



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**TUGAS AKHIR - TM 184835**

**ANALISIS PENGARUH *AIR GAP*, BESAR ARUS, DAN JUMLAH LILITAN PADA *COIL* TERHADAP GAYA AKSIAL PADA *ACTIVE MAGNETIC BEARING***

MUHAMMAD DARMA SUSILO AJI  
NRP 02111640000014

Dosen Pembimbing  
Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN  
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2020





**TUGAS AKHIR - TM 184835**

**ANALISIS PENGARUH *AIR GAP*, BESAR ARUS,  
DAN JUMLAH LILITAN PADA *COIL* TERHADAP  
GAYA AKSIAL PADA *ACTIVE MAGNETIC  
BEARING***

MUHAMMAD DARMA SUSILO AJI  
NRP. 0211164000014

Dosen Pembimbing  
Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA

Departemen Teknik Mesin  
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2020





**FINAL PROJECT - TM 184835**

# **ANALYSIS ON EFFECT OF AIR GAP, CURRENT, AND COIL NUMBER TO THE AXIAL MAGNETIC FORCE ON ACTIVE MAGNETIC BEARING**

**MUHAMMAD DARMA SUSILO AJI**  
NRP. 02111640000014

Advisor  
Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA

Mechanical Engineering Department  
Faculty of Industrial Technology and System Engineering  
Sepuluh Nopember Institute of Technology  
Surabaya 2020



## HALAMAN PENGESAHAN

# ANALISIS PENGARUH *AIR GAP*, BESAR ARUS, DAN JUMLAH LILITAN PADA COIL TERHADAP GAYA AKSIAL PADA *ACTIVE MAGETIC BEARING*

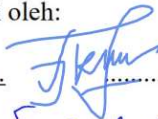



## TUGAS AKHIR

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 :

**Muhammad Darma Susilo Aji**  
NRP. 02111640000014

Disetujui oleh:

1. Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA.  ..... (Pembimbing)  
NIP. 196508101991021001
2. Ir. Julendra B. Ariatedja, M.T  (Penguji 1)  
NIP. 196807061999081004
3. Alief Wikarta, S.T., M.Sc.Eng., Ph.D.  ..... (Penguji 2)  
NIP. 197909262005011001
4. Ir. Yusuf Kaelani, M.Sc.E.  ..... (Penguji 3)  
NIP. 196511031990021001



“Halaman ini sengaja dikosongkan”



# ANALISIS PENGARUH AIR GAP, BESAR ARUS DAN JUMLAH LILITAN PADA COIL TERHADAP GAYA AKSIAL PADA ACTIVE MAGNETIC BEARING

Nama Mahasiswa : Muhammad Darma Susilo Aji  
NRP : 0211164000014  
Jurusan : Teknik Mesin FTIRS-ITS  
Dosen Pembimbing : Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA

## ABSTRAK

Bearing memegang peranan penting dalam menjalankan peralatan yang menunjang kehidupan manusia, salah satunya transportasi. Fungsi utama bearing adalah untuk mengurangi gesekan dan menjaga komponen yang bergerak linier agar selalu pada jalurnya. Salah satu bearing yang digunakan oleh mobil Toyota Prius adalah *bearing angular contact*. Mengingat gesekan dan sulitnya melakukan perawatan yang menyebabkan kerusakan pada *bearing*. Maka dari itu diperlukan inovasi perancangan *bearing* seperti *magnetic bearing*. *Magnetic bearing* dapat dengan signifikan menghilangkan gesekan yang tidak dapat dilakukan oleh bearing konvensional, mengoptimalkan energi, *life time* yang tinggi, mampu beroperasi dengan putaran yang sangat tinggi, tidak memerlukan pelumasan, bersih dan layak beroperasi pada ruangan yang vakum. Penelitian ini dilakukan untuk merancang sebuah *axial active magnetic bearing* untuk dibandingkan dengan produk bearing dari Toyota Manufacturing Indonesia dengan kode DAC4075W – 2CS73.

Analisis dilakukan untuk mengetahui pengaruh dari variabel simulasi, yaitu variabel *air gap*, *air gap* minimum yang digunakan adalah 0,1 mm dan *air gap* maksimum yang digunakan adalah 2.5 mm. Selanjutnya analisis dengan variabel jumlah lilitan pada bearing, dengan jumlah minimum lilitan 100 dan maksimum lilitan 366 dan juga variasi besar arus dimana arus minimum yang

digunakan adalah 0.2 A dan arus maksimum yang digunakan adalah 3 A . Analisis meliputi permodelan pada proses simulasi dan parameter yang diukur. Setelah dilakukan pemodelan pada *software* ANSYS Electronics Maxwell 3D, dilakukan simulasi dengan menggunakan penyelesaian *magnetostatic* dilanjutkan dengan *transient*. Hasil analisa *magnetostatic* berhasil apabila hasil yang didapatkan memiliki *energy error* yang konvergen dan sesuai dengan parameter yang telah ditentukan dengan besar nilai error dibawah atau sama dengan 1 %, dan analisan *transien* dengan variasi *air gap*, besar arus dan jumlah lilitan menggunakan kecepatan rotasi adalah 1000 rpm untuk mendapat nilai gaya aksial dan *flux density*

