

**TUGAS AKHIR- TM184835**

**STUDI KARAKTERISTIK PENGARUH KONFIGURASI  
*POLE*, BESAR ARUS, *ECCENTRICITY* DAN JUMLAH  
LILITAN TERHADAP GAYA *RADIAL NON-  
PERMANENT MAGNETIC BEARING***

**FARIZAL WAHYU TRIROMDHONI**

**NRP. 0211184000022**

**Dosen Pembimbing**

**Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA**

**Program Studi S-1 Teknik Mesin**

**Departemen Teknik Mesin**

**Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem**

**INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER**

**Surabaya**

**2022**



# **STUDI KARAKTERISTIK PENGARUH KONFIGURASI POLE, BESAR ARUS, *ECCENTRICITY* DAN JUMLAH LILITAN TERHADAP GAYA RADIAL NON-PERMANENT MAGNETIC BEARING**

**FARIZAL WAHYU TRIROMDHONI**

**NRP. 0211184000022**

**Dosen Pembimbing**

**Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA**

**Program Studi S-1 Teknik Mesin**

Departemen Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

Surabaya

2022

**FINAL PROJECT - TM184835**

**CHARACTERISTICS STUDY OF THE EFFECT OF POLE  
CONFIGURATION, CURRENT, ECCENTRICITY AND COIL ON RADIAL  
FORCE OF NON-PERMANENT MAGNETIC BEARING**

**FARIZAL WAHYU TRIROMDHONI**

0211184000022

Advisor

**Dr.Ir.Agus Sigit Pramono DEA**

19650810 199102 1 001

**Undergraduate Study Program of Mechanical Engineering**

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022



## HALAMAN PENGESAHAN

### STUDI KARAKTERISTIK PENGARUH KONFIGURASI *POLE*, BESAR ARUS, *ECCENTRICITY* DAN JUMLAH LILITAN TERHADAP GAYA RADIAL NON-PERMANENT MAGNETIC BEARING

#### TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin  
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

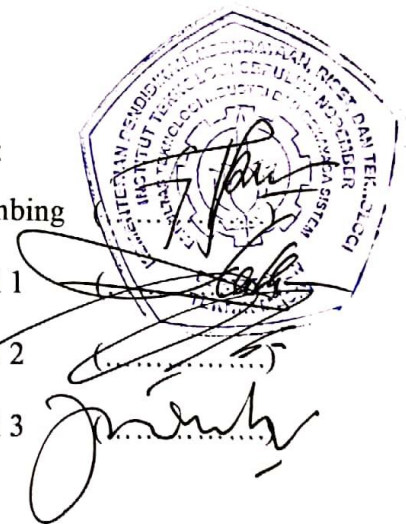
Oleh:

**Farizal Wahyu Triromdhoni**

NRP. 0211184000022

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

- |                                       |            |
|---------------------------------------|------------|
| 1. Dr.Ir. Agus Sigit Pramono DEA      | Pembimbing |
| 2. Ir. Yusuf Kaelani, M. Sc. E.       | Penguji 1  |
| 3. Dr.Eng. Yohanes, S.T., M.Sc.       | Penguji 2  |
| 4. Ir.Julendra Bambang Ariadteja, MT. | Penguji 3  |



**SURABAYA**

**Juli, 2022**

## APPROVAL SHEET

### CHARACTERISTICS STUDY OF THE EFFECT OF POLE CONFIGURATION, CURRENT, ECCENTRICITY AND COIL ON RADIAL FORCE OF NON- PERMANENT MAGNETIC BEARING

#### FINAL PROJECT

Submitted to fulfill one of the requirement  
For obtaining a Bachelor of Engineering at  
Undergraduate Study Program Of Mechanical Engineering  
Department of Mechanical Engineering  
Faculty of industrial Technology and Systems Engineering  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

**By : Farizal Wahyu Triromdhoni**

NRP. 0211184000022

Approved by Final Project Examiner Team :

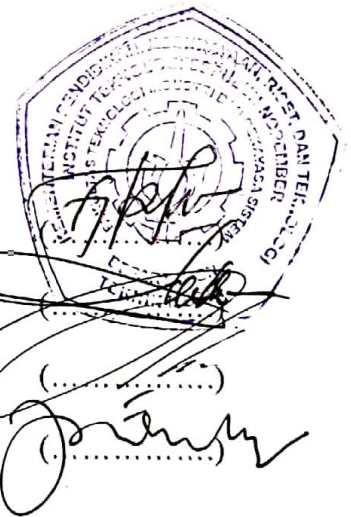
1. Dr.Ir. Agus Sigit Pramono DEA
2. Ir. Yusuf Kaelani, M. Sc. E.
3. Dr.Eng. Yohanes, S.T., M.Sc.
4. Ir.Julendra Bambang Ariadteja, MT.

Adviser

Examiner 1

Examiner 2 (.....)

Examiner 3 (.....)



**SURABAYA**

**July, 2022**

## PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama mahasiswa / NRP : Farizal Wahyu Triromdhoni/ 0211184000022

Departemen : Teknik Mesin

Dosen pembimbing / NIP : Dr.Ir. Agus Sigit Pramono DEA / 196508101991021001

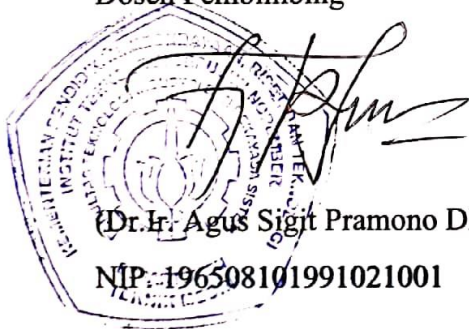
dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “Studi Karakteristik Pengaruh Konfigurasi Pole, Besar Arus, Eccentricity dan Jumlah Lilitan Terhadap Gaya Radial Non-Permanent Magnetic Bearing” adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 29 Juli 2022

Mengetahui

Dosen Pembimbing



(Dr. Ir. Agus Sigit Pramono DEA)

NIP. 196508101991021001

Mahasiswa,

A handwritten signature in black ink, which appears to be 'Farizal Wahyu Triromdhoni'.

(Farizal Wahyu Triromdhoni)

NRP. 0211184000022

## STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

Name of student / NRP : Farizal Wahyu Triromdhoni / 0211184000022  
Department : Mechanical Engineering  
Advisor / NIP : Dr.Ir. Agus Sigit Pramono DEA / 196508101991021001


Hereby declare that the Final Project with the title of “ Characteristics Study Of The Effect Of Pole Configuration, Current, Eccentricity and Coil on Radial Force of Non-Permanent Magnetic Bearing“ is the result of my own work, is original, and is written by following the rules of scientific writing.

If in the future there is a discrepancy with this statement, then I am willing to accept sanctions in accordance with the provisions that apply at Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 29 July 2022

Acknowledged

Advisor



(Dr. Ir. Agus Sigit Pramono DEA)  
NIP. 196508101991021001

Student,



(Farizal Wahyu Triromdhoni)

NRP. 0211184000022



# STUDI KARAKTERISTIK PENGARUH KONFIGURASI *POLE*, BESAR ARUS, *ECCENTRICITY* DAN JUMLAH LILITAN TERHADAP GAYA RADIAL NON-PERMANENT MAGNETIC BEARING

Nama Mahasiswa :Farizal Wahyu Triromdhoni  
NRP :0211184000022  
Dosen Pembimbing :Dr. Ir. Agus Sigit Pramano, DEA  
Departemen :Teknik Mesin

## ABSTRAK

*Magnetic bearing* memang mempunyai banyak keunggulan dibandingkan *bearing* konvensional, yaitu kemampuan dalam mengurangi gaya hambat terhadap gesekan. Dalam perkembangannya, *magnetic bearing* dibagi menjadi dua jenis yaitu *passive magnetic bearing* dan *active magnetic bearing*. Pada tipe *passive magnetic bearing* beban yang dapat ditumpu tidak dapat bervariasi, bergantung pada kemampuan material magnet yang dipilih. Untuk menghasilkan gaya yang besar maka harus memperbesar dimensi dari magnet tersebut atau memilih magnet yang berbeda. Sehingga penelitian *non-permanent magnetic bearing* menjadi alternatif guna meneliti parameter-parameter yang mempengaruhi besar gaya radialnya. *Active magnetic bearing* memanfaatkan induksi magnetik yang timbul akibat adanya arus listrik yang mengalir pada kumparan sehingga mempunyai fungsi yang sama dengan *passive magnetic bearing*.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui beban maksimal yang mampu diterima pada AMB dan mengetahui pengaruh dari setiap variasi penelitian terhadap kemampuan angkat beban *active magnetic bearing*. Desain dan simulasi desain dilakukan dengan menggunakan software *Ansys Electronic Maxwell 3D 19R1*. Simulasi dilakukan dengan tiga variasi, yaitu variasi besar arus, jumlah kutub, dan jumlah kumparan. Variasi penelitian dilakukan guna meneliti pengaruh ketiga variasi tersebut terhadap beban maksimal yang mampu diterima oleh *active magnetic bearing*. Variasi *eccentricity* dilakukan dengan besar *eccentricity* 1.2, 1.3 dan 1.4, menyesuaikan batasan ukuran *bearing* yang digunakan. Variasi besar arus dilakukan dengan rentang arus 2-3 A, menyesuaikan batasan lilitan yang digunakan. Variasi kumparan dilakukan dengan rentang 110, 130 dan 150 lilitan.

Eksperimen dilakukan dengan beberapa tahapan yakni instalasi peralatan dan objek sesuai dengan eksperimen, pengambilan data berupa besar gaya radial pada tiap variasi, dan pengujian dengan empat variasi pengaktifan *pole* untuk mendapatkan gaya radial maksimal masing-masing variasi tersebut. Dari analisis yang dilakukan didapatkan hasil perbandingan error untuk simulasi dan eksperimen untuk masing-masing variasi sebesar 1,62%-13% ; 3,8%-8,17% ; 1,57%-18% ; 1,03%-15,2%.

**Kata kunci : Besar Arus, *Eccentricity*, Kumparan, Gaya Radial.**

# **CHARACTERISTICS STUDY OF THE EFFECT OF POLE CONFIGURATION, CURRENT, ECCENTRICITY AND COIL ON RADIAL FORCE OF NON-PERMANENT MAGNETIC BEARING**

**Student Name** :Farizal Wahyu Triromdhoni  
**Student ID** :0211184000022  
**Academic Advisor** :Dr. Ir. Agus Sigit Pramano, DEA  
**Departemen** :Mechanical Engineering

## **ABSTRACT**

Magnetic bearing is divided into two types, passive magnetic bearing and active magnetic bearing. In passive magnetic bearing the load that can be supported cannot be varied, but depends on the selected magnetic material. To produce a large force, it must enlarge the dimensions of the permanent magnet, but we know that bearing is a small component in the engine element. Therefore another type of magnetic bearing research is carried out, that is active magnetic bearing to examine the parameters that affect the radial force of the active magnetic bearing. Active magnetic bearing utilize magnetic induction that arising from a flowing electric current in the coil, so that they can replace the function of permanent magnet in passive magnetic bearing. This research is expected to improve the performance of magnetic bearing.

Research on active magnetic bearing was carried out to analys the maximum load that can be accepted on active magnetic bearing and the effect of each variations on the carrying load capacity on active magnetic bearing. Then do the comparasion between carrying load capacity on active magnetic bearing and mechanical bearing of the same size so Design making and design simulation is done using Ansys Electronic Maxwell 3D 19R1. Simulation are carried out to examine the effect of variations made on active magnetic bearing, namely coil current, number of coil, and number of pole, and coil current. Variations in this study were carried out to analysis the effect of these three variations on the maximum load of active magnetic bearing. Variation of number poles is done by magnetic bearing configuration of 6 poles, 8 poles, and 10 poles, adjusting the size limitation od the bearing used The variation of the coil current is carried out in the 1 Ampere to 3 Ampere current range, adjusting the winding type that used. Variation of windings of coil per pole is 155,175 and 195.

The experiment was carried out in several stages, namely the installation of equipment and objects in accordance with the experiment, data collection in the form of the radial force for each variation, and testing with four variations of pole activation to obtain the maximum radial force for each of these variations. From the analysis carried out, the results of the comparison of errors for simulation and experiment for each variation are 1,62%-13% ; 3,8%-8,17% ; 1,57%-18% ; 1,03%-15,2%.

**Key words : Coil Current, Number of Poles, Number of Coil, Radial Force**

## KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas rahmat-Nya penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini. Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi persyaratan kelulusan pendidikan Sarjana S-1 di Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Penyusunan tugas akhir ini dapat terlaksana dengan baik atas bantuan dan kerjasama dari berbagai pihak. Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan Laporan Tugas Akhir ini bukan semata-mata atas kemampuan penulis sendiri. Untuk itu, izinkan penulis untuk mengucapkan terima kasih dan memberikan rasa hormat atas segala bantuan yang telah diberikan kepada penulis, baik itu secara langsung dan tidak langsung, yaitu kepada:

1. Almarhumah ibu Indarti dan Bapak Joko Nyuwito selaku orang tua penulis serta Fareza Ditya Aryanto dan Fitria Yuni Astuti selaku kakak penulis yang selalu memberikan doa-doanya, dan menjadi motivasi tersendiri bagi penulis untuk menyelesaikan tugas akhir dan perkuliahan ini.
2. Bapak Dr.Ir. Agus Sigit Pramono DEA selaku dosen pembimbing penulis yang telah membimbing serta memberikan dukungan dan nasihat selama rangkaian pengerjaan tugas akhir ini.
3. Bapak Ir. Yusuf Kaelani, M.Sc.E, Bapak Dr. Eng. Yohanes, S.T., M.Sc. dan Bapak Ir. Julendra B. Ariatedja, M.T. selaku dosen penguji seminar yang telah memberikan saran dan arahan kepada penulis dalam menyempurnakan tugas akhir ini.
4. Bapak Bambang Pramujati, Ir. M.Sc., Eng. PhD selaku dosen wali penulis yang telah memberikan nasihat sejak awal perkuliahan hingga akhir perkuliahan.
5. Seluruh teman satu bimbingan tugas akhir (Shiddiq, Garin, Huda, Nauval, Syarif) yang telah membantu, menemani, serta membagi ilmunya kepada penulis selama pengerjaan tugas akhir ini.
6. Kang mat, Kang Muchtar, Pak faishal, Mas arip(MY), De Nuk, cak Hadi, mbak rizqa, aqilla, leni, sogol dan mamat, yang telah membantu penulis dalam pengerjaan TA.
7. Semua pihak yang tidak dapat penulis cantumkan satu persatu.

Semoga seluruh kebaikan yang telah diberikan dapat bermanfaat dan mendapat balasan dari Allah SWT. Penulis menyadari dalam bahwa masih terdapat kekurangan dalam penulisan laporan tugas akhir ini. Untuk itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun demi kesempurnaan laporan tugas akhir ini. Semoga laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi penulis dan pembaca dalam pengembangan kemajuan teknologi di Indonesia. Akhir kata, penulis memohon maaf atas kekurangannya dan mengucapkan terima kasih.

Surabaya, Juli 2022

**Farizal Wahyu Triromdhoni**

**NRP. 0211184000022**



## DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN .....	i
ABSTRAK.....	v
ABSTRACT .....	vi
KATA PENGANTAR.....	vii
DAFTAR ISI .....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR TABEL .....	xv
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1 Latar Belakang Permasalahan.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	1
1.3 Tujuan .....	2
1.4 Manfaat .....	2
1.5 Batasan Masalah .....	2
1.6 Sistematika Penulisan .....	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI.....	4
2.1 Bearing.....	4
2.2 Magnetic Bearing.....	6
2.3 Active Magnetic Bearing (AMB) .....	7
2.4 Dasar Perhitungan Radial Active Magnetic Bearing .....	7
2.4.1 Fluks Magnetik .....	7
2.4.2 Induktansi L pada Sirkuit Magnetik .....	9
2.4.3 Gaya Radial <i>Active Magnetic Bearing</i> untuk SatuPasang Kutub Elektromagnet .....	9
2.4.4 Gaya Radial <i>Active Magnetic Bearing</i> Saat Terjadi Pergeseran Rotor ( <i>Eccentricity</i> ) .....	10
2.5 Magnet .....	12
2.5.1 <i>Soft Magnetic Material</i> .....	13
2.5.2 <i>Hard Magnetic Material</i> .....	15
2.6 Penelitian Terdahulu .....	15
BAB III METODOLOGI PENELITIAN .....	18
3.1 Diagram Alir Penelitian .....	18

3.1.1	Observasi Penelitian	19
3.1.2	Perumusan Masalah	20
3.1.3	Studi Literatur	20
3.1.4	Penentuan Data Awal	20
3.1.5	Desain 3D, Simulasi, dan Eksperimen	20
3.1.6	Validasi Simulasi	21
3.1.7	Simulasi FEM (Transient Solution)	21
3.1.8	Pengambilan dan Pengolahan Data	22
3.1.9	Analisa Data dan Pembahasan	22
3.1.10	Kesimpulan Penelitian	22
3.2	Diagram Alir Simulasi .....	22
3.2.1	<i>Input Model 3 Dimensi Desain</i>	24
3.2.2	<i>Assign Material</i>	25
3.2.3	<i>Assign Region</i>	26
3.2.4	<i>Assign Mesh Operation</i>	26
3.2.5	<i>Setup Analysis</i>	27
3.2.6	<i>Iterate</i>	27
3.2.7	<i>Menentukan Solution Type</i>	28
3.2.8	<i>Create Band Region</i>	28
3.2.9	<i>Assign Motion</i>	28
3.2.10	<i>Menentukan Excitation</i>	29
3.2.11	<i>Assign Parameter</i>	30
3.2.12	<i>Menentukan Analysis Setup</i>	30
3.2.13	<i>Validation Check dan Analyze All</i>	30
3.2.14	<i>Create Quick Report</i>	31
3.3	Proses Eksperimen .....	31
3.3.1	Peralatan Eksperimen	31
3.3.2	Instalasi Peralatan	32
3.3.3	Langkah-Langkah Eksperimen	33
3.3.4	Diagram Alir Proses Eksperimen	37
3.3.5	Pengambilan Data Hasil Eksperimen dan Pengolahan Hasil Eksperimen	38
BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN .....		39
4.1	Analisis Hasil Eksperimen .....	39
4.2	Analisis Gaya Radial Hasil Simulasi Transient .....	40

4.2.1	Analisis Pengaruh Variasi <i>Eccentricity</i>	41
4.2.2	Analisis Pengaruh Jumlah Lilitan pada Gaya Radial	46
4.2.3	Analisis Pengaruh Kuat Arus pada Gaya Radial	50
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....		56
5.1	Kesimpulan .....	56
5.2	Saran .....	56
DAFTAR PUSTAKA.....		56
BIODATA PENULIS .....		58

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Tipe dari Radial Bearing (sumber : Kacz, 2020).....	4
<b>Gambar 2.2</b> Jenis – jenis ball bearing. (a) Deep groove ball bearing. (b) Angular contact ball bearing. (c) Self aligning ball bearing. (d) Thrust ball bearing. ....	4
<b>Gambar 2.3</b> <i>Free Body Diagram</i> Jurnal Bearing .....	5
<b>Gambar 2.4</b> Sudut pada jurnal bearing .....	6
Gambar 2.5 (a) Passive magnetic bearing.(b) Active magnetic bearing. ....	6
Gambar 2.6 (a) Medan magnet konduktor. (b) <i>Air coil</i> . ....	8
Gambar 2.7 (a) Gaya. (b) Geometri.....	9
Gambar 2.8 <i>Radial active magnetic bearing</i> dengan pergeseran rotor. ....	10
Gambar 2.9 <i>Air gap</i> pada satu pasang kutub elektromagnetik .....	11
<b>Gambar 2.10</b> Ilustrasi perbandingan ukuran magnet dan kumparan. ....	12
<b>Gambar 2.11</b> (a) Tipikal kurva histerisis soft ferromagnetic. (b) Hard ferromagnetic .....	13
<b>Gambar 2.12</b> Perbandingan antar soft magnetic material .....	14
Gambar 2.13 (a) Kontur <i>magnetic flux</i> . (b) Distribusi vektor <i>magnetic flux</i> .....	16
Gambar 2.14 (a) Rancangan peralatan eksperimen. (b) perbandingan gaya radial hasil simulasi dengan eksperimen.....	16
Gambar 2.15 Gaya elektromagnet ketika posisi rotor $337,5^\circ$ dan <i>eccentricity</i> yang berbeda-beda.....	16
Gambar 2.II-16 Pergeseran rotor ketika posisi rotor $337,5^\circ$ .....	17
Gambar 2.17 Gaya elektromagnet ketika posisi rotor $337,5^\circ$ dan <i>eccentricity</i> yang berbeda-beda.....	17
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian .....	19
Gambar 3.2 Pembuatan sketsa 2 dimensi rotor dan stator <i>active magnetic bearing</i> .....	20
<b>Gambar 3.3</b> Sketsa 2 dimensi rotor dan stator <i>active magnetic bearing</i> .....	21
<b>Gambar 3.4</b> Sketsa 3D <i>active magnetic bearing</i> .....	21
Gambar 3.5 Diagram Alir Simulasi .....	24
Gambar 3.6 Model 3D desain <i>radial active magnetic bearing</i> .....	24
Gambar 3.7 <i>Properties</i> material rotor dan stator .....	26
Gambar 3.8 <i>Area region</i> yang dipilih.....	26
Gambar 3.9 <i>Mesh operation</i> .....	26
Gambar 3.10 Pengaturan <i>solve setup</i> .....	27



Gambar 3.11 Hasil analisis <i>mesh</i> .....	27
Gambar 3.12 <i>Transient solution type</i> .....	28
Gambar 3.13 <i>Band region</i> .....	28
Gambar 3.14 <i>Setting motion rotor</i> .....	29
Gambar 3.15 (a) Eksitasi <i>coil terminal</i> . (b) <i>Add winding</i> .....	29
Gambar 3.16 <i>Assign force</i> .....	30
<b>Gambar 3.17</b> (a) <i>Solve setup general</i> . (b) <i>Solve setup save field</i> .....	30
Gambar 3.18 Validation Check .....	31
Gambar 3.19 (a) Nilai dan arah vektor <i>flux density</i> . (b) Gaya radial AMB .....	31
<b>Gambar 3.20</b> Installasi Peralatan Pengujian .....	32
<b>Gambar 3.21</b> Magnetic Bearing .....	32
<b>Gambar 3.22</b> Desain Parameter .....	32
<b>Gambar 3.23</b> Gambar Teknik .....	33
<b>Gambar 3.24</b> Desain Geometri Alat 3D.....	34
<b>Gambar 3.25</b> Desain rancangan bagian-bagian alat uji eksperimen (a) <i>Subassembly t-slot aluminium profile 4040 dan 4080</i> (b) <i>Shaft</i> (c) Dudukan Poros (d) Beban.....	35
<b>Gambar 3.26</b> Assembly komponen-komponen eksperimen .....	36
<b>Gambar 3.26</b> Diagram Alir Eksperimen .....	38
Gambar 4.1 Konfigurasi desain <i>radial active magnetic bearing</i> .....	41
Gambar 4.2 Grafik perbandingan gaya radial dengan variasi <i>eccentricity rotor</i> pada AMB 8 kutub .....	42
Gambar 4.3 Hasil simulasi <i>radial active magnetic bearing</i> 8 kutub dengan rasio <i>eccentricity</i> 1,2. (a) Distribusi <i>flux density</i> . (b) Arah vektor <i>flux</i> .....	43
Gambar 4.4 Hasil simulasi <i>radial active magnetic bearing</i> 8 kutub dengan rasio <i>eccentricity</i> 1,3. (a) Distribusi <i>flux density</i> . (b) Arah vektor <i>flux density</i> .....	44
Gambar 4.5 Hasil simulasi <i>radial active magnetic bearing</i> 8 kutub dengan rasio <i>eccentricity</i> 1,4. (a) Distribusi <i>flux density</i> . (b) Arah vektor <i>flux density</i> .....	45
Gambar 4.6 Grafik pengaruh variasi jumlah lilitan terhadap gaya radial pada arus 3 A .....	47
Gambar 4.7 Hasil simulasi <i>radial active magnetic bearing</i> 8 kutub dengan 110 lilitan (a) Distribusi <i>flux density</i> . (b) Arah vektor <i>flux density</i> .....	48
Gambar 4.8 Hasil simulasi <i>radial active magnetic bearing</i> 8 kutub dengan 130 lilitan (a) Distribusi <i>flux density</i> . (b) Arah vektor <i>flux density</i> .....	49

Gambar 4.9 Hasil simulasi <i>radial active magnetic bearing</i> 8 kutub dengan 150 lilitan (a) Distribusi <i>flux density</i> . (b) Arah vektor <i>flux density</i> .....	49
Gambar 4.10 Grafik pengaruh variasi besar arus terhadap gaya radial pada AMB 8 kutub ....	51
Gambar 4.11 Hasil simulasi radial active magnetiv bearing 8 kutub dengan nilai arus 2 A (a) Distribusi <i>flux density</i> . (b) Arah vektor <i>flux density</i> .....	52
Gambar 4.12 Hasil simulasi radial active magnetiv bearing 8 kutub dengan nilai arus 2,5 A (a) Distribusi <i>flux density</i> . (b) Arah vektor <i>flux density</i> .....	53
Gambar 4.13 Hasil simulasi radial active magnetiv bearing 8 kutub dengan nilai arus 3 A (a) Distribusi <i>flux density</i> . (b) Arah vektor <i>flux density</i> .....	54

## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Tabel data variasi simulasi .....	24
Tabel 3.2 Tabel data variasi simulasi .....	25
Tabel 3.3 Tabel data variasi besar arus dengan eccentricity rasio yang berbeda .....	25
Tabel 3.4 Tabel Lembar Data Eksperimen .....	38
Tabel 4.1 Data Hasil Simulasi dan Eksperimen .....	39



# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang Permasalahan

Sejarah mencatat, pada tahun 1954 merupakan awal mula berkembangnya *Active Magnetic Bearing (AMB)* di kalangan ilmuwan Amerika Serikat. AMB yang pertama kali diaplikasikan secara komersial adalah pada mesin turbo untuk NOVA Gas Transmission Ltd. (NGTL) di Alberta, Canada yang bisa mengurangi fire hazard allowing a substantial reduction. Kesuksesan NGTL ini membuat mereka menjadi pionier dalam riset dan pengembangan sistem kontrol digital magnetic bearing sebagai pengganti sistem kontrol analog yang dibuat oleh American Company Magnetic Bearings Inc. (MBI) (Waludjojati, 2009). *Active Magnetic Bearing* berfungsi menumpu rotor seperti bearing pada umumnya, namun metode operasi dan konstruksinya berbeda. AMB adalah sistem tanpa kontak (contactless) dan sangat bermanfaat untuk penggunaan dengan putaran tinggi, yaitu mencapai lebih dari 20.000 RPM (F, Michael 2013).

