DIAdem atau MATLAB. Konfigurasi sistem pada penelitian ini seperti yang terlihat pada gambar 3.2 dibawah ini.



Gambar 3.2 Konfigurasi sistem deteksi eksentrisitas celah udara

Motor induksi 3 fasa yang digunakan dalam penelitian ini merupakan jenis rotor sangkar merk TATUNG dengan kapasitas 2 HP atau setara dengan 1,5 kW. Konfigurasi belitan yang digunakan adalah star (Y) sehingga motor induksi 3 fasa memiliki rating tegangan sebesar 380 V dan rating arus sebesar 3,44 A. Motor induksi 3 fasa yang digunakan memiliki jumlah kutub sebanyak 4 buah sehingga memiliki kecepatan sinkron sebesar 1500 rpm dan kecepatan saat beban penuh sebesar 1380 rpm. Spesifikasi motor induksi 3 fasa yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 3.3 dan Tabel 3.1.



Gambar 3.3 Motor Induksi 3 Fasa

Tabel 3.1 Spesifikasi Motor Induksi 3 Fasa

Merk	TATUNG		
HP	2	Model	FBFC
kW	1,5	AMB	40°
Volt	220 / 380	Rating	CONT
Amp	5.94 / 3,44	Ins	F
Hz	50	F.L. Eff	78,6 %
RPM	1380	F.L. input	1,91 kW
IP	5,5	Frame	D90L

3.2 Pembebanan pada Motor

Peralatan pembebanan yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari dua alat yaitu generator sinkron dan beban lampu. Kedua peralatan ini digunakan untuk memberikan pembebanan yang bervariasi pada motor induksi 3 fasa. Sistem kerja alat ini adalah beban listrik lampu pijar (gambar 3.4) akan memberikan beban pada generator (gambar 3.5) sehingga daya output pada generator akan ikut naik. Jika daya keluaran generator semakin besar maka torsi generator akan naik. Generator yang dikopel dengan motor induksi akan membuat torsi motor ikut naik. Hal tersebut membuat motor menjadi terbebani sesuai kenaikan beban lampu yang diberikan.



Gambar 3.4 Perangkat pembebanan berupa lampu



Gambar 3.5 Generator sinkron

Beban maksimal yang diberikan pada generator sinkron dibatasi oleh kapasitas daya motor sekitar 1500 Watt, dalam hal ini beban akan diberikan dalam bentuk persen dimana beban maksimum sebesar 100% atau 1500 watt atau arus nominal pada rating motor sebesar 3,44 A yang merupakan penjumlahan dari beban generator dan beban lampu. Pada percobaan ini akan dilakukan dalam berbagai variasi beban. Kondisi awal yang diberikan pada motor adalah beban 0% atau tanpa beban, Kondisi berikutnya, motor akan dihubungkan dengan generator sinkron melalui kopling dan output generator dihubungkan dengan beban yang secara bertahap beban 25%, beban 50%, beban 75% dan beban penuh 100%.

Data motor pertama yang diambil untuk setiap kondisi kerusakan rotor adalah dalam kondisi tanpa beban. Setelah data tanpa beban didapat, motor akan diturunkan dari dudukannya untuk dipasang kopel pada rotornya, lalu motor dinaikkan kembali ke dudukannya dan disambung oleh kopel pada rotor generator, lalu pengambilan data kembali dilanjutkan untuk data beban generator yang terhubung juga dengan beban lampu.

3.3 Proses Akuisisi Data

Peralatan akuisisi data dalam penelitian adalah NI DAQ-9246 dengan sensor arus yang digunakan sebagai media yang mengubah sinyal arus stator menjadi sekumpulan data secara digital dan melakukan akuisisi data untuk keperluan analisis. Alat ini merupakan produk dari National Instruments yang dapat difungsikan sebagai osiloskop dengan frekuensi sampling hingga 1 MHz. Alat ini terintegrasi dengan perangkat lunak LabVIEW yang juga merupakan produk dari *National Instruments*. *Channel Analog to Digital Converter* (ADC) pada NI cDAQ-9246 digunakan untuk membaca sinyal arus stator. Sinyal arus stator yang dibaca oleh NI DAQ-9246 kemudian diakuisisi, sedangkan perangkat lunak LabVIEW berfungsi untuk menampilkan dan mengkonversi data sinyal arus stator yang telah diakuisisi. Tampilan peralatan akuisisi data dapat dilihat pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6 Alat akuisisi data merk NI-DAQ 9246

Pengaturan dari proses sampling pada DAQ dilakukan melalui perangkat lunak LabVIEW. Keluaran dari hasil sampling oleh DAQ melalui LabVIEW adalah berupa file TDMS (*Technical Data Management Streaming*). Untuk dapat melihat sinyal hasil sampling melalui file TDMS tersebut, dibutuhkan lagi satu perangkat lunak yakni DIAdem. Melalui perangkat lunak DIAdem, sinyal hasil proses sampling dapat diatur tampilannya. Selain itu, DIAdem juga dapat digunakan untuk mengubah file TDMS tadi ke bentuk file *.xls*. File *.xls* hasil konversi oleh DIAdem berisi data teknis melalui proses sampling dan juga data arus ketiga fasa. File *.xls* inilah yang akan digunakan sebagai input pada perangkat lunak MATLAB untuk bisa dilakukan proses analisa atau bisa juga dilakukan analisa langsung dalam perangkat lunak DIAdem.

Dari beberapa peralatan penunjang yang sudah dijelaskan sebelumnya, peralatan tersebut disusun sedemikian rupa sehingga dapat dibentuk sistem deteksi terjadinya eksentrisitas celah udara yang implementasinya dapat dilihat pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7 Implementasi sistem deteksi eksentrisitas celah udara

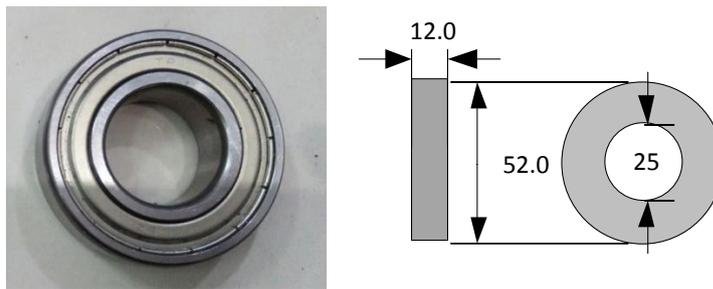
Setelah perancangan sistem deteksi kerusakan *bearing* sudah dilakukan, maka langkah-langkah untuk melakukan pengujian adalah sebagai berikut:

1. Susun peralatan penunjang seperti pada Gambar 3.7.
2. Kondisikan semua peralatan penunjang berada dalam keadaan aktif atau terhubung ke sumber.
3. Nyalakan motor induksi hingga mencapai kondisi *steady state*
4. Ukur arus stator menggunakan peralatan akuisisi data yang terintegrasi dengan perangkat lunak LabVIEW.
5. Ulangi langkah 1 sampai 4 dengan kondisi tanpa beban dan kondisi berbeban pada motor normal dalam bentuk persen secara bertahap 0%, 25%, 50%, 75% dan 100%.
6. Ulangi langkah 1 sampai 5 dengan kondisi tanpa beban dan kondisi berbeban pada motor telah mengalami eksentrisitas dalam bentuk persen secara bertahap 0%, 25%, 50%, 75% dan 100%.
7. Ulangi langkah 1 sampai 5 dengan kondisi tanpa beban dan kondisi berbeban dengan variasi frekuensi resolusi 2 hz, 1 hz, 0,5 hz, 0,1 hz dan 0,02 hz.
8. Setelah memperoleh semua data hasil pengukuran yang diperlukan, analisis masing-masing data untuk mendeteksi terjadinya eksentrisitas celah udara pada motor induksi.

Penelitian ini melibatkan beberapa kondisi beban yang berbeda sehingga dapat diperbandingkan dampak yang diberikan oleh setiap perubahan beban. Pada saat melakukan pengambilan data dilakukan dengan nilai sampling yang tinggi yaitu sebanyak 10.000 Hz/s. Nilai ini dipilih untuk mempermudah proses analisis sehingga pembacaan frekuensi lain yang muncul disekitar fundamental dapat terbaca lebih detail saat data dari domain waktu dibawa ke domain frekuensi. Nilai sampling tinggi digunakan bertujuan untuk mendapatkan pensamplingan yang lebih akurat. Penentuan frekuensi resolusi dilakukan dengan memberikan panjang data sampling. Panjang data sampling dibuat variasi untuk menghasilkan frekuensi resolusi yang bervariasi pula. Dalam sekali pengujian diambil beberapa sampel data untuk memperkecil kesalahan yang terjadi karena keterbatasan kemampuan alat ukur yang digunakan.

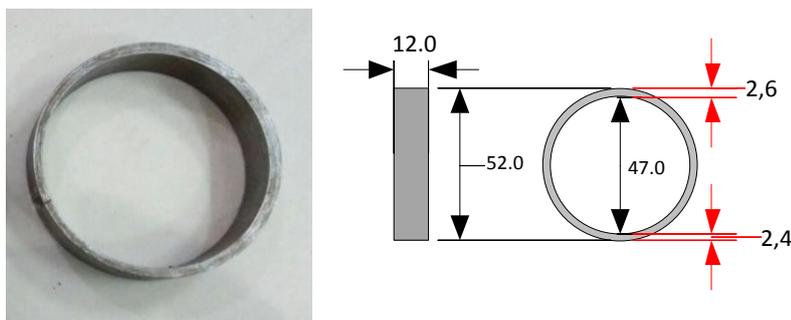
3.4 Rekontruksi Eksentrisitas Celah Udara

Simulasi terjadinya eksentrisitas dilakukan dengan mengubah ukuran *bearing* dengan ukuran yang lebih kecil. *Bearing* ukuran yang digunakan pada motor induksi dalam penelitian ini menggunakan *bearing* dengan diameter luar 52 mm dan diameter dalam 25 mm. Dimensi *bearing* normal yang tidak mengakibatkan terjadinya eksentrisitas celah udara dapat dilihat pada gambar 3.8.

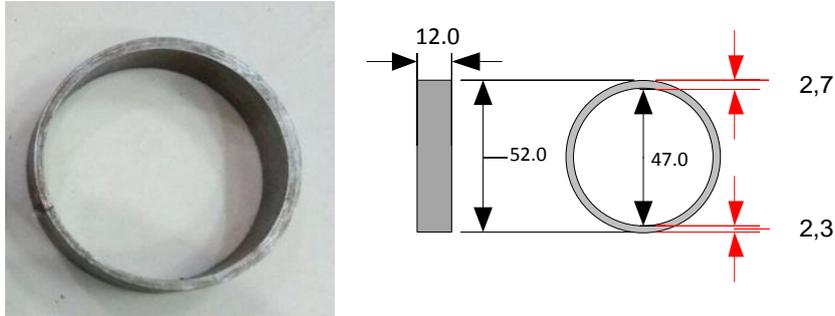


Gambar 3.8. *Bearing* normal tanpa rekontruksi *outer* 52 mm dan *inner* 25 mm

Untuk menjadikan rotor tidak selaras terhadap celah udara maka *bearing* diganti dengan ukuran yang lebih kecil yaitu dengan ukuran diameter luar 47 mm dan untuk diameter dalam tetap dengan ukuran 25 mm. selanjutnya agar *bearing* yang lebih presisi dipasang pada rumah *bearing* yang semula dan juga untuk membuat menjadi tidak selaras maka dibuat ring *bearing* dengan diameter luar 52 mm dan diameter dalam 47 mm yang nantinya ring ini digunakan untuk melapisi *bearing* pengganti yang lebih kecil sehingga ukurannya sama dengan ukuran *bearing* yang semula. Untuk membuat poros rotor tidak simetris atau eksentrisitas maka ketebalan ring *bearing* dibuat beda. Gambar 3.9 dan gambar 3.10 merupakan ring yang akan digunakan untuk melapisi *bearing* dengan ketebalan yang berbeda.



Gambar 3.9. Ring dengan ketebalan berbeda 0.1 mm



Gambar 3.10. Ring dengan ketebalan berbeda 0.2 mm

Rekontruksi poros rotor agar bergeser 0.1 mm maka ring dibuat dengan tebal bagian atas sebesar 2,6 mm dan bagian bawah sebesar 2,4 mm. Ring ini digunakan pada bagian depan dan bagian belakang rumah stator secara sejajar. Poros rotor bergeser kebawah sebanyak 0,1 mm dan menjadikan lebar celah udara bagian atas bertambah menjadi 0,3 mm dan bagian bawah berkurang yang semula 0,2 mm menjadi 0,1 mm. Pada gambar 3.10 sama halnya dengan gambar 3.9 namun pada gambar 3.10 ring dibuat dengan ketebalan atas 2,7 mm dan bagian bawah 2,3 mm sehingga poros bergeser 0,2 mm yang juga membuat lebar celah udara menjadi tidak seimbang.

Eksperimen eksentrisitas celah udara dilakukan dengan menggunakan dua variasi percobaan yaitu dengan keadaan poros bergeser 0.1 mm dan 0.2 mm. Hal ini dilakukan berdasarkan hasil pengukuran lebar celah udara pada motor normal 2 HP yang digunakan dalam penelitian ini dimana motor induksi ini hanya memiliki lebar celah udara sebesar 0,25 mm setiap sisinya. Gambar 3.11 menunjukkan perbandingan ukuran *bearing* normal dan *bearing* yang lebih kecil dengan ring dengan ketebalan berbeda yang akan digunakan dalam penelitian ini.

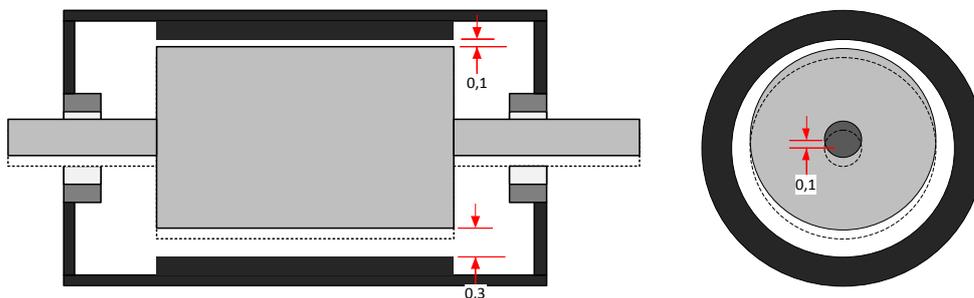


(a)

(b)

Gambar 3.11 a) Perbandingan ukuran *bearing* normal dengan *bearing* pengganti,
b) *Bearing* pengganti dengan ring eksentrik

Pada penelitian ini akan menggunakan eksentrisitas celah udara statis tipe *cylyndrical whirling motion*. Pada eksentrisitas jenis ini motor mengalami ketidak seimbang celah udara namun rotor dan stator tetap selaras. Oleh karena itu maka pemasangan ring *bearing* yang berbeda ketebalan akan dipasang selaras juga. Skema dari hasil pemasangan ring *bearing* yang selaras dapat terlihat pada gambar 3.12 berikut.



Gambar 3.12 Skema eksentrisitas celah udara

3.5 Perancangan Sistem Pengukuran dan Pengolahan Data

Sistem pengukuran sinyal arus stator dilakukan melalui perangkat lunak LabVIEW dimana perangkat lunak ini digunakan sebagai program utama untuk menampilkan dan memberikan perintah akuisisi data sinyal arus stator pada salah satu fasa motor induksi 3 fasa. Perangkat lunak LabVIEW dikenal dengan sebutan VI atau *Virtual Instruments* karena tampilan dan sistem operasinya dapat meniru sebuah peralatan instrumentasi.

Ada dua komponen penting dalam perangkat lunak LabVIEW, yaitu *front panel* dan *block diagram*. *Front panel* adalah bagian *window* yang merupakan tampilan utama dari perangkat lunak LabVIEW. *Front panel* digunakan untuk membangun sebuah VI, menjalankan program dan *mendebug* program. Diagram blok adalah bagian *window* yang berisi *source code* yang menggunakan fungsi representasi grafis untuk mengontrol objek dari *front panel*.

Sedangkan pengolahan sinyal arus stator dilakukan melalui perangkat lunak DIAdem. DIAdem digunakan untuk menampilkan sinyal hasil pengambilan data arus dari LabVIEW yang umumnya berformat .TDMS, pada DIAdem juga

dapat melakukan analisa data arus baik berupa pemotongan ataupun pengolahan sinyal dengan metode-metode tertentu yang telah tersedia didalamnya. Pada penelitian ini DIAdem akan digunakan untuk melakukan olah sinyal arus dari semulanya berupa hasil dari domain waktu akan diubah menjadi domain frekuensi yang nantinya pada penelitian ini akan dilakukan pengamatan pada perubahan bentuk frekuensi apabila motor mengalami ketidak seimbang celah udara. Analisa data arus yang digunakan berupa algoritma *Fast Fourier Transform* (FFT) yang mengubah sinyal arus stator dari domain waktu ke domain frekuensi. Tujuan digunakannya algoritma FFT adalah untuk melakukan deteksi terjadinya ketidak selarasan celah udara melalui spektrum arus stator. Algoritma FFT yang digunakan merupakan jenis radix-2 yang menampilkan bentuk transformasi dalam 2 dimensi.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 4

HASIL PENGUJIAN DAN ANALISA DATA

Pada bab ini menjelaskan terkait hasil pengujian sistem yang telah dilakukan untuk selanjutnya dipaparkan analisis mengenai eksentrisitas celah udara melalui frekuensi resolusi pada arus stator. Pengujian dilakukan dengan membandingkan hasil analisa spektrum frekuensi pada motor normal dengan motor kondisi eksentrisitas celah udara. Kondisi eksentrisitas celah udara dibuat dengan dua tingkat kerusakan, yaitu eksentrisitas 0,1 mm dan eksentrisitas 0,2 mm. Hal ini dimaksudkan untuk mengetahui pengaruh tingkat eksentrisitas terhadap perubahan spektrum frekuensi. Untuk mendapatkan spektrum frekuensi yang bervariasi maka analisa dilakukan dengan menggunakan 5 frekuensi resolusi yang berbeda, yang ditunjukkan pada tabel 4.1. Untuk meningkatkan keakuratan proses analisa, ini juga dilakukan pada kondisi berbeban untuk mengetahui efek pembebanan terhadap hasil analisa deteksi eksentrisitas celah udara melalui frekuensi resolusi arus stator. Kondisi pembebanan dibuat menjadi 5 pembebanan yang berbeda yang dinyatakan dalam persen. Proses pengambilan data untuk analisa deteksi eksentrisitas celah udara dapat dilihat pada tabel 4.2.

Tabel 4.1 Frekuensi resolusi

	Kasus I	Kasus II	Kasus III	Kasus IV	Kasus V
Frekuensi sampel (F_s)	10 kS/s	10 kS/s	10 kS/s	10 kS/s	10 kS/s
Banyak data (N)	5 kS	10 kS/s	20 kS	100 kS	500 kS
Waktu pensamplingan ($T=N/F_s$)	0,5 sec	1 sec	2 sec	10 sec	50 sec
Frekuensi resolusi ($\Delta f=1/T$)	2 Hz	1 Hz	0.5 Hz	0,1 Hz	0,02 Hz

Tabel 4.2 Skema pengambilan data

Beban	Frekuensi resolusi	Kondisi motor	Keterangan
0 %	2 hz	Normal Eksentrisitas 0,1 mm Eksentrisitas 0,2 mm	Pengambilan data dilakukan sebanyak 10 kali (untuk meminimalkan error keterbatasan alat ukur)
25 %	1 hz		
50 %	0,1 hz		
75 %	0,5 hz		
100 %	0,02 hz		

4.1 Perhitungan Persentase Pembebanan

Pembebanan yang digunakan merupakan pembebanan mekanik berupa generator dan untuk membuat beban bervariasi maka generator diberi pembebanan listrik berupa lampu. Untuk membuat pembebanan bertingkat menjadi bentuk persentase maka pertama yang dilakukan adalah mengukur daya tanpa beban atau pengukur arus stator dilakukan pada saat motor beroperasi tanpa terkopel dengan generator. Selanjutnya motor dikopel dengan generator dan generator dihubungkan pada beban lampu untuk variasi beban. Penambahan beban lampu dilakukan hingga motor mendapatkan beban penuh dengan acuan arus maksimum rating pada *nameplate* motor yaitu sebesar 3,44 Ampere yang nantinya menjadi acuan nilai untuk beban penuh pada motor. Daya lampu yang digunakan bervariasi antara 50-100 Watt. Pengukuran untuk pembebanan dilakukan dengan menggunakan peralatan penunjang berupa *power quality*. Tabel 4.3 merupakan hasil pengukuran persentase pembebanan yang akan digunakan pada penelitian ini:

Tabel 4.3. Perbandingan pembebanan pada motor induksi dalam persen

Beban motor (%)	Konfigurasi Pembebanan	Arus Stator (A)	Daya input (Watt)
0	Motor	1,55	330
25	Motor + Generator	1,75	700
50	Mtr + Gen + 5 lampu	2,05	1070
75	Mtr + Gen + 8 lampu	2,53	1440
100	Mtr + Gen + 11 lampu	3,45	1810

4.2 Analisa Arus Stator Pada Motor Normal dan Eksentrisitas

Analisa arus stator ini dilakukan untuk melihat perubahan nilai arus akibat terjadinya eksentrisitas celah udara. Analisa arus dilakukan pada keadaan motor normal dan pada keadaan motor mengalami eksentrisitas. Kasus eksentrisitas celah udara yang diamati adalah dalam dua variasi eksentrisitas yaitu eksentrisitas dengan penggeseran poros rotor 0,1 mm dan eksentrisitas dengan pergeseran poros rotor 0,2 mm dari inti poros. Pengukuran juga dilakukan pada kondisi beban yang bervariasi. Hasil dari pengukuran dari arus pada saat motor normal dan motor mengalami eksentrisitas celah udara ditunjukkan pada tabel 4.4.

Tabel 4.4 Hasil pengukuran arus stator pada kondisi normal dan eksentrisitas

Beban (%)	Arus Stator (Ampere)		
	Kondisi Normal	Eksentrisitas 0,1 mm	Eksentrisitas 0,2 mm
0	1,55	1,60	1,53
25	1,75	1,72	1,78
50	2,05	2,13	2,15
75	2,53	2,49	2,42
100	3,45	3,40	3,38

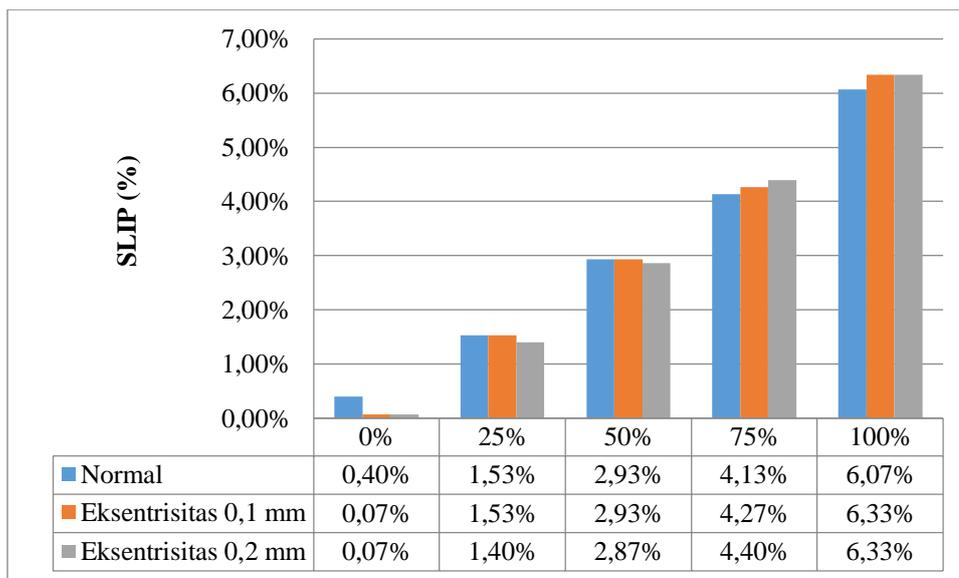
Hasil pengukuran pada tabel 4.4 menunjukkan pada kondisi normal dan kondisi eksentrisitas celah udara, terdapat perubahan besaran nilai arus stator pada saat kondisi normal dan kondisi eksentrisitas. Namun perubahan nilai arus pada kondisi eksentrisitas tidak memiliki perbedaan yang signifikan dibanding dengan motor dalam kondisi normal. Perubahan nilai arus stator pada kondisi eksentrisitas juga bisa disebabkan oleh perubahan tegangan sumber yang tidak stabil, kasus ini tentu juga bisa berdampak pada perubahan arus pada kondisi normal. Oleh karena itu, perubahan nilai arus stator tidak bisa dijadikan referensi penentu kondisi eksentrisitas celah udara pada motor. Perubahan kenaikan arus stator lebih menunjukkan akibat dampak variasi pembebanan, semakin besar pembebanan pada motor terlihat arus yang masuk pada motor akan semakin besar.

4.3 Pengukuran Slip pada Motor Kondisi Normal dan Kondisi Eksentrisitas

Berdasarkan persamaan (2.12) untuk menentukan frekuensi eksentrisitas celah udara disekitar fundamental pada motor induksi perlu mengetahui nilai slip. Nilai slip ini digunakan untuk mencari nilai frekuensi rotor dan kemudian dijumlahkan dengan frekuensi sumber sehingga menghasilkan spektrum frekuensi gangguan. Frekuensi gangguan adalah frekuensi yang muncul disekitaran frekuensi fundamental yang memiliki pola berbeda beda setiap tipe kerusakannya. Hasil slip dari motor normal dan motor telah mengalami eksentrisitas celah udara dengan diberikan variasi beban dapat dilihat pada tabel 4.5 dan gambar 4.1.

Tabel 4.5 Hasil pengukuran slip pada motor induksi

Beban	Slip pada motor induksi		
	Normal	Eksentrisitas 0,1 mm	Eksentrisitas 0,2 mm
100%	6,07 %	6,33 %	6,33 %
75%	4,13 %	4,27 %	4,40 %
50%	2,93 %	2,93 %	2,87 %
25%	1,53 %	1,53 %	1,40 %
0%	0,40 %	0,07 %	0,07 %



Gambar 4.1 Perbandingan slip motor normal dan terjadi eksentrisitas

Dari gambar 4.1 dapat kita lihat adanya gangguan eksentrisitas celah udara mempengaruhi nilai slip, perubahan nilai slip pada motor kondisi eksentrisitas celah udara ini disebabkan adanya daya tarik medan elektromagnetik yang tidak seimbang dicelah udara motor sehingga gaya medan putar menjadi tidak beraturan. Dalam kasus deteksi eksentrisitas celah udara nilai slip digunakan untuk menentukan letak frekuensi eksentrisitas disekitar frekuensi fundamental.

4.4 Analisa Letak Frekuensi Eksentrisitas Celah Udara

Metode deteksi melalui analisa arus stator memiliki karakteristik spektrum frekuensi yang berbeda beda disetiap kerusakan motor. Dalam kasus deteksi eksentrisitas celah udara, hal yang pertama yang dilakukan adalah menentukan letak spektrum frekuensi kerusakan yang menjadi karakteristik gangguan eksentrisitas. Letak spektrum frekuensi pada gangguan eksentrisitas celah udara dapat ditentukan melalui persamaan (2.7) dan (2.9). Pada penelitian ini penentuan letak spektrum frekuensi dilakukan dengan menggunakan persamaan (2.9), dimana letak spektrum frekuensi muncul di frekuensi rendah atau disekitar frekuensi fundamental. Pada tabel 4.6, 4.7, dan 4.8 ditunjukkan analisa perhitungan letak frekuensi eksentrisitas dengan menggunakan nilai slip yang telah diukur pada tabel 4.5.

Tabel 4.6 Letak spektrum frekuensi eksentrisitas pada kondisi normal

Beban	Letak spektrum frekuensi eksentrisitas			
	f_s	f_r	$f_s - f_r$	$f_s + f_r$
100%	50,00	23,48	26,52	73,48
75%	50,00	23,97	26,03	73,97
50%	50,00	24,27	25,73	74,27
25%	50,00	24,62	25,38	74,62
0%	50,00	24,90	25,10	74,90

Tabel 4.7 Letak spektrum frekuensi eksentrisitas pada kondisi eksentrisitas 0,1 mm

Beban	Letak spektrum frekuensi eksentrisitas			
	f_s	f_r	f_s-f_r	f_s+f_r
100%	50,00	23,42	26,58	73,42
75%	50,00	24,62	25,38	74,62
50%	50,00	24,27	25,73	74,27
25%	50,00	24,62	25,38	74,62
0%	50,00	24,98	25,02	74,98

Tabel 4.8 Letak spektrum frekuensi eksentrisitas pada kondisi eksentrisitas 0,2 mm

Beban	Letak spektrum frekuensi eksentrisitas			
	f_s	f_r	f_s-f_r	f_s+f_r
100%	50,00	23,42	26,58	73,42
75%	50,00	23,90	26,10	73,90
50%	50,00	24,28	25,72	74,28
25%	50,00	24,65	25,35	74,65
0%	50,00	24,98	25,02	74,98

Dari tabel diatas, dengan menggunakan frekuensi sumber 50 Hz dan nilai slip pada tabel 4.5 maka didapat frekuensi rotor berkisar 23-25 hz, selanjutnya letak frekuensi gangguan bisa ditentukan dengan menggunakan persamaan (2.9). Hasil analisa menunjukkan untuk letak frekuensi eksentrisitas pada f_s-f_r berkisar antara 25,02 Hz – 26,58 hz, sedangkan letak frekuensi eksentrisitas pada f_s+f_r berkisar antara 73,42 Hz – 74,98 Hz. Maka dapat disimpulkan bahwa dengan menggunakan analisa perhitungan, karakteristik letak spektrum frekuensi eksentrisitas berada disektirar frekuensi 25 hz dan 75 hz.

4.5 Hasil Analisa Deteksi Frekuensi Eksentrisitas Celah Udara

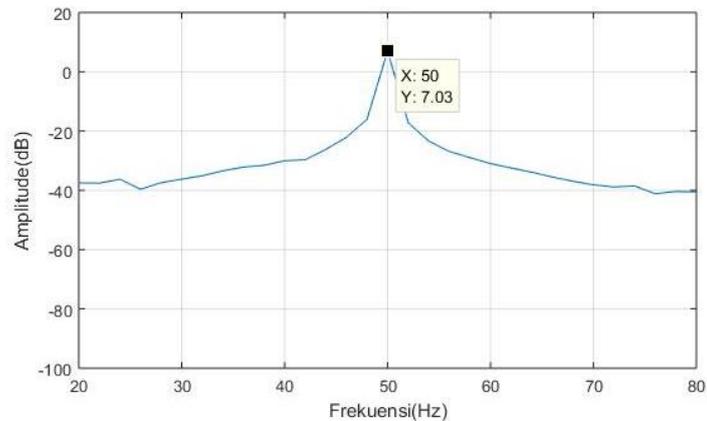
Dalam penelitian ini, deteksi frekuensi eksentrisitas dilakukan dengan menggunakan variasi frekuensi resolusi yang bertujuan untuk mencari frekuensi resolusi yang cocok untuk diimplementasikan pada sistem pendeteksi. Frekuensi resolusi dikatakan cocok jika sistem dapat mendeteksi eksentrisitas celah udara

tanpa adanya frekuensi komponen lain disekitar frekuensi fundamental. Variasi frekuensi resolusi dalam percobaan deteksi eksentrisitas ini adalah frekuensi resolusi 2 Hz/sampling, 1 Hz/sampling, 0,5 Hz/sampling, 0,1 Hz/sampling, dan frekuensi resolusi 0,02 Hz/sampling. Untuk memperlengkap proses analisa maka analisa deteksi eksentrisitas juga dilakukan dengan memberikan variasi pembebanan yaitu beban 0%, 25%, 50%, 75% dan juga 100%.

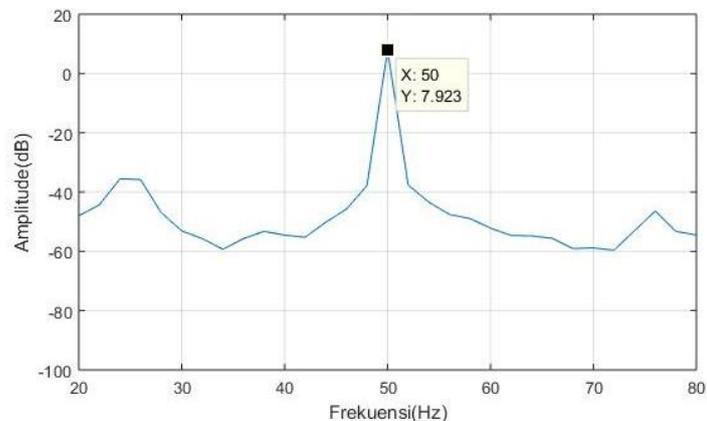
Pada pengujian deteksi eksentrisitas ini, penentuan motor induksi yang terindikasi mengalami eksentrisitas celah udara adalah dengan mengamati adanya kenaikan amplitudo pada frekuensi eksentrisitas, dimana telah dilakukan analisa frekuensi eksentrisitas muncul pada frekuensi 25 hz dan 75 hz sekitar frekuensi fundamental.