Dalam penerapannya, *bearing* konvensional masih memiliki beberapa kekurangan, yaitu masih terdapat gesekan yang menghambat pergerakan poros dan dapat mengakibatkan keausan sehingga menyebabkan kerusakan pada *bearing* jika tidak dilakukan perawatan secara rutin. Meninjau permasalahan tersebut maka dilakukan penelitian mengenai *magnetic bearing*.

Kelebihan *magnetic bearing* tidak memiliki gesekan, tidak membutuhkan pelumasan, dan memiliki kontrol posisi yang presisi serta baik dalam meredam getaran (Schweitzer, G., Maslen, 2009a). *Magnetic bearing* dibagi menjadi dua jenis yaitu *passive magnetic bearing* dan *active magnetic bearing*. Pada tipe *passive magnetic bearing* beban yang dapat ditumpu tidak dapat bervariasi, bergantung pada kemampuan material magnet yang dipilih. Untuk menghasilkan gaya yang besar maka harus memperbesar dimensi dari magnet permanen tersebut, yang mana bearing merupakan komponen yang cukup kecil dalam elemen mesin (Iffagano, 2020).

Oleh karena itu, penulis ingin melakukan penelitian mengenai *radial active magnetic bearing* guna meneliti parameter-parameter yang mempengaruhi besar dari gaya radial atau gaya angkat *bearing*. Penelitian ini dilakukan untuk merancang sebuah *magnetic bearing* untuk dibandingkan dengan *insert bearing*. Penelitian diawali dengan perancangan *radial active magnetic bearing* dengan dimensi yang mendekati dengan *bearing* tersebut menggunakan analisa metode elemen hingga (FEM) pada *software* Ansys Electronics Maxwell 3D 19R1.

### 1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah yang diangkat berdasarkan latar belakang tersebut adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh konfigurasi pengaktifan pole terhadap Gaya radial yang di hasilkan melalui *finite element method (FEM)* dan pada eksperimen?
2. Bagaimana pengaruh besar arus yang digunakan terhadap gaya radial yang dihasilkan?
3. Bagaimana pengaruh *eccentricity* yang digunakan terhadap gaya radial yang dihasilkan?

4. Bagaimana pengaruh jumlah lilitan pada kumparan yang digunakan terhadap gaya radial yang dihasilkan?

### 1.3 Tujuan

Tujuan yang ingin dicapai dalam pelaksanaan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Untuk mengetahui pengaruh konfigurasi *pole* terhadap Gaya radial yang di hasilkan melalui *finite element method* (FEM) dan pada eksperimen.
2. Untuk mengetahui pengaruh besar arus yang digunakan terhadap gaya radial yang dihasilkan.
3. Untuk mengetahui pengaruh *eccentricity* yang digunakan terhadap gaya radial yang dihasilkan.
4. Untuk mengetahui pengaruh jumlah lilitan pada kumparan yang digunakan terhadap gaya radial yang dihasilkan.

### 1.4 Manfaat

Penelitian ini harapannya dapat berguna bagi pembaca yang tertarik dengan topik *armour unit*. Adapun manfaat dari penelitian tugas akhir ini adalah Manfaat yang diharapkan dari penelitian tesis ini adalah menunjukkan probabilitas dari *radial active magnetic bearing* sebagai alternatif penggunaan sebuah elemen mesin yaitu *angular contact bearing* dengan meminimalisasi kekurangan yang ada pada *mechanical bearing* konvensional.

### 1.5 Batasan Masalah

Adapun batasan permasalahan yang terdapat pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Konfigurasi kutub stator yaitu N-S-N-S-N-S-N-S-N-S
2. Material stator dan rotor menggunakan *Carbon Steel S45C*
3. Material lilitan menggunakan Copper
4. Dimensi *magnetic bearing* mengikuti dimensi produk
5. Pengaruh perubahan temperatur diabaikan
6. Luas penampang kutub 352,7 mm<sup>2</sup>
7. Uji eksperimen hanya dilakukan dengan pembebanan statis searah gravitasi

### 1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan laporan dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

#### **BAB I Pendahuluan**

Bab ini berisi mengenai hal umum yang berhubungan dengan topik yang diangkat dalam tugas akhir. Pada bab ini berisi mengenai latar belakang permasalahan mengenai pengangkatan topik pada tugas akhir. Selain itu, pada bab ini juga berisi mengenai tujuan dan manfaat yang akan diperoleh dalam tugas akhir ini, batasan masalah yang sesuai dengan permasalahan yang diangkat, serta sistematika penulisan dari tugas akhir ini.

#### **BAB II Tinjauan Pustaka dan Dasar Teori**

Bab ini berisi penjelasan singkat yang berkaitan dengan penelitian yang sudah dilakukan sebelumnya dan akan dijadikan sebagai acuan dalam pengerjaan tugas akhir ini. Pada bab ini juga menjelaskan mengenai teori-teori yang berasal dari literatur untuk menunjang penelitian.

#### **BAB III Metodologi Penelitian**

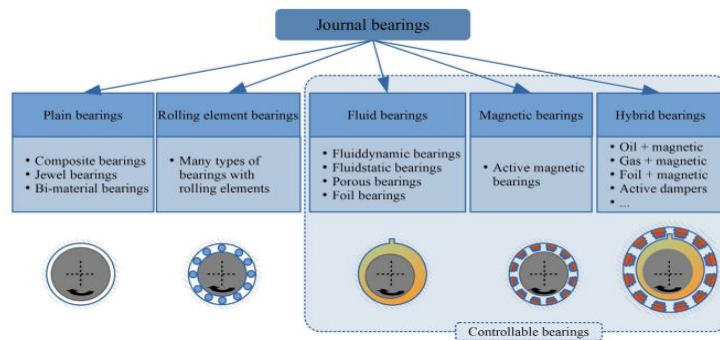
Bab ini menjelaskan mengenai langkah-langkah pengerjaan tugas akhir. Pada bab ini juga dilengkapi dengan diagram alir penelitian untuk menggambarkan urutan pelaksanaan penelitian. Dalam bab ini juga dipaparkan *gant chart* terkait jadwal pelaksanaan tugas akhir.

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai beberapa studi literatur serta referensi yang digunakan selama penelitian sebagai dasaran pengerjaan penelitian yang berasal dari jurnal-jurnal, buku, dan sumber lainnya.

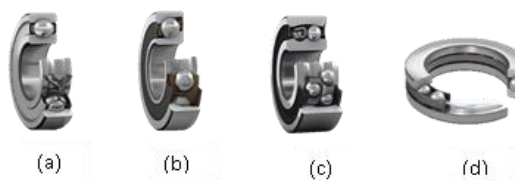
### 2.1 Bearing

*Bearing* atau bantalan adalah komponen mesin yang bertujuan untuk mempermudah gerakan dalam arah yang diinginkan (Kacz, 2020). Bantalan berfungsi untuk menumpu poros yang berotasi sehingga dapat mengurangi gesekan antara dua elemen mesin. Sehingga poros dapat berputar secara maksimal. Beberapa jenis bearing yang dapat dikategorikan menjadi 2 yaitu dapat dan tidak dapat dikontrol:



**Gambar 2.1** Tipe dari Radial Bearing (sumber : Kacz, 2020)

Secara umum, *bearing* dibagi menjadi dua tipe, yaitu *ball bearing* dan *roller bearing* (Iffagano, 2020). *Ball bearing* memanfaatkan bola – bola baja sebagai media gesekan antara komponen yang diam dengan komponen yang bergerak. *Ball bearing* terbagi menjadi beberapa tipe.



**Gambar 2.2** Jenis – jenis ball bearing. (a) Deep groove ball bearing. (b) Angular contact ball bearing. (c) Self aligning ball bearing. (d) Thrust ball bearing. (sumber: Iffagano, 2020)

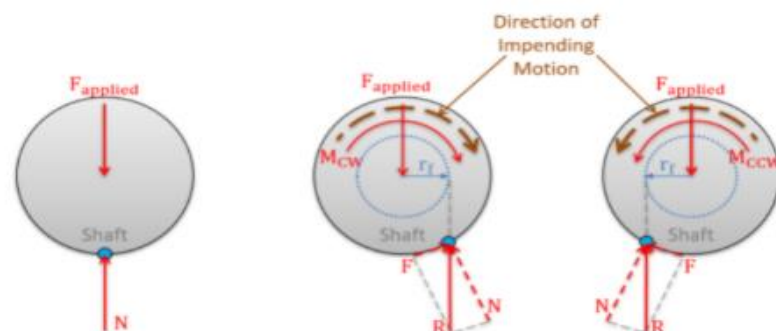
*Deep Grove Ball Bearing* merupakan jenis *ball bearing* yang paling sering dijumpai, biasa digunakan dalam perakitan otomotif. *Bearing* tipe ini meskipun dirancang untuk menerima beban radial, alur bola yang dalam memungkinkannya untuk menerima beban aksial yang cukup besar. Bearing ini memiliki 2 tipe berdasarkan jumlah *raceway* nya, yaitu *Single Deep Groove Ball Bearing* yang memiliki satu *raceway* dan *Double Deep Groove Ball Bearing* yang memiliki dua *raceway*. *Double Deep Groove Ball Bearing* dengan dua *raceway* membuat jumlah bola baja yang ada pada *raceway* lebih banyak dibandingkan dengan tipe *single row*



pada ukuran yang sama, dengan semakin banyak bola baja maka pembagian beban pada setiap bola semakin kecil. Dengan demikian, pada ukuran yang sama *Double Deep Groove Ball Bearing* memiliki kapasitas angkut beban yang lebih tinggi. Selain dapat menahan beban yang tinggi, sesuai dengan SKF (Svenska Kullagerfabriken) *Catalogue* tipe ini juga tahan bekerja pada suhu tinggi dan memiliki tingkat kebisingan yang rendah. *Angular Contact Bearing* dirancang untuk menerima beban gabungan yaitu beban aksial dan beban radial, tetapi untuk arah aksial hanya dapat menahan beban dalam satu arah saja. Salah satu sisi pada *bearing* ini dibuat kontak sudut yang lebih tinggi dibanding *bearing* pada umumnya agar dapat mengakomodasi beban aksial yang lebih besar. *Self Aligning Ball Bearing* memiliki dua baris bola baja. *Bearing* ini memiliki kelebihan dimana masih bisa berputar walaupun pemasangannya tidak benar-benar presisi antara *bearing* kiri dan kanan poros, sehingga mampu menahan defleksi berlebih pada poros. Karena sudut kontak pada bearing jenis ini kecil jadi kurang sesuai untuk menahan beban aksial. *Thrust Ball Bearing* dirancang khusus untuk menahan beban aksial dan tidak direkomendasikan untuk dikenai beban radial.

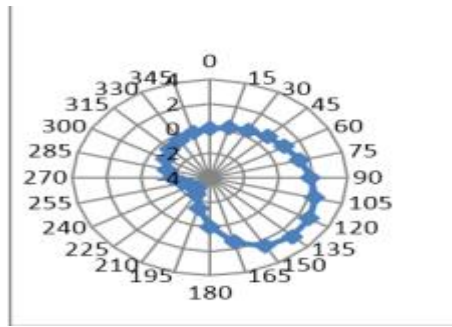
*Cylindrical Roller Bearing* memiliki kapasitas beban radial yang tinggi dan cocok untuk bekerja pada putaran tinggi. *Needle Roller Bearing* merupakan bearing dengan diameter roller yang kecil. *Bearing* jenis ini dirancang untuk dapat menahan beban radial atau beban aksial, tergantung pada arah beban yang didukung. *Spherical Roller Bearing* memiliki kemampuan pengangkutan beban yang tinggi, baik beban radial maupun beban aksial. *Bearing* jenis ini memiliki fungsi yang sama dengan *Self Aligning Ball Bearing* yaitu untuk mengimbangi tidak sejajar pada poros dengan rumahnya. *Tapered Roller Bearing* memiliki perakitan *roller* yang berbentuk mengerucut. Konstruksi *bearing* ini mampu mengakomodasi beban radial yang tinggi dan beban aksial dalam satu arah.

Selain jenis bearing diatas ada juga jenis journal bearing yang memiliki prinsip kerja yang hampir sama dengan *Active Magnetic Bearing (AMB)*. Journal bearing berdasarkan kemampuan menerima pembebanan juga dibagi menjadi dua yaitu *Radial bearing* dan *Thrust bearing*. Mekanisme kontak journal bearing yaitu terjadi proses slide (peluncuran) yang terjadi pada permukaan kontak antara elemen yang berputar dan elemen yang tetap. Berdasarkan prinsip operasi kerjanya, journal bearing dibagi menjadi dua yaitu bearing hidrodinamis dan bearing hidrostatis. Bearing hidrodinamis adalah ketika bearing menghasilkan film pelumas bertekanan dalam bearing tersebut untuk menopang beban akibat perputaran poros. Bearing hidrostatis juga menggunakan film pelumas bertekanan untuk menopang beban, namun tekanan ini disuplai dari sumber luar.



**Gambar 2.3** *Free Body Diagram Journal Bearing*

Pada jurnal bearing juga dipengaruhi akan sudut-sudut yang dapat menghasilkan distribusi pressure yang berbeda.



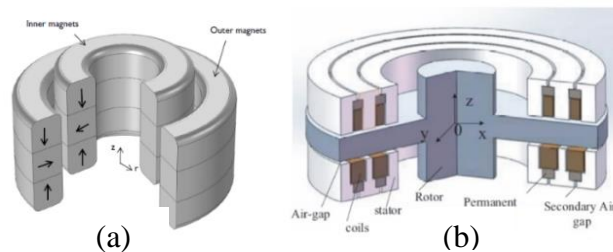
**Gambar 2.4** Sudut pada jurnal bearing

Pada gambar diatas jurnal bearing memiliki distribusi pressure terbesar terjadi pada saat membentuk sudut 135 derajat dan 210 derajat.

## 2.2 Magnetic Bearing

*Magnetic bearing* adalah suatu bearing yang mampu menumpu beban tanpa kontak fisik, melainkan menggunakan levitasi magnet. *Magnetic bearing* dapat melayangkan (levitasi) putaran poros atau pergerakan yang relative tanpa menimbulkan gesekan dan keausan. Penggunaan *magnetic bearing* semakin populer dan terus dikembangkan karena pada kenyataannya tidak ada kontak dan tidak ada gesekan sama sekali antara bagian yang berputar dan tumpuannya (Polajzer, B., et. al. 2010).

*Magnetic bearing* dibagi menjadi dua jenis yaitu aktif dan pasif. Pada *passive magnetic bearing*, umpan balik antara posisi rotor pada *radial clearance* dengan nilai gaya magnet tidak terjadi. Magnet permanen digunakan untuk menghasilkan gaya magnet pada jenis *magnetic bearing* ini. *Passive magnetic bearing* ini memiliki desain yang sederhana dan efisiensi yang lebih baik daripada *active magnetic bearing* karena tidak ada penyerapan energy selama *bearing* beroperasi. Selain itu, biaya yang relative rendah menjadi nilai lebih yang diperoleh jika menggunakan *passive magnetic bearing* ini. Pada *active magnetic bearing* selalu dijumpai penggunaan koil beserta sensor yang berfungsi untuk mengukur posisi rotor pada *radial clearance*, *controller* untuk mengubah informasi posisi rotor yang diperoleh sensor menjadi sinyal kemudi dan sebuah penguat sinyal (*amplifier*). Stabilisasi posisi rotor terjadi dikarenakan oleh perubahan nilai gaya magnet dengan mengubah nilai arus listrik yang mengalir melalui koil *magnetic bearing* sebagai umpan balik dari posisi rotor dan gaya magnet yang terdeteksi.



**Gambar 2.5** (a) Passive magnetic bearing.(b) Active magnetic bearing.  
(sumber:Iffagano,2020)

### 2.3 Active Magnetic Bearing (AMB)

Saat ini, AMB digunakan di perangkat yang kecepatan operasinya berkisar hingga 300.000 rpm. Dalam bantalan magnet aktif, pengontrol yang dirancang dengan baik memungkinkan untuk mencapai kecepatan pengenal secara stabil. Karena kurangnya kontak antara jurnal dan tutup bantalan pada bantalan magnetik aktif, tidak ada gesekan yang terjadi

Keuntungan menggunakan AMB antara lain (Kacz, 2020):

- Merupakan solusi alternatif dan solutif pengganti bearing konvensional
- Bantalan memanfaatkan levitasi magnetic, keseimbangan gaya tarik menarik magnet
- Tanpa pelumas, tidak menghasilkan polusi sehingga ramah lingkungan
- Kemampuan untuk beroperasi dalam ruang hampa, pada kecepatan tinggi, dalam suhu yang sangat rendah dan sangat tinggi dan dalam lingkungan asam atau basa yang berbahaya.
- Bantalan magnet aktif juga dapat digunakan sebagai sensor, aktuator, dan pembangkit getaran
- Pengukuran gaya dan perpindahan yang akurat dan pembangkitan gerakan poros aksial dan radial dimungkinkan. Oleh karena itu, AMB menawarkan kemungkinan aplikasi baru dalam mesin turbo.

Kelemahan menggunakan AMB antara lain (Kacz, 2020):

- Peredam getaran — lebih rendah daripada bantalan hidrostatis.
- Harga — biasanya jauh lebih tinggi dibandingkan dengan desain tradisional dan *Passive magnetic bearing*.
- Ukuran — mereka jauh lebih besar daripada bantalan non-kontak konvensional.
- Daya — kebutuhan akan pasokan listrik yang tidak terputus bahkan ketika tidak ada beban. Setelah listrik padam, rotor tidak akan berputar lagi dan akan mengendap pada kumparan, yang dapat merusaknya
- Desain kompleks — untuk melindungi dari kegagalan daya, bantalan bantu digunakan, yang membuat sistem lebih rumit.
- Suhu — peningkatan suhu menyebabkan penurunan nilai maksimum medan magnet (meskipun fakta ini bantalan ini juga digunakan pada suhu tinggi).
- Kebersihan — dalam hal peralatan mesin dan peralatan pemrosesan lainnya, gaya magnet yang dihasilkan menarik limbah baja (misalnya serpihan).

### 2.4 Dasar Perhitungan Radial Active Magnetic Bearing

Gerhard Schweitzer dalam bukunya “*Magnetic Bearing : Theory, Design, and Application to Rotating Machinery*” menyatakan formula perhitungan yang digunakan dalam perhitungan gaya radial *active magnetic bearing* adalah sebagai berikut (Schweitzer, G., Maslen, 2009b):

#### 2.4.1 Fluks Magnetik

Fluks magnet dapat divisualisasikan oleh garis – garis medan magnet. Kerapatan garis-garis ini mewakili modulus *flux density*, dan arah garis menunjukkan arah vektor *flux density*. Setiap baris bidang selalu tertutup.

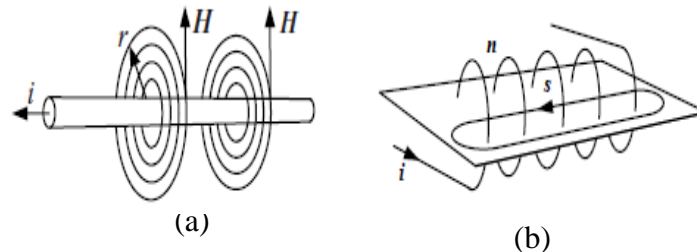
$$\Phi = \iint_A B \cdot dA \quad (2.1)$$

Dimana:

- $\Phi$  = Fluks magnetik total (Wb)
- B = Kerapatan fluks (Wb/m<sup>2</sup>)

$A$  = Luas permukaan yang dilewati medan magnet ( $m^2$ )

Medan magnet ( $H$ ) dapat dihasilkan dengan memindahkan muatan arus, medan listrik bolak-balik, dan magnet permanen. Suatu medan magnet ( $H$ ) dapat dihasilkan oleh arus listrik atau kutub magnet. Jika medan magnet dihasilkan oleh arus listrik, maka garis-garis medan magnet kontinu dan membentuk loop tertutup.



**Gambar 2.6** (a) Medan magnet konduktor. (b) *Air coil*.  
(sumber: Gerhard, 2009)

$$\oint H \cdot ds = i \quad (2.2)$$

Medan magnet  $H$  dan *flux density*  $B$  dihubungkan dengan *constitutive law*. Dengan  $\mu_0$  adalah permeabilitas magnetik ruang hampa dengan nilai  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$ . Permeabilitas relatif ( $\mu_r$ ) tergantung pada medium tempat medan magnet itu bekerja. Untuk ruang hampa  $\mu_r = 1$ .

$$B = \mu_0 \mu_r H \quad (2.3)$$

Dimana:

$B$  = Kerapatan fluks ( $\text{Wb/m}^2$ )

$\mu_0$  = Permeabilitas ruang hampa ( $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$ )

$\mu_r$  = Permeabilitas relatif ( $\text{N/A}^2$ )

$H$  = Kuat medan magnet ( $\text{A/m}$ )

Material dengan  $\mu_r < 1$  disebut *diamagnetic*, material ini mengurangi *flux density*. Material dengan  $\mu_r > 1$  disebut *paramagnetic*, sedangkan untuk ferromagnetik  $\mu_r \gg 1$ , sehingga pada kasus ini  $\mu_r$  sering diabaikan.

Fluks magnetik ( $\Phi$ ) berjalan seluruhnya dalam loop magnetik dengan penampang besi  $A_{fe}$  yang diasumsikan konstan sepanjang loop magnetik dan sama dengan penampang  $A_a$  pada celah udara dirumuskan sebagai berikut:

$$\Phi = B_a A_a \quad (2.4)$$

Dengan flux density ( $B$ ) pada iron dan pada celah udara ( $s$ )

$$B = \mu_0 \frac{NI}{2s} \quad (2.5)$$

Dimana:

$\Phi$  = Fluks magnetik total ( $\text{Wb}$ )

$B$  = Kerapatan fluks ( $\text{Wb/m}^2$ )

$A$  = Luas permukaan yang dilewati medan magnet ( $m^2$ )

$N$  = Jumlah lilitan

$s$  = Celah udara ( $m$ )

### 2.4.2 Induktansi L pada Sirkuit Magnetik

Induktansi (L) adalah rasio dari apa yang disebut *winding flux* yang dihasilkan oleh satu putaran tunggal pada koil terhadap arus (i). Untuk coil dengan N lilitan, induktansi terdapat pada ujung terminal koil.

$$L = \frac{N\Phi}{i} \quad (2.6)$$

Dengan *flux magnetic* ( $\Phi$ ) merupakan perkalian antara *flux density* B dengan luas penampang  $A_a$  maka induktansi L menjadi :

$$L = \frac{\mu_0 N^2 A_a}{2s} \quad (2.7)$$

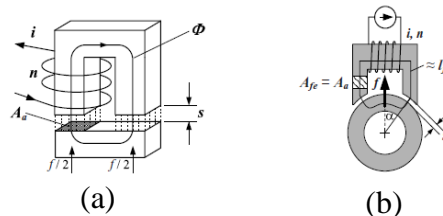
dimana:

- A = Luas permukaan yang dilewati medan magnet ( $m^2$ )
- N = Jumlah lilitan
- s = Celah udara (m)
- $\mu_0$  = Permeabilitas ruang hampa ( $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} N/A^2$ )
- L = Induktansi magnetik
- I = Besar arus (A)

### 2.4.3 Gaya Radial untuk SatuPasang Kutub Elektromagnet

Perhitungan gaya berdasarkan pada energi medan  $W_a$ . Dengan menganggap energi disimpan dalam volume celah udara,  $V_a = 2sA_a$ . Dalam kasus medan homogen di celah udara loop magnetik, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.6a, energi yang tersimpan adalah

$$W_a = \frac{1}{2} B_a H_a V_a = \frac{1}{2} B_a H_a A_a (2s) \quad (2.8)$$



**Gambar 2.7** (a) Gaya. (b) Geometri.  
(sumber: Gerhard,2009)

Gaya yang bekerja dihasilkan oleh perubahan energi medan di celah udara, sebagai fungsi perpindahan. Untuk perpindahan kecil  $ds$  *magnetic flux*  $B_a A_a$  tetap konstan. Ketika celah udara meningkat oleh  $ds$ , volume  $V_a = 2sA_a$  meningkat dan energi  $W_a$  meningkat sebesar  $dW_a$ . Maka gaya dirumuskan menjadi :

$$f = -\frac{dW_a}{ds} = B_a H_a A_a = \frac{B_a^2 A_a}{\mu_0} \quad (2.9)$$

Untuk elektromagnet (gambar 2.6) energi listrik dimasukkan ke dalam sistem melalui terminal koil untuk mengatur medan magnet. Agar persamaan f tetap valid, differensial harus dilakukan seolah-olah tidak ada pertukaran energi listrik antara koil dan catu dayanya, yaitu ketika *flux density* tetap konstan. Untuk mendapatkan

gaya  $f$  sebagai fungsi arus dan celah udara,  $B$  dimasukan kedalam persamaan gaya  $f$ , sehingga menjadi:

$$f = \mu_0 A_a \left( \frac{ni}{2s} \right)^2 = \frac{1}{4} \mu_0 n^2 A_a \frac{i^2}{s^2} \quad (2.10)$$

Di mana area  $A_a$  diasumsikan sebagai area yang diproyeksikan dari permukaan kutub, bukan area permukaan yang melengkung. Dalam kasus *radial active magnetic bearing* kekuatan kedua kutub magnet mempengaruhi rotor dengan sudut  $\alpha$  (Gambar 2.6b). Dalam kasus *radial active magnetic bearing* dengan 4 pasang kutub (8 kutub)  $\alpha$  sama dengan  $22,5^\circ$ . Dengan mempertimbangkan  $\alpha$  maka perumusan gaya menjadi :

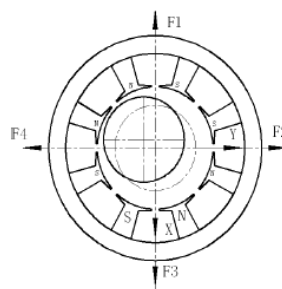
$$f = \mu_0 A_a \left( \frac{ni}{2s} \right)^2 \cos(\alpha) \quad (2.11)$$

Dimana:

- $f$  = Gaya radial *active magnetic bearing* (N)
- $A$  = Luas permukaan yang dilewati medan magnet ( $m^2$ )
- $N$  = Jumlah lilitan
- $s$  = Celah udara/air gap (m)
- $\mu_0$  = Permeabilitas ruang hampa ( $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ N/A}^2$ )
- $i$  = Besar arus (A)
- $\alpha$  = Besar sudut kutub dengan garis vertikal

#### 2.4.4 Gaya Radial *Active Magnetic Bearing* Saat Terjadi Pergeseran Rotor (*Eccentricity*)

Berdasarkan Liu Xiaojing pada jurnalnya yang berjudul “Calculation of Radial Magnetic Bearing Electromagnetic Force under Eccentric Rotor” (Xiaojing, L. Yefa, 2012), perhitungan gaya radial pada *active magnetic bearing* dipengaruhi oleh seberapa besar *air gap* atau celah udara antara rotor dan kutub stator. *Air gap* pada setiap kutub elektromagnet memiliki nilai yang berbeda-beda karena kondisi rotor yang mengalami pergeseran dari titik nolnya ketika dikenai beban dari poros, sehingga gaya elektromagnet yang dihasilkan masing – masing kutub memiliki nilai yang berbeda-beda.