4.5.1 Analisa spektrum frekuensi eksentrisitas pada beban 0%

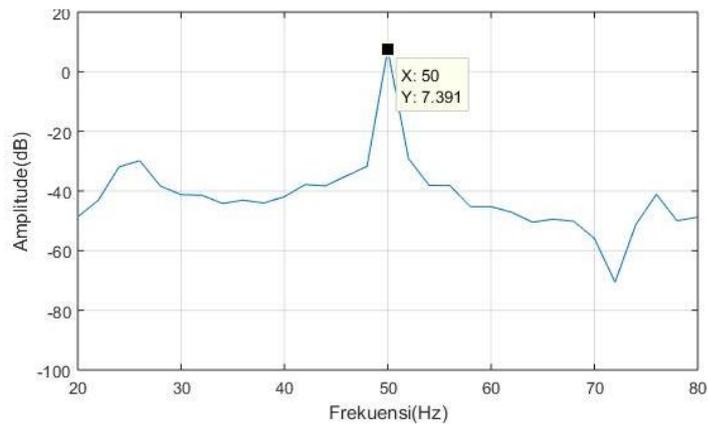
1. Pengujian analisa arus stator dengan frekuensi resolusi 2 hz/sampling



(a)



(b)

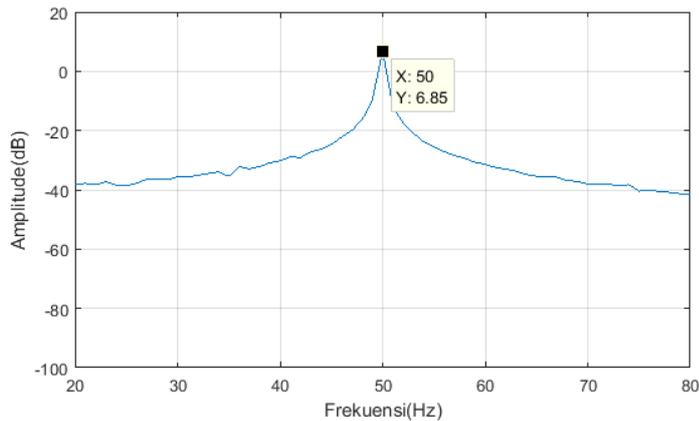


(c)

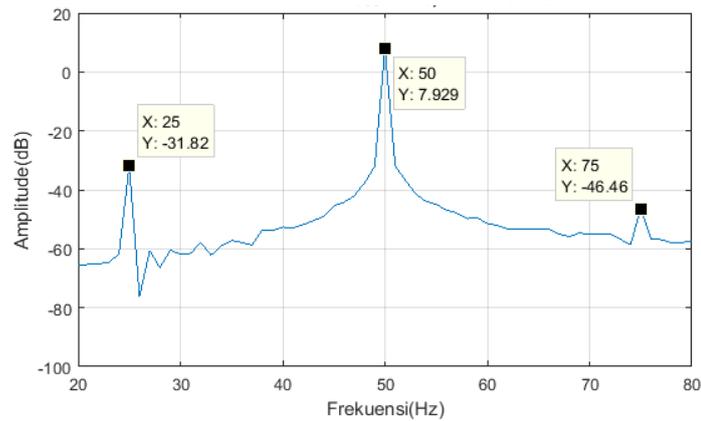
Gambar 4.2 Spektrum frekuensi pada motor dengan frekuensi resolusi 2 hz pada pembebanan 0%, (a) kondisi normal, (b) kondisi eksentrisitas 0,1 mm, (c) kondisi eksentrisitas 0,2 mm

Hasil menunjukkan terdapat perbedaan pola spektrum frekuensi pada motor kondisi normal dan kondisi eksentrisitas, pada frekuensi eksentrisitas terdapat kenaikan pola amplitudo namun tidak terlihat jelas puncak dari amplitudo pada frekuensi eksentrisitas (25 hz dan 75 hz).

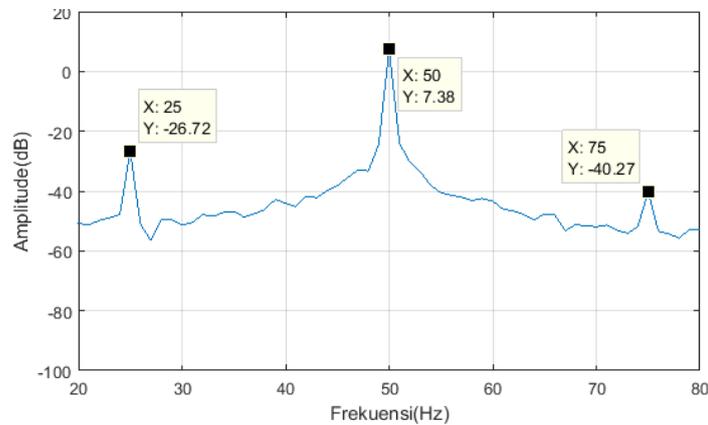
2. Pengujian analisa arus stator dengan frekuensi resolusi 1 hz/sampling



(a)



(b)

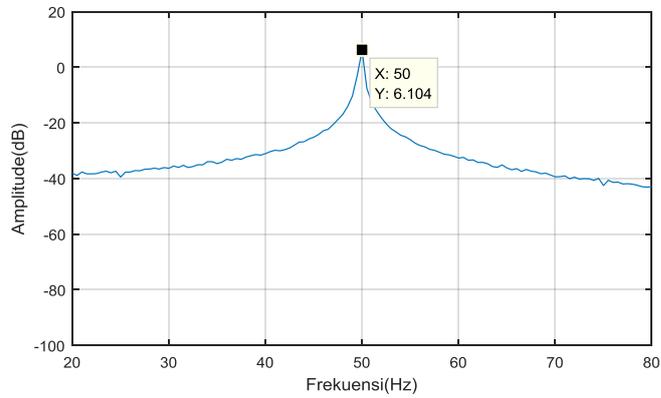


(c)

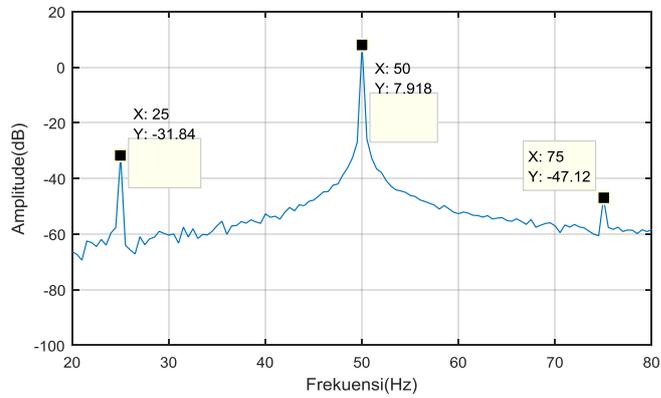
Gambar 4.3 Spektrum frekuensi pada motor dengan frekuensi resolusi 1 hz pada pembebanan 0%, (a) kondisi normal, (b) kondisi eksentrisitas 0,1 mm, (c) kondisi eksentrisitas 0,2 mm

Selanjutnya hasil pengujian dengan resolusi 1 hz menunjukkan adanya perbedaan spektrum frekuensi pada kondisi normal dan eksentrisitas. Dapat dilihat jelas pada kondisi normal, tidak terdapat kenaikan amplitudo pada spektrum fekuensi eksentrisitas, pada pola ini analisa tidak menunjukkan motor induksi terindikasi eksentrisitas celah udara. Pada kondisi eksentrisitas terdapat amplitudo yang muncul pada frekuensi eksentrisitas, terdeteksi dengan jelas puncak amplitudo di ($f_s \pm f_r$) sebesar -31,82 dB dan -46,46 dB pada kondisi eksentrisitas 0,1 mm, sedangkan pada kondisi eksentrisitas 0,2 mm terdapat kenaikan amplitudo pada frekuensi eksentrisitas menjadi -26,72 dB dan -40,27 dB.

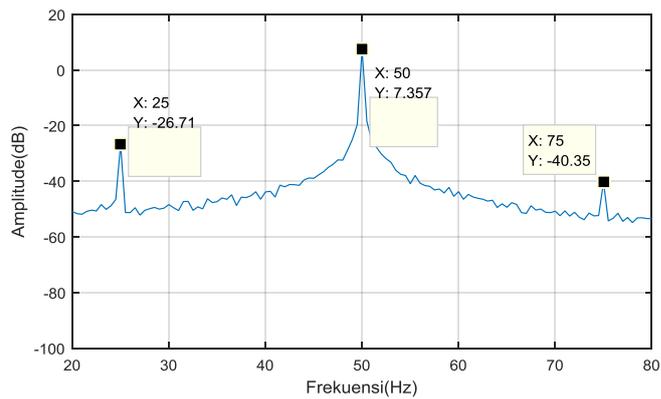
3. Pengujian analisa arus stator dengan frekuensi resolusi 0,5 hz/sampling



(a)



(b)

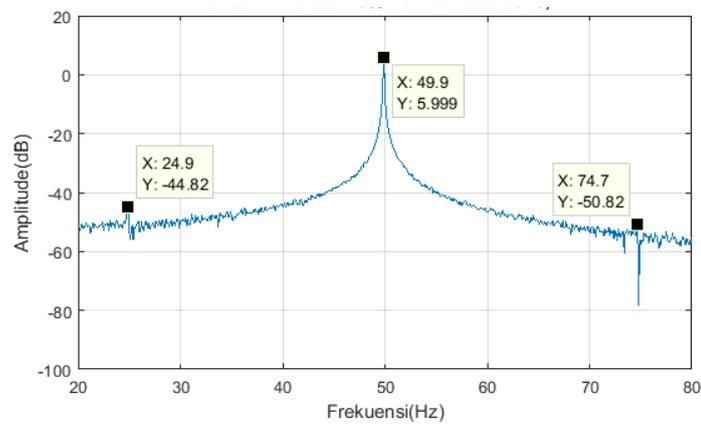


(c)

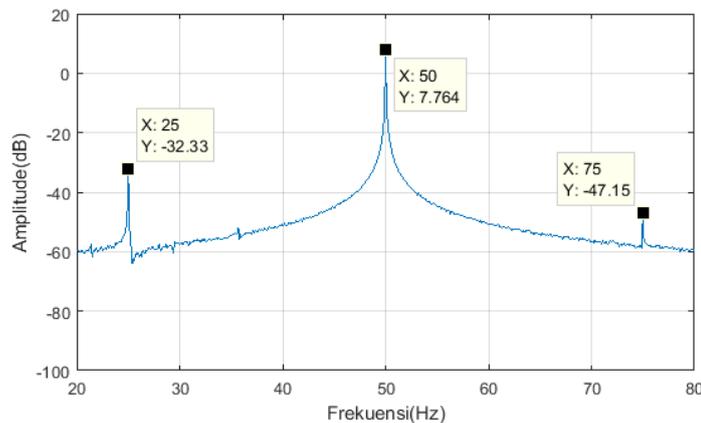
Gambar 4.4 Spektrum frekuensi pada motor dengan frekuensi resolusi 0,5 hz pada pembebanan 0%, (a) kondisi normal, (b) kondisi eksentrisitas 0,1 mm, (c) kondisi eksentrisitas 0,2 mm

Pada hasil analisa menggunakan frekuensi resolusi 0,5 hz menunjukkan sedikit perbedaan dibanding dengan penggunaan frekuensi resolusi 1 hz, frekuensi eksentrisitas berhasil dideteksi dengan jelas pada kondisi motor yang telah direkontruksi mengalami eksentrisitas celah udara. Pada kondisi eksentrisitas 0,1 mm, kenaikan amplitudo pada frekuensi eksentrisitas sebesar -31,84 dB dan -47,12 dB, sedangkan pada kondisi eksentrisitas 0,2 mm amplitudo semakin meningkat menjadi -26,71 dB dan -40,35 dB.

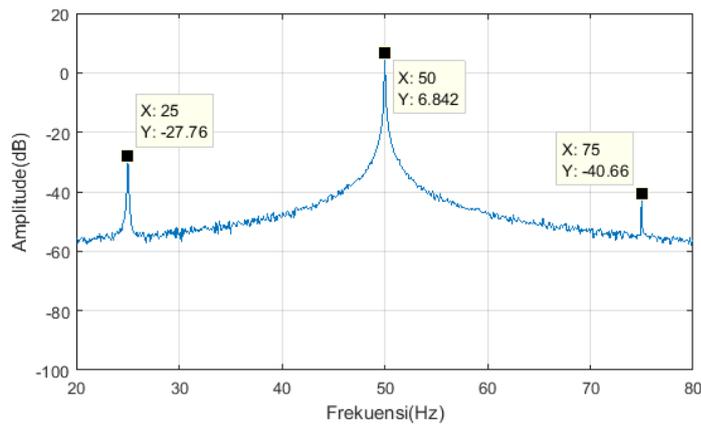
4. Pengujian analisa arus stator dengan frekuensi resolusi 0,1 hz/sampling



(a)



(b)

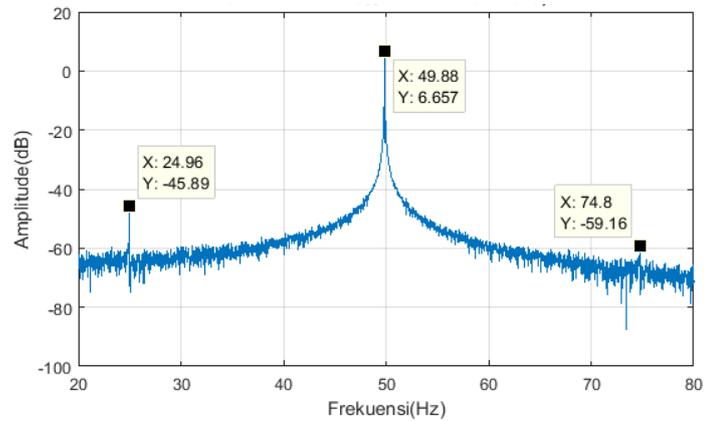


(c)

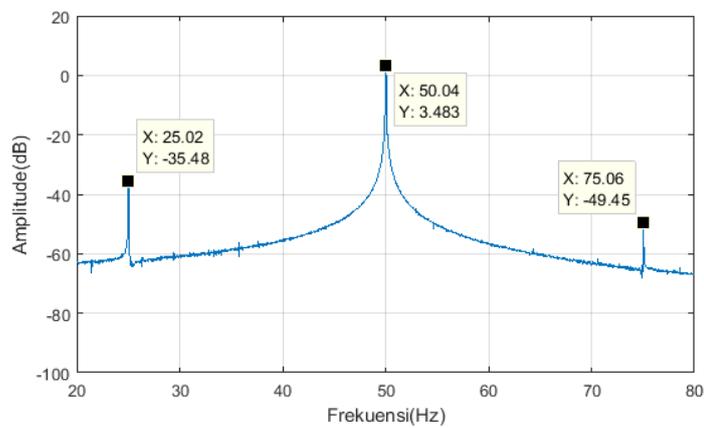
Gambar 4.5 Spektrum frekuensi pada motor dengan frekuensi resolusi 0,1 hz pada pembebanan 0%, (a) kondisi normal, (b) kondisi eksentrisitas 0,1 mm, (c) kondisi eksentrisitas 0,2 mm

Hasil analisa berikutnya menggunakan frekuensi resolusi 0,1 hz, eksentrisitas celah udara dapat terdeteksi dengan munculnya amplitudo pada frekuensi eksentrisitas. Besar amplitudo yang muncul tidak jauh berbeda dengan penggunaan frekuensi resolusi sebelumnya, pada analisa ini amplitudo muncul sebesar -32,32 dB dan -47,15 dB pada kondisi motor eksentrisitas 0,1 mm, sedangkan pada kondisi eksentrisitas 0,2 mm amplitudo terdeteksi sebesar -27,76 dB dan -40,66 dB. Namun jika diamati pada kondisi motor normal, juga tampak munculnya amplitudo pada frekuensi eksentrisitas sebesar -44,82 dB dan -50,82 dB. jika kita lihat secara perbandingan besarnya amplitudo, maka hasil analisa menunjukkan bahwa kondisi eksentrisitas tetap memiliki amplitudo yang lebih tinggi dibanding kondisi normal.

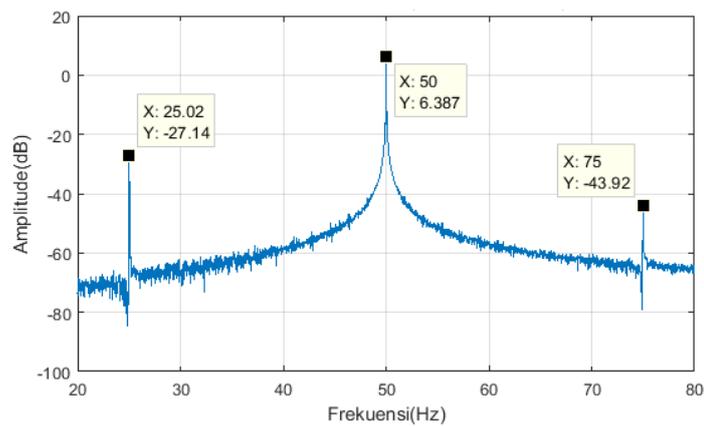
5. Pengujian analisa arus stator dengan frekuensi resolusi 0,02 hz/sampling



(a)



(b)



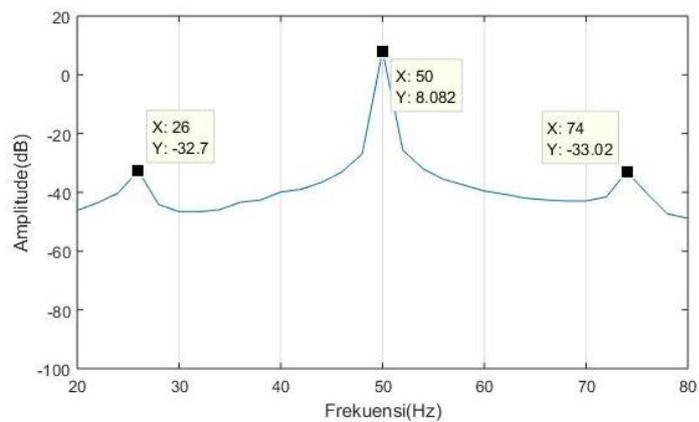
(c)

Gambar 4.6 Spektrum frekuensi pada motor dengan frekuensi resolusi 0,02 hz pada pembebanan 0%, (a) kondisi normal, (b) kondisi eksentrisitas 0,1 mm, (c) kondisi eksentrisitas 0,2 mm

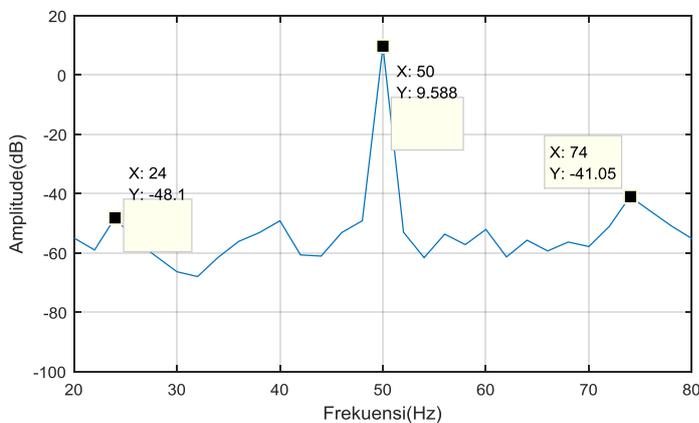
Hasil pengujian menggunakan frekuensi resolusi 0,02 hz menunjukkan analisa berhasil mendeteksi eksentrisitas celah udara, namun sama halnya dengan analisa sebelumnya pada analisa frekuensi resolusi 0,1 hz, amplitudo juga terdeteksi di frekuensi eksentrisitas pada motor kondisi normal, bahkan kenaikan amplitudo dapat terlihat dengan jelas.

4.5.2 Analisa spektrum frekuensi eksentrisitas pada beban 25%

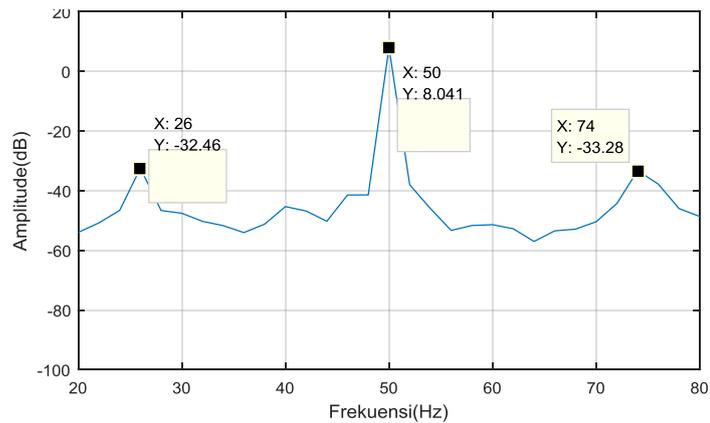
1. Pengujian analisa arus stator dengan frekuensi resolusi 2 hz/sampling



(a)



(b)

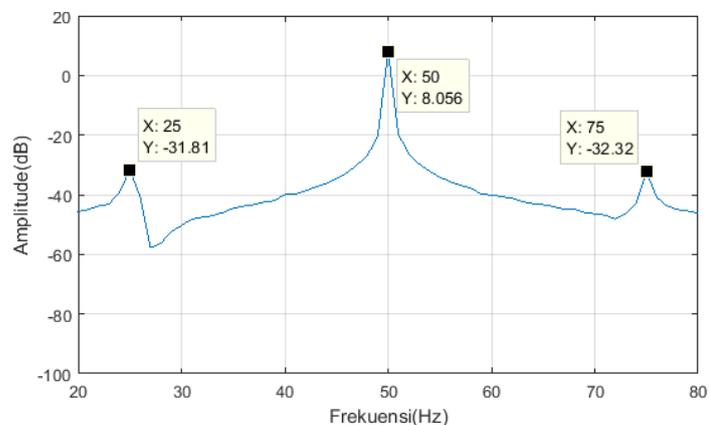


(c)

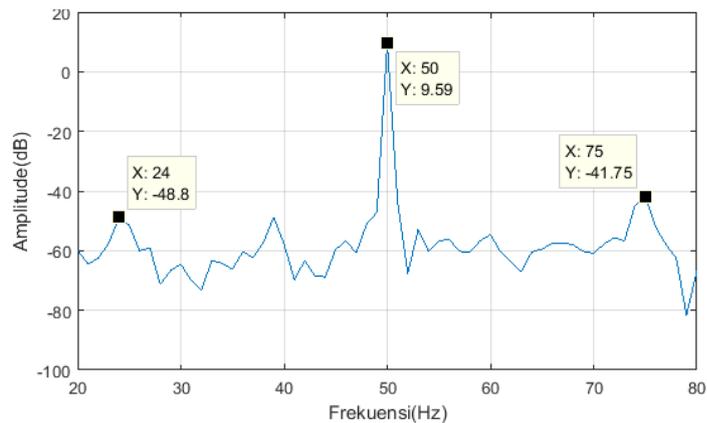
Gambar 4.7 Spektrum frekuensi pada motor dengan frekuensi resolusi 2 hz pada pembebanan 25%, (a) kondisi normal, (b) kondisi eksentrisitas 0,1 mm, (c) kondisi eksentrisitas 0,2 mm

Hasil pengujian selanjutnya dengan menggunakan pembebanan 25%, eksentrisitas celah udara berhasil terdeteksi. Gambar 4.7 menunjukkan pada kondisi normal maupun kondisi eksentrisitas terdapat puncak amplitudo yang terdeteksi di fekuensi eksentrisitas. Pada kondisi normal amplitudo muncul sebesar $fs-fr$ -32,70 Db dan $fs+fr$ -33,02 dB, nilai amplitudo yang hampir sama juga terdeteksi pada kondisi eksentrisitas 0,2 mm yaitu sebesar $fs-fr$ -32,46 dB dan $fs+fr$ -33,28 dB. Sedangkan hasil analisa dengan kondisi eksentrisitas 0,1 mm, nilai amplitudo menurun dibanding dengan kondisi normal menjadi $fs-fr$ -48,1 dB dan $fs+fr$ -42,05 dB.

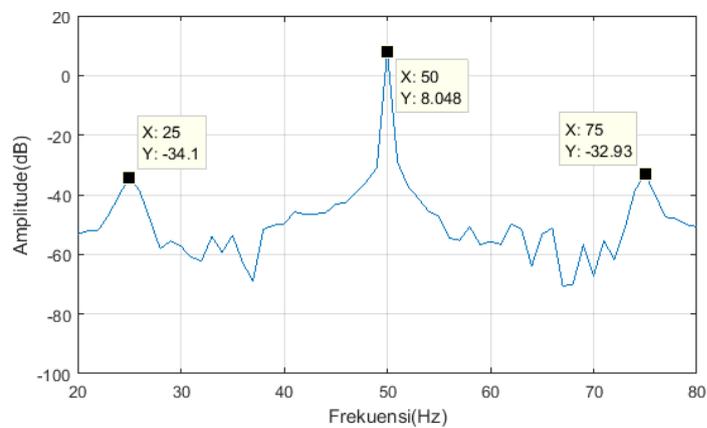
2. Pengujian analisa arus stator dengan frekuensi resolusi 1 hz/sampling



(a)



(b)

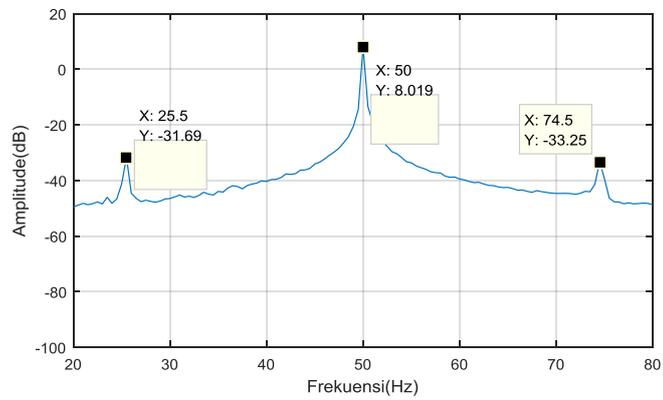


(c)

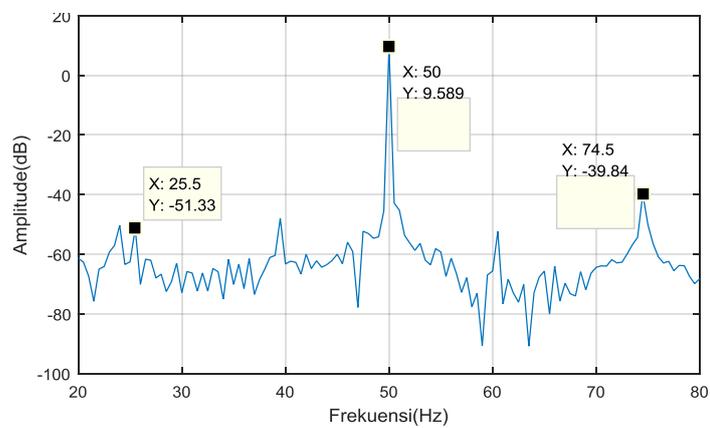
Gambar 4.8 Spektrum frekuensi pada motor dengan frekuensi resolusi 1 hz pada pembebanan 25%, (a) kondisi normal, (b) kondisi eksentrisitas 0,1 mm, (c) kondisi eksentrisitas 0,2 mm

Pada gambar 4.8 dengan menggunakan frekuensi 1 hz menunjukkan bahwa eksentrisitas dapat terdeteksi. Pada pengujian eksentrisitas 0,1 mm, analisa menunjukkan muncul amplitudo pada frekuensi eksentrisitas sebesar $f_s - f_r$ -48,8 dB dan $f_s + f_r$ -41,75 dB. Terjadi kenaikan nilai amplitudo dengan memberikan tingkat eksentrisitas yang lebih besar, kondisi eksentrisitas 0,2 mm nilai amplitudo meningkat menjadi $f_s - f_r$ -34,10 dB dan $f_s + f_r$ -32,93 dB. Namun sama halnya dengan analisa sebelumnya pada gambar 4.7, pada kondisi normal menunjukkan nilai amplitudo juga terdeteksi dengan jelas pada frekuensi eksentrisitas sebesar $f_s - f_r$ -32,81 dB dan $f_s + f_r$ -32,32 dB. Pada kasus ini dapat kita lihat pada kondisi normal memiliki nilai amplitudo pada frekuensi eksentrisitas yang lebih besar dibanding amplitudo pada kondisi eksentrisitas 0,1 mm.

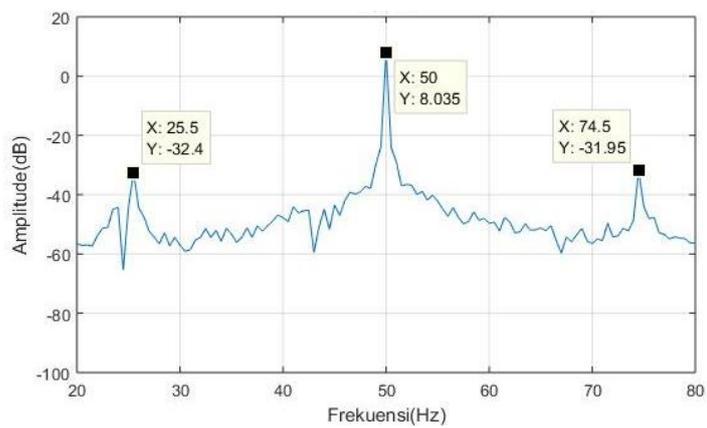
3. Pengujian analisa arus stator dengan frekuensi resolusi 0,5 hz/sampling



(a)



(b)

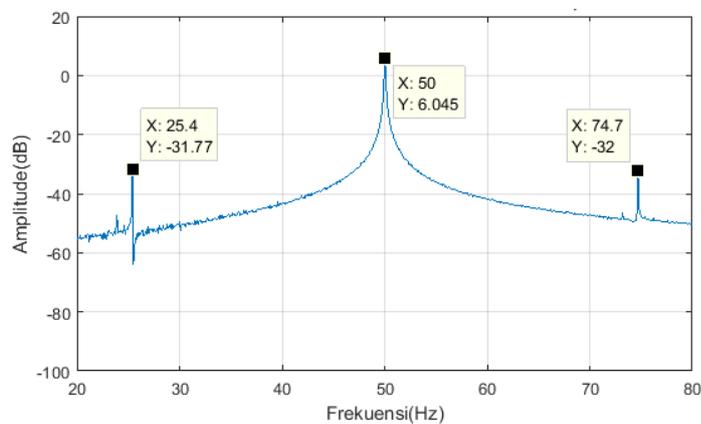


(c)

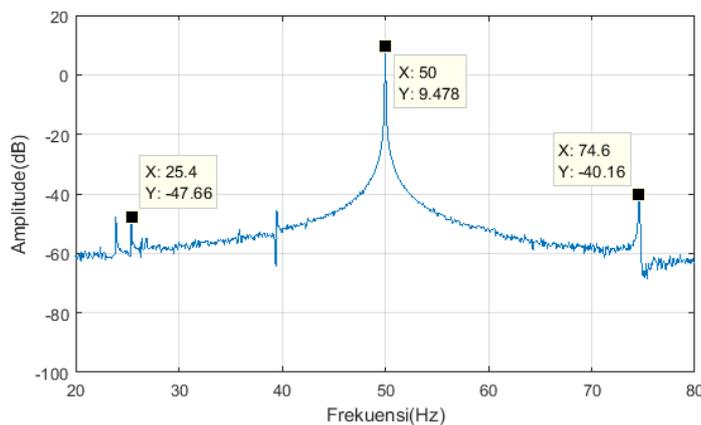
Gambar 4.9 Spektrum frekuensi pada motor dengan frekuensi resolusi 0,5 hz pada pembebanan 25%, (a) kondisi normal, (b) kondisi eksentrisitas 0,1 mm, (c) kondisi eksentrisitas 0,2 mm

Hasil analisa menggunakan frekuensi resolusi 0,5 hz dengan beban 25% berhasil mendeteksi eksentrisitas celah udara, hal ini ditunjukkan dengan adanya amplitudo yang muncul pada frekuensi eksentrisitas. Pada gambar 4.9 hasil analisa menunjukkan pada kondisi normal amplitudo pada frekuensi eksentrisitas terdeteksi sebesar fs-fr -31,69 dB dan fs+fr -33,25 dB, kondisi eksentrisitas 0,1 mm terdeteksi amplitudo sebesar fs-fr -52,33 dB dan fs+fr -39,84 dB, kondisi eksentrisitas 0,2 mm terdeteksi amplitudo sebesar fs-fr -32,40 dB dan fs+fr -31,95 dB.