**Gambar 2.8** *Radial active magnetic bearing* dengan pergeseran rotor.  
(sumber: Gerhard, 2009)

Terdapat dua metode untuk menghitung gaya elektromagnet. Metode pertama dengan cara melihat nilai *flux density* pada *air gap* yang berbeda-beda, kemudian didapatkan nilai gaya. Metode kedua yaitu dengan cara memecah gaya elektromagnetik menjadi limit kecil tertentu dan didapatkan nilai gaya yang kemudian nilai-nilai gaya tersebut dijumlahkan. Menggunakan  $\Delta F_i$  untuk menyatakan gaya elektromagnet interval ke –  $i$ .

$$F = \sum_{i=1}^n \Delta F_i \quad (2.12)$$

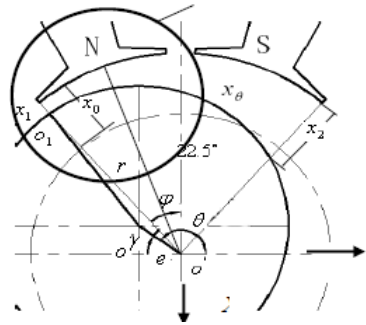
$$\Delta F \approx \frac{\mu_0 N^2 \Delta \varphi_i (x_0 + r) B_i}{8} \frac{i_\theta^2}{x_\theta^2} \quad (2.13)$$

Dengan mengambil titik secara acak didapatkan rumus gaya elektromagnet,

$$F = \sum_{i=1}^n \Delta F_i \approx \sum_{i=1}^n \frac{\mu_0 N^2 \Delta \varphi_i (x_0 + r) B_i}{8} \frac{i_\theta^2}{x_\theta^2} \quad (2.14)$$

$$F = \lim_{\Delta \varphi \rightarrow 0} \sum_{i=1}^n \Delta F_i \approx \lim_{\Delta \varphi \rightarrow 0} \sum_{i=1}^n \frac{\mu_0 N^2 \Delta \varphi_i (x_0 + r) B_i}{8} \frac{i_\theta^2}{x_\theta^2} \quad (2.15)$$

Dengan meninjau besar *air gap* yang selalu berubah pada setiap titik berubah sesuai dengan pergerakan posisi rotor *active magnetic bearing*, berikut perumusan *air gap* dinyatakan dengan persamaan



**Gambar 2.9** *Air gap* pada satu pasang kutub elektromagnetik

$$x_\theta = r + x_0 - r' \quad (2.16)$$

$$r' = \sqrt{r^2 + e^2 \cos^2(\theta - 90 - \varphi)} - e^2 - e \cos(\theta - 90 - \varphi) \quad (2.17)$$

$$x_\theta = r + x_0 - \sqrt{r^2 + e^2 \cos^2(\theta - 90 - \varphi)} - e^2 - e \cos(\theta - 90 - \varphi) \quad (2.18)$$

Sehingga persamaan gaya elektromagnet menjadi,

$$F = \lim_{\Delta \varphi \rightarrow 0} \sum_{i=1}^n k_g \Delta \varphi_i \frac{i_\theta^2}{x_\theta^2} = \int_{0.125\pi - \frac{A}{2B_i(x_0+r)}}^{0.125\pi + \frac{A}{2B_i(x_0+r)}} k_g \frac{i_\theta^2}{x_\theta^2} d\varphi \quad (2.19)$$

Besar arus dirumuskan dengan persamaan 2.18, di mana nilai arus dipengaruhi oleh posisi rotor dan pergeseran rotor. Nilai arus akan disesuaikan oleh *controller*, sensor, dan *power amplifier* yang digunakan

$$i_\theta = i_o \pm (k_2 k_1 k_p x + k_2 k_1 k_p \tau_d \dot{x}) \quad (2.20)$$

dimana:

- $i_o$  = Besar arus *input* (Ampere)
- $k_1$  = Parameter sensor
- $k_2$  = Parameter amplifier
- $k_p$  dan  $\tau_d$  = Parameter *controler*

Dengan memasukan formula perhitungan *air gap* ke dalam persamaan gaya elektromagnet didapatkan rumus akhir gaya elektromagnet pada setiap kutub sebagai berikut:



$$F = \int_{0.125\pi - \frac{A}{2B_i(x_0+r)}}^{0.125\pi + \frac{A}{2B_i(x_0+r)}} k_g \frac{[i_0 \pm (k_2 k_1 k_p x + k_2 k_1 k_p r_d x)]^2}{[r+x_0 - \sqrt{r^2 + e^2} \cos^2(\theta - 0.5\pi - \varphi) - e^2 - e \cos(\theta - 0.5\pi - \varphi)]^2} d\varphi \quad (2.21)$$

dimana:

$$k_g = \frac{\mu_0 N^2 (x_0 + r) B_i}{8}$$

F = Gaya radial *active magnetic bearing* (N)

A = Luas permukaan yang dilewati medan magnet (m<sup>2</sup>)

N = Jumlah lilitan

x<sub>0</sub> = *Radial clearance* (m)

μ<sub>0</sub> = Permeabilitas ruang hampa (μ<sub>0</sub> = 4π x 10<sup>-7</sup> N/A<sup>2</sup>)

i = Besar arus (A)

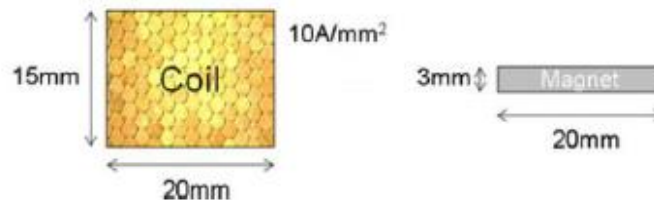
φ = Besar sudut kutub dengan garis vertikal

e = *Eccentricity* rotor (m)

r = Jari – jari rotor (m)

## 2.5 Magnet

Magnet adalah sebuah benda yang mampu menarik benda disekitarnya karena memiliki sifat kemagnetan. Kemagnetan sendiri adalah suatu fenomena fisik yang timbul dari medan magnet. Sifat dari suatu magnet dapat ditentukan dari medan magnet, induksi magnet dan lain sebagainya. Magnet dibagi menjadi Soft Magnetic Material dan Hard Magnetic Material. Dari segi ukuran, magnet mampu menghasilkan medan magnet yang sama dengan kumparan elektromagnetik dengan ukuran yang lebih kecil. Hal ini diilustrasikan pada Gambar 2.8



**Gambar 2.10** Ilustrasi perbandingan ukuran magnet dan kumparan.  
(sumber:Iffagano, 2020)

Magnet yang paling banyak dikenal adalah yang mengandung besi metalik. Berdasarkan sifat materialnya, material magnet dibedakan menjadi beberapa sifat, yaitu:

- Diamagnetik Material yang bersifat diamagnetik adalah material yang kekuatan magnetnya sangat lemah dan berlawanan arah dengan medan magnet material magnet lainnya sehingga tidak dapat menarik material lain yang bersifat magnet bahkan terjadi tolak-menolak dengan material yang bersifat magnet disekitarnya.
- Paramagnetik Material yang bersifat paramagnetik adalah material yang memiliki kekuatan magnet lemah namun memiliki arah yang searah terhadap medan magnet material magnet lainnya sehingga terjadi tarik-menarik dengan bahan yang bersifat magnet disekitarnya namun kekuatan tarik-menariknya lemah.
- Ferromagnetik Sifat yang terakhir dan yang paling banyak digunakan adalah material yang bersifat ferromagnetik, dimana material ini memiliki kekuatan magnet yang kuat dan memiliki arah yang searah dengan medan magnet material magnet

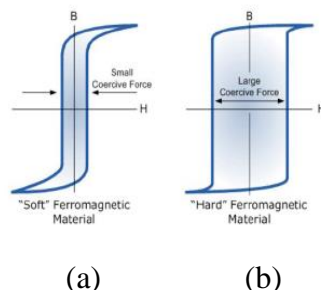


lainnya sehingga terjadi tarik-menarik dengan magnet disekitarnya dengan kekuatan tarik-menarik yang kuat. Material dengan sifat ferromagnetik biasanya banyak yang dijadikan sebagai bahan dasar dari permanen magnet.

Magnet terdiri dari tiga kriteria, bisa berwujud magnet tetap (magnet permanen), magnet tidak tetap, dan magnet buatan. Magnet permanen adalah magnet yang tidak memerlukan tenaga atau bantuan dari luar untuk menghasilkan daya magnet (berelektromagnetik). Magnet jenis ini dapat mempertahankan kemagnetannya dalam waktu yang sangat lama. Terdapat beberapa jenis magnet permanen yang selama ini diketahui seperti 20 neodymium magnet (NdFeb), samarium-cobalt magnet (SmCo), keramik magnet, plastik magnet, alnico magnet.

### 2.5.1 *Soft Magnetic Material*

*Soft Magnetic Material* adalah magnet yang mudah dimagnetisasi, sifat kemagnetannya akan hilang setelah proses magnetisasi dihentikan (Manaf, 2007). Dalam mesin elektrik atau motor listrik, terjadinya *magnetic losses* diakibatkan oleh jenis *soft magnetic material* yang digunakan dalam medan magnet, kerugian terdiri dari kerugian eddy-current yang timbul dari proses induksi arus listrik dan kerugian histerisis magnetik dari bahan-bahan tertentu. Histerisis menggambarkan proses magnetization reversal pada bahan magnetic dari kondisi awal yang tidak termagnetisasi kemudian diinduksi oleh medan magnetic luar sehingga membentuk kurva histerisis. Tipikal kurva histerisis untuk soft ferromagnetik dan hard ferromagnetik ditunjukkan pada Gambar 2.10. Karakteristik yang membedakan bahan softmagnetic dengan bahan hard magnetic adalah energy product ( $BH_{max}$ ) yang bisadihasilkan

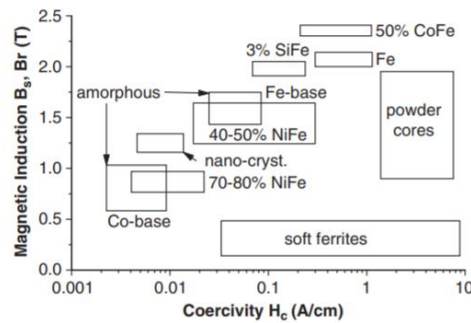


**Gambar 2.11** (a) Tipikal kurva histerisis soft ferromagnetic. (b) Hard ferromagnetic (sumber: Iffagano, 2020)

Karakteristik yang diperlukan dari soft magnetic material antara lain:

1. Induksi saturasi tinggi untuk meminimalkan berat dan volume dari iron
2. Permeabilitas tinggi untuk desain reluktansi sirkuit magnetic
3. Koersivitas rendah untuk meminimalkan kerugian histerisis
4. Resistivitas tinggi untuk meminimalkan kerugian eddy current
5. Sifat-sifat magnetik tersebut tidak didapatkan hanya dari satu material, karena ada banyak faktor yang mempengaruhi sifat magnetik.
6. Sifat magnetik material dapat dioptimalkan dengan penambahan elemen kimia, kerja mekanis material, dan perlakuan panas pada material.

Karakteristik berbagai soft magnetic material ditunjukkan pada Gambar 2.10.



**Gambar 2.12** Perbandingan antar soft magnetic material  
(sumber: Iffagano, 2020)

### 7. Iron Cobalt Alloys

Material iron-cobalt memiliki magnetisasi saturasi tertinggi dari semua bahan soft magnetic material, dapat dilihat pada gambar 2.11. Material tersebut memiliki kerugian yaitu biaya yang lebih tinggi dibanding material silikon-besi, tetapi menguntungkan dalam pengurangan berat dan ukuran. Paduan iron-cobalt digunakan dalam generator pesawat terbang, motor 400Hz dan active magnetic bearing.

### 8. Silicon-Iron Electrical Steel

Material ini merupakan salah satu material yang sering digunakan pada mesin elektrik. Dengan penambahan silikon pada besi dapat mengurangi koersifitas tetapi mengurangi saturasi magnet juga. Terdapat dua kategori yang berbeda dari jenis ini, produk isotropik dengan silikon 1-3,5% non oriented dan anisotropik dengan 2,9-3,15% silikon grain-oriented. Tingkat silikon di atas 3,5% membuat baja menjadi sangat rapuh dan sulit untuk proses pengerjaan. Oriented steel memiliki core loss terendah dan biasa digunakan dalam transformator, sedangkan non-oriented steel digunakan dalam mesin elektrik karena terdapat berbagai arah fluks, selain itu non-oriented steel memiliki harga yang lebih rendah.

### 9. Amorphous or Glassy Metal

Logam amorf terbuat dari paduan Fe, Ni, dan Co dan metaloid atau kaca seperti silikon, boron, atau karbon. Logam amorf biasanya dijual oleh Allied Signal Inc, AS, adalah METGLAS 2826, yang memiliki komposisi Fe<sub>40</sub>Ni<sub>40</sub>P<sub>14</sub>B<sub>6</sub>. Logam amorf sangat tipis, dengan ukuran 0,025-0,04 mm, dan memiliki koersivitas terendah dari semua material soft magnetic dan resistivitas lebih tinggi dari baja listrik, menghasilkan lowest core loss. Terdapat beberapa masalah terkait penggunaan logam amorf dalam mesin listrik. Dimana kemampuan yang diinginkan seperti low coercivity tetapi saturation magnetization-nya rendah. Pemotongan dan pembentukan amorphous metal laminations 24 sangat mahal karena peningkatan keausan pahat karena kekerasannya (lebih dari C-80 Rockwell), material langka. Material telah digunakan dalam motor listrik di mana mempunyai efisiensi tinggi >94%. dalam distribusinya material ini terbukti paling menguntungkan. 2.3.1.4

### 10. Soft Magnetic Composites

Material ini terbuat dari serbuk besi yang dilapisi dengan lapisan isolasi dan ditekan menjadi material padat. Material ini memiliki beberapa keunggulan, bahanya yang isotropik memungkinkan desain sirkuit magnetik yang memiliki jalur fluks tiga dimensi dan karena ada lapisan isolasi antara partikel serbuk besi,

kerugian akibat aliran arus diminimalkan. Keunggulan lain yaitu, biaya pembuatan tergolong rendah dan kerugiandari material ini yaitu memiliki core loss yang tergolong tinggi dibandingkan dengan bahan silikon besi. Meskipun demikian, material ini masih banyak digunakan.

#### 11. Soft Ferrites

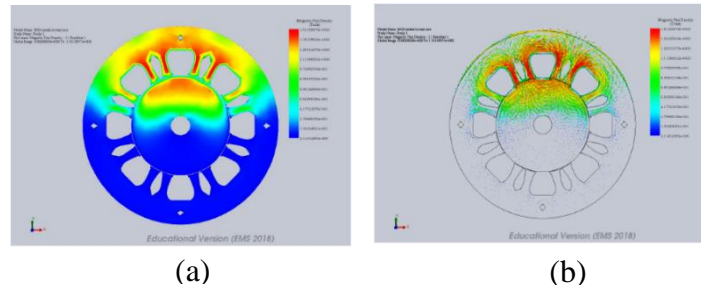
Soft Ferrites Magnetic memiliki rumus kimia umum  $MeFe_2O_4$ , di mana Me paling umum adalah MnZn Ferrite atau NiZn Ferrite. Sifat-sifat dari material ini dapat disesuaikan dengan penambahan Mg, Cu, atau Co, atau campuran dari bahan-bahan ini. Material ini memiliki karakteristik umum koersivitasnya rendah, permeabilitas tinggi, dan resistivitas tinggi. Resistivitas tinggi menghasilkan kerugian yang dapat diabaikan karena eddy current, memungkinkan material untuk digunakan pada frekuensi tinggi. Umumnya NiZn Ferrit memiliki resistivitas lebih tinggi dari MnZn Ferrite, tetapi induksi saturasinya lebih rendah. Material ini biasa digunakan untuk induktor dan transformator. Namun, induksi saturasinya yang relatif rendah membuatnya tidak cocok untuk digunakan pada power atau transformator fluks tinggi.

#### 2.5.2 *Hard Magnetic Material*

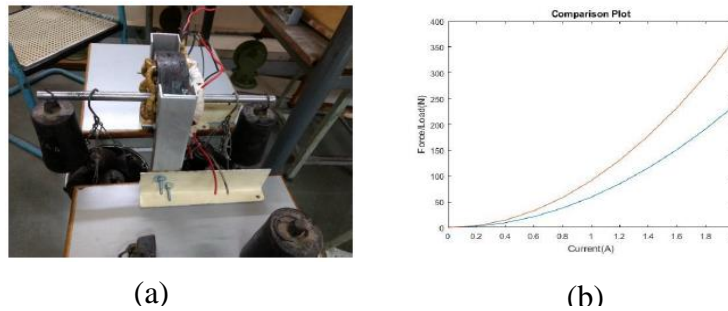
Bahan hard magnetic merupakan bahan yang memiliki kurva histerisis yang besar dan lebar seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.10. Bahan hardmagnetic adalah sebutan untuk bahan yang susah di-magnetization dan juga susah untuk didemagnetisasi yang membuat bahan ini sangat cocok untuk dijadikan bahan dari magnet permanen. Bahan hardmagnetic dibagi menjadi dua, yaitu magnet konvensional dan magnet tanah jarang. Magnet konvensional memiliki nilai maksimum energy product (BHmax) berkisar antara 2-80 kJ/m<sup>3</sup>, seperti baja, paduan Cunife (Cu-Ni-Fe), paduan Alnico (Al-Ni-Co). Bahan hard magnetic yang memiliki energi tinggi seperti Nd<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B, SmCo<sub>5</sub> memiliki nilai BHmax lebih besar dari 80 kJ/m<sup>3</sup> masuk dalam rare earth magnet. Bahan hardmagnetic biasanya banyak diaplikasikan pada motor, speaker, bor, dsb, dikarenakan semakin besar BHmax maka bahan magnet tersebut akan sangat susah untuk diberi perlakuan demagnetisasi.

#### 2.6 Penelitian Terdahulu

Mehir Pewekar (2018) dalam penelitiannya yang berjudul “*Analysis of Active Magnetic Bearing*” melakukan simulasi dan eksperimen pada *radial active magnetic bearing* dengan desain *heteropolar* 8 kutub stator. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisa *Specific Load Capacity*, menganalisa *Force Efficiency Factor* dan menganalisa grafik gaya radial berbanding dengan besar arus yang digunakan pada *active magnetic bearing*. Analisa penelitian ini dilakukan dengan menentukan dimensi dari *radial active magnetic bearing* dengan *stator inner diameter* sebesar 76 mm, *diameter of rotor* adalah 75.7 mm, *wire diameter* sebesar 0.5192 mm, jumlah lilitan sebanyak 115 lilitan, tebal kutub 10 mm, luas penampang kutub sebesar 724.24 mm dan *air gap* sebesar 0.35 mm. Simulasi dilakukan dengan menggunakan *software* Electromagnetic Simulation Suite (EMS) from EM Works Inc. yang diintegrasikan dengan Ansys Workbench Interface. Variasi yang dilakukan pada penelitian ini adalah besar arus yang dialirkan pada lilitan tembaga dengan rentang 0.2 A hingga 2 A, kemudian dibandingkan dengan eksperimen yang dilakukan.



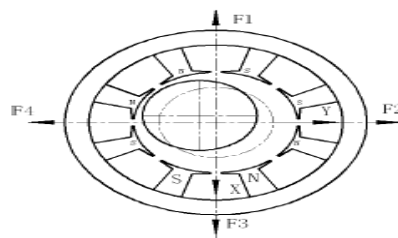
**Gambar 2.13** (a) Kontur *magnetic flux*. (b) Distribusi vektor *magnetic flux*.



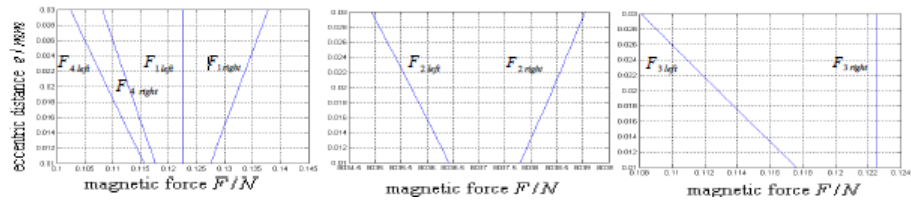
**Gambar 2.14** (a) Rancangan peralatan eksperimen. (b) perbandingan gaya radial hasil simulasi dengan eksperimen

Dari grafik gaya radial dibandingkan arus diketahui bahwa grafik membentuk kurva parabolik dengan semakin besar arus yang dialirkan pada lilitan maka semakin besar gaya radial yang dihasilkan. Kurva berwarna merah merupakan hasil dari simulasi sedangkan kurva berwarna biru merupakan kurva hasil eksperimen, dari kedua kurva tersebut diketahui bahwa besar gaya radial pada arus minimum hampir sama dan semakin besar arus, semakin besar perbedaan gaya radial yang dihasilkan. *Specific Load Capacity* bergantung pada parameter geometri *active magnetic bearing*, *Specific Load Capacity* dapat ditingkatkan dengan mereduksi massa total dari *active magnetic bearing*.

Liu Xiaojing dan Ya Hufa dalam penelitiannya yang berjudul “Calculation of Radial Active Magnetic Bearing Electromagnetic Force under Eccentric Rotor” melakukan analisa gaya radial setiap kutub elektromagnet *active magnetic bearing* dengan meninjau besar *air gap* yang timbul akibat pergeseran rotor. Analisa dilakukan pada *radial active magnetic bearing* 8 kutub tipe heteropolar, dengan jari – jari rotor sebesar 10 mm, *air gap* sebesar 0,35 mm, lebar bearing sebesar 25 mm, dan luas penampang kutub sebesar 183,42 mm<sup>2</sup>.



**Gambar 2.15** Gaya elektromagnet ketika posisi rotor 337,5° dan *eccentricity* yang berbeda-beda



**Gambar 2.17** Gaya elektromagnet ketika posisi rotor  $337,5^\circ$  dan *eccentricity* yang berbeda-beda

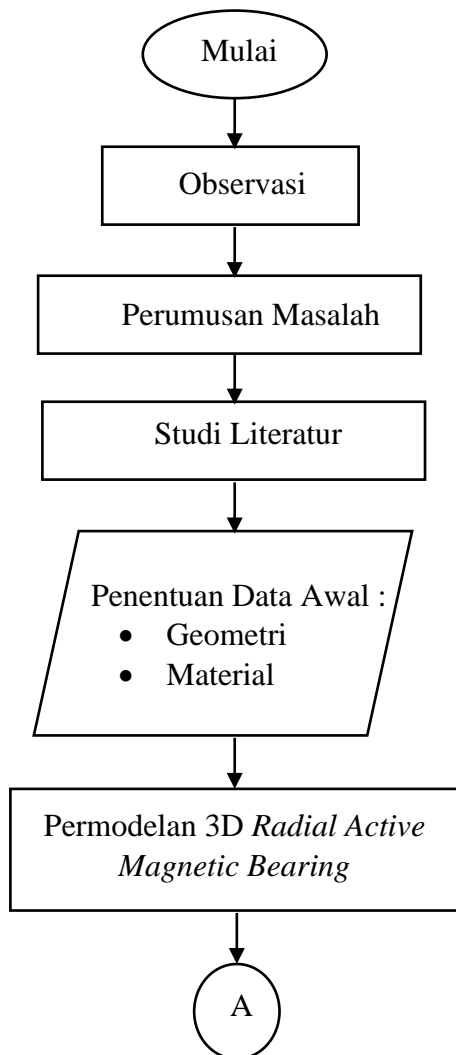
Dari analisis yang dilakukan didapatkan grafik gaya radial dengan perubahan *eccentricity* rotor pada saat posisi rotor berada pada sudut  $67,5^\circ$  dihasilkan gaya elektromagnet yang berbeda-beda pada setiap kutubnya. Ditampilkan grafik dari setiap kutub elektromagnet pada gambar 2.x, yang mana disimpulkan bahwa dengan perubahan *eccentricity* rotor maka mengakibatkan besar *air gap* yang berbeda pada masing – masing kutub, sehingga gaya yang dihasilkan pada masing – masing kutub berbeda, bergantung pada besar *ait gap*-nya. Semakin kecil *air gap* gaya elektromagnet yang dihasilkan semakin besar.

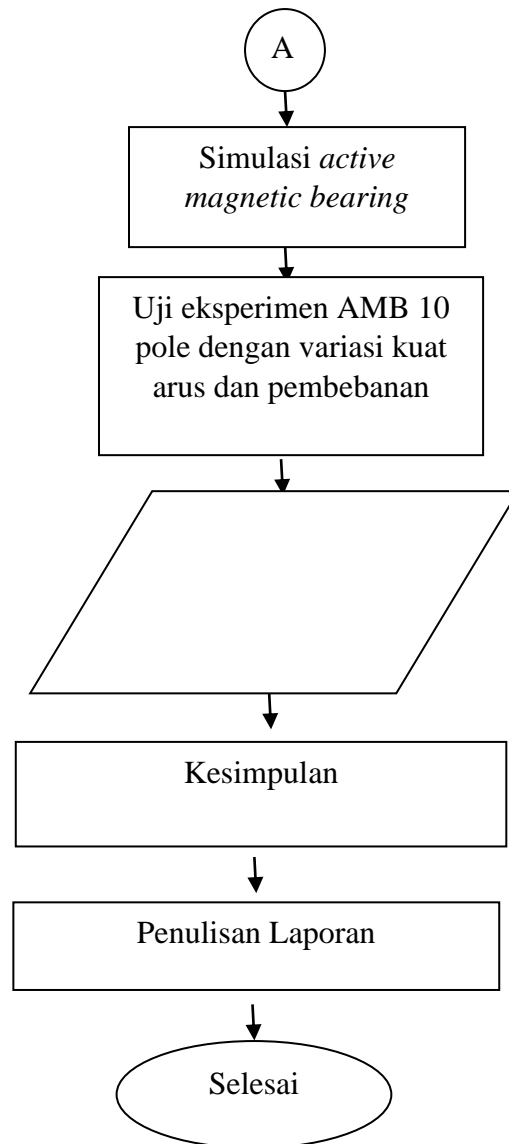
## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian mengenai *radial active magnetic bearing* memiliki beberapa tahapan yang dilakukan. Pada bab ini, akan dijelaskan bagaimana melakukan masing – masing tahapan hingga akhir tahap penelitian selesai.

### 3.1 Diagram Alir Penelitian

Dalam melakukan penelitian, diperlukan langkah-langkah atau tahapan yang sistematis untuk menganalisis gaya radial pada *active magnetic bearing*. Adapun diagram alir penelitian dapat dilihat seperti pada gambar 3.1 di bawah ini.