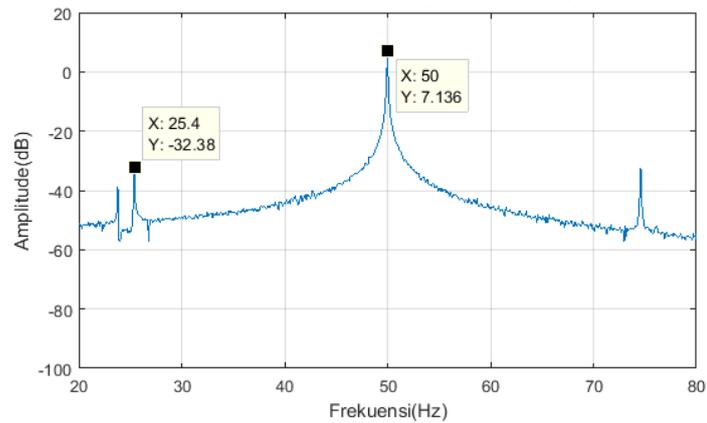
4. Pengujian analisa arus stator dengan frekuensi resolusi 0,1 hz/sampling



(a)



(b)

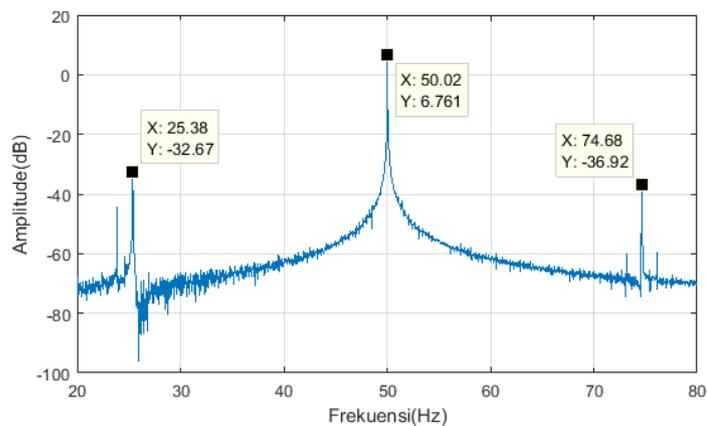


(c)

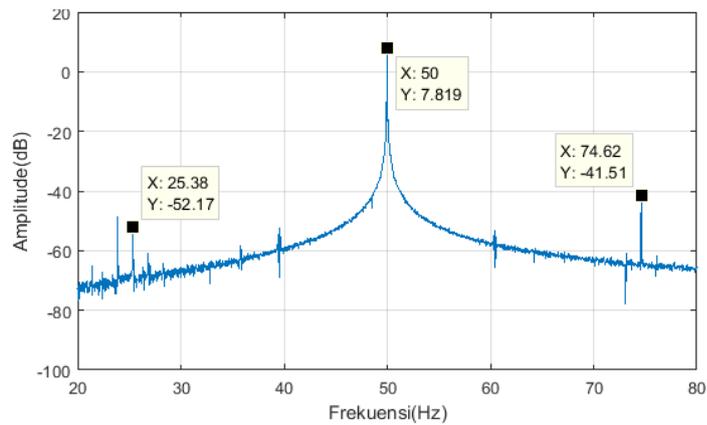
Gambar 4.10 Spektrum frekuensi pada motor dengan frekuensi resolusi 0,1 hz pada pembebanan 25%, (a) kondisi normal, (b) kondisi eksentrisitas 0,1 mm, (c) kondisi eksentrisitas 0,2 mm

Hasil analisa menggunakan frekuensi resolusi 0,1 hz dengan beban 25% berhasil mendeteksi eksentrisitas celah udara, hal ini ditunjukkan dengan adanya amplitudo yang muncul pada frekuensi eksentrisitas. Hasil analisa menunjukkan pada kondisi normal amplitudo pada frekuensi eksentrisitas terdeteksi sebesar $f_s - f_r$ -31,77 dB dan $f_s + f_r$ -32,00 dB, kondisi eksentrisitas 0,1 mm terdeteksi amplitudo sebesar $f_s - f_r$ -47,66 dB dan $f_s + f_r$ -40,16 dB, kondisi eksentrisitas 0,2 mm terdeteksi amplitudo sebesar $f_s - f_r$ -32,38 dB dan $f_s + f_r$ -32,25 dB.

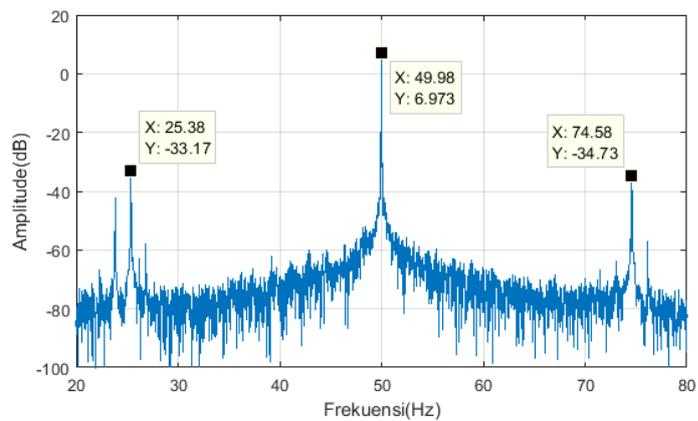
5. Pengujian analisa arus stator dengan frekuensi resolusi 0,02 hz/sampling



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.11 Spektrum frekuensi pada motor dengan frekuensi resolusi 0,02 hz pada pembebanan 25%, (a) kondisi normal, (b) kondisi eksentrisitas 0,1 mm, (c) kondisi eksentrisitas 0,2 mm

Hasil analisa menggunakan frekuensi resolusi 0,1 hz dengan beban 25% berhasil mendeteksi eksentrisitas celah udara. Pada kondisi normal amplitudo pada frekuensi eksentrisitas terdeteksi sebesar $f_s - f_r$ -31,77 dB dan $f_s + f_r$ -32,00 dB, kondisi eksentrisitas 0,1 mm terdeteksi amplitudo sebesar $f_s - f_r$ -47,66 dB dan $f_s + f_r$ -40,16 dB, kondisi eksentrisitas 0,2 mm terdeteksi amplitudo sebesar $f_s - f_r$ -32,38 dB dan $f_s + f_r$ -32,25 dB.

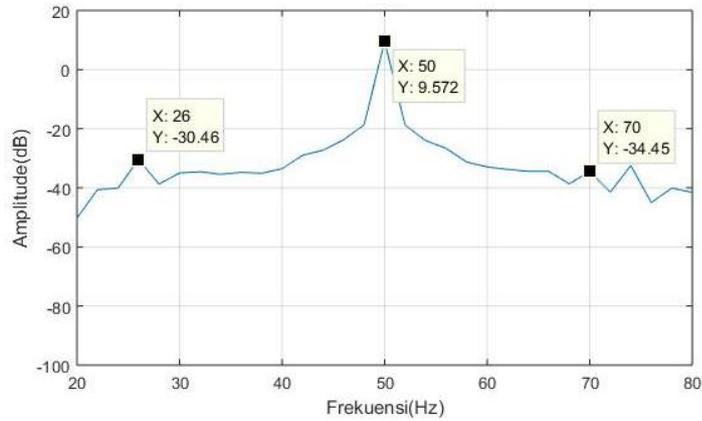
Dari hasil analisa deteksi eksentrisitas pada kondisi berbeban 25%, menunjukkan eksentrisitas 0,1 mm dan 0,2 mm dapat terdeteksi, namun hasil pada kondisi normal amplitudo eksentrisitas juga terdeteksi, bahkan hampir menyamai amplitudo pada eksentrisitas 0,2 mm. Kemungkinan hal ini terjadi adalah disebabkan pada pembebanan 25% dilakukan pengkopelan motor dengan

generator. Karena celah udara pada motor induksi yang digunakan dalam pengujian ini sangat kecil, maka perlu dilakukan pengkopelan yang sangat sempurna. Pada kasus ini, dudukan generator dan motor dan juga permukaan kopel yang tidak benar benar presisi menyebabkan kemungkinan terjadinya pembengkokan poros rotor pada motor induksi. Hal ini menyebabkan terdeteksinya eksentrisitas celah udara meskipun motor dalam kondisi normal.

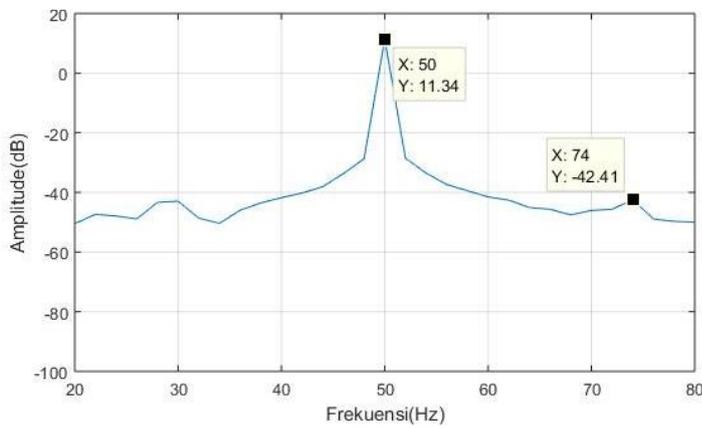
Pada analisa selanjutnya dengan pembebanan 50%, 75% dan 100% memungkinkan terjadi hal serupa. Hal ini dikarenakan keseluruhan pembebanan dilakukan dengan pengkopelan terhadap generator. Analisa deteksi eksentrisitas celah udara pada kondisi pembebanan 25% cukup mewakili pola spektrum yang dihasilkan oleh tingkat pembebanan berikutnya.

4.5.3 Analisa spektrum frekuensi eksentrisitas pada beban 50%

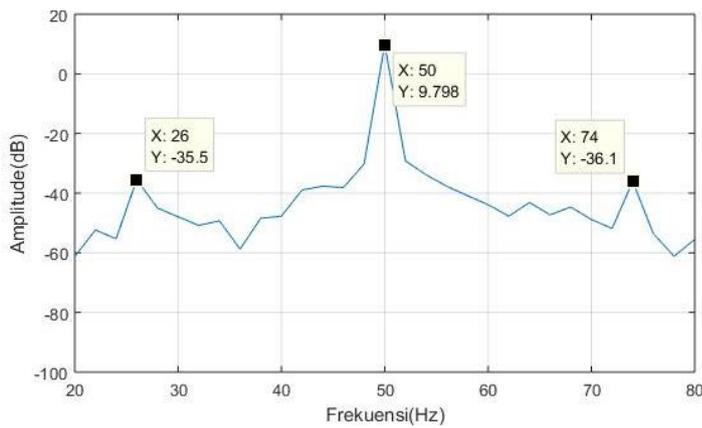
1. Pengujian analisa arus stator dengan frekuensi resolusi 2 hz/sampling



(a)



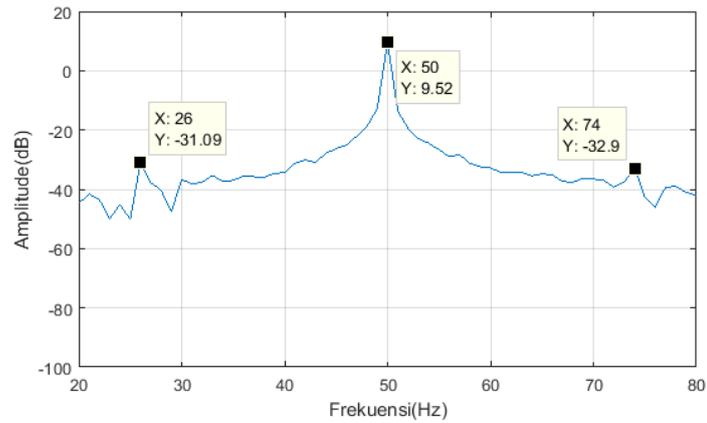
(b)



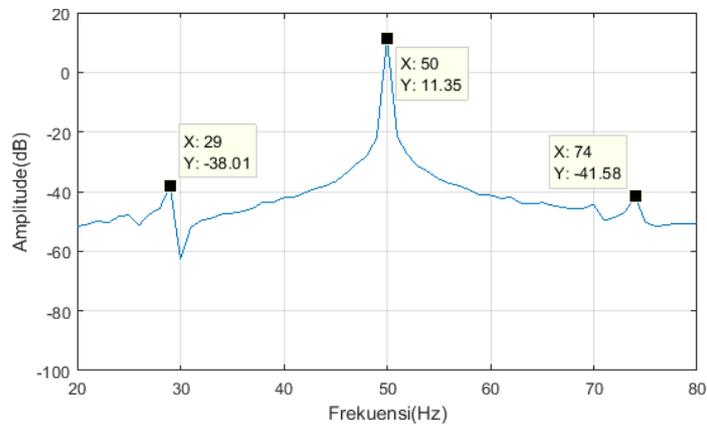
(c)

Gambar 4.12 Spektrum frekuensi pada motor dengan frekuensi resolusi 2 hz pada pembebanan 50%, (a) kondisi normal, (b) kondisi eksentrisitas 0,1 mm, (c) kondisi eksentrisitas 0,2 mm

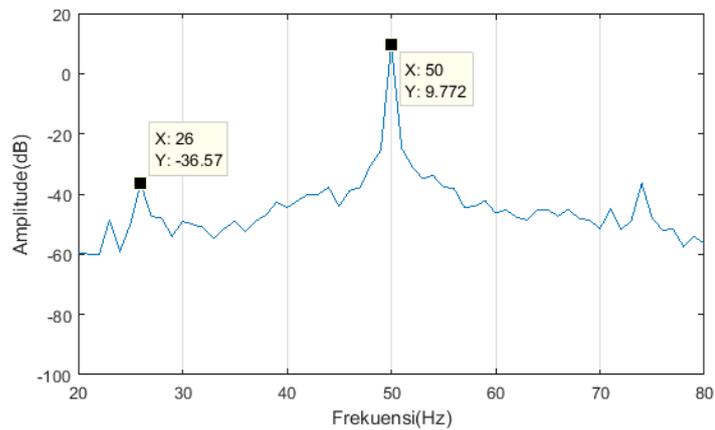
2. Pengujian analisa arus stator dengan frekuensi resolusi 1 hz/sampling



(a)



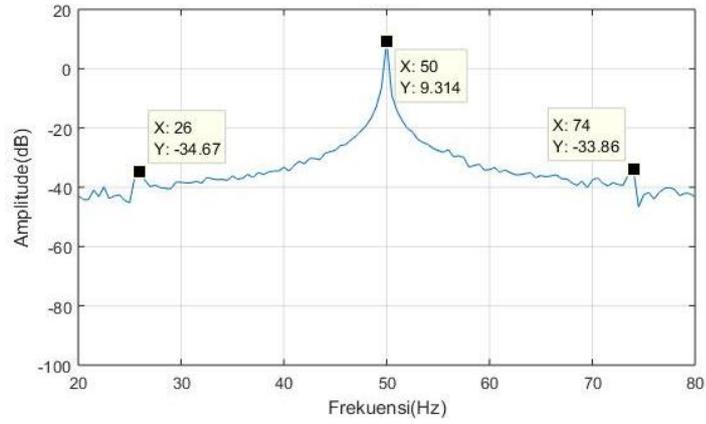
(b)



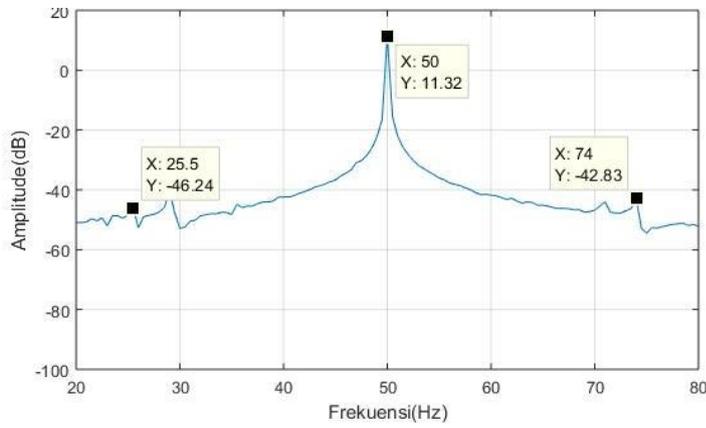
(c)

Gambar 4.13 Spektrum frekuensi pada motor dengan frekuensi resolusi 1 hz pada pembebanan 50%, (a) kondisi normal, (b) kondisi eksentrisitas 0,1 mm, (c) kondisi eksentrisitas 0,2 mm

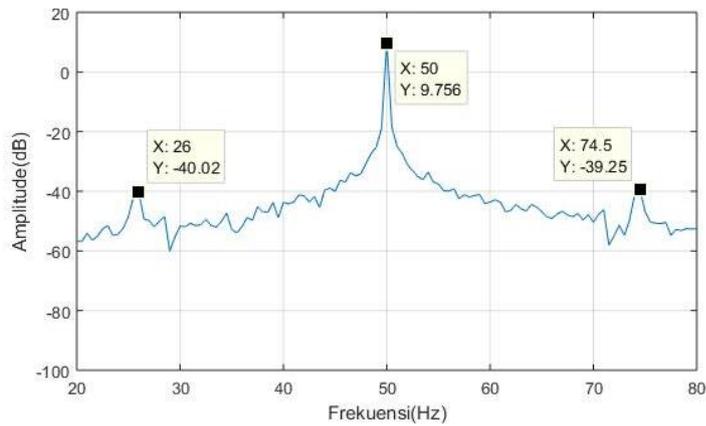
3. Pengujian analisa arus stator dengan frekuensi resolusi 0,5 hz/sampling



(a)



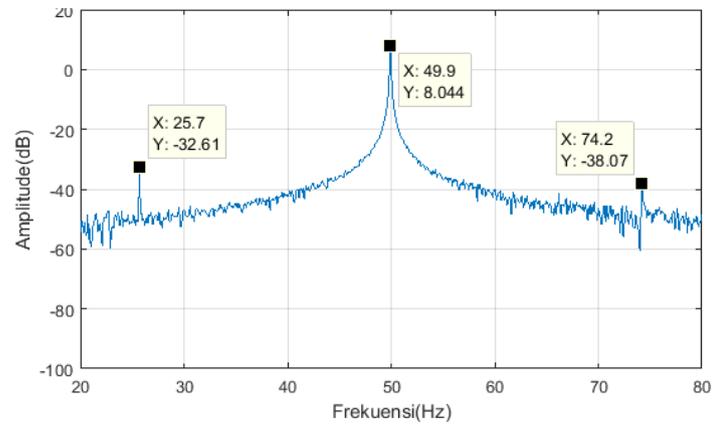
(b)