**Gambar 3.1** Diagram Alir Penelitian

Gambar 3.1 merupakan diagram alir yang menjelaskan tahapan-tahapan penelitian pada tugas akhir ini. Penjelasan mengenai tiap tahapan pada diagram alir adalah sebagai berikut:

### 3.1.1 Observasi Penelitian

Pada tahapan ini bertujuan untuk menentukan ruang lingkup dari permasalahan yang diangkat dalam penelitian. Observasi dilakukan secara umum oleh penulis mengenai perkembangan teknologi otomotif kemudian penelitian dilanjutkan secara khusus mengenai kemajuan objek yang akan diteliti yaitu *radial active magnetic bearing*. Pelaksanaan penelitian dimulai dengan meneliti jurnal ilmiah yang sudah dipublikasikan.

### 3.1.2 Perumusan Masalah

Setelah dilakukan obeservasi penelitian selanjutnya dilakukan perumusan masalah. Dari masalah yang telah teridentifikasi pada saat observasi penelitian selanjutnya penulis merumuskan beberapa parameter permasalahan yang akan diselesaikan dalam penelitian.

### 3.1.3 Studi Literatur

Studi literatur dilakukan dengan tujuan untuk memberikan informasi pengetahuan mengenai topik yang akan diangkat dalam penelitian. Studi literatur ini dilakukan dengan cara mempelajari literatur yang terkait dan menunjang pelaksanaan penelitian. Studi literatur didapatkan dari buku, jurnal ilmiah, tesis, dan tugas akhir.

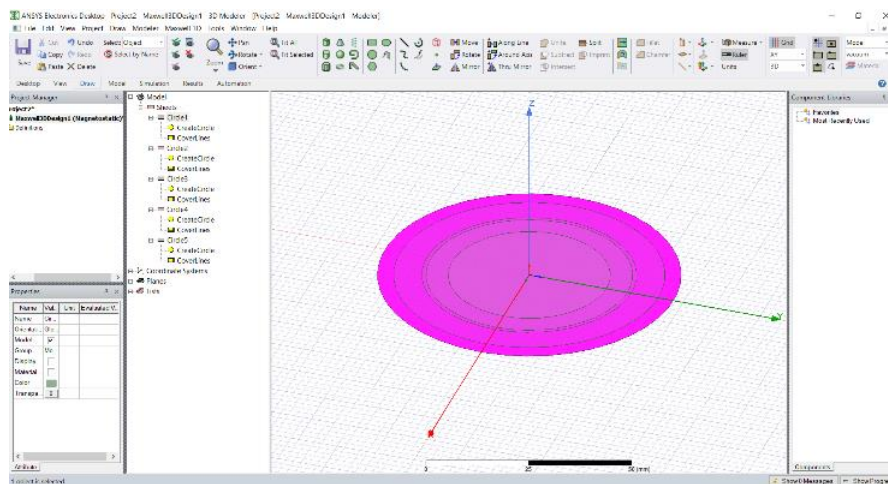
### 3.1.4 Penentuan Data Awal

Data awal yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari spesifikasi *roller bearing*. Dari spesifikasi tersebut diambil dimensi yang dijadikan acuan penelitian ini untuk membuat model magnetic bearing dengan volume yang konstan. Spesifikasi *roller bearing* memiliki nilai  $d = 60$  mm,  $D = 110$  mm,  $B = 22$  mm.

### 3.1.5 Desain 3D, Simulasi, dan Eksperimen

Proses pemodelan dilakukan dnegan menggunakan bantuan *softwere* ANSYS Electronics v19 R1 sehingga mempermudah dalam hal optimasi. Setelah dilakukan pemodelan 3D menggunakan *software* ANSYS Electronics v19 R1 telah selesai, selanjutnya dilakukan proses simulasi menggunakan *software* yang sama. Simulasi FEM dilakukan untuk mengetahui output yang diterima berupa gaya dan *magnetic flux density* (B). Berikut penjelasan lebih detail dari permodelan 3D.

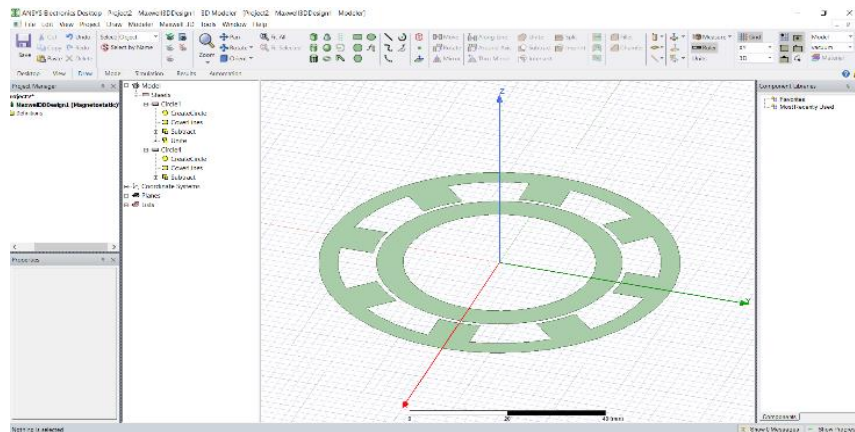
- a. Membuat sketsa 2D yang kemudian akan diproses menjadi bentuk 3D



Gambar 3.2 Pembuatan skesa 2 dimensi rotor dan stator *active magnetic bearing*

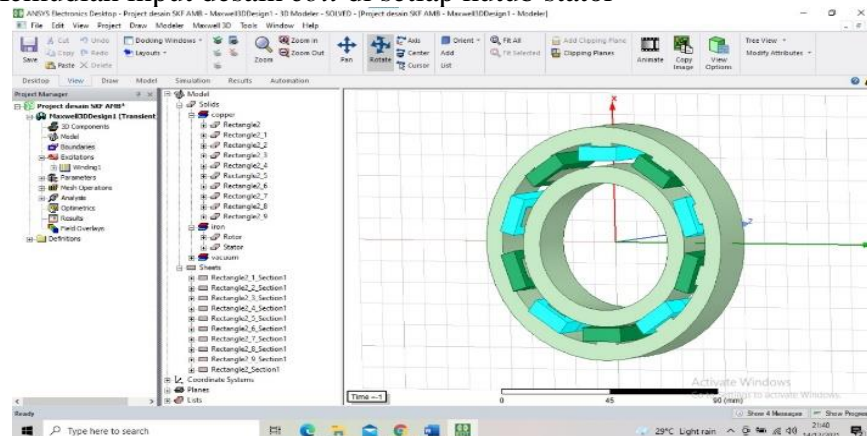


- b. Sketsa 2D yang telah dibuat kemudian diproses *subtract* untuk memisahkan sketsa 2D dari rotor dan stator



**Gambar 3.3** Sketsa 2 dimensi rotor dan stator *active magnetic bearing*

- c. Proses *sweep* ke arah Z dilakukan untuk membuat sketsa 2D menjadi bentuk 3D. Kemudian input desain *coil* di setiap kutub stator



**Gambar 3.4** Sketsa 3D *active magnetic bearing*

### 3.1.6 Validasi Simulasi

Metode simulasi yang benar menjadi perhatian utama penulis dalam membandingkan hasil simulasi terhadap hasil yang berasal dari penelitian – penelitian sebelumnya dengan sumber yang dapat dipercaya. Alittio Fatah Yassin dalam penelitiannya yang berjudul “Analisis Pengaruh *Radial Clearance* dan Ketebalan Magnet terhadap Gaya Radial pada *Passive Magnetic Bearing*” menggunakan *software* Ansys Electronics v17 untuk simulasi desain. Pada penelitian ini dengan menggunakan *software* Ansys Electronics v19. melakukan simulasi dalam proses validasi hasil tersebut. Validasi dilakukan dengan cara membandingkan nilai gaya *radial active magnetic bearing* yang diperoleh dari hasil simulasi terhadap nilai gaya *radial passive magnetic bearing* yang dihasilkan pada penelitian Alittio Fatah Yassin. Pelaksanaan simulasi dikatakan valid apabila perbandingan hasil yang diperoleh konvergen dengan memiliki eror di bawah atau sama dengan 5%. Dengan demikian hasil yang diperoleh menjadi semakin kredibel.

### 3.1.7 Simulasi FEM (Transient Solution)

Setelah model 3 dimensi *radial active magnetic bearing* selesai dibuat, simulasi FEM dengan penyelesaian *transient* dilakukan.. Dari simulasi ini akan didapatkan hasil berupa *magnetic flux density* (B), *static magnetic field* (H), dan

*current density* (J), beserta arah vektornya. Selain itu, didapatkan juga besaran turunan seperti gaya. Dalam simulasi kali ini terdapat tiga jenis variasi yaitu

### 3.1.8 Pengambilan dan Pengolahan Data

Penggunaan jumlah kutub, besar arus dan konfigurasi kutub yang berbeda dilakukan sebagai variasi dalam simulasi yang dilakukan. Setelah tahap demi tahap pelaksanaan simulasi dilakukan, data utama yang dapat diambil adalah gaya yang dihasilkan. Setelah itu, data diolah untuk dimasukkan ke dalam grafik untuk dianalisis.

### 3.1.9 Analisa Data dan Pembahasan

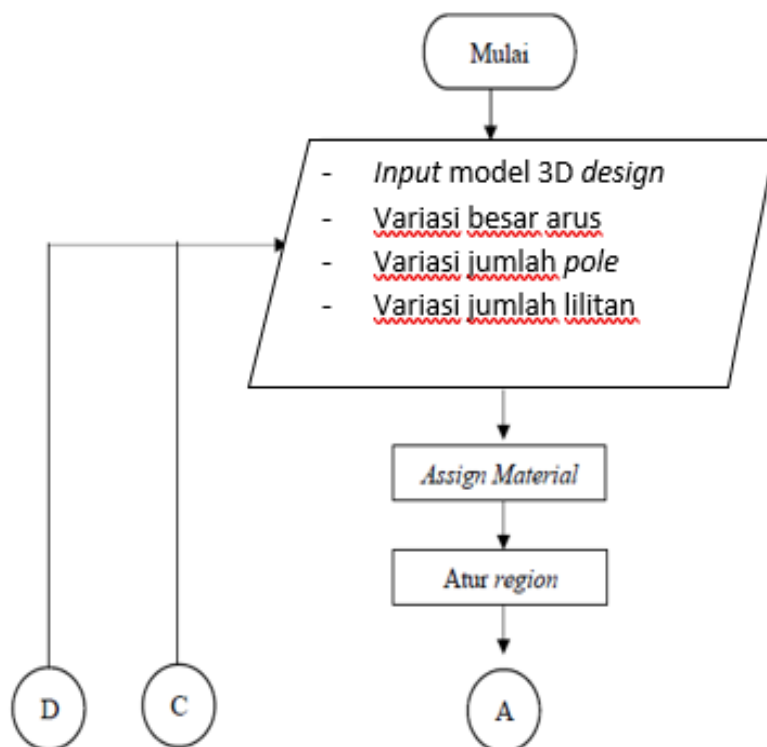
Setelah data diperoleh dalam bentuk grafik, kemudian dilakukan pembahasan mengenai hasil yang diperoleh dari simulasi. Pembahasan pada analisis yang dilakukan mencakup bagaimana pengaruh variasi jumlah kutub, besar arus dan konfigurasi kutub terhadap gaya yang dihasilkan.

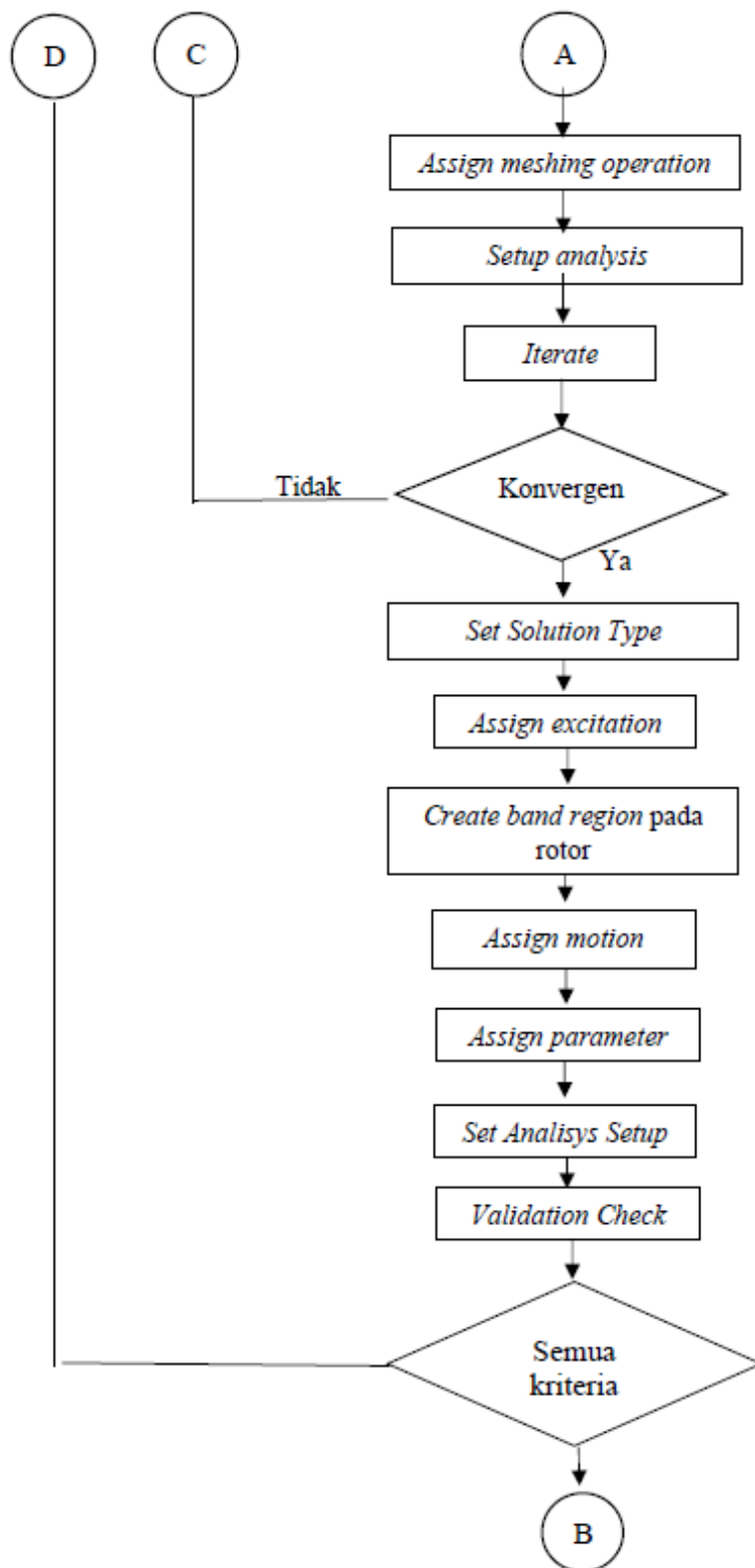
### 3.1.10 Kesimpulan Penelitian

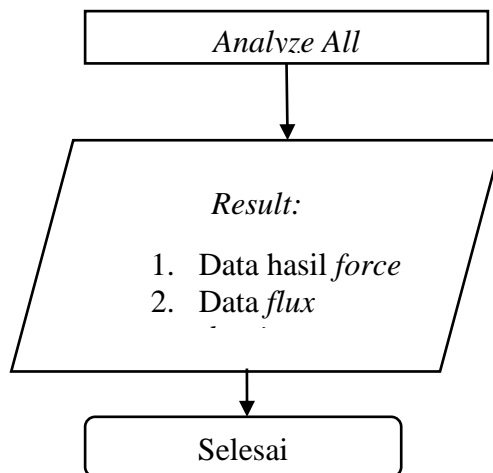
Berdasarkan data dan pembahasan yang telah dilakukan, dapat ditarik beberapa kesimpulan yang dapat menjawab tujuan dilaksanakannya penelitian ini.

## 3.2 Diagram Alir Simulasi

Untuk memperjelas alur simulais maka disajikan diagram alir simulasi seperti pada gambar 3.5 di bawah ini.





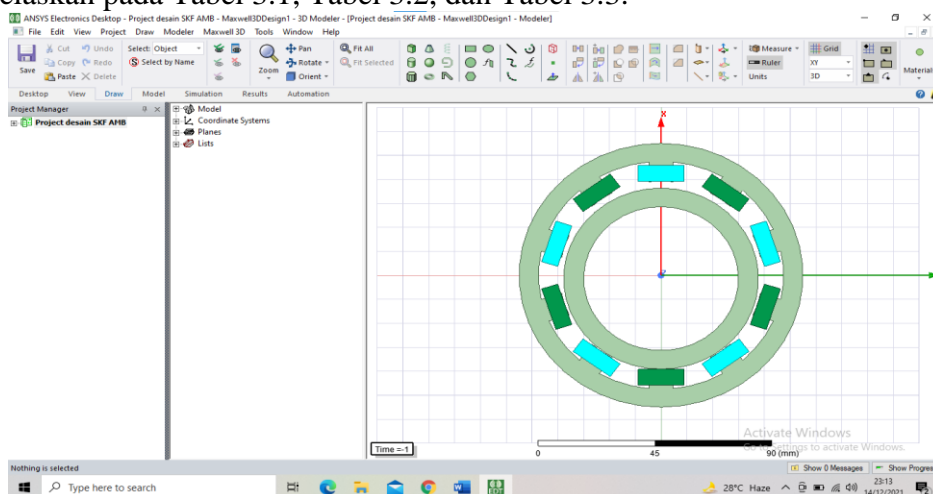


**Gambar 3.5** Diagram Alir Simulasi

Untuk memahami alur simulasi maka akan dijelaskan sebagai berikut:

### 3.2.1 Input Model 3 Dimensi Desain

Untuk melakukan *input* model 3 dimensi, hal pertama yang dilakukan adalah membuka *software* ANSYS Electronics v19 R1, kemudian pilih *project Maxwell 3D Design*. *Input* model 3 dimensi terdapat pada menu *Modeler*. Dalam penelitian ini terdapat 3 jenis variasi yaitu besar arus, jumlah kutub dan *radial clearance* yang dijelaskan pada Tabel 3.1, Tabel 3.2, dan Tabel 3.3.



**Gambar 3.6** Model 3D desain *radial active magnetic bearing*

**Tabel 3.1** Tabel data variasi simulasi

Lilitan	Kuat Arus (A)	eccentricity	Gaya Radial (N)
110	2	1,2	
		1,3	
		1,4	
	2,5	1,2	
		1,3	
		1,4	
	3	1,2	
		1,3	
		1,4	

**Tabel 3.2** Tabel data variasi simulasi

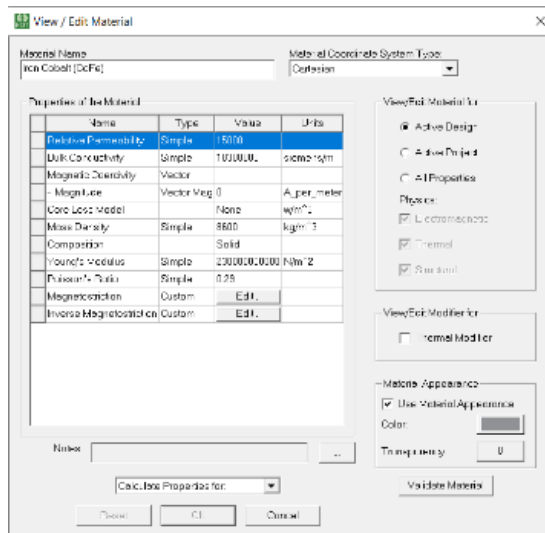
Lilitan	Kuat Arus (A)	eccentricity	Gaya Radial (N)
130	2	1,2	
		1,3	
		1,4	
	2,5	1,2	
		1,3	
		1,4	
	3	1,2	
		1,3	
		1,4	

**Tabel 3.3** Tabel data variasi besar arus dengan eccentricity rasio yang berbeda

Lilitan	Kuat Arus (A)	eccentricity	Gaya Radial (N)
150	2	1,2	
		1,3	
		1,4	
	2,5	1,2	
		1,3	
		1,4	
	3	1,2	
		1,3	
		1,4	

### 3.2.2 Assign Material

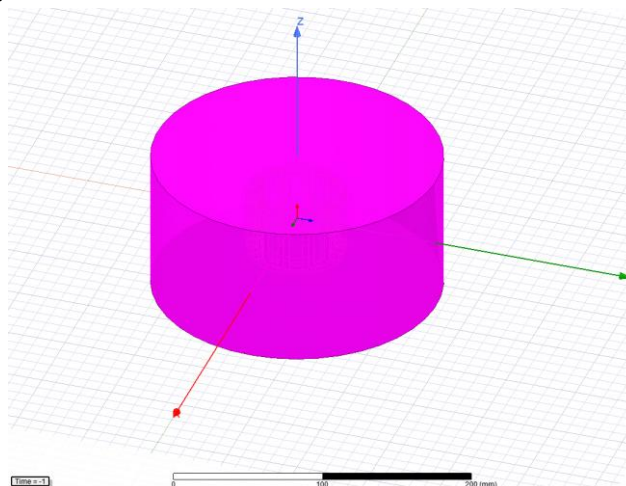
Setelah selesai melakukan model ke dalam *project*, dilakukan proses *assign material* yang berfungsi untuk memberikan material pada model yang telah dibuat. Material yang digunakan diperoleh dari *library software* ANSYS Electronics v19 R1 dengan detail *properties* material yang sudah terdapat di dalamnya. Pada bagian rotor dan stator dipilih material iron-cobalt (Co-Fe) dan pada bagian kumparan dipilih material *copper*.



**Gambar 3.7** Properties material rotor dan stator

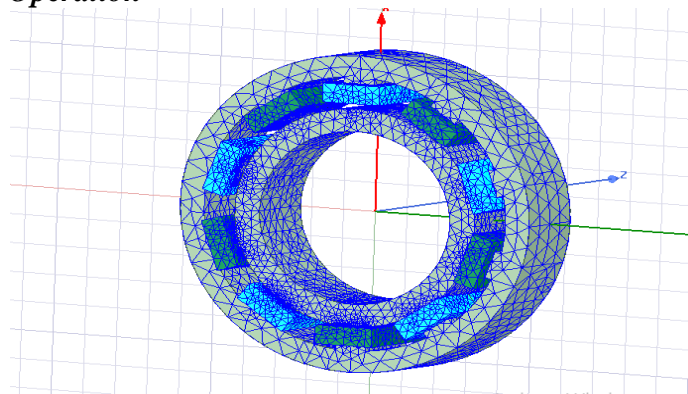
### 3.2.3 Assign Region

*Region* adalah daerah di sekitar *radial active magnetic bearing* yang dianggap sebagai ruang permeabilitas. Pembuatan *region* dilakukan dengan membuat model 3D berbentuk *cylinder* dan diatur sebagai daerah berisikan udara seperti pada gambar. Region membantu mendefinisikan batasan ruang permeabilitas dari objek yang dianalisa.



**Gambar 3.8** Area region yang dipilih

### 3.2.4 Assign Mesh Operation

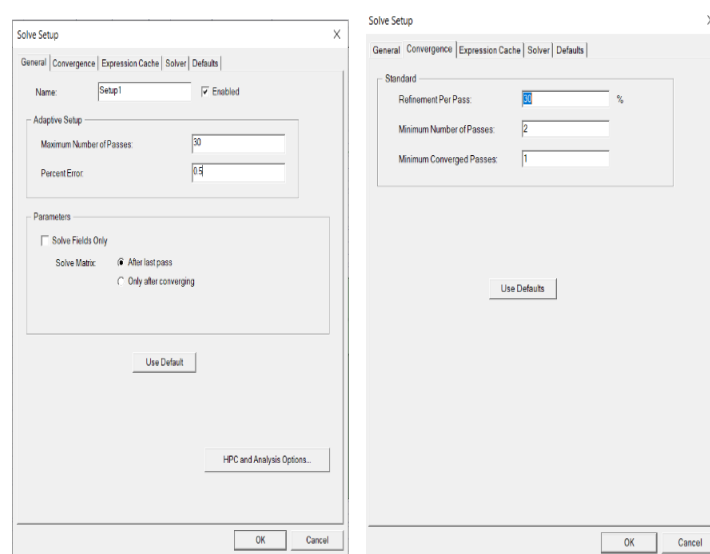


**Gambar 3.9** Mesh operation

Selanjutnya, pengaturan *mesh* pada setiap model 3 dimensi. *Mesh operation* diterapkan pada rotor, stator, dan kumparan. Bentuk *meshing* volume yang digunakan dalam *software* ini adalah tipe tetrahedral. Sedangkan metode *mesh* yang digunakan yaitu *Mesh inside selection, length based*. Mesh yang digunakan pada komponen rotor, stator, dan koil masing-masing menggunakan metode *maximum number of additional element* sebesar 8000 elemen.

### 3.2.5 Setup Analysis

Merupakan langkah pengaturan untuk mendapatkan proses iterasi *mesh* yang mencapai konvergen. Dengan menggunakan metode *adaptive passes* pada *software* sebanyak 30 dengan persentase *error* sebesar 0.5% seperti pada Gambar 3.10.



Gambar 3.10 Pengaturan *solve setup*

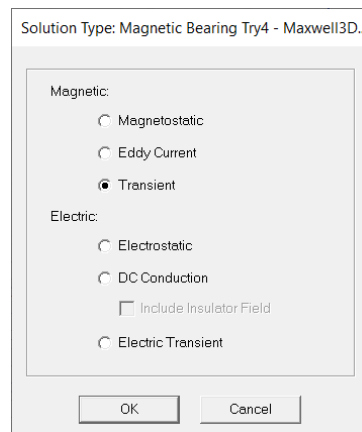
### 3.2.6 Iterate

Setelah menentukan *Setup Analysis* langkah berikutnya adalah *iterate*, yang bertujuan untuk mengetahui apakah panjang *mesh* yang ditentukan telah mencapai kriteria konvergen. Jika hasil analisa tidak mencapai kriteria untuk dianggap konvergen, maka perlu dilakukan perbaikan pada *meshing* yang telah dibuat.