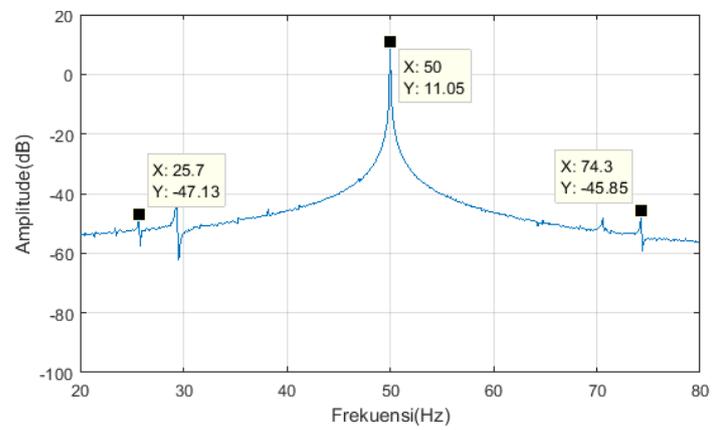
(c)

Gambar 4.14 Spektrum frekuensi pada motor dengan frekuensi resolusi 0,5 hz pada pembebanan 50%, (a) kondisi normal, (b) kondisi eksentrisitas 0,1 mm, (c) kondisi eksentrisitas 0,2 mm

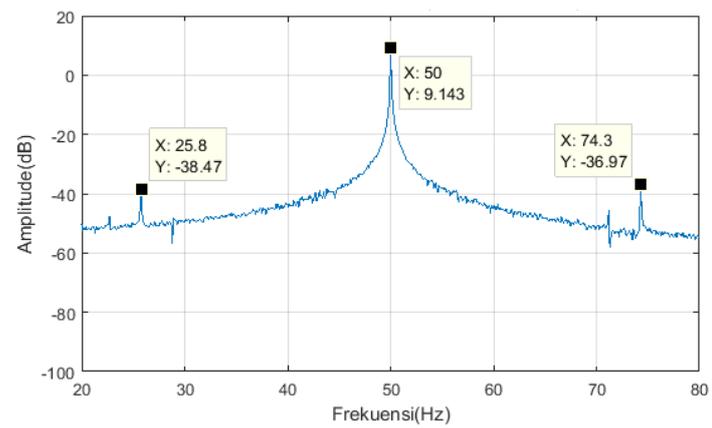
4. Pengujian analisa arus stator dengan frekuensi resolusi 0,1 hz/sampling



(a)



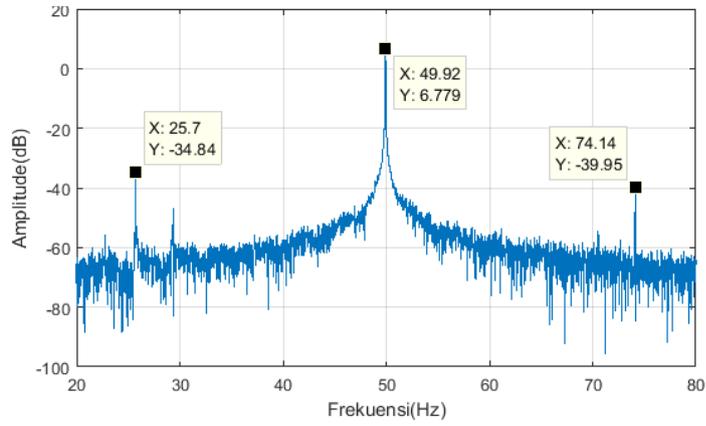
(b)



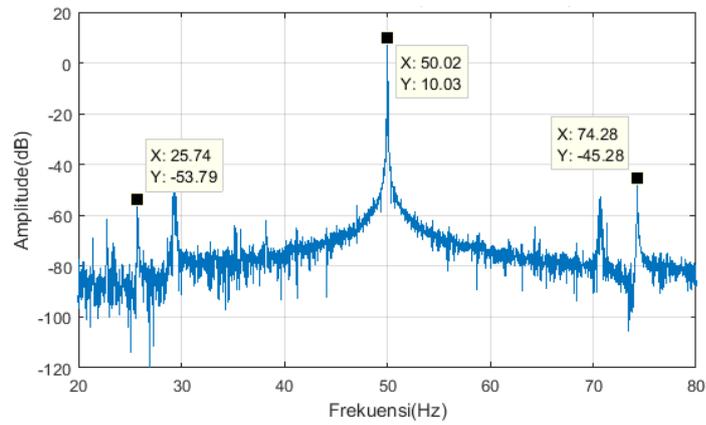
(c)

Gambar 4.15 Spektrum frekuensi pada motor dengan frekuensi resolusi 0,1 hz pada pembebanan 50%, (a) kondisi normal, (b) kondisi eksentrisitas 0,1 mm, (c) kondisi eksentrisitas 0,2 mm

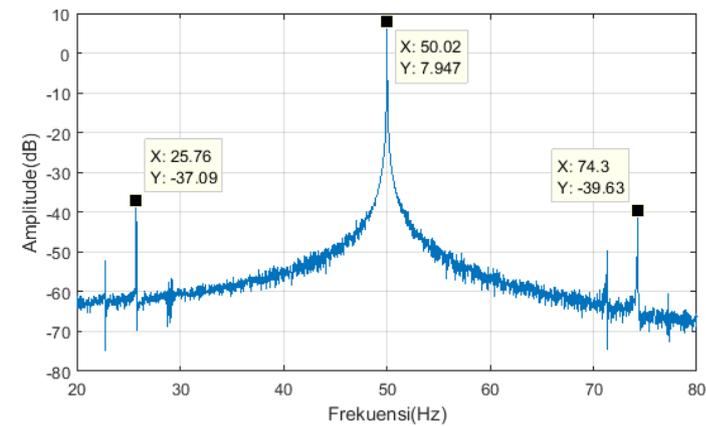
5. Pengujian analisa arus stator dengan frekuensi resolusi 0,02 hz/sampling



(a)



(b)

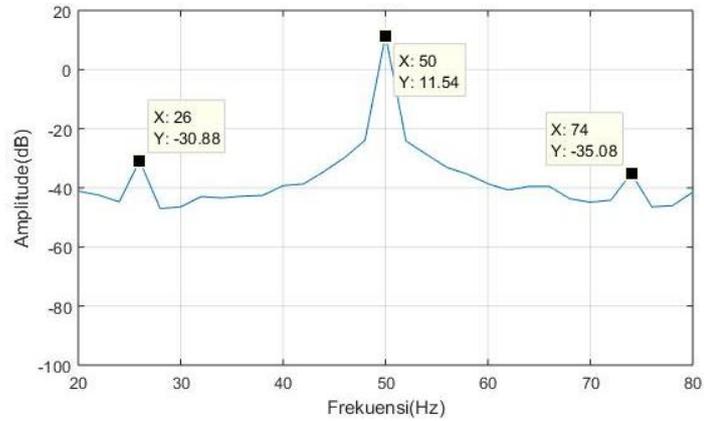


(c)

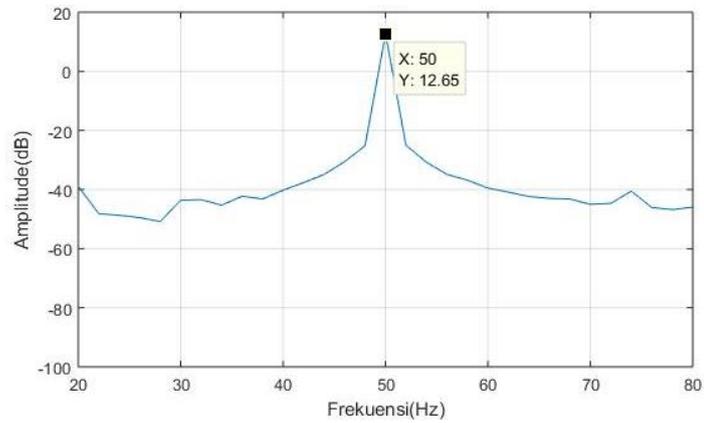
Gambar 4.16 Spektrum frekuensi pada motor dengan frekuensi resolusi 0,02 hz pada pembebanan 50%, (a) kondisi normal, (b) kondisi eksentrisitas 0,1 mm, (c) kondisi eksentrisitas 0,2 mm

4.5.4 Analisa spektrum frekuensi eksentrisitas pada beban 75%

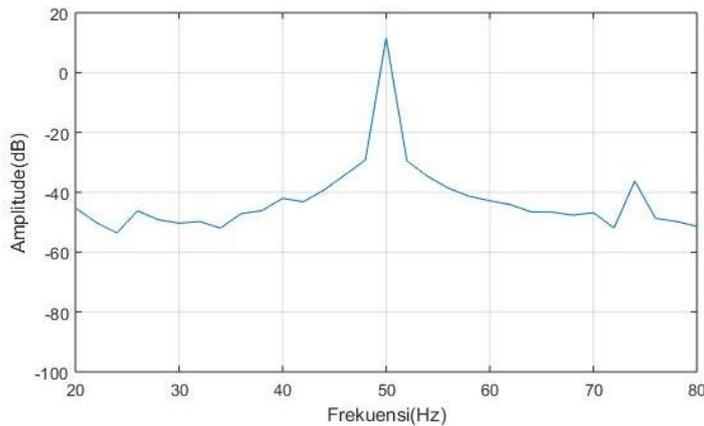
1. Pengujian analisa arus stator dengan frekuensi resolusi 2 hz/sampling



(a)



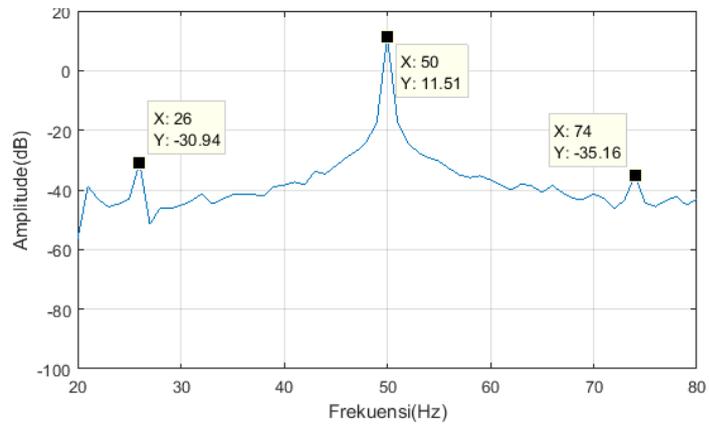
(b)



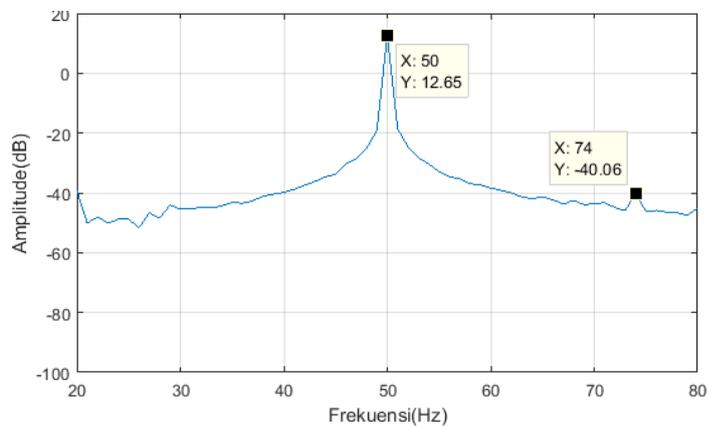
(c)

Gambar 4.17 Spektrum frekuensi pada motor dengan frekuensi resolusi 2 hz pada pembebanan 75%, (a) kondisi normal, (b) kondisi eksentrisitas 0,1 mm, (c) kondisi eksentrisitas 0,2 mm

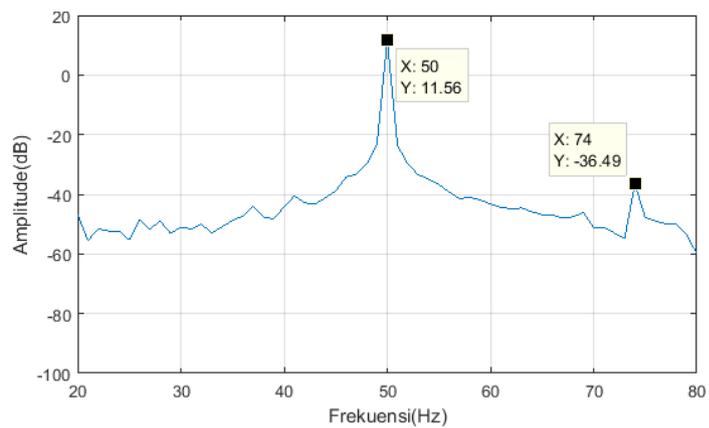
2. Pengujian analisa arus stator dengan frekuensi resolusi 1 hz/sampling



(a)



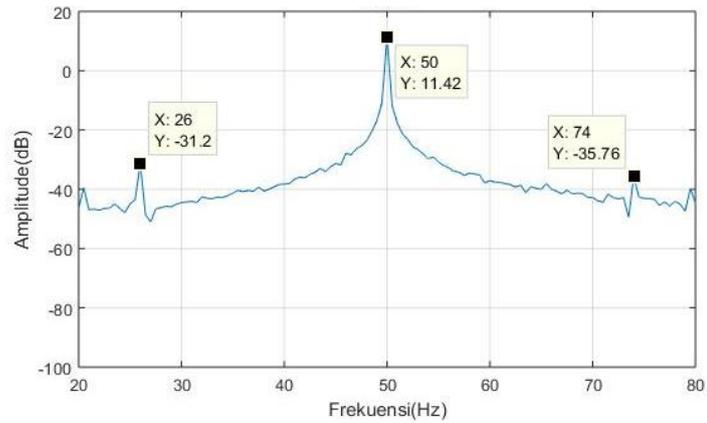
(b)



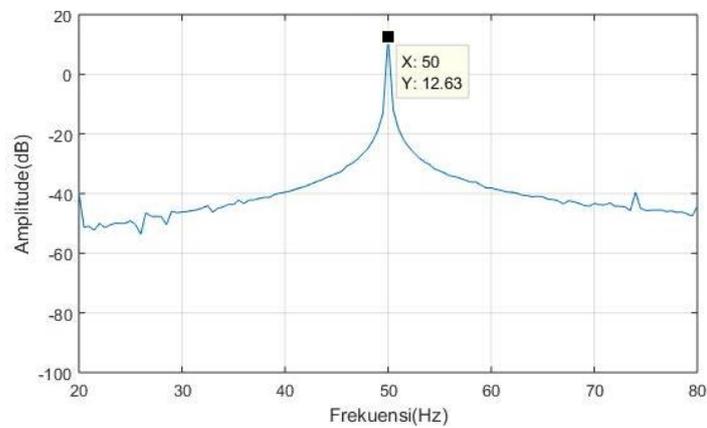
(c)

Gambar 4.18 Spektrum frekuensi pada motor dengan frekuensi resolusi 1 hz pada pembebanan 75%, (a) kondisi normal, (b) kondisi eksentrisitas 0,1 mm, (c) kondisi eksentrisitas 0,2 mm

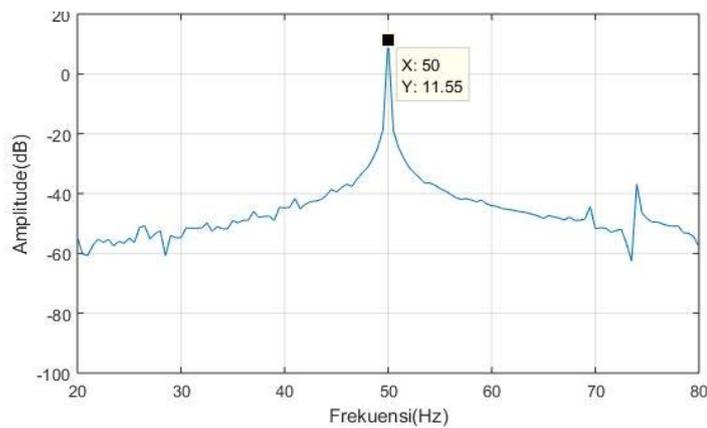
3. Pengujian analisa arus stator dengan frekuensi resolusi 0,5 hz/sampling



(a)



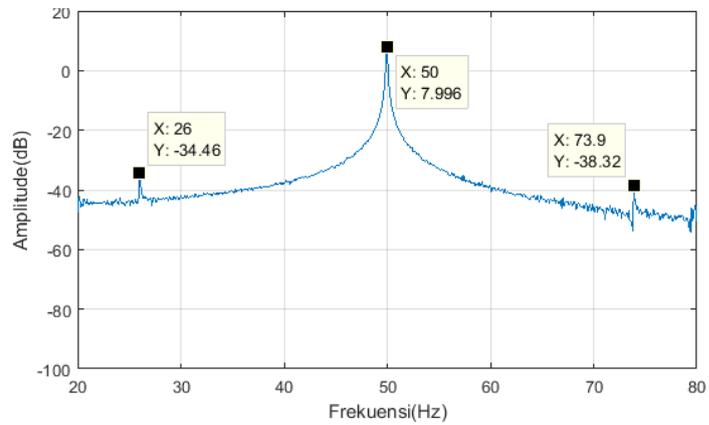
(b)