Pass	# Tetrahedra	Total Energy (J)	Energy Error (%)	Delta Energy (%)
1	19230	2.9041e-06	7.495	N/A
2	25009	2.8765e-06	4.4697	0.95042
3	32514	2.8653e-06	3.3712	0.38674
4	42272	2.8501e-06	2.4877	0.53193
5	54964	2.8413e-06	1.9837	0.30972
6	71456	2.834e-06	1.5044	0.25661
7	92911	2.8276e-06	1.1398	0.21819
8	120800	2.8222e-06	0.87128	0.1961
9	157044	2.817e-06	0.69339	0.18537
10	204161	2.812e-06	0.547	0.17674
11	265416	2.8095e-06	0.44187	0.089821
12	345047	2.8074e-06	0.34254	0.073663
13	448566	2.8057e-06	0.26497	0.06134
14	583140	2.8044e-06	0.20975	0.047805
15	758087	2.8033e-06	0.16401	0.038359

Gambar 3.11 Hasil analisis *mesh*

### 3.2.7 Menentukan Solution Type

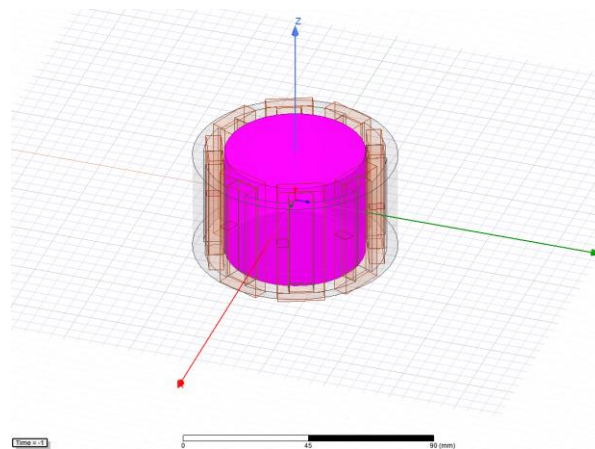


**Gambar 3.12** *Transient solution type*

*Solution type* berfungsi untuk menentukan jenis penyelesaian simulasi yang diinginkan. Pada penelitian ini menggunakan penyelesaian *transient*, karena *transient* sesuai dengan pengaplikasiannya yaitu *active magnetic bearing* dengan sumber *current*.

### 3.2.8 Create Band Region

Merupakan langkah untuk membuat *region* berbentuk tabung bervolume vakum yang menyelubungi rotor, yang merupakan bagian yang berputar pada sistem bearing. *Region* ini berfungsi untuk *setting motion* rotor

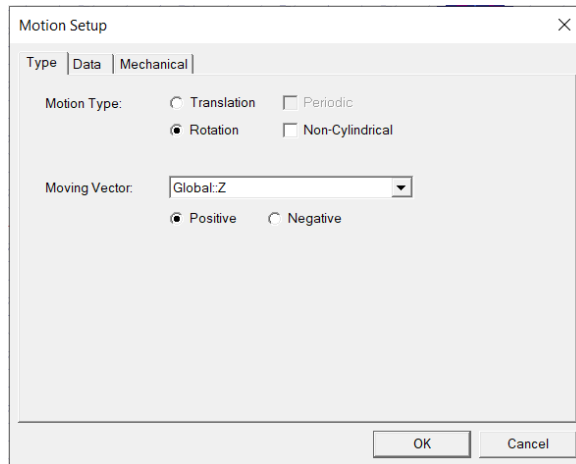


**Gambar 3.13** *Band region*

### 3.2.9 Assign Motion

Pada langkah ini dilakukan *setting motion* pada komponen yang telah diselubungi *region* yaitu rotor. Rotor diberikan *input motion* berupa *rotation* dengan *moving vector positive*

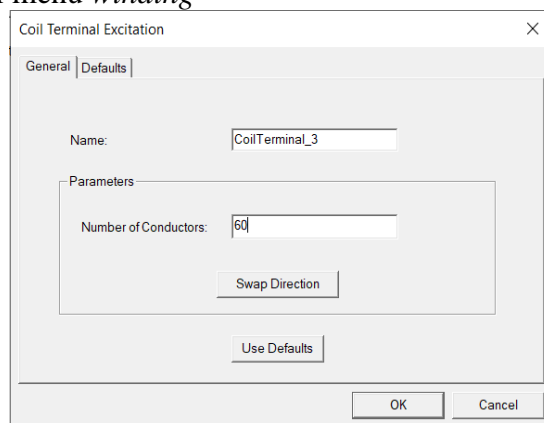




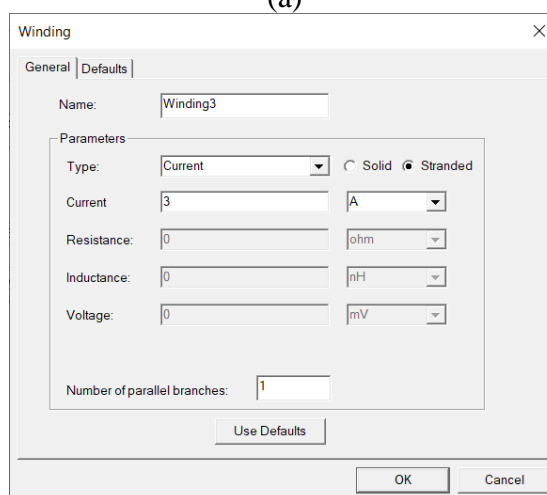
**Gambar 3.14** *Setting motion rotor*

### 3.2.10 *Menentukan Excitation*

Excitation berfungsi untuk memberikan input pada kumparan berupa arus, tegangan, hambatan, induktansi, dan lain-lain. Excitation yang dipilih dalam penelitian ini adalah *coil terminal*, kemudian *coil terminal* tersebut di-*input*-kan current melalui menu *winding*



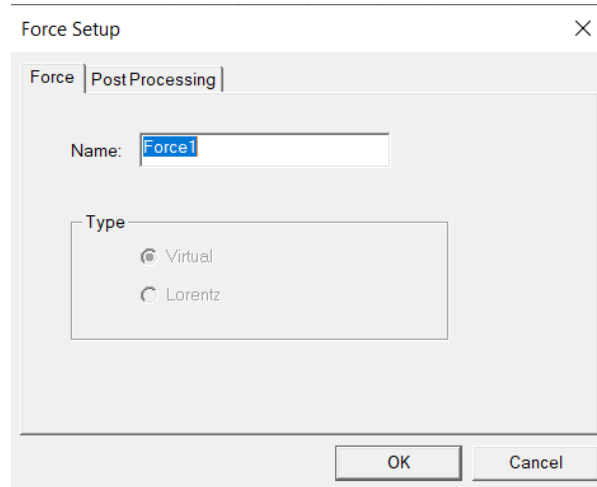
(a)



(b)

**Gambar 3.15** (a) Eksitasi *coil terminal*. (b) Add winding

### 3.2.11 Assign Parameter

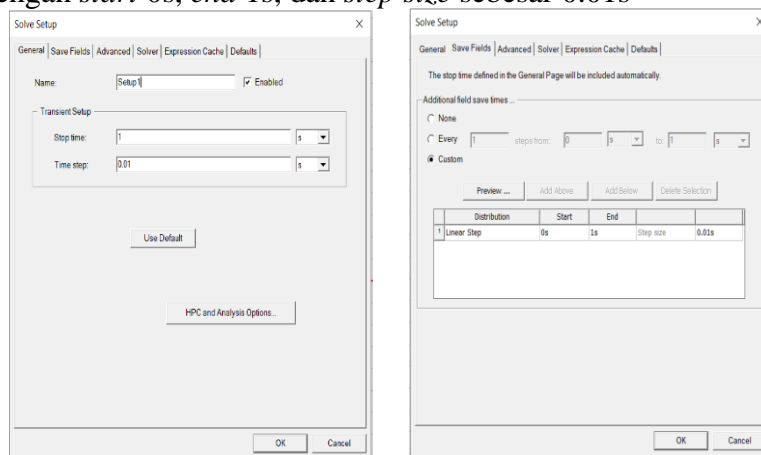


Gambar 3.16 Assign force

*Assign Parameter* berfungsi untuk menentukan parameter yang nantinya dihasilkan dari simulasi. Pada penelitian ini, parameter yang digunakan adalah *force*. Penentuan parameter dilakukan dengan terlebih dulu memilih objek yang akan dianalisis, yaitu rotor dan stator. Kemudian buka menu parameters dan pilih *assign force*.

### 3.2.12 Menentukan Analysis Setup

*Analysis setup* mendefinisikan parameter yang digunakan untuk penyelesaian simulasi. Penentuan *analysis setup* dilakukan dengan memilih *add solution setup* pada menu *analysis setup*. Kemudian input *stop time* sebesar 1 s dan *time stop* sebesar 0.01 s. Pada menu *save field* pilih *custom* dan input *linear step* dengan *start* 0s, *end* 1s, dan *step size* sebesar 0.01s



(a)

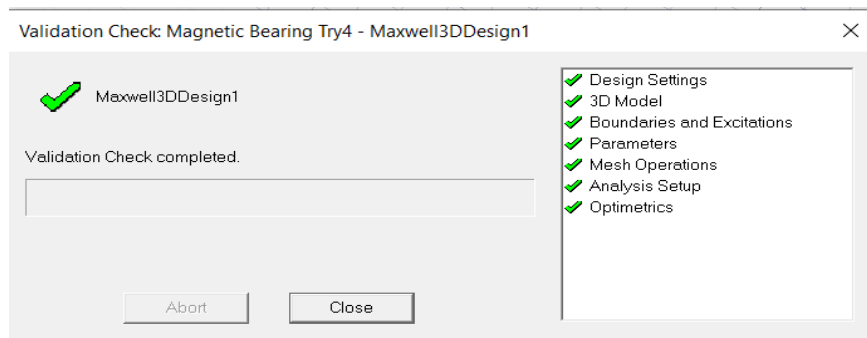
(b)

Gambar 3.17 (a) Solve setup general. (b) Solve setup save field.

### 3.2.13 Validation Check dan Analyze All

*Validation check* merupakan tahapan terakhir sebelum simulasi dijalankan. Tahapan ini berfungsi untuk memastikan bahwa seluruh kriteria sudah terpenuhi. Apabila tidak terdapat masalah dan seluruh kriteria terpenuhi, seperti ditunjukkan

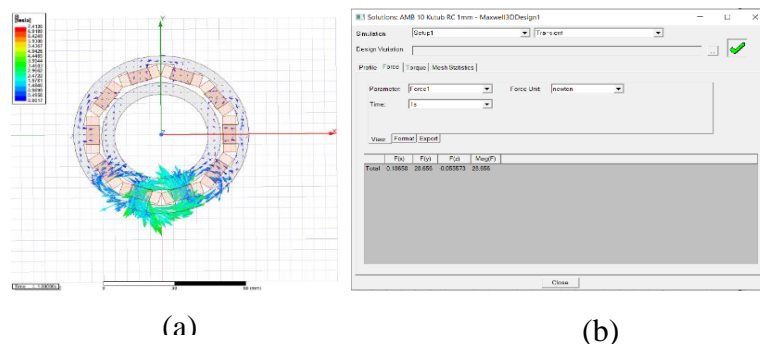
pada Gambar 3.12, maka simulasi dapat dimulai ke tahap analisis dengan memilih menu *analyze all*.



**Gambar 3.18** Validation Check

### 3.2.14 Create Quick Report

Setelah proses simulasi dan analisis 3D *finite element* selesai, didapatkan hasil simulasi berupa grafik gaya dengan derajat putar bearing. Pada Gambar 3.19 terlihat anak panah yang menunjukkan vektor dari *flux density* disertai dengan warna yang menunjukkan besar *flux density*. Dan diperoleh besar gaya radial yang bekerja pada *active magnetic bearing*



**Gambar 3.19** (a) Nilai dan arah vektor *flux density*. (b) Gaya radial AMB

## 3.3 Proses Eksperimen

Pada saat eksperimen dilakukan dengan menggunakan model *Magnetic Bearing* dimana variasi yang digunakan dalam eksperimen ini adalah berupa jumlah lilitan dan kuat arus. Alat yang digunakan dalam eksperimen ini adalah *T-Sot Aluminium Profil*. Pada eksperimen, gaya radial didapatkan dari beban maksimal yang dapat diterapkan. Beban yang dipasang adalah sebesar 5 kg sampai 45 kg. Gaya radial yang didapat kemudian akan dibandingkan dengan hasil simulasi. Namun, pada eksperimen digunakan 2 *magnetic bearing* untuk mengangkat *shaft*, sehingga perbandingan yang dilakukan adalah terhadap 2 kali gaya radial simulasi.

### 3.3.1 Peralatan Eksperimen

Peralatan yang digunakan dalam eksperimen ini antara lain adalah sebagai berikut:

1. *Magnetic Bearing*

Untuk bagian stator dan rotor pada *magnetic bearing* dibuat dari proses manufaktur dengan material *iron*.

2. Rumah poros

Digunakan untuk menempatkan Active Magnetic Bearing (AMB)

3. Poros dari material aluminium

4. Beban

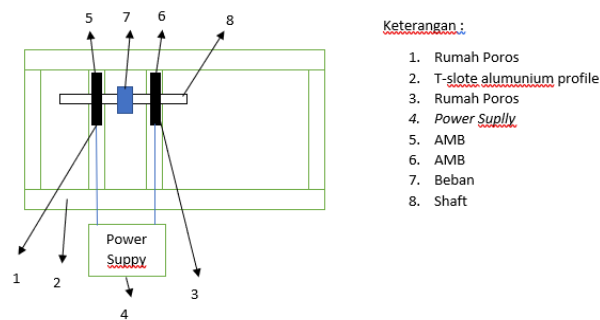
Beban ini berupa piring beban yang bertujuan untuk mengukur gaya radial yang ditimbulkan oleh medan magnet.

5. *Power Supply*

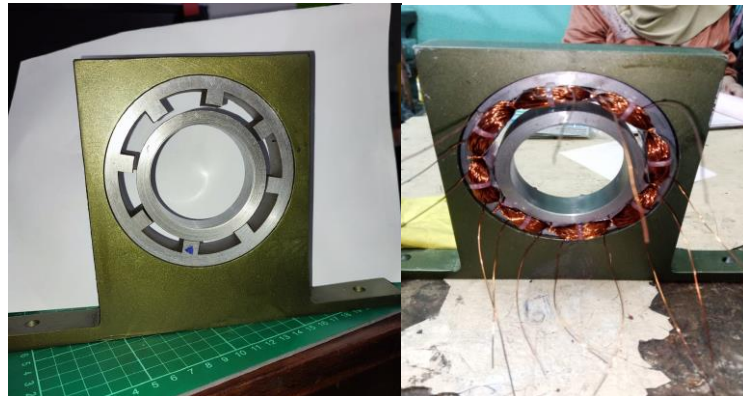
Komponen perangkat keras yang berperan sebagai penyedia listrik dan daya yang digunakan

**3.3.2 Instalasi Peralatan dan Spesifikasi Desain Bearing**

Eksperimen ini dilakukan dengan memasang *magnetic bearing* pada rumah *bearing*. Kemudian dilakukan pemasangan *shaft* pada *magnetic bearing*. Pada *shaft* tersebut kemudian diberikan beban. Gambar 3.20 di bawah ini merupakan gambaran instalasi peralatan.



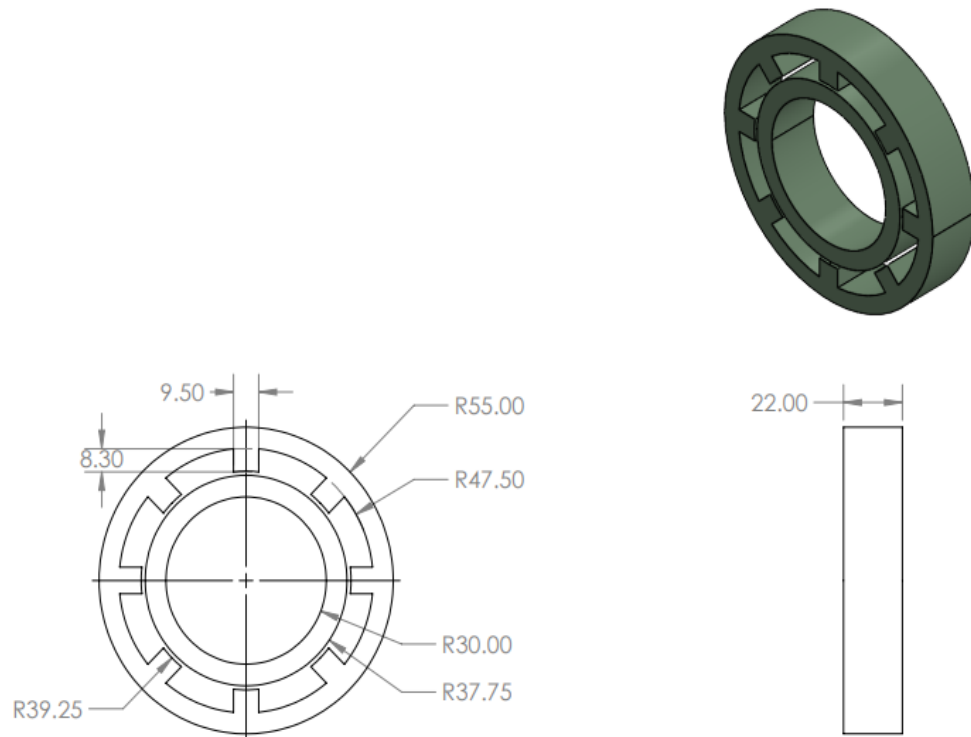
**Gambar 3.20** Instalasi Peralatan Pengujian



**Gambar 3.21** Magnetic Bearing

Parameter	Value
Diameter dalam rotor	60 mm
Diameter luar rotor	75,5 mm
Diameter dalam stator	95 mm
Diameter luar stator	110 mm
Wire diameter	1,45 mm (15 AWG)
Jumlah lilitan	150
Tebal pole	22 mm
Radial clearance	1,5 mm

**Gambar 3.22** Desain Parameter



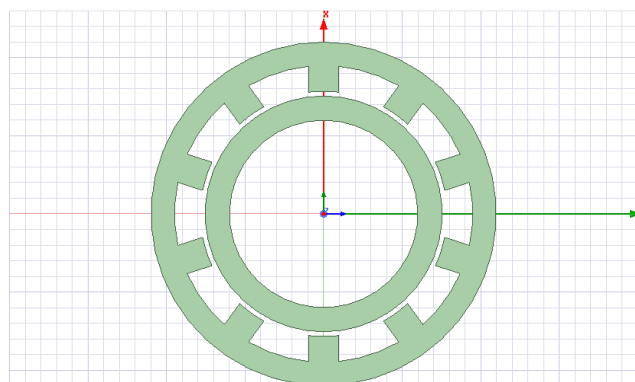
**Gambar 3.23 Gambar Teknik**

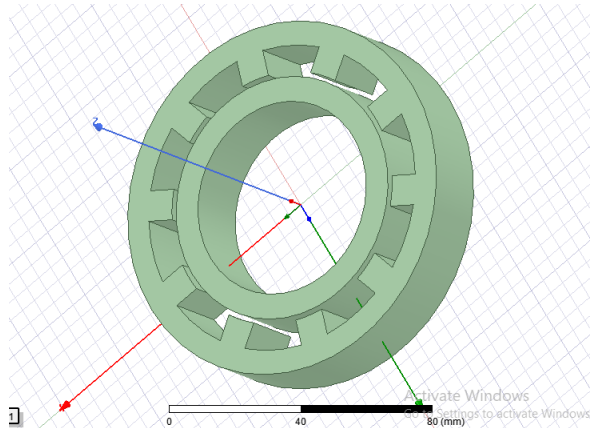
### 3.3.3 Langkah-Langkah Eksperimen

Untuk mempermudah dalam melakukan eksperimen, berikut merupakan tahapan eksperimen pada penelitian ini yang meliputi

#### 1. Tahap Perancangan Alat

- a. Pembuatan model 3D dari *magnetic bearing* yang disesuaikan dengan pembuatan model pada saat simulasi. Adapun gambar 3.21 di bawah ini merupakan gambaran desain 3D yang dibuat.





**Gambar 3.24** Desain Geometri Alat 3D

b. Proses Manufactur

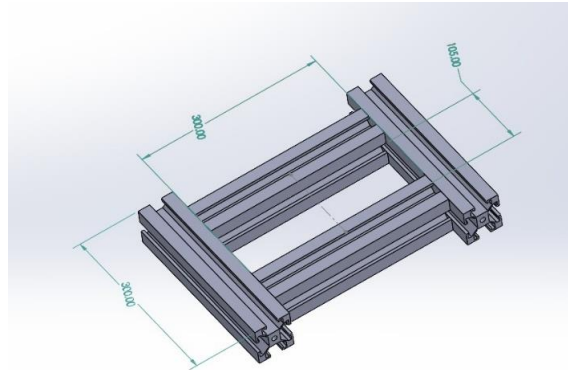
Pada tahapan ini *magnetic bearing* dibuat dengan proses bubut, milling, dan bore dimana material yang digunakan adalah material besi.

c. Pemasangan Lilitan

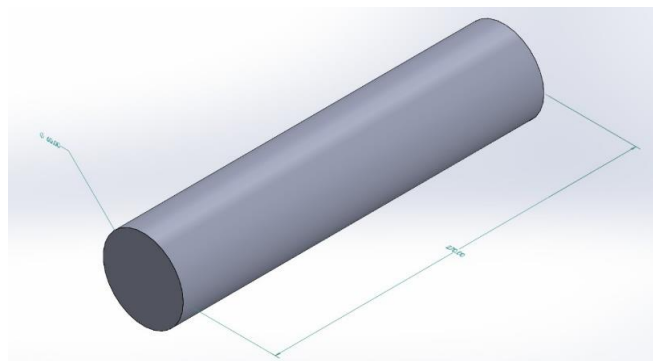
Pada tahapan ini, *magnetic bearing* yang telah melewati proses manufactur kemudian dipasang lilitan dengan tujuan untuk membuat magnet.

d. Perancangan Skema Peralatan Uji

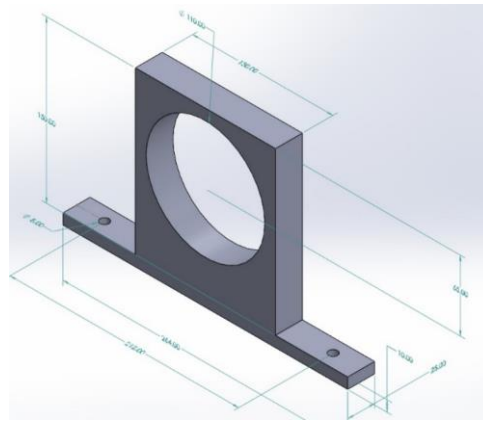
Setelah *magnetic bearing* dipasang lilitan, proses selanjutnya adalah dilakukan perancangan skema peralatan uji.



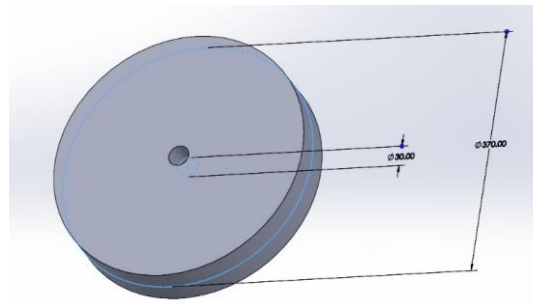
(a)



(b)



(c)



(d)

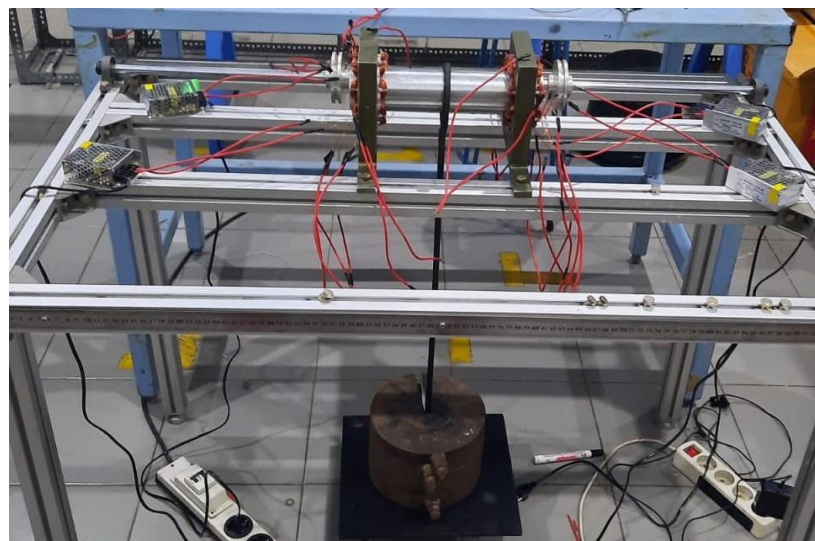
**Gambar 3.25** Desain rancangan bagian-bagian alat uji eksperimen (a) *Subassembly t-slot aluminium profile 4040 dan 4080* (b) *Shaft* (c) *Dudukan Poros* (d) *Beban*

e. Proses Manufactur Peralatan Uji

Pada tahapan ini tahapannya adalah sama dengan pada tahapan proses manufactur *magnetic bearing*.

f. Assembly Komponen-Komponen Eksperimen

Gambar 3.23 di bawah ini merupakan gambaran dari proses assembly komponen-komponen eksperimen.