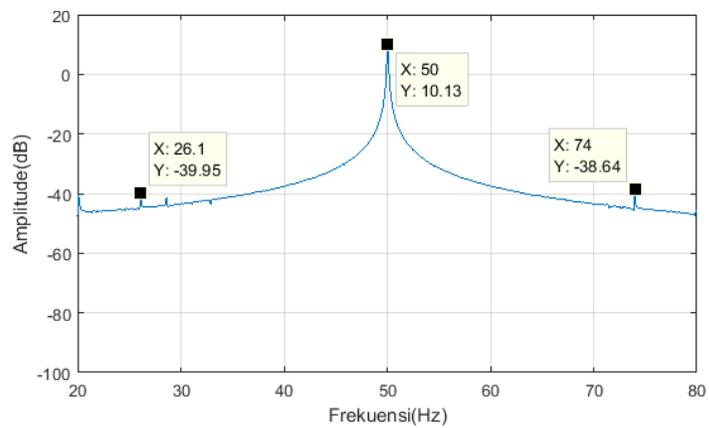
(c)

Gambar 4.19 Spektrum frekuensi pada motor dengan frekuensi resolusi 0,5 hz pada pembebanan 75%, (a) kondisi normal, (b) kondisi eksentrisitas 0,1 mm, (c) kondisi eksentrisitas 0,2 mm

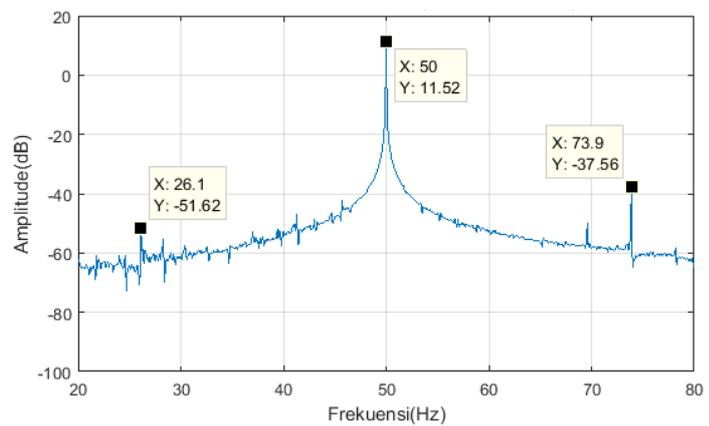
4. Pengujian analisa arus stator dengan frekuensi resolusi 0,1 hz/sampling



(a)



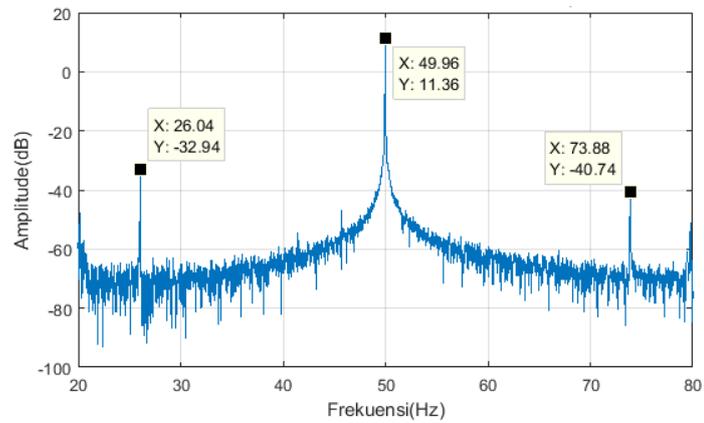
(b)



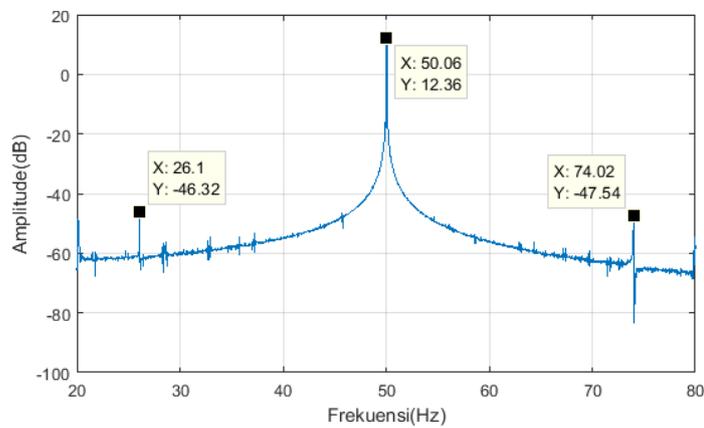
(c)

Gambar 4.20 Spektrum frekuensi pada motor dengan frekuensi resolusi 0,1 hz pada pembebanan 75%, (a) kondisi normal, (b) kondisi eksentrisitas 0,1 mm, (c) kondisi eksentrisitas 0,2 mm

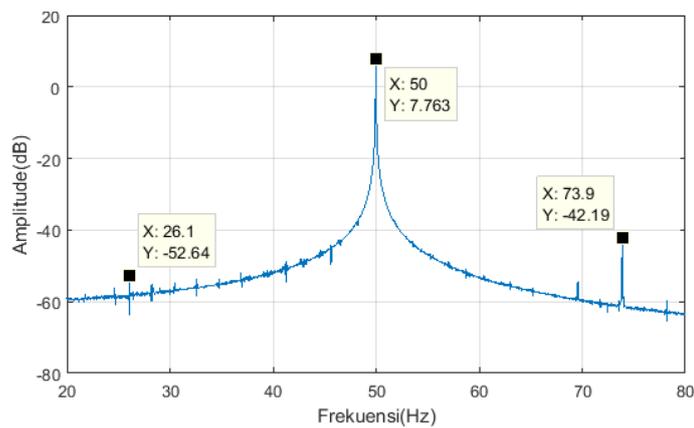
5. Pengujian analisa arus stator dengan frekuensi resolusi 0,02 hz/sampling



(a)



(b)

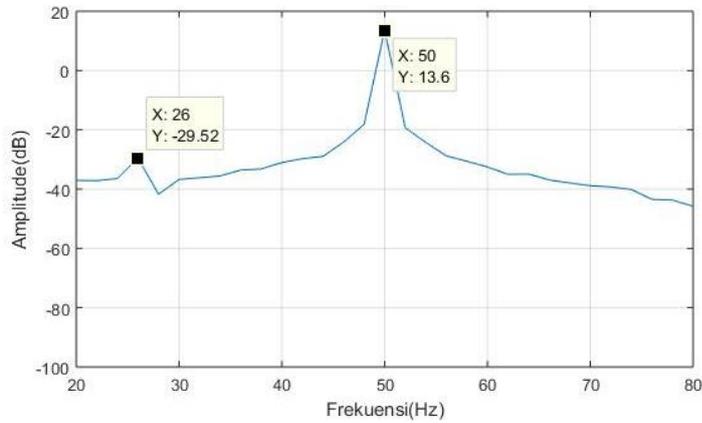


(c)

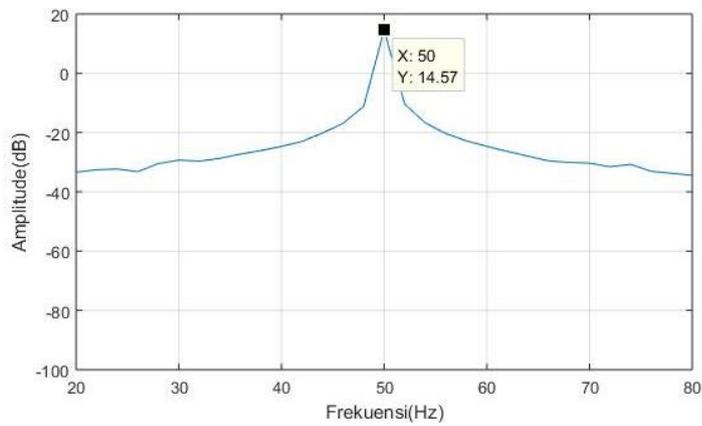
Gambar 4.21 Spektrum frekuensi pada motor dengan frekuensi resolusi 0,02 hz pada pembebanan 75%, (a) kondisi normal, (b) kondisi eksentrisitas 0,1 mm, (c) kondisi eksentrisitas 0,2 mm

4.5.5 Analisa spektrum frekuensi eksentrisitas pada beban 100%

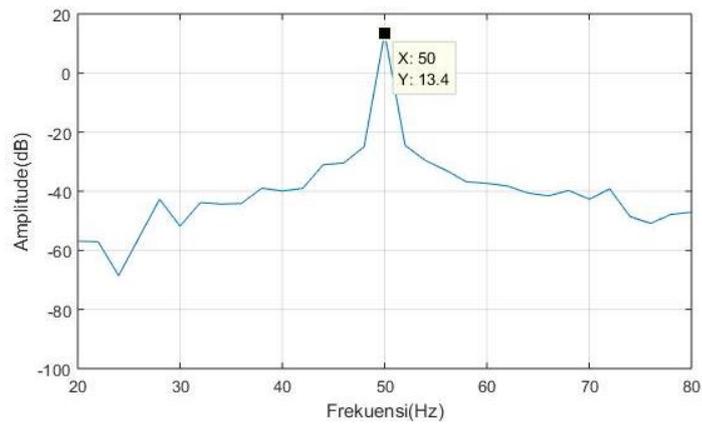
1. Pengujian analisa arus stator dengan frekuensi resolusi 2 hz/sampling



(a)



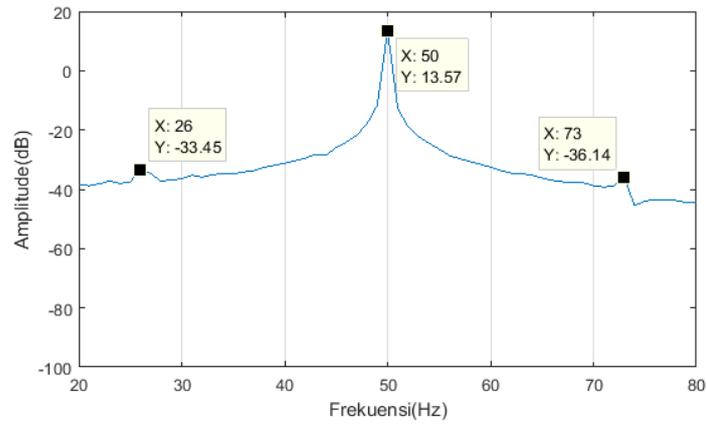
(b)



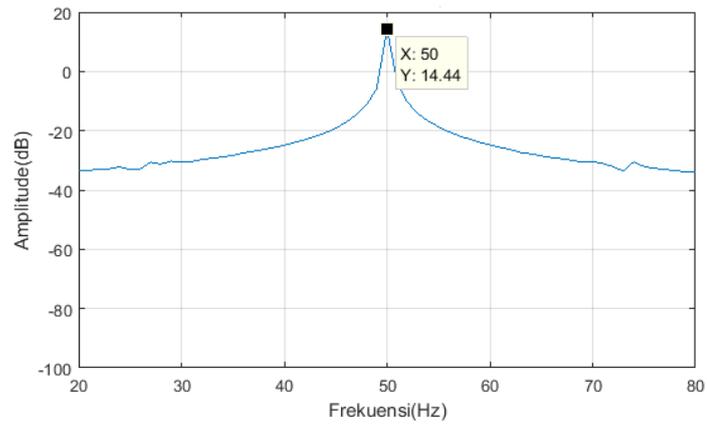
(c)

Gambar 4.22 Spektrum frekuensi pada motor dengan frekuensi resolusi 2 hz pada pembebanan 100%, (a) kondisi normal, (b) kondisi eksentrisitas 0,1 mm, (c) kondisi eksentrisitas 0,2 mm

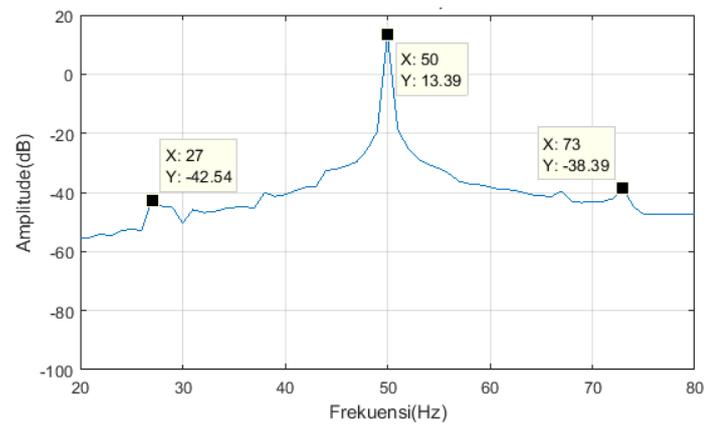
2. Pengujian analisa arus stator dengan frekuensi resolusi 1 hz/sampling



(a)



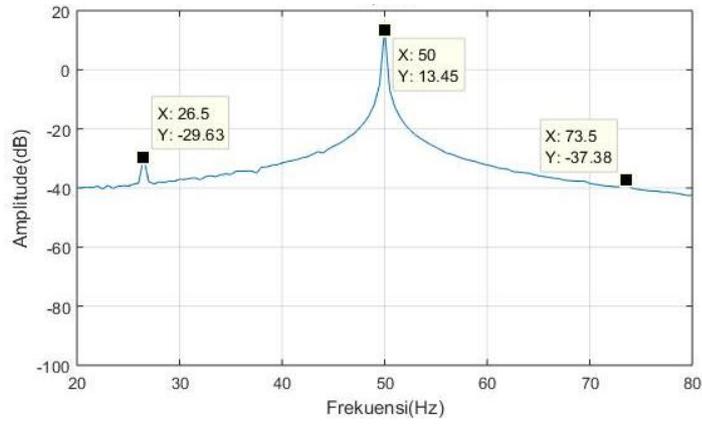
(b)



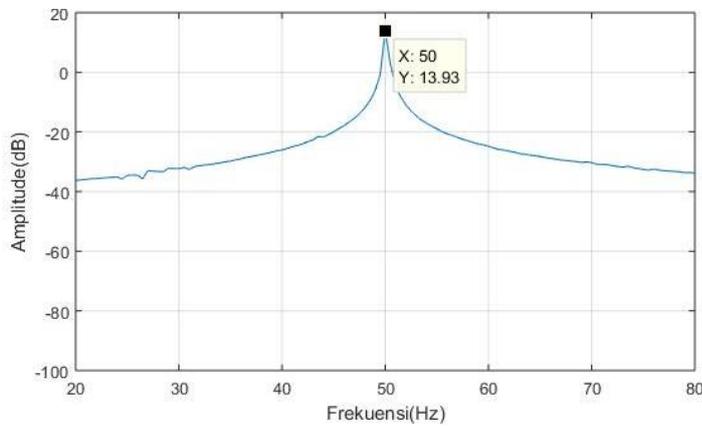
(c)

Gambar 4.23 Spektrum frekuensi pada motor dengan frekuensi resolusi 1 hz pada pembebanan 100%, (a) kondisi normal, (b) kondisi eksentrisitas 0,1 mm, (c) kondisi eksentrisitas 0,2 mm

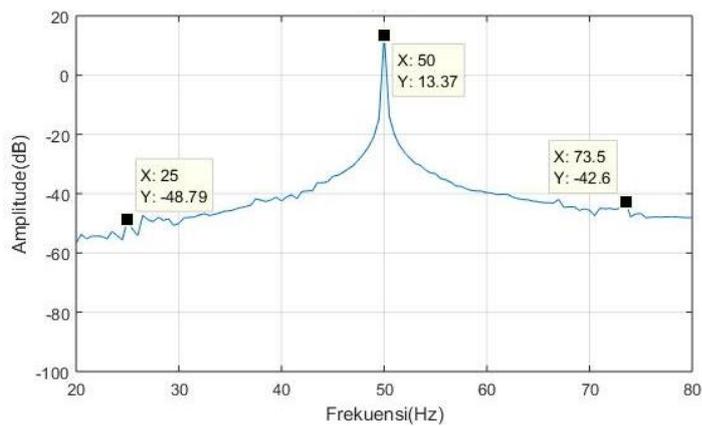
3. Pengujian analisa arus stator dengan frekuensi resolusi 0,5 hz/sampling



(a)



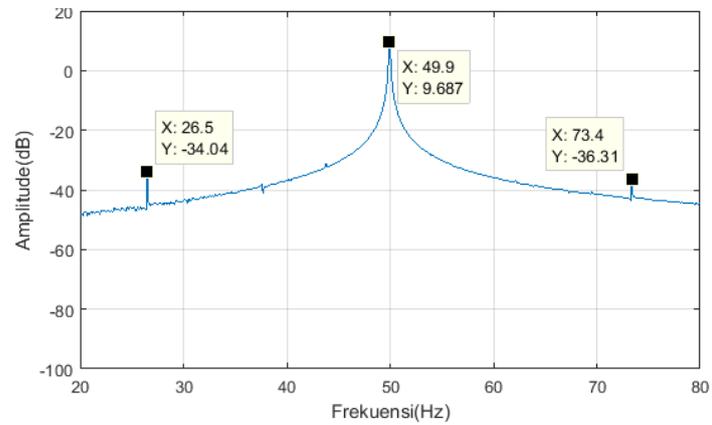
(b)