**Gambar 3.26** Assembly komponen-komponen eksperimen

2. Tahap Persiapan

Adapun Langkah pada tahapan persiapan adalah sebagai berikut:

- a. Seluruh peralatan yang dibutuhkan untuk eksperimen disiapkan.
- b. Peralatan dirangkai sesuai dengan skema percobaan..
- c. AMB yang sudah memiliki variasi jumlah lilitan tertentu dialiri kuat arus lalu dipasang dengan *shaft*, dan ketika sudah terpasang maka akan diberi beban pada tempat beban untuk menghitung gaya radial
- d. Sistem peralatan uji dipastikan terpasang dengan benar sesuai skema peralatan.
- e. Alat tulis disiapkan untuk mencatat data

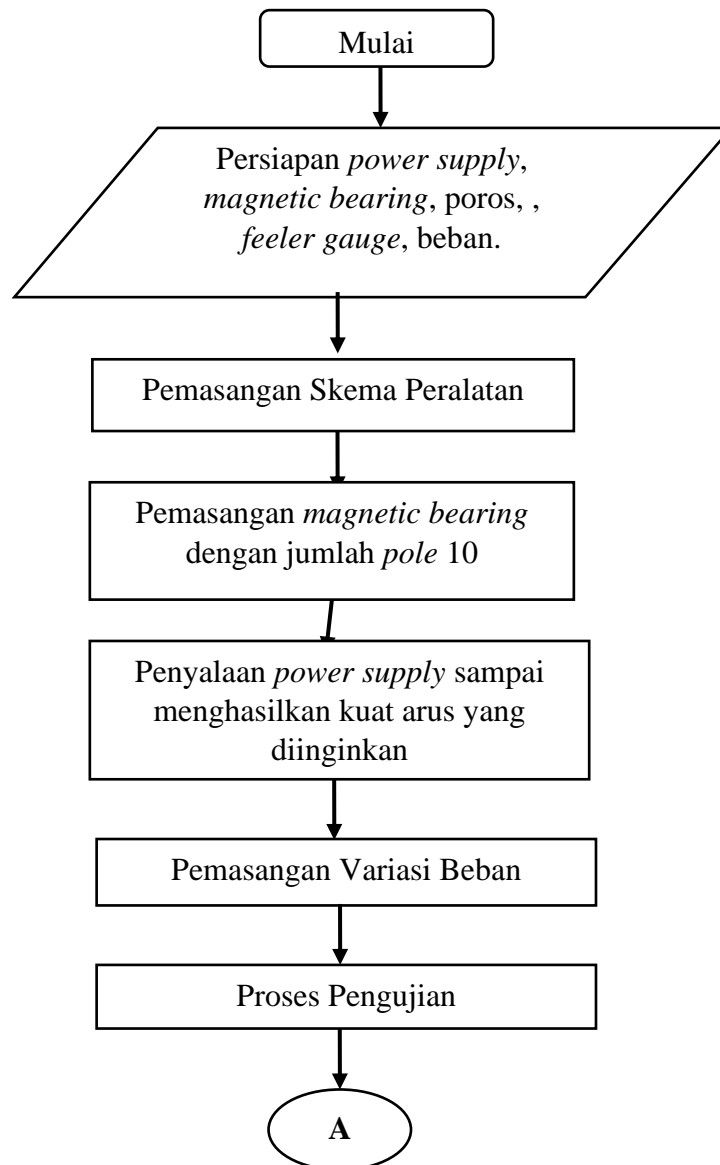
3. Tahapan Pengambilan Data

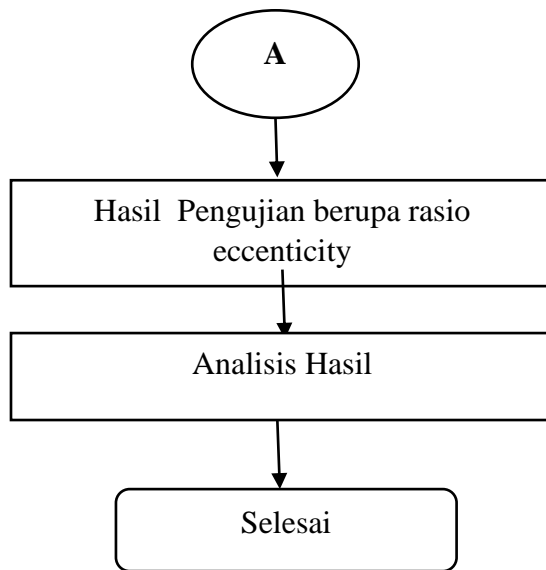
- a. Melakukan pemasangan *magnetic bearing* dengan jumlah *pole* 10 menggunakan variasi jumlah lilitan yang sudah ditetapkan.
- b. Melakukan penyesuaian *air gap* sesuai dengan variasi yang digunakan.
- c. Menyalakan *power supply* untuk me-*supply* kuat arus yang diinginkan.
- d. Memasang beban pada *shaft* dengan variasi yang sudah ditetapkan.
- e. Besar dari gaya radial dicatat sesuai dengan variasi penambahan beban.
- f. Mematikan *power supply*.
- g. Langkah b hingga f dilakukan untuk variasi jumlah lilitan dan besar kuat arus yang telah ditentukan.



### 3.3.4 Diagram Alir Proses Eksperimen

Adapun gambar 3.25 di bawah ini merupakan gambar diagram alir proses eksperimen yang dilakukan.





**Gambar 3.27** Diagram Alir Eksperimen

### 3.3.5 Pengambilan Data Hasil Eksperimen dan Pengolahan Hasil Eksperimen

**Tabel 3.4** Tabel Lembar Data Eksperimen

Konfigurasi pole	Kuat Arus	Jumlah lilitan	2 X Gaya radial simulasi (N)	Gaya radial Eksperimen (N)	error
8 pole aktif	3A	150			
4 pole atas					
2 pole atas 2 pole bawah					
2 pole atas					

## BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini dilakukan simulasi menggunakan metode elemen hingga (*finite element methode*) untuk mendapatkan nilai gaya radial dan nilai *flux density* dari beberapa variasi yang dilakukan pada desain *radial active magnetic bearing*. Terdapat tiga jenis variasi, antara lain variasi besar arus, jumlah lilitan, dan *eccentricity*. Variasi besar arus yang digunakan adalah sebesar 2 A hingga 3 A dengan kenaikan sebesar 0,5 A. Kemudian variasi *eccentricity* sebesar 1,2, 1,3, dan 1,4, sedangkan variasi jumlah lilitan sejumlah 110 lilitan, 130 lilitan, dan 150 lilitan. Simulasi dilakukan dengan menggunakan metode penyelesaian *transient* pada software Ansys Electronics Maxwell 3D 19R1. Melalui proses simulasi transient didapatkan data nilai gaya radial dan nilai beserta arah distribusi *flux density*. Hasil dari simulasi digunakan untuk menganalisis pengaruh dari setiap variasi terhadap nilai gaya radial yang dihasilkan oleh *radial active magnetic bearing* dengan membandingkan hasil dari setiap variasi, sehingga didapatkan hasil paling optimal dari variasi yang dilakukan.

### 4.1 Analisis Hasil Eksperimen

Setelah dilakukan analisis menggunakan metode simulasi, selanjutnya dilakukan analisis menggunakan metode eksperimen. Analisis ini memiliki tujuan untuk mengetahui gaya radial maksimal yang dapat dihasilkan. Pada penelitian ini pembebanan yang dilakukan pada uji eksperimen adalah beban statis kearah gravitasi. Pada proses eksperimen ini rotor menempel dengan 2 pole atas, atau bisa dikatakan tidak ada air gap, maka untuk simulasi juga dilakukan sesuai dengan eksperimen. Penyebab tidak bisanya rotor berada pada titik center disebabkan oleh toleransi manufacture yang kurang baik dan juga dibutuhkan sensor posisi untuk embuat rotor tetap berada pada center. Untuk variasi yang digunakan dalam eksperimen ini adalah menggunakan variasi konfigurasi pengaktifan *pole*. Eksperimen dilakukan pada kuat arus 3A dan jumlah lilitan 150. Hal ini menyesuaikan power supply yang tersedia sebesar 5V, 3A serta dimensi yang terbatas dari desain *active magnetic bearing* yang hanya mampu menampung maksimal 150 lilitan, maka untuk itu pada eksperimen ini dilakukan dengan konfigurasi pengaktifan pole. Selain itu, hasil dari metode eksperimen ini juga digunakan sebagai pembanding hasil pada metode simulasi. Data hasil dari metode eksperimen yang telah dilakukan berupa beban maksimal yang dapat diterima oleh *active magnetic bearing*. Setelah didapatkan hasil dari metode simulasi dan metode eksperimen, kedua data tersebut selanjutnya dapat dibandingkan sesuai dengan variasi konfigurasi pengaktifan *pole*, yaitu 8 *pole* aktif, 4 *pole* aktif atas, 2 *pole* atas, dan 2 *pole* atas 2 *pole* bawah.

**Tabel 4.1** Data Hasil Simulasi dan Eksperimen

Konfigurasi pole	Kuat Arus	Jumlah lilitan	2 X Gaya radial simulasi (N)	Gaya radial Eksperimen (N)	error
8 pole aktif	3A	150	406,6	350-400	1,62%-13%
4 pole atas			416,00	400-450	3,8%-8,17%
2 pole atas 2 pole bawah			152,40	250-300	1,57%-18%
2 pole atas			176,83	300-350	1,03%-15,2%

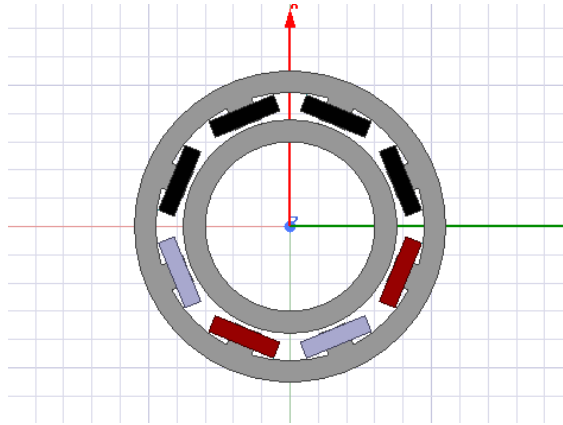
Dari tabel 4.1 dapat diketahui perbandingan data hasil dari simulasi dan eksperimen, dimana pada simulasi didapatkan hasil berupa gaya radial maksimum dari *active magnetic bearing* sedangkan pada eksperimen didapatkan hasil berupa beban maksimal yang dapat diterima oleh *active magnetic bearing*. Karena pada eksperimen digunakan 2 buah magnetic bearing, maka perbandingan gaya radial dilakukan 2 kali nilai gaya radial pada simulasi. Pada simulasi dan eksperimen digunakan kuat arus dan jumlah lilitan yang sama, yaitu dengan kuat arus 3A dan jumlah lilitan sebanyak 150 lilitan. Pada simulasi dan eksperimen juga diberikan variasi yang sama, yaitu variasi konfigurasi *pole* yang terdiri dari empat variasi. Variasi tersebut meliputi 8 *pole* aktif, 4 *pole* aktif atas, 2 *pole* atas 2 *pole* bawah, dan 2 *pole* atas. Dari tabel tersebut, dapat diketahui bahwa pada variasi konfigurasi 8 *pole* aktif menghasilkan data gaya radial maksimum yang didapat dari simulasi adalah sebesar 203,3 N atau 406,6 N untuk 2 buah bearing dan gaya radial maksimum hasil dari eksperimen berada pada range 350-400 N. Untuk variasi konfigurasi 4 *pole* atas mendapatkan hasil gaya radial simulasi sebesar 208 N atau 416 N untuk 2 buah bearing dan gaya radial maksimum hasil dari eksperimen berada pada range 400-450 N. Tabel tersebut juga memuat hasil data untuk variasi 2 *pole* atas 2 *pole* bawah yaitu sebesar 152,4 N atau 304,8 N untuk 2 bearing dan gaya radial maksimum hasil dari eksperimen berada pada range 250-300 N. Sedangkan hasil yang didapat untuk variasi terakhir atau variasi 2 *pole* atas adalah sebesar 176,83 N atau 353,66 N untuk gaya radialnya dan gaya radial maksimum hasil dari eksperimen berada pada range 300-350 N. Pada tabel diatas menunjukkan data hasil simulasi dan eskperimen untuk variasi 8 *pole* aktif, dimana memiliki selisih nilai gaya radial hasil simulasi dan gaya radial eksperimen dengan range 1,62%-13%. variasi 4 *pole* atas yang memiliki selisih nilai gaya radial hasil simulasi dan gaya radial eksperimen dengan range 3,8%-8,17%. variasi 2 *pole* atas 2 *pole* bawah dan memiliki selisih dengan range 1,57%-18%. Sedangkan dari variasi konfigurasi 2 *pole* atas dimana menunjukkan selisih untuk kedua hasil dengan range sebesar 1,03%-15,2%.

Perbedaan hasil antara simulasi dan eksperimen ini dapat terjadi karena beberapa faktor, misalnya adanya eddy current losses, hysteresis losses dan Hambatan lilitan. Eddy current losses adalah kerugian yang muncul dari arus listrik yang bersirkulasi yang diinduksi dengan bahan konduktor dalam kasus ini material yang digunakan oleh stator berupa carbon steel dan material lilitan menggunakan cooper, untuk meminimalkan eddy current losses ini dapat dilakukan dengan menggunakan lapisan tipis yang melindungi permukaan dari stator yang biasanya terbuat dari material silicon. hysteresis losses adalah panas yang dihasilkan dari gaya magnetisasi untuk menghilangkan magnet sisa yang tersisa dalam stator. Hambatan lilitan dalam kasus eksperimen memiliki nilai yang berbeda dalam masing-masing kumoaran, hal ini meyebabkan besarnya arus yang mengalir dalam kumparan juga akan berbeda dan juga dapat mempengaruhi dari besar gaya magnet yang dihasilkan dari masing- masing pole.

## 4.2 Analisis Gaya Radial Hasil Simulasi Transient

Simulasi transient dilakukan dengan beberapa macam konfigurasi *radial active magnetic bearing* yang menggunakan tiga macam variasi jumlah lilitan, yaitu 110 lilitan, 130 lilitan, dan 150 lilitan. Variasi besar arus yang digunakan adalah 2 A, 2,5 A, dan 3 A. Sedangkan untuk variasi *eccentricity* sebesar 1,1 mm, 1,2 mm, dan 1,3 mm. Setiap konfigurasi variasi tersebut menggunakan dimensi yang konstan menyesuaikan dimensi mechanical bearing tipe Insert Bearing with a Standard Inner Ring dengan diameter terluar sebesar 110 mm, diameter terdalam sebesar 60 mm, dan lebar bearing sebesar 22 mm, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.1. Dari proses simulasi ini, dapat diketahui nilai maksimal dari gaya radial, nilai dan arah flux density yang dapat dihasilkan dari setiap konfigurasi radial active magnetic bearing. Hasil simulasi yang diperoleh tersebut

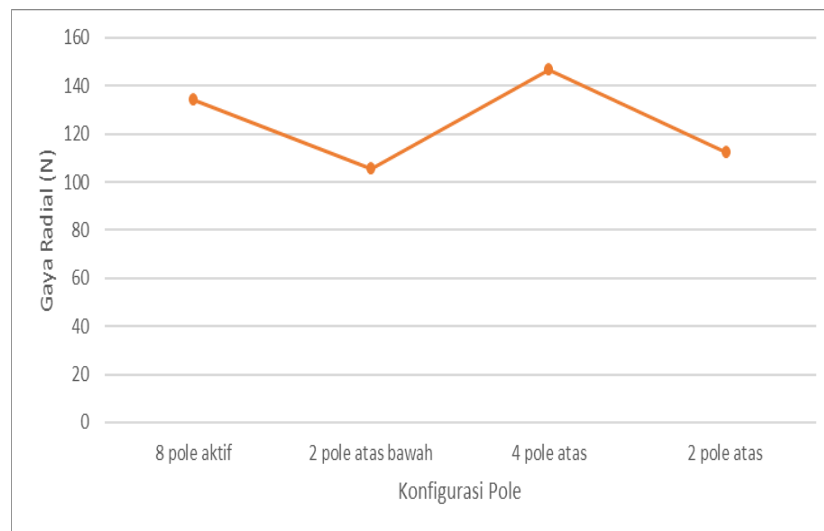
kemudian dibandingkan antara data satu dengan data yang lain pada setiap variasinya sehingga dapat diketahui pengaruh dari setiap variasi yang dilakukan. Hasil simulasi dinyatakan berhasil apabila telah sesuai dengan parameter desain yang telah ditentukan



**Gambar 4.1** Konfigurasi desain *radial active magnetic bearing*

#### 4.2.1 Analisis Konfigurasi Pole

Pada analisis ini dilakukan perbandingan hasil simulasi pada 4 macam konfigurasi pengaktifan pole yaitu 8 pole, 4 pole atas, 2 pole atas bawah, dan 2 pole atas. Dari setiap variasi tersebut digunakan jumlah lilitan yang sama yaitu 150, kuat arus 3 A dan pergeseran atau eccentricity yang sama yaitu sebesar 1,4.



**Gambar 4.2** grafik perbandingan gaya radial dengan variasi konfigurasi pole

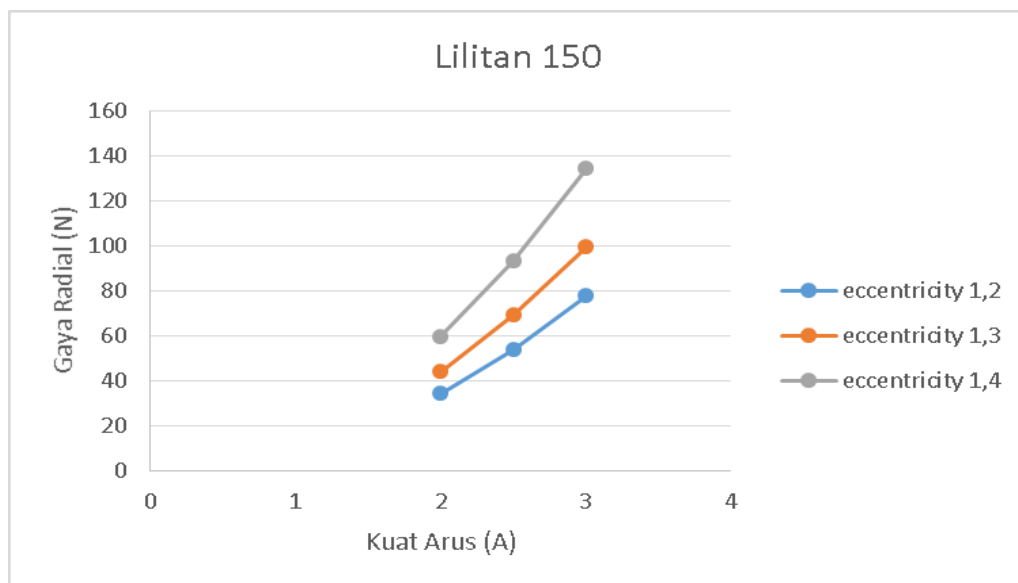
Pada grafik diatas, grafik 4.2 terdapat satu garis yang menghubungkan 4 titik hasil gaya radial dari masing-masing konfigurasi pole, dimana dari hasil tersebut akan dilakukan dianalisis. Pada radial clearance yang sama yaitu sebesar 1,5 mm, didapatkan gaya radial sebesar 134,4 N untuk variasi konfigurasi 8 pole aktif, untuk variasi konfigurasi 2 pole atas bawah aktif didapatkan gaya radial sebesar 105,35 N, untuk

variasi konfigurasi 4 pole atas aktif didapatkan gaya radial sebesar 146,84 N, dan untuk variasi konfigurasi 2 pole atas aktif didapatkan gaya radial sebesar 112,46 N.

Dari hasil analisis diatas diketahui bahwa nilai gaya radial terbesar dihasilkan oleh variasi konfigurasi 4 pole atas aktif dengan nilai 146,84 N, sementara gaya radial terkecil dihasilkan oleh variasi konfigurasi 2 pole atas bawah aktif dengan nilai 105,35 N. dari analisa data atau grafik diatas kita juga bisa membandingkan hasil antara pengaktifan pole bagian atas saja dengan pengaktifan pole bagian atas bawah. Untuk kasus variasi konfigurasi 4 pole atas aktif dan 8 pole aktif didapatkan hasil lebih tinggi didapatkan oleh variasi konfigurasi 4 pole atas aktif, hal ini dipengaruhi oleh tidak adanya gaya Tarik magnet/force magnetic dari sisi bawah. Hal itu juga berlaku untuk variasi konfigurasi 2 pole atas bawah aktif dan 2 pole atas aktif, didapatkan hasil gaya radial untuk 2 pole atas aktif lebih besar.

#### 4.2.2 Analisis Pengaruh Variasi *Eccentricity*

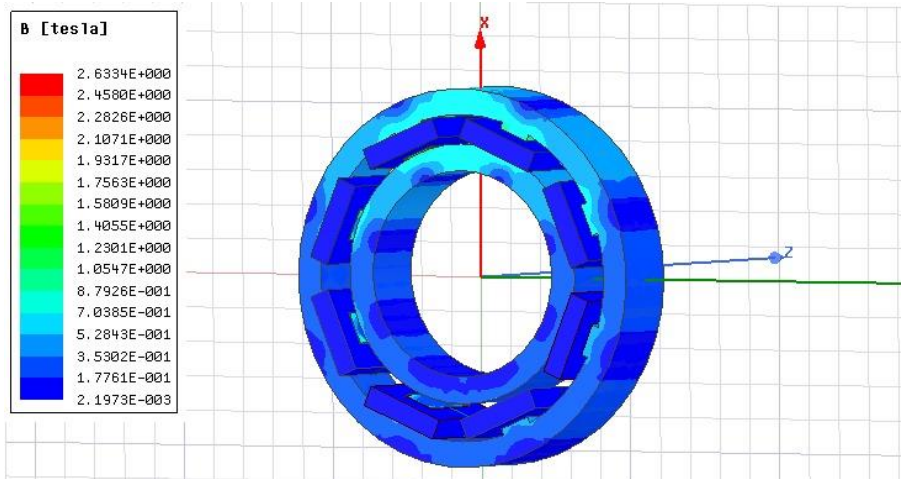
Pada analisis ini dilakukan perbandingan hasil simulasi pada tiga posisi pergeseran rotor sebesar 1,2, 1,3, dan 1,4. Dari setiap perpindahan tersebut, dilakukan pada *radial clearance* sebesar 1,5 mm pada *radial active magnetic bearing* 8 kutub.



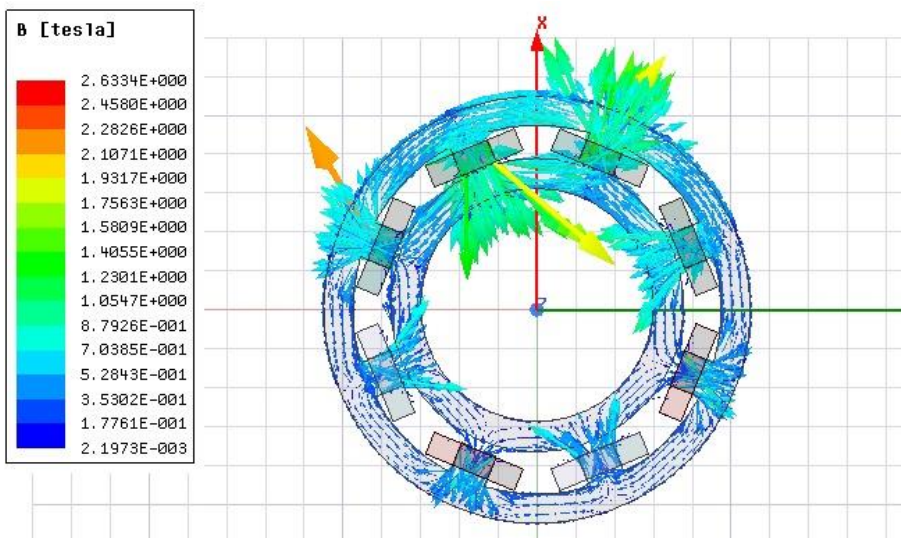
**Gambar 4.3** Grafik perbandingan gaya radial dengan variasi *eccentricity rotor* pada AMB 8 kutub

Pada Gambar 4.2 terdapat 3 garis grafik di mana masing – masing menunjukkan nilai gaya radial pada *radial active magnetic bearing* 8 kutub dengan variasi *eccentricity* sebesar 1,2: 1,3; dan 1,4 serta menggunakan variasi arus sebesar 2A, 2,5A, dan 3A untuk dilakukan analisis. Pada *radial clearance* yang sama yaitu sebesar 1,5 mm, nilai maksimal gaya radial yang dihasilkan dari setiap pergeseran tersebut adalah sebesar 78 N, 100 N, dan 134,4 N. Pada variasi kuat arus 2 A, nilai gaya radial yang didapat untuk *eccentricity* 1,2 adalah sebesar 35 N, untuk *eccentricity* 1,3 sebesar 44,23 N, dan untuk *eccentricity* 1,4 adalah sebesar 60 N. Pada variasi kuat arus 2,5 A, nilai gaya radial yang didapat untuk

variasi *eccentricity* 1,2 adalah sebesar 54 N, untuk variasi *eccentricity* 1,3 adalah sebesar 69 N, dan untuk variasi *eccentricity* 1,4 adalah sebesar 93 N. Untuk variasi kuat arus 3 A, nilai gaya radial yang didapatkan untuk variasi *eccentricity* 1,2 adalah sebesar 78 N, untuk variasi *eccentricity* 1,3 adalah sebesar 100 N, dan untuk variasi *eccentricity* 1,4 adalah sebesar 134,4 N. Dari sini dapat diketahui bahwa pada *radial clearance* yang sama, yaitu sebesar 1,5 mm dan variasi kuat arus 2 A, 2,5 A, dan 3 A yang dilakukan untuk masing-masing variasi *eccentricity*, menghasilkan nilai gaya radial terbesar yang ditunjukkan pada variasi *eccentricity* 1,4.



(a)

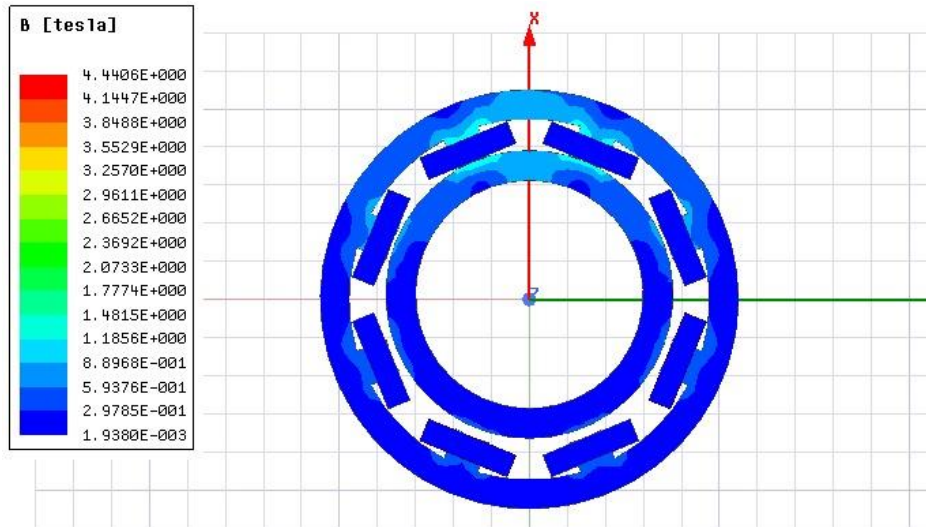


(b)

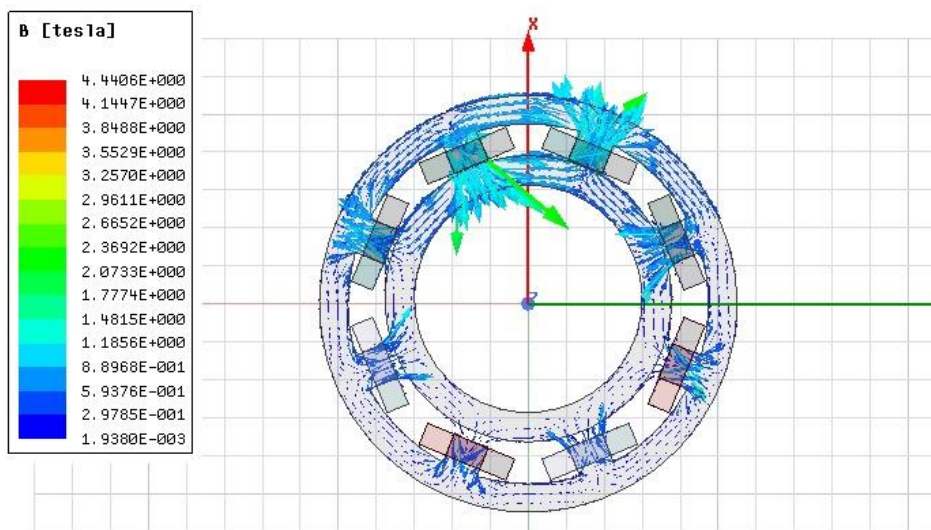
**Gambar 4.4** Hasil simulasi *radial active magnetic bearing* 8 kutub dengan rasio *eccentricity* 1,2. (a) Distribusi *flux density*. (b) Arah vektor *flux*.

Gambar 4.3 merupakan visualisasi hasil simulasi *radial active magnetic bearing* 8 kutub dengan rasio *eccentricity* 1,2. Gambar 4.3 (a) adalah ilustrasi dari distribusi *flux density*. Terlihat bahwa *flux density* pada permukaan rotor dan stator mayoritas berwarna biru tua. Warna tersebut menunjukkan *flux density* yang bernilai 0,0022 hingga 0,3590 Tesla. Nilai *flux density* terbesar terletak pada bagian bawah *radial active magnetic bearing* yang mana memiliki *air gap* antara stator dan rotor terkecil. Terlihat bahwa *flux*

*density* pada posisi tersebut mayoritas memiliki warna biru muda hingga hijau muda. Warna tersebut menunjukkan nilai dari *flux density* sebesar 0,5284 hingga 1,5809 Tesla dan terdapat distribusi warna berwarna merah pada ujung kutub bagian bawah yang menunjukkan nilai *flux density* sebesar 2,6334 Tesla, yang merupakan *flux density* terbesar. Meninjau pada Gambar 4.3 (b) di mana mayoritas anak panah berwarna biru tua dan pada bagian bawah *radial active magnetic bearing* didominasi oleh *flux density* berwarna biru muda hingga hijau, sesuai dengan distribusi *flux density* pada Gambar 4.3 (a).



(a)



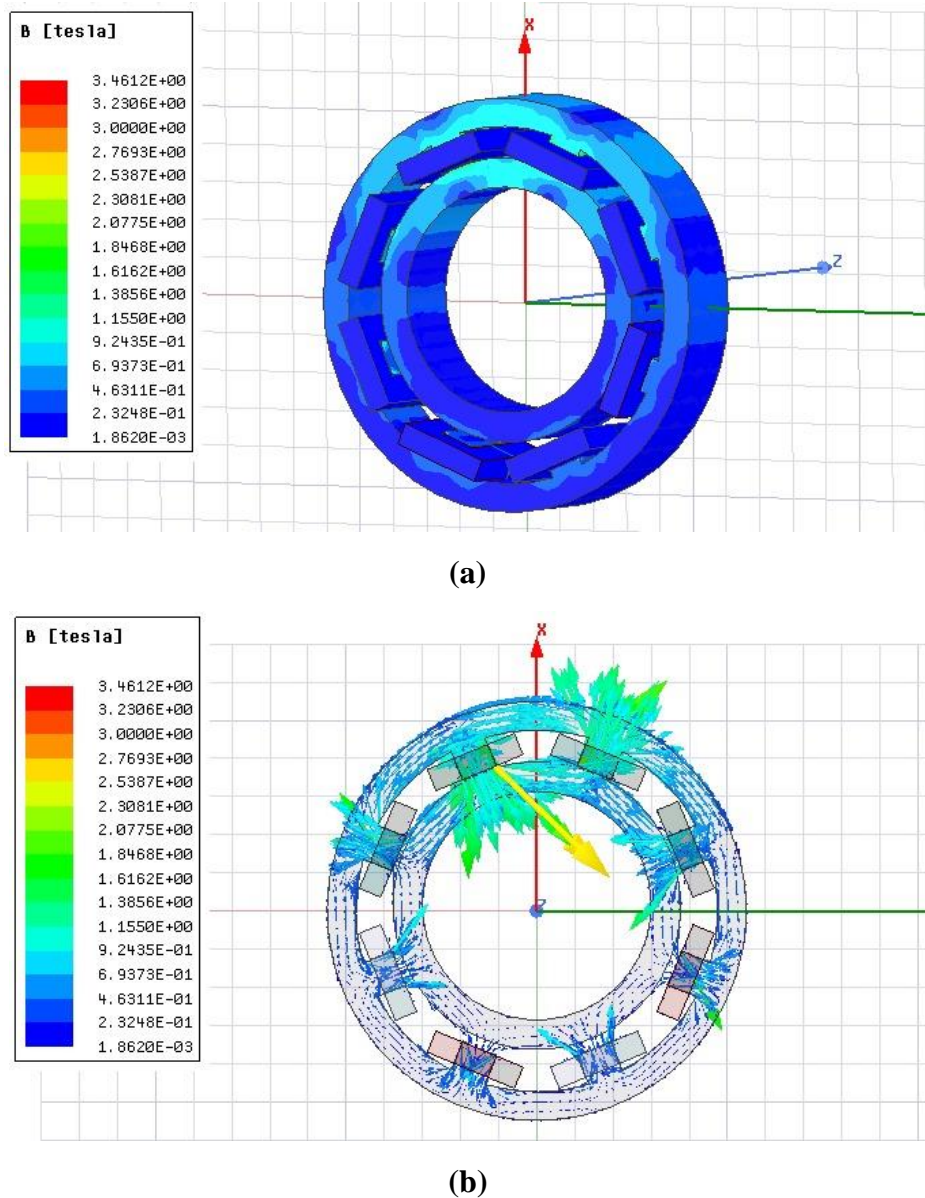
(b)

**Gambar 4.5** Hasil simulasi *radial active magnetic bearing* 8 kutub dengan rasio *eccentricity* 1,3. (a) Distribusi *flux density*. (b) Arah vektor *flux density*

Gambar 4.4 merupakan visualisasi hasil simulasi *radial active magnetic bearing* 8 kutub dengan rasio *eccentricity* 1,3. Gambar 4.4 (a) adalah ilustrasi dari distribusi *flux density*. Terlihat bahwa *flux density* pada permukaan rotor dan stator mayoritas berwarna biru tua. Warna tersebut menunjukkan *flux density* yang bernilai 0,0019 – 0,5937 Tesla. Nilai *flux density* terbesar terletak pada bagian bawah *radial active magnetic bearing* yang mana memiliki *air gap* antara stator dan rotor terkecil. Terlihat bahwa *flux density* pada posisi tersebut mayoritas memiliki warna biru muda hingga hijau muda. Warna tersebut



menunjukkan nilai dari *flux density* sebesar 0,8896 hingga 2,6652 dan terdapat distribusi warna berwarna merah pada ujung kutub bagian bawah yang menunjukkan nilai *flux density* sebesar 4,4406 Tesla, yang merupakan *flux density* terbesar. Meninjau pada Gambar 4.4 (b) di mana mayoritas anak panah berwarna biru tua dan pada bagian bawah *radial active magnetic bearing* didominasi oleh *flux density* berwarna biru muda hingga hijau, sesuai dengan distribusi *flux density* pada Gambar 4.4 (a).



**Gambar 4.6** Hasil simulasi *radial active magnetic bearing* 8 kutub dengan rasio *eccentricity* 1,4. (a) Distribusi *flux density*. (b) Arah vektor *flux density*

Gambar 4.5 merupakan visualisasi hasil simulasi *radial active magnetic bearing* 8 kutub dengan rasio *eccentricity* 1,3. Gambar 4.4 (a) adalah ilustrasi dari distribusi *flux density*. Terlihat bahwa *flux density* pada permukaan rotor dan stator mayoritas berwarna biru tua. Warna tersebut menunjukkan *flux density* yang bernilai 0,0018 – 0,4631 Tesla. Nilai *flux density* terbesar terletak pada bagian bawah *radial active magnetic bearing* yang mana memiliki *air gap* antara stator dan rotor terkecil. Terlihat bahwa *flux density* pada

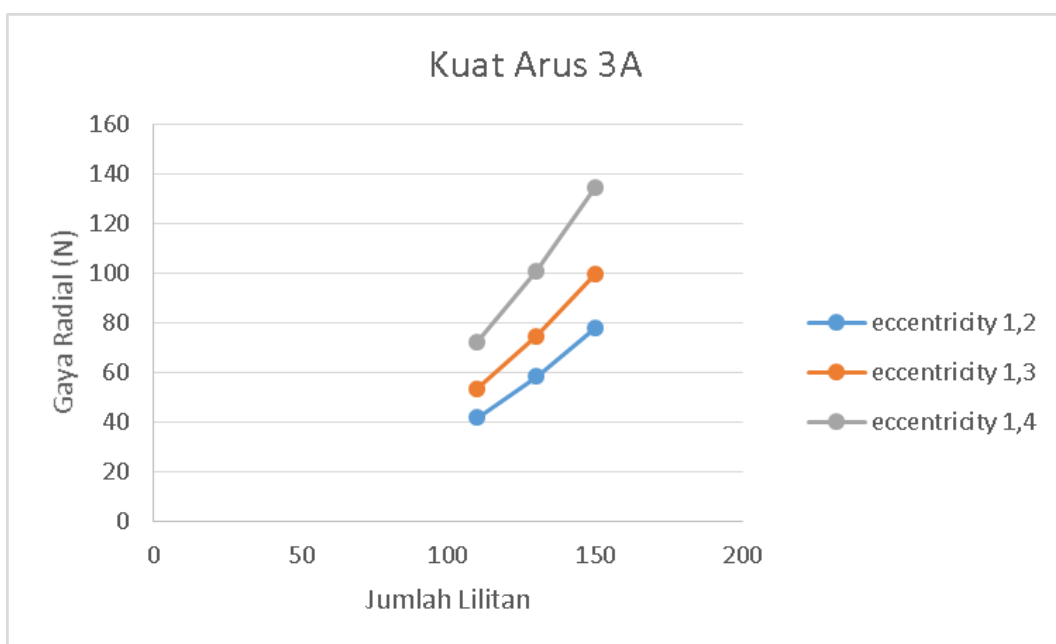
posisi tersebut mayoritas memiliki warna biru muda hingga hijau muda. Warna tersebut menunjukkan nilai dari *flux density* sebesar 0,6937 hingga 2,0775 dan terdapat distribusi warna berwarna merah pada ujung kutub bagian bawah yang menunjukkan nilai *flux density* sebesar 3,4612 Tesla, yang merupakan *flux density* terbesar. Meninjau pada Gambar 4.5 (b) di mana mayoritas anak panah berwarna biru tua dan pada bagian bawah *radial active magnetic bearing* didominasi oleh *flux density* berwarna biru muda hingga hijau, sesuai dengan distribusi *flux density* pada Gambar 4.5 (a).

Dari ketiga variasi tersebut, kemudian dilakukan perbandingan antara gambar 4.3 yang merupakan *radial active magnetic bearing* dengan variasi *eccentricity* 1,2, gambar 4.4 yang menggunakan variasi *eccentricity* 1,3, dan gambar 4.5 yang menggunakan variasi *eccentricity* 1,4. Dari ketiga gambar tersebut, dapat diketahui bahwa nilai terbesar didapat pada variasi *eccentricity* 1,4 dengan nilai sebesar 3,0 Tesla. Sedangkan nilai terkecil didapat pada variasi *eccentricity* 1,2 dengan nilai sebesar 1,93 Tesla.

Besar dan arah dari *flux density* dipengaruhi oleh jarak antara kutub elektromagnet pada stator dengan rotornya atau dapat disebut juga dengan air gap. Pada bagian atas *radial active magnetic bearing* memiliki *flux density* dengan warna biru tua, yang mana pada bagian tersebut merupakan air gap terbesar antara kutub stator dengan rotornya. Arah vektor *flux density* berasal dari kutub elektromagnet utara menuju kutub elektromagnet selatan. Dengan semakin kecilnya air gap antara kutub stator dengan rotor membuat pergerakan distribusi *flux density* dari kutub elektromagnet utara menuju selatan menjadi semakin optimal. Hal tersebut dibuktikan dengan *flux density* hasil simulasi yang semakin mengecil seiring dengan bertambah besarnya *air gap*. Hal tersebut berkaitan dengan besar kecilnya gaya radial yang dihasilkan pada simulasi ini. Pada hasil simulasi yang terlampir, semakin kecil *air gap* maka besar nilai gaya radial yang dihasilkan.

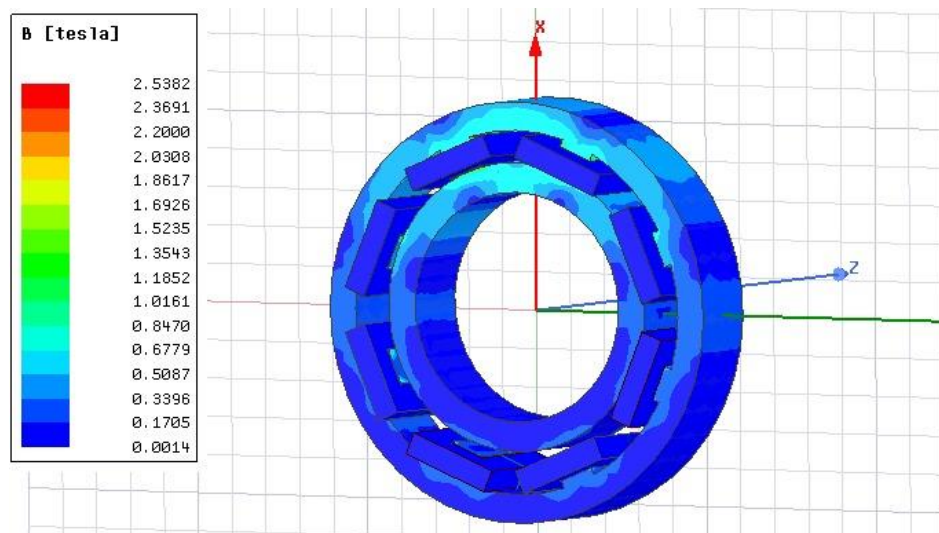
### 4.2.3 Analisis Pengaruh Jumlah Lilitan pada Gaya Radial

Pada analisis ini dilakukan perbandingan antara nilai gaya radial yang dihasilkan dengan variasi jumlah lilitan, yaitu 110 lilitan, 130 lilitan, 150 lilitan. Analisis dilakukan pada kuat arus 3 A dengan nilai *eccentricity* 1,2; 1,3; dan 1,4.

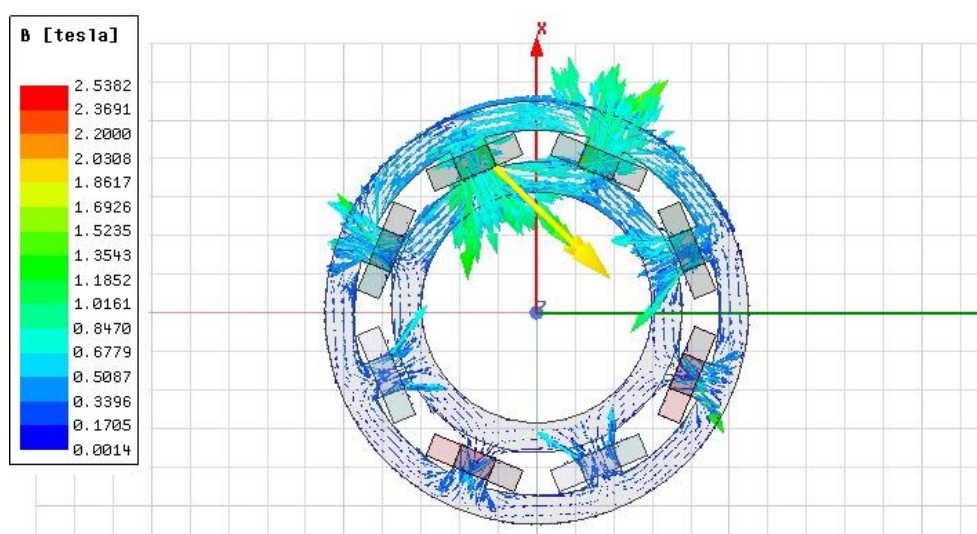


**Gambar 4.7** Grafik pengaruh variasi jumlah lilitan terhadap gaya radial pada arus 3 A

Pada gambar 4.5 terdapat 3 garis grafik di mana masing – masing menunjukkan nilai gaya radial pada radial dengan variasi jumlah lilitan 110 lilitan, 130 lilitan, dan 150 lilitan yang dilakukan pada masing-masing *eccentricity* 1,2, 1,3, dan 1,4. Pada *eccentricity* 1,2 menghasilkan gaya radial sebesar 42 N untuk variasi 110 lilitan, 58 N untuk variasi 130 lilitan, dan 78 N untuk variasi 150 lilitan. Pada *eccentricity* 1,3 menghasilkan gaya radial sebesar 54 N untuk variasi lilitan 110 lilitan, 75 N untuk variasi 130 lilitan, dan 100 N untuk variasi 150 lilitan. Untuk *eccentricity* 1,4 didapatkan hasil gaya radial sebesar 72,27 N untuk variasi 110 lilitan, 100,95 N untuk variasi 130 lilitan, dan 134,4 N untuk variasi 150 lilitan. Dari data tersebut, dapat diketahui bahwa pada variasi jumlah lilitan 110 lilitan, 130 lilitan, dan 150 lilitan, dengan menggunakan perlakuan yang sama yaitu menggunakan kuat arus 3 A dengan *eccentricity* 1,2, 1,3, dan 1,4 untuk masing-masing variasi lilitan menghasilkan nilai gaya radial terbesar pada jumlah lilitan 150 lilitan.



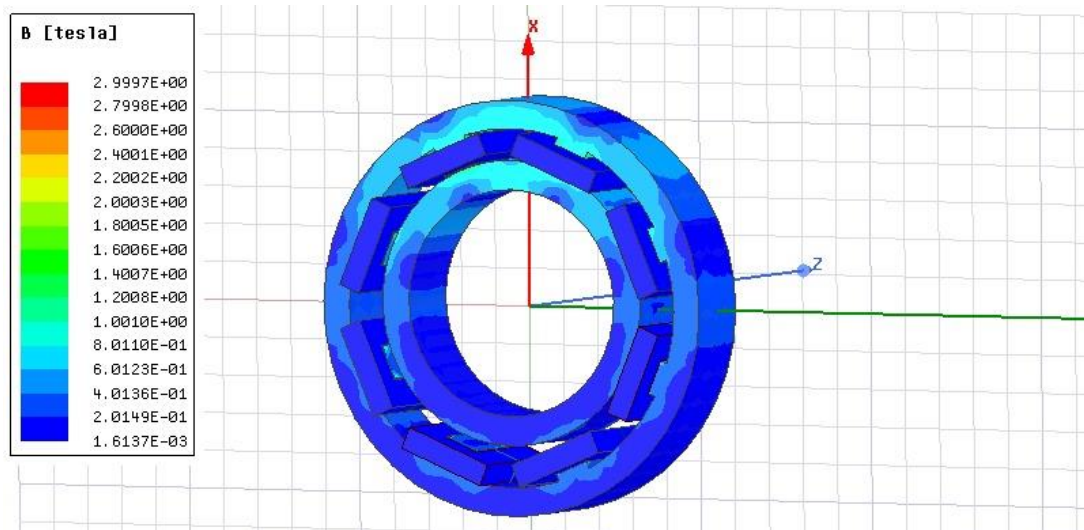
(a)



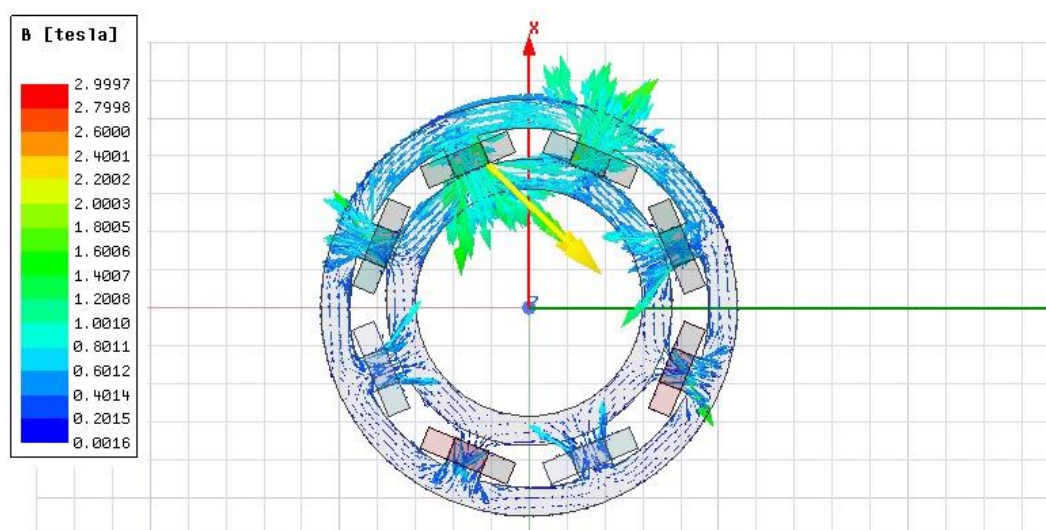
(b)

**Gambar 4.8** Hasil simulasi *radial active magnetic bearing* 8 kutub dengan 110 lilitan (a) Distribusi *flux density*. (b) Arah vektor *flux density*

Gambar 4.7 merupakan visualisasi hasil simulasi *radial active magnetic bearing* 8 kutub dengan jumlah lilitan 110 lilitan. Gambar 4.7 (a) adalah ilustrasi dari distribusi *flux density*. Terlihat bahwa *flux density* pada permukaan rotor dan stator mayoritas berwarna biru tua. Warna tersebut menunjukkan *flux density* yang bernilai 0,0014 – 0,3396 Tesla. Nilai *flux density* terbesar terletak pada bagian bawah *radial active magnetic bearing* yang mana memiliki *air gap* antara stator dan rotor terkecil. Terlihat bahwa *flux density* pada posisi tersebut mayoritas memiliki warna biru muda hingga hijau muda. Warna tersebut menunjukkan nilai dari *flux density* sebesar 0,5087 hingga 1,5235 Tesla dan terdapat distribusi warna berwarna merah pada ujung kutub bagian bawah yang menunjukkan nilai *flux density* sebesar 2,5982 Tesla, yang merupakan *flux density* terbesar. Meninjau pada Gambar 4.7 (b) di mana mayoritas anak panah berwarna biru tua dan pada bagian bawah *radial active magnetic bearing* didominasi oleh *flux density* berwarna biru muda hingga hijau, sesuai dengan distribusi *flux density* pada Gambar 4.7 (a).



(a)

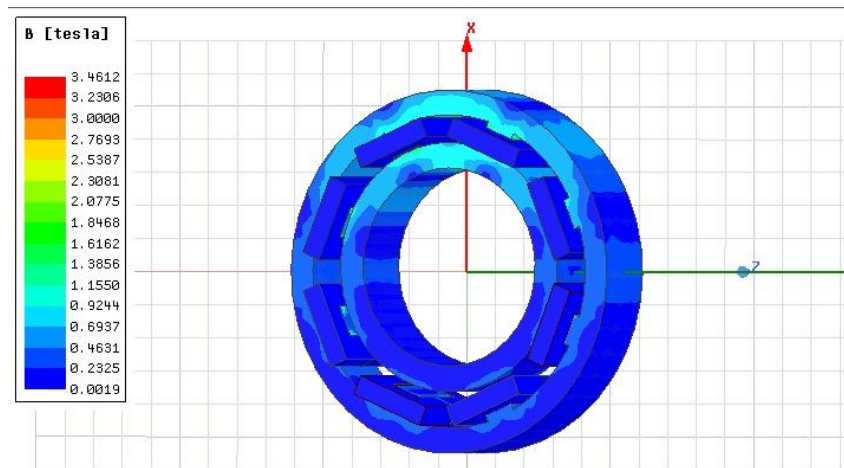


(b)

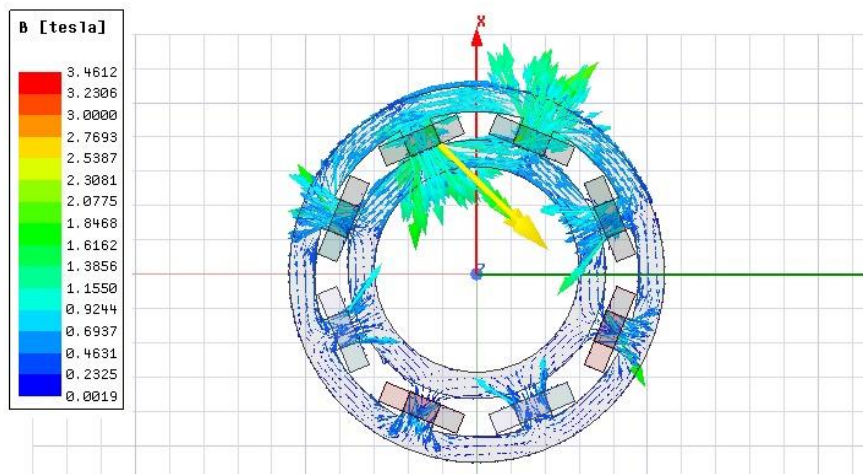


**Gambar 4.9** Hasil simulasi *radial active magnetic bearing* 8 kutub dengan 130 lilitan (a) Distribusi *flux density*. (b) Arah vektor *flux density*

Gambar 4.8 merupakan visualisasi hasil simulasi *radial active magnetic bearing* 8 kutub dengan jumlah lilitan 130 lilitan. Gambar 4.8 (a) adalah ilustrasi dari distribusi *flux density*. Terlihat bahwa *flux density* pada permukaan rotor dan stator mayoritas berwarna biru tua. Warna tersebut menunjukkan *flux density* yang bernilai 0,0016 – 0,4014 Tesla. Nilai *flux density* terbesar terletak pada bagian bawah *radial active magnetic bearing* yang mana memiliki *air gap* antara stator dan rotor terkecil. Terlihat bahwa *flux density* pada posisi tersebut mayoritas memiliki warna biru muda hingga hijau muda. Warna tersebut menunjukkan nilai dari *flux density* sebesar 0,6012 hingga 1,8005 Tesla dan terdapat distribusi warna berwarna merah pada ujung kutub bagian bawah yang menunjukkan nilai *flux density* sebesar 2,9997 Tesla, yang merupakan *flux density* terbesar. Meninjau pada Gambar 4.8 (b) di mana mayoritas anak panah berwarna biru tua dan pada bagian bawah *radial active magnetic bearing* didominasi oleh *flux density* berwarna biru muda hingga hijau, sesuai dengan distribusi *flux density* pada Gambar 4.8 (a).