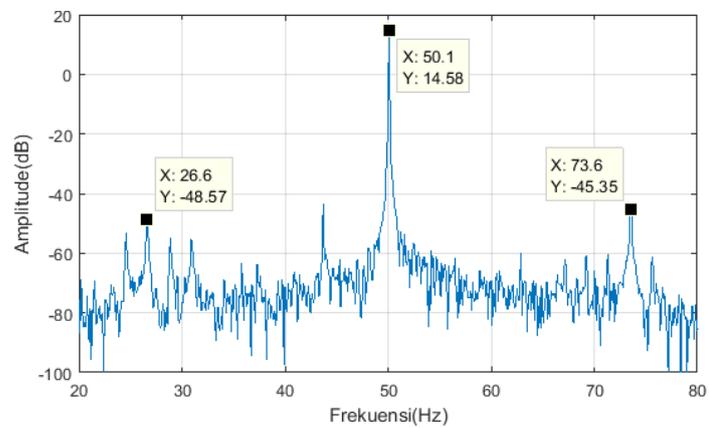
(c)

Gambar 4.24 Spektrum frekuensi pada motor dengan frekuensi resolusi 0,5 hz pada pembebanan 100%, (a) kondisi normal, (b) kondisi eksentrisitas 0,1 mm, (c) kondisi eksentrisitas 0,2 mm

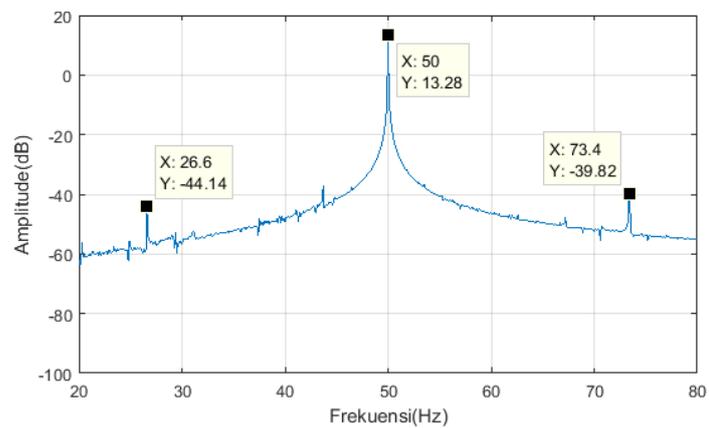
4. Pengujian analisa arus stator dengan frekuensi resolusi 0,1 hz/sampling



(a)



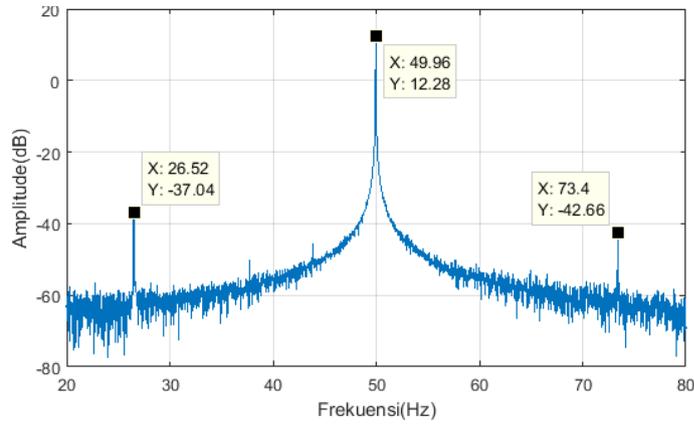
(b)



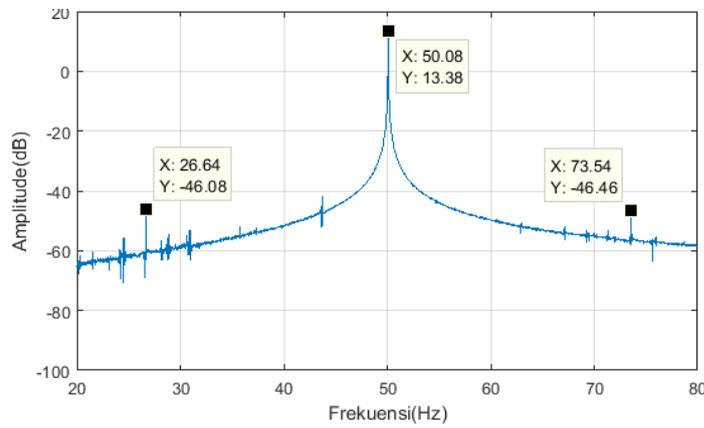
(c)

Gambar 4.25 Spektrum frekuensi pada motor dengan frekuensi resolusi 0,1 hz pada pembebanan 100%, (a) kondisi normal, (b) kondisi eksentrisitas 0,1 mm, (c) kondisi eksentrisitas 0,2 mm

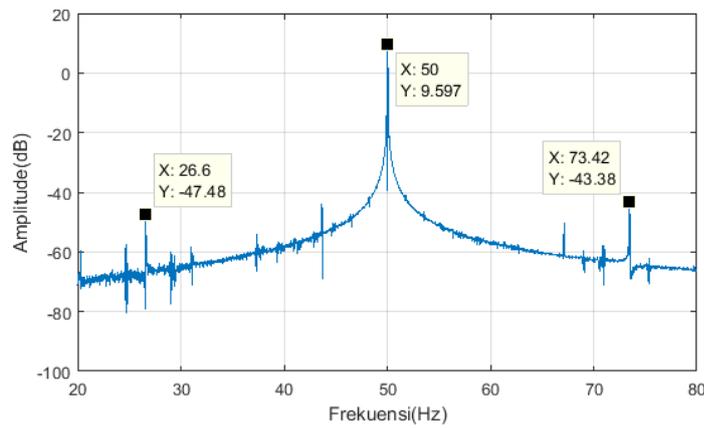
5. Pengujian analisa arus stator dengan frekuensi resolusi 0,02 hz/sampling



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.26 Spektrum frekuensi pada motor dengan frekuensi resolusi 0,02 hz pada pembebanan 100%, (a) kondisi normal, (b) kondisi eksentrisitas 0,1 mm, (c) kondisi eksentrisitas 0,2 mm

Hasil analisa deteksi eksentrisitas celah udara pada motor induksi melalui analisa frekuensi resolusi arus stator, dalam keadaan berbeban dan tidak berbeban, dengan pengujian dilakukan terhadap variasi resolusi frekuensi ditunjukkan pada tabel 4.9.

Table 4.9 Perbandingan nilai amplitudo pada tiap pengujian

Beban	Frek. resolusi (Δf)	Puncak Amplitudo (dB)						ket
		Normal		Eks 0,1 mm		Eks 0,2 mm		
		$fs-fr$	$fs+fr$	$fs-fr$	$fs+fr$	$fs+fr$	$fs+fr$	
0%	2 Hz	-	-	-	-	-	-	0
	1 Hz	-	-	-31,82	-46,46	-26,72	-40,27	1
	0,5 Hz	-	-	-31,84	-47,12	-26,71	-40,35	1
	0,1 Hz	-44,82	-50,82	-32,33	-47,15	-27,76	-40,66	2
	0,02 Hz	-45,89	-59,16	-35,48	-49,45	-27,14	-43,92	2
25%	2 Hz	-32,70	-33,02	-48,10	-41,05	-32,46	-33,28	2
	1 Hz	-31,81	-32,32	-48,80	-41,75	-34,10	-32,93	2
	0,5 Hz	-31,69	-33,25	-51,33	-39,84	-32,40	-31,95	2
	0,1 Hz	-31,77	-32,00	-47,65	-40,16	-32,38	-33,31	2
	0,02 Hz	-32,67	-36,92	-52,17	-41,51	-33,17	-34,73	2
50%	2 Hz	-30,46	-34,45	-	-	-35,50	-36,10	2
	1 Hz	-31,09	-32,90	-38,01	-41,58	-36,57	-36,33	2
	0,5 Hz	-34,67	-33,86	-46,24	-42,83	-40,02	-39,25	2
	0,1 Hz	-32,61	-38,07	-47,13	-45,85	-38,47	-36,97	2
	0,02 Hz	-34,84	-39,95	-53,79	-45,28	-37,09	-39,63	2
75%	2 Hz	-30,88	-35,08	-	-	-	-35,66	2
	1 Hz	-30,94	-35,16	-	-40,06	-	-36,49	2
	0,5 Hz	-31,12	-35,76	-	-40,01	-	-38,33	2
	0,1 Hz	-34,46	-38,32	-39,95	-38,64	-51,62	-37,56	2
	0,02 Hz	-32,94	-40,74	-46,32	-47,54	-52,64	-42,19	2
100%	2 Hz	-29,52	-	-	-	-	-	2
	1 Hz	-33,45	-36,14	-	-	-42,25	-38,39	2
	0,5 Hz	-29,63	-37,38	-	-	-48,79	-42,60	2
	0,1 Hz	-34,04	-36,31	-48,57	-45,35	-44,14	-39,82	2
	0,02 Hz	-37,04	-42,66	-46,08	-46,46	-47,48	-43,38	2

Ket : 0 - Tidak ada puncak amplitudo yang terdeteksi

1 – Amplitudo terdeteksi pada kondisi eksentrisitas dan tidak terdeteksi pada kondisi normal

2 - Amplitudo terdeteksi pada kondisi eksentrisitas dan kondisi normal

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 5

PENUTUP

5.1 Simpulan

Hasil dari percobaan deteksi eksentrisitas celah udara melalui frekuensi resolusi pada arus stator dapat disimpulkan bahwa sistem ini berhasil mendeteksi terjadinya eksentrisitas celah udara. Hal ini ditentukan dengan adanya amplitudo yang muncul di frekuensi eksentrisitas ($fs \pm fr$). Karakteristik spektrum frekuensi pada gangguan eksentrisitas celah udara berada pada frekuensi sekitar fundamental yaitu di frekuensi 25 Hz dan frekuensi 75 Hz. Dari hasil pengujian juga didapat simpulan bahwa tingkat keparahan eksentrisitas yang terjadi celah udara motor induksi berdampak pada peningkatan amplitudo pada frekuensi eksentrisitas. Ini ditunjukkan dengan pengujian menggunakan eksentrisitas 0,1 mm dan dibandingkan eksentrisitas 0,2 mm. Frekuensi resolusi yang diterapkan pada analisa deteksi eksentrisitas berpengaruh pada pembacaan spektrum frekuensi, penggunaan frekuensi resolusi rendah (2 Hz) menyebabkan pembacaan amplitudo pada frekuensi eksentrisitas tidak dapat terlihat jelas, sedangkan penggunaan frekuensi tinggi (0,02 Hz) berdampak pada sensitifitas pembacaan amplitudo yang muncul di spektrum frekuensi, sehingga amplitudo juga ikut muncul meskipun kondisi motor dalam keadaan normal. Dari hasil pengujian menggunakan variasi frekuensi resolusi, didapat nilai dari frekuensi resolusi yang tepat untuk diterapkan pada analisa deteksi eksentrisitas celah udara, yaitu dengan frekuensi resolusi 0,5 Hz dan 1 Hz. Hal ini ditunjukkan dengan gangguan eksentrisitas celah udara dapat terdeteksi dengan baik dan pada kondisi motor normal tidak ada kemunculan amplitudo di frekuensi eksentrisitas. Pada kondisi motor dalam pembebanan amplitudo terlihat pada frekuensi eksentrisitas namun ini terlihat pada semua pengujian dalam keadaan motor normal. Hal ini disebabkan konfigurasi sistem berupa pengkopelan motor pada generator yang kurang sempurna, sehingga menyebabkan ketidakselarasan poros motor pada poros generator dan membentuk amplitudo baru di frekuensi eksentrisitas.

5.2 Saran

Untuk pengembangan dari penelitian ini, dilakukan pengujian dengan jenis dan daya motor induksi yang berbeda untuk memastikan sistem deteksi eksentrisitas celah udara ini dapat bekerja pada motor yang berbeda.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Chapman, Stephen J., "*Electric Machinery Fundamentals Fourth Edition*", McGraw-Hill Companies, New York, 2005.
- [2] Da Silva, A. M., "*Induction Motor Fault Diagnostic and Monitoring Method*", Marquette University, Milwaukee, Mei 2006.
- [3] Dooso Hyun, Ernesto J. Widedenbrug, Subhasis Nandi, "*Automated Monitoring of Airgap Eccentricity for Inverter fed Induction Motors under Standstill Conditions*", pp 2485-2492, IEEE 2010 Copy right material.
- [4] Do-Jin Kim, Hae-Joong Kim, Jung-Pyo Hong, "*Estimation of Acoustic Noise and Vibration in an Induction Machine Considering Rotor Eccentricity*", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.50, No.2, pp 7021204, February 2014.
- [5] N. Mehla, and R. Dahiya, "*An approach of condition monitoring of induction motor using MCSA,*" International Journal of Systems Applications, Engineering & Development, vol. 1, issue 1, pp. 13–17, July 2007.
- [6] W. T. Thomson and M. Fenger, "*Industrial application of current signal analysis to diagnose faults in 3-phase squirrel cage induction motors*" Pulp and Paper Industry Technical Conference, 2000, pp205-211.
- [7] J. S. Hsu, "*Monitoring of defects in induction motors through air-gap torque observation,*" IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 31, No. 5, Sept./Oct. 1995, pp1016-1021
- [8] Ilker, Ozelgin., "*Analysis of magnetic flux density for airgap eccentricity and bearing faults*", International Journal of Systems Applications, Engineering & Development, Vol.02, No.4, 2008
- [9] C. M. Riley, B. K. Lin, T. G. Habetler, and R. R. Schoen, "*A method for sensorless online vibration monitoring of induction machines,*" IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 34, No. 6, Nov./Dec. 1998, pp12401245.

- [10] R. R. Obaid and T. G. Habetler, “*Current-based algorithm for mechanical fault detection in induction motors with arbitrary load conditions*,” IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 2003, pp. 1347-1351.
- [11] A. Bellini, *et. al.*, “*On-field experience with online diagnosis of large induction motors cage failure using MCSA*,” IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 38, No. 4, July/Aug. 2002, pp1045-1053.
- [12] Jawad Faiz, Bashir Mahdi Ebrahimi, Bilal Akin, and Hamid A. Toliyat, “*Comprehensive Eccentricity Fault Diagnosis in Induction Motors Using Finite Element Method*”, IEEE Transactions on Magnetics, Vol.45, No.3, pp 1764-1767, March 2009.
- [13] Yudiastawan, I Gusti Putu., “*Bearing and Eccentricity Fault Detection in Three Phase Induction Motor Using Current Signature Analysis*”, Master of Physics, Indonesia of University, june 2009
- [14] G. S. Maruthi; Vishwanath Hegde, “*Mathematical analysis of unbalanced magnetic pull and detection of mixed air gap eccentricity in induction motor by vibration analysis using MEMS accelerometer*”, IEEE 1st International Conference on Condition Assessment Techniques in Electrical Systems (CATCON), pp 207-212, 2013
- [15] A. Tenhunen, T. Benedetti, T.P. Holopainen, A. Arkkio,” *Electromagnetic forces in cage induction motors with rotor eccentricity*,” Proceedings of IEMDC'03, Vol.3, pp 1616-1622, Madison , WI , USA, 1-4 June 2003.
- [16] Ehsan Tarkesh Esfahan, Shaocheng Wang, and V. Sundararajan, “*Multisensor Wireless System for Eccentricity and Bearing Fault Detection in Induction Motors*”. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 19, No. 3, June 2014
- [17] S. Nandi, H. Toliyat, and X. Li, “*Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors—A review*,” IEEE Trans. Energy Convers., vol. 20, no. 4, pp. 719–729, Dec. 2005

- [18] Rodríguez Irahis dan Alves Roberto, “*Bearing Damage Detection of the Induction Motors using Current Analysis*”, Universidad de Carabobo, Bárbula Edo. Carabobo, Venezuela, 2006
- [19] Benbouzid, Mohamed El Hachemi, “*A Review of Induction Motors Signature Analysis as a Medium for Faults Detection*”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 47, No. 5, Oktober, 2000
- [20] Hayes, Monson H., “*Schaum's Outline of Theory and Problems of Digital Signal Processing*”, McGraw-Hill Companies, USA, 1999

Halaman ini sengaja dikosongkan

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama lengkap Belly Yan Dewantara, lahir di Dusun Pasar Daya, Desa Talango, Kabupaten Sumenep, Madura pada tanggal 12 Januari 1993 merupakan anak kedua dari tiga bersaudara. Penulis lahir dari pasangan suami istri Bapak Muhammad Abdurrahman dan Ibu Asta Ningsih.

Penulis menyelesaikan pendidikan dasar di SDN II Talango – Sumenep lulus tahun 2004, SMP Negeri 1 Kalianget – Sumenep lulus tahun 2007, SMA Negeri 1 Sumenep lulus pada tahun 2010, Sarjana Strata 1 di Universitas Hang Tuah Surabaya, Fakultas Teknik dan Ilmu Kelautan, Jurusan Teknik Elektro lulus tahun 2014, dan pada tahun 2015 penulis melanjutkan pendidikan ke jenjang Pasca Sarjana di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, Fakultas Teknik Elektro, Jurusan Teknik Elektro, Bidang Keahlian Teknik Sistem Tenaga dan lulus tahun 2017. Penulis dapat dihubungi melalui email *bellyyandewantara@yahoo.com*.

Halaman ini sengaja dikosongkan