(a)



(b)

**Gambar 4.10** Hasil simulasi *radial active magnetic bearing* 8 kutub dengan 150 lilitan (a) Distribusi *flux density*. (b) Arah vektor *flux density*

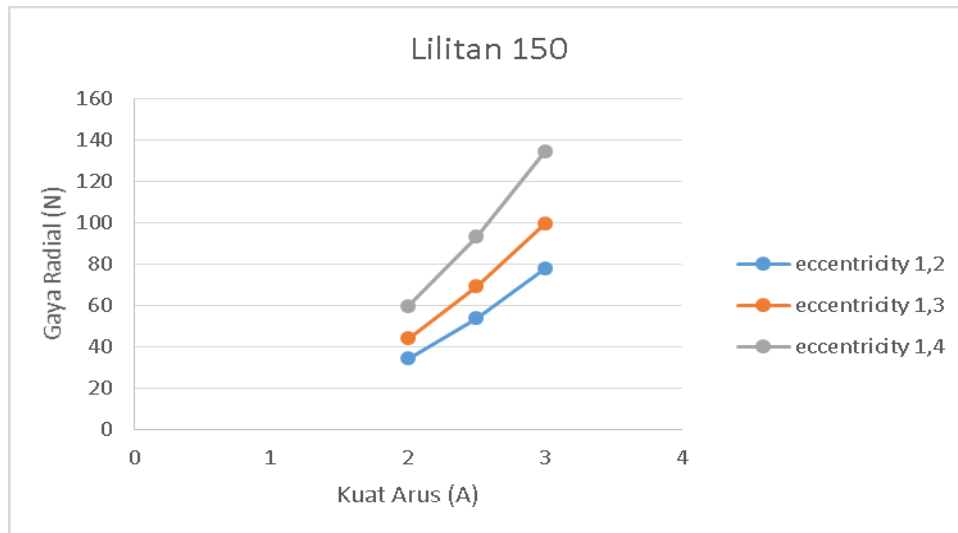
Gambar 4.9 merupakan visualisasi hasil simulasi radial *active magnetic bearing* 8 kutub dengan jumlah lilitan 150 lilitan. Gambar 4.9 (a) adalah ilustrasi dari distribusi *flux density*. Terlihat bahwa *flux density* pada permukaan rotor dan stator mayoritas berwarna biru tua. Warna tersebut menunjukkan *flux density* yang bernilai 0,0019 – 0,4631 Tesla. Nilai *flux density* terbesar terletak pada bagian bawah radial *active magnetic bearing* yang mana memiliki *air gap* antara stator dan rotor terkecil. Terlihat bahwa *flux density* pada posisi tersebut mayoritas memiliki warna biru muda hingga hijau muda. Warna tersebut menunjukkan nilai dari *flux density* sebesar 0,6937 hingga 2,0075 Tesla dan terdapat distribusi warna berwarna merah pada ujung kutub bagian bawah yang menunjukkan nilai *flux density* sebesar 3,4612 Tesla, yang merupakan *flux density* terbesar. Meninjau pada Gambar 4.9 (b) di mana mayoritas anak panah berwarna biru tua dan pada bagian bawah radial *active magnetic bearing* didominasi oleh *flux density* berwarna biru muda hingga hijau, sesuai dengan distribusi *flux density* pada Gambar 4.9 (a).

Dari ketiga variasi tersebut, kemudian dilakukan perbandingan antara gambar 4.6 yang merupakan radial *active magnetic bearing* dengan variasi jumlah lilitan 110 lilitan, gambar 4.7 yang menggunakan variasi jumlah lilitan 130 lilitan, dan gambar 4.8 yang menggunakan variasi 150 lilitan. Dari ketiga gambar tersebut, dapat diketahui bahwa nilai terbesar didapat pada variasi 150 lilitan dengan nilai sebesar 2,53 Tesla. Sedangkan nilai terkecil didapat pada variasi 110 lilitan dengan nilai sebesar 1,86 Tesla.

Besar dan arah dari *flux density* dipengaruhi oleh jumlah lilitan pada stator. Pada bagian atas radial *active magnetic bearing* memiliki *flux density* dengan warna biru tua, yang mana pada bagian tersebut merupakan *air gap* terbesar antara kutub stator dengan rotornya. Arah vektor *flux density* berasal dari kutub elektromagnet utara menuju kutub elektromagnet selatan. Dengan semakin kecilnya *air gap* antara kutub stator dengan rotor membuat pergerakan distribusi *flux density* dari kutub elektromagnet utara menuju selatan menjadi semakin optimal. Hal tersebut dibuktikan dengan *flux density* hasil simulasi yang semakin mengecil seiring dengan bertambah besarnya *air gap*. Hal tersebut berkaitan dengan besar kecilnya gaya radial yang dihasilkan pada simulasi ini. Pada hasil simulasi yang terlampir, semakin kecil *air gap* maka besar nilai gaya radial yang dihasilkan.

#### **4.2.4 Analisis Pengaruh Kuat Arus pada Gaya Radial**

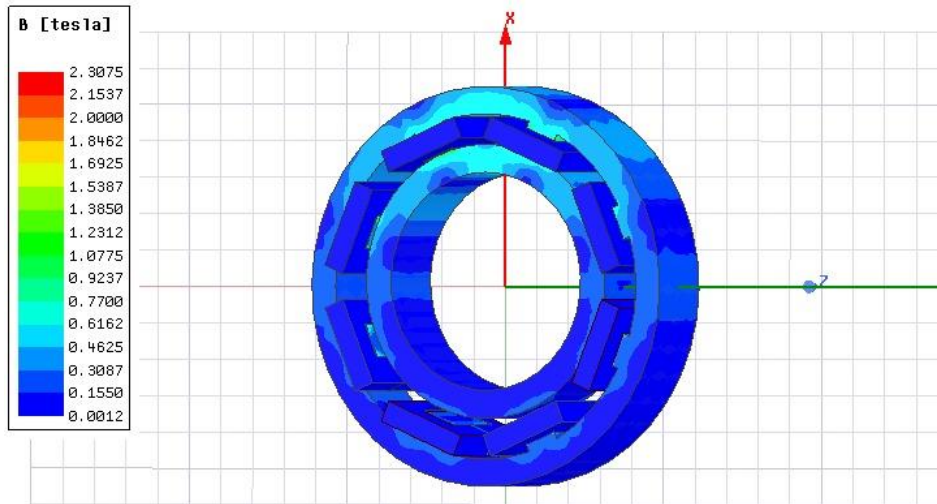
Pada analisis ini dilakukan perbandingan nilai gaya radial hasil simulasi dengan besar arus yang divariasikan, yaitu sebesar 2 A, 2,5 A, dan 3 A. Nilai gaya radial yang timbul ditinjau dengan variasi besar arus pada setiap kondisi *eccentricity* rotor, yang mana semakin besar *eccentricity* rotor, maka semakin kecil *air gap* yang timbul antara kutub stator dengan rotornya. Analisis ini dilakukan pada konfigurasi jumlah kutub 8.



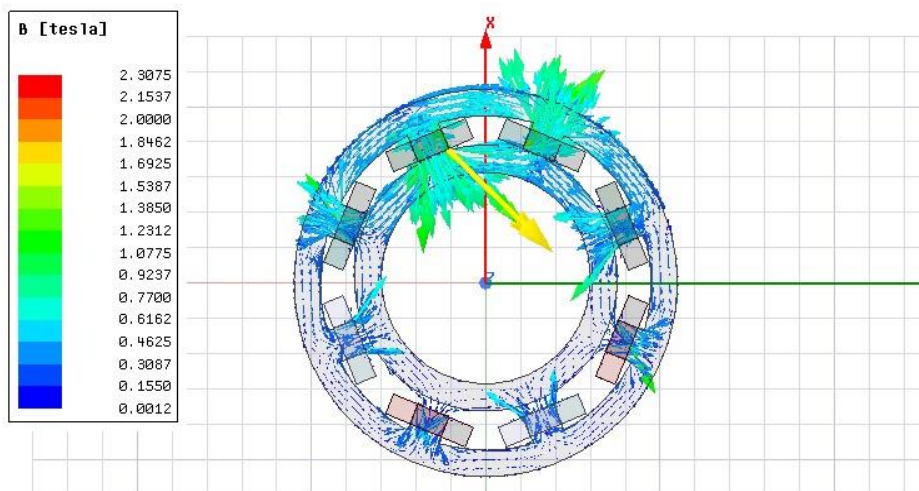
**Gambar 4.11** Grafik pengaruh variasi besar arus terhadap gaya radial pada AMB 8 kutub

Pada Gambar 4.10 terdapat 3 garis grafik di mana masing – masing garisnya menunjukkan nilai gaya radial pada variasi arus sebesar 2 A, 2.5 A, dan 3 A. Dari data yang telah didapatkan, diketahui nilai gaya radial dengan variasi kuat arus 2 A adalah sebesar 35 N untuk *eccentricity* 1,2, 44,23 N untuk *eccentricity* 1,3, dan 60 N untuk *eccentricity* 1,4. Pada variasi kuat arus 2,5 A, didapatkan nilai gaya radial sebesar 54 N untuk *eccentricity* 1,2, 69 N untuk *eccentricity* 1,3, dan 93 N untuk *eccentricity* 1,4. Sedangkan untuk variasi kuat arus 3 A, besar gaya radial yang didapat adalah 78 N untuk *eccentricity* 1,2, 100 N untuk *eccentricity* 1,3, dan 134,4 untuk *eccentricity* 1,4. Dari data hasil simulasi tersebut, dapat diketahui bahwa gaya radial terbesar terjadi pada *eccentricity* 1,4 dengan variasi arus 3 A, yaitu sebesar 134,4 N sedangkan gaya radial terkecil didapatkan pada *eccentricity* 1,2 dengan variasi arus 2 A sebesar 35 N. Dengan meninjau grafik tersebut, dapat dilihat bahwa semakin bertambahnya arus yang digunakan maka semakin besar gaya radial yang dihasilkan. Dilihat dari masing – masing garis grafik memiliki trendline yang semakin naik eksponensial seiring bertambahnya besar arus yang digunakan

Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa pada setiap variasi *eccentricity* rotor memiliki kemiringan trendline yang berbeda-beda. Hal tersebut menandakan pada setiap variasi *eccentricity* memiliki sensitifitas penambahan gaya radial yang berbeda – beda terhadap bertambahnya besar arus yang digunakan. Dapat dilihat pada rasio *eccentricity* 1,2 memiliki kemiringan trendline yang landai dan kemiringannya semakin curam seiring bertambahnya rasio *eccentricity*, yang mana semakin besar *eccentricity* maka semakin kecil air gap antara stator dan rotor pada bagian bawah *magnetic bearing*. Dari hasil simulasi didapatkan data bahwa bertambahnya besar arus yang digunakan akan mempengaruhi besarnya *flux density* yang dihasilkan oleh setiap kutub elektromagnet. Semakin besar penambahan arus yang digunakan maka nilai *flux density* yang dihasilkan akan semakin besar, sehingga mempengaruhi besar gaya radial yang dihasilkan. Berikut distribusi dan vektor *flux density* yang dihasilkan pada radial active magnetic bearing 8 kutub pada masing-masing variasi kuat arus.



(a)

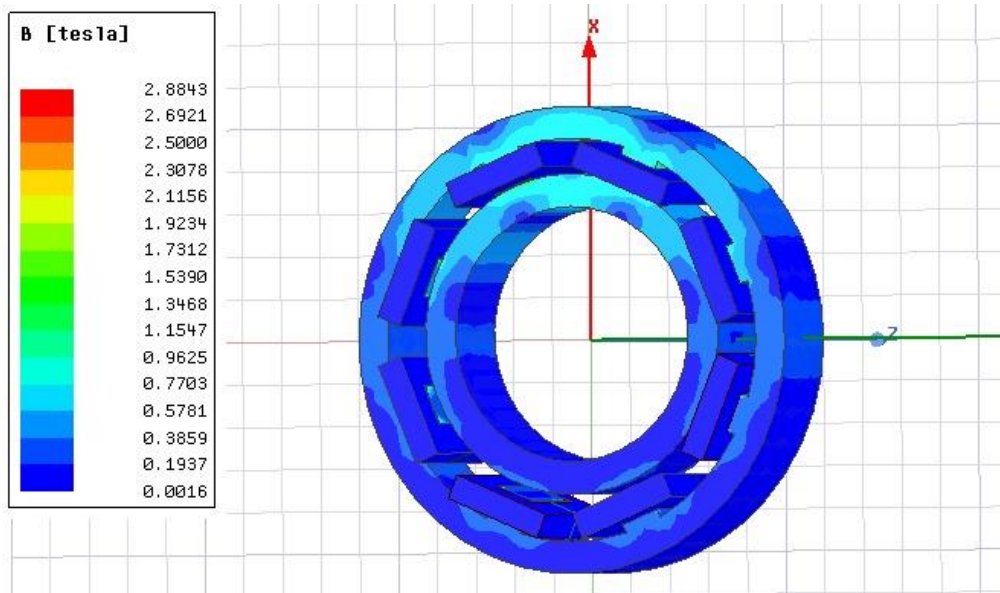


(b)

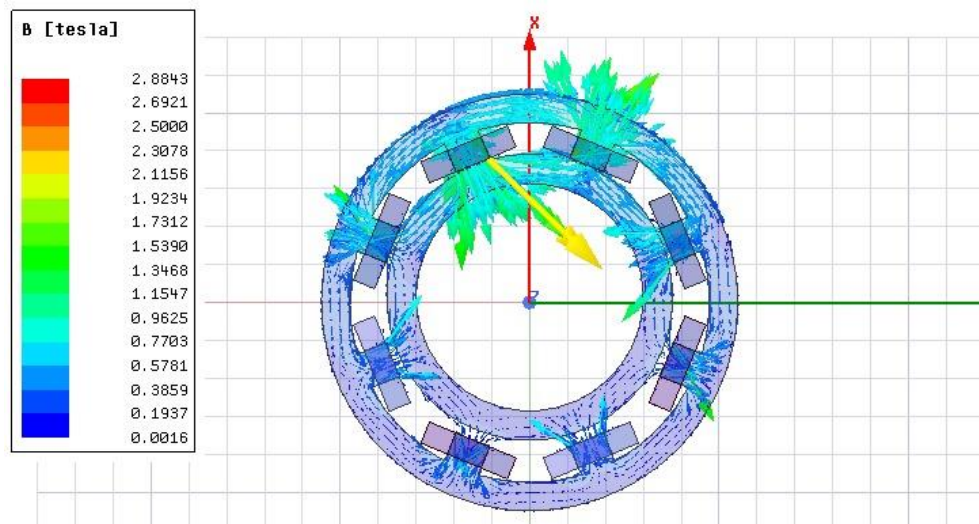
**Gambar 4.12** Hasil simulasi radial active magnetiv bearing 8 kutub dengan nilai arus 2 A  
 (a) Distribusi *flux density*. (b) Arah vektor *flux density*

Gambar 4.11 merupakan visualisasi dari hasil simulasi pada *radial active magnetic bearing* 8 kutub dengan rasio *eccentricity* 1,4 dan input arus sebesar 2 Ampere. Pada Gambar 4.11 (a) ditampilkan ilustrasi dari distribusi *flux density*. Dari gambar diketahui bahwa distribusi tersebut didominasi dengan warna biru yang menunjukkan nilai *flux density* sebesar 0,0012 – 0,3087 Tesla. Pada bagian bawah desain atau pada air gap terkecil didominasi oleh warna biru muda hingga warna hijau yang menunjukkan nilai *flux density* sebesar 0,4625 – 1,3850 Tesla. Pada ujung kutub stator terdapat distribusi berwarna merah yang menunjukkan nilai *flux density* sebesar 2,3075 Tesla, nilai tersebut merupakan nilai *flux density* maksimal pada konfigurasi tersebut.





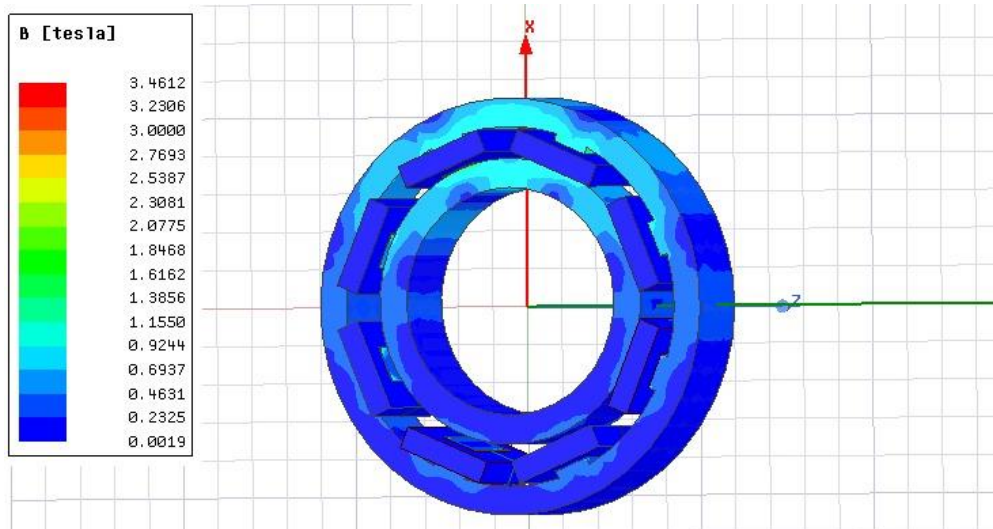
(a)



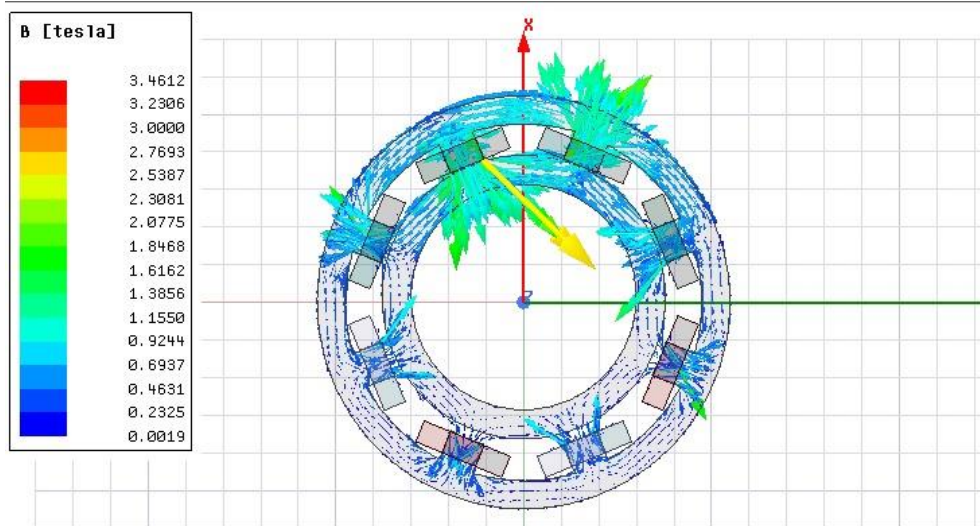
(b)

**Gambar 4.13** Hasil simulasi radial active magnetiv bearing 8 kutub dengan nilai arus 2,5  
A (a) Distribusi *flux density*. (b) Arah vektor *flux density*

Gambar 4.12 merupakan visualisasi dari hasil simulasi pada *radial active magnetic bearing* 8 kutub dengan rasio *eccentricity* 1,4 dan input arus sebesar 2,5 Ampere. Pada Gambar 4.12 (a) ditampilkan ilustrasi dari distribusi flux density. Dari gambar diketahui bahwa distribusi tersebut didominasi dengan warna biru yang menunjukkan nilai flux density sebesar 0,0016 – 0,3859 Tesla. Pada bagian bawah desain atau pada air gap terkecil didominasi oleh warna biru muda hingga warna hijau yang menunjukkan nilai *flux density* sebesar 0,5781 – 1,7312 Tesla. Pada ujung kutub stator terdapat distribusi berwarna merah yang menunjukkan nilai *flux density* sebesar 2,8843 Tesla, nilai tersebut merupakan nilai *flux density* maksimal pada konfigurasi tersebut.



(a)



(b)

**Gambar 4.14** Hasil simulasi radial active magnetiv bearing 8 kutub dengan nilai arus 3 A  
(a) Distribusi *flux density*. (b) Arah vektor *flux density*

Gambar 4.13 merupakan visualisasi dari hasil simulasi pada *radial active magnetic bearing* 8 kutub dengan rasio *eccentricity* 1,4 dan input arus sebesar 2,5 Ampere. Pada Gambar 4.12 (a) ditampilkan ilustrasi dari distribusi flux density. Dari gambar diketahui bahwa distribusi tersebut didominasi dengan warna biru yang menunjukkan nilai flux density sebesar 0,0019 – 0,4631 Tesla. Pada bagian bawah desain atau pada air gap terkecil didominasi oleh warna biru muda hingga warna hijau yang menunjukkan nilai *flux density* sebesar 0,6937 – 2,0775 Tesla. Pada ujung kutub stator terdapat distribusi berwarna merah yang menunjukkan nilai *flux density* sebesar 3,4612 Tesla, nilai tersebut merupakan nilai *flux density* maksimal pada konfigurasi tersebut.

Dari ketiga variasi tersebut, kemudian dilakukan perbandingan antara gambar 4.11 yang merupakan *radial active magnetic bearing* dengan variasi kuat arus 2 A, gambar 4.12 yang menggunakan variasi kuat arus 2,5 A, dan gambar 4.13 yang menggunakan variasi kuat arus 3 A. Dari ketiga gambar tersebut, dapat diketahui bahwa nilai terbesar didapat

pada variasi 3 A dengan nilai sebesar 2,538 Tesla. Sedangkan nilai terkecil didapat pada variasi 3 A dengan nilai sebesar 1,69 Tesla.

Besar dan arah dari *flux density* dipengaruhi oleh kuat arus yang mengalir. Pada bagian atas radial active magnetic bearing memiliki *flux density* dengan warna biru tua, yang mana pada bagian tersebut merupakan air gap terbesar antara kutub stator dengan rotornya. Arah vektor *flux density* berasal dari kutub elektromagnet utara menuju kutub elektromagnet selatan. Dengan semakin kecilnya air gap antara kutub stator dengan rotor membuat pergerakan distribusi *flux density* dari kutub elektromagnet utara menuju selatan menjadi semakin optimal. Hal tersebut dibuktikan dengan *flux density* hasil simulasi yang semakin mengecil seiring dengan bertambah besarnya *air gap*. Hal tersebut berkaitan dengan besar kecilnya gaya radial yang dihasilkan pada simulasi ini. Pada hasil simulasi yang terlampir, semakin kecil *air gap* maka besar nilai gaya radial yang dihasilkan.

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian tugas akhir yang telah dilakukan, didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Konfigurasi pole yang menghasilkan gaya radial paling optimal terjadi pada variasi pengaktifan 4 pole atas dengan nilai 208 N, hal ini diakibatkan tidak adanya gaya Tarik magnet pada bagian bawah sehingga tidak mengurangi gaya Tarik ke atas magnet.
2. Dengan dibatasinya nilai *input* arus karena menyesuaikan kemampuan lilitan yang digunakan, didapatkan arus optimal yaitu arus 3 ampere. Hubungan antara nilai *input* arus dengan penambahan gaya radial adalah eksponensial kuadrat, dimana semakin besar nilai *input* arus maka gaya radial yang dihasilkan akan bertambah secara eksponensial. Gaya radial maksimal yang dihasilkan yaitu sebesar 134,4 N.
3. *Eccentricity* paling optimal terjadi pada variasi *eccentricity* 1,4. Pada kondisi tersebut kapasitas angkat maksimal beban radial pada *active magnetic bearing* sebesar 134,4 N. Hubungan antara *eccentricity* dengan bertambahnya gaya radial yang dihasilkan adalah berbanding lurus, dimana semakin besar *eccentricity* maka akan menghasilkan nilai gaya radial yang semakin besar pula.
4. Jumlah lilitan paling optimal terjadi pada variasi 150 lilitan. Pada kondisi tersebut kapasitas angkat maksimal beban radial pada *active magnetic bearing* sebesar 134,4 N. Hubungan antara jumlah lilitan dengan bertambahnya gaya radial yang dihasilkan adalah berbanding lurus, dimana semakin banyak jumlah lilitan maka akan menghasilkan nilai gaya radial yang semakin besar pula.

#### 5.2 Saran

Berdasarkan penelitian tugas akhir yang dilakukan terdapat beberapa saran yang dapat digunakan untuk pengembangan penelitian selanjutnya, antara lain :

1. Dalam perancangan dimensi *radial active magnetic bearing* diperbesar, sehingga ruang untuk lilitan menjadi lebih banyak.
2. Diperlukan *controller* untuk mengatur *input* arus yang digunakan, sehingga dapat menghasilkan gaya radial yang lebih optimal sesuai dengan beban radial yang timbul.
3. Diperlukan sensor untuk mengatur agar rotor tetap pada titik *center* dan juga proses manufaktur yang cukup bagus untuk mendapatkan hasil barang sesuai dengan desain simulasi.
4. Diperlukan uji eksperimen dengan pembebanan berdasarkan pergeseran sudut tertentu, sehingga dapat menganalisa untuk pembebanan dinamis

## DAFTAR PUSTAKA

- F, M. G. (2013). A Control Model of Active Magnetic Bearings. *3rd International Conference of Engineering Against Failure (ICEAF III)*, 26–28.
- Iffagano, M. I. (2020). *Analisis Pengaruh Jumlah Kutub, Besar Arus, Dan Radial Clearance terhadap Gaya Radial Pada Active Magnetic Bearing*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Kacz, Ł. B. (2020). Research and applications of active bearings: A state-of-the-art review. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 80–283.
- Manaf, A. (2007). *Potensi Bahan Lokal Dalam Pengembangan Material Magnet untuk Industri di Indonesia*. Universitas Indonesia.
- Polajžer, B., Štumberger, G., Ritonja, J., Dolinar, D. (2010). Linearization of Radial Force Characteristic of Active Magnetic Bearings Using Finite Element Method and Differential Evolution. In B. Polajžer (Ed.), *Magnetic Bearings, Theory and Application*. Slovenia.
- Schweitzer, G., Maslen, E. (2009a). *Magnetic Bearings : Theory, Design, and Application to Rotating Machinery*. Springer.
- Schweitzer, G., Maslen, E. (2009b). *Magnetic Bearings : Theory, Design, and Application to Rotating Machinery*. Springer.
- Waludjojati, A. (2009). *Analisis Sistem Kontrol Active Magnetic Bearing Pada Rotor” Momentum*,. 5(1), 56–60.
- Xiaojing, L. Yefa, H. (2012). *Calculation of Radial Active Magnetic Bearing Electromagnetic Force Under Eccentric Rotor*. Wuhan University of Technology.

## BIODATA PENULIS



Tugas akhir ini ditulis oleh Farizal Wahyu Triromdhoni yang dilahirkan di Rembang, 24 Desember 1999. Penulis merupakan anak ke 3 dari 3 bersaudara dari pasangan Bapak Joko Nyuwito dan almarhumah Ibu Indarti. Penulis menempuh pendidikan formal di SD N 2 leteh, SMP N 2 Rembang, dan SMAN 1 Rembang sebelum akhirnya mengikuti seleksi SNMPTN dan diterima di Departemen Teknik Mesin FTIRS-ITS pada tahun 2018.

Selama menempuh pendidikan S-1, penulis sempat aktif di beberapa kegiatan yang diselenggarakan di dalam dan luar ITS. Diantaranya sebagai *staff* PSDA UKM Sepak Bola ITS, Member SRE ITS

Untuk Informasi, kritik, saran serta keperluan lain mengenai tugas akhir ini, penulis dapat dihubungi melalui *e-mail* berikut: [wahyufarizal99@gmail.com](mailto:wahyufarizal99@gmail.com)