Berdasarkan hasil penelitian terlihat bahwa air gap, besar arus, jumlah lilitan memiliki pengaruh terhadap gaya aksial yang dihasilkan active magnetic bearing. Semakin kecil air gap dan semakin besar besar arus dan jumlah lilitan yang digunakan maka gaya aksial yang dihasilkan akan semakin besar. Air gap sebesar 1 mm merupakan variasi celah udara yang paling optimum yang menghasilkan gaya aksial terbesar dan tidak memberikan beban secara radial. Karena beban radial menyebabkan *bearing* tidak bergerak secara linear dan membuat poros *bending*. Dengan memerhatikan *current density* dan ukuran dari kumparan. Besar arus 3 A dan jumlah lilitan 366 menghasilkan gaya aksial terbesar. Hal ini disebabkan oleh nilai *flux density* yang lebih besar. Sehingga didapatkan maksimal gaya aksial pada desain ini adalah 236 N

***Kata kunci: Air Gap; Flux density; Gaya Aksial; Magnetic Bearing; Jumlah lilitan; Besar arus***

# ANALYSIS ON EFFECT OF AIR GAP, CURRENT, AND COIL NUMBER TO THE AXIAL MAGNETIC FORCE ON ACTIVE MAGNETIC BEARING

Student Name : Muhammad Darma Susilo Aji  
NRP : 0211164000014  
Department : Teknik Mesin FTIRS-ITS  
Advisor : Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA

## ABSTRACT

*Bearing plays an important role in carrying out equipment that supports human life, one of them is transportation. The main function of the bearing is to reduce friction and keep the linear moving components in line. One of the bearing used by Toyota Prius car is double row angular contact. Given the friction and difficulty of doing maintenance that causes failure of bearing. So it is necessary to do design innovations such as magnetic bearing. Magnetic bearing can significantly eliminate friction which cannot do by mechanical bearing, reduce energy efficiency, high life time, able to operate with high rpm, does not require lubrication, clean and suitable to operate in a vacuum. This research was conducted to design an active magnetic bearing for comparison with product from Toyota Manufacturing Indonesia with code DAC4075W – 2CS73.*

*The analysis was carried out to determine the effect of the simulation variable, that is air gap variable. The minimum air gap used is 0,1 mm and the maximum air gap used is 2,5 mm. furthermore analysis with variable number of turn in the coil with minimum number of turn is 100 and maximum is 366. And then analysis with variable current with minimum current used is 0,2 A and maximum used is 3 A. Analysis included modeling the*

*simulation process and measured parameters. After modeling the ANSYS Electronics Maxwell 3D software. The simulation was performed using a magnetostatic solution and transient solution. The results of magnetostatic analysis were successful if the results obtained have a convergent energy error and are in accordance with predetermined parameters with a large error value below or equal to 1%. And transient solution analysis with variable of air gap, current, and number of turn in the coil and rpm used is 1000 to get axial force and flux density.*

*Based on the result of the research, it is known that variable of air gap, current, and number of turn in the coil affect the axial force produced. The smaller air gap and bigger current and number of turns coil used, the greater the resulting axial force. Air gap of 1 mm is the most optimum variation of air gap that produces the largest axial force and does not give a radial load. Because the radial load causes the bearing to not move linearly and makes the shaft bend. By adjusting the current density and size of coil. Current 3 A and number of turns of coil 366 produces the largest axial force. This is caused by a greater flux density value. The maximum axial force obtained in this design is 236 N*

***Keyword : Air Gap; Flux density; Axial Force; Magnetic Bearing; Number of turns coil; Coil Current***

## KATA PENGANTAR

Allhamdulillah. Puji syukur kehadirat ALLAH SWT atas limpahan rahmat, hidayah, dan inayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan laporan tugas akhir dengan baik.

Penyusunan laporan tugas akhir ini merupakan salah satu syarat akademis untuk kelulusan mahasiswa Program Studi S1 Departemen Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya dan mengembangkan wawasan terbaru mengenai teknologi *bearing*. Penulis menyadari dalam penyusunan laporan tugas akhir ini bukan semata-mata atas kemampuan penulis sendiri, melainkan dengan adanya dukungan, bimbingan dan dorongan dari berbagai pihak, baik secara langsung, maupun tidak langsung. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Bapak Heri dan Ibu Asrifah, orang tua penulis, Pandu dan keluarga besar yang selalu memberikan semangat dan doa hingga terselesaikannya tugas akhir ini.
2. Bapak Dr. Ir. Agus Sigit Pramono, DEA selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan, arahan dan nasihat kepada penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
3. Bapak Alief Wikarta, ST, MSc.Eng, PhD., Bapak Ir. Yusuf Kaelani, MSc.E dan Bapak Ir. Julendra B. Ariatedja, MT yang telah memberikan bimbingan, arahan dan nasihat kepada penulis dalam menyelesaikan tugas akhir.
4. Bapak Prof. Dr. Ir. Abdullah Shahab, selaku dosen wali.
5. Pak Ir. Witantyo, M.Eng.Sc., Pak Dr. Ir. Atok Setiawan, M.Eng.Sc., dan Pak Dr. Bambang Sudarmanta, ST, MT., selaku dosen pembimbing LBMM dan ITS Tim Sapuaning yang memberikan banyak pengalaman berorganisasi
6. Seluruh Dosen beserta staf karyawan Departemen Teknik Mesin FTIRS – ITS yang telah memberikan bekal ilmu pengetahuan serta sarana dan prasarana kepada penulis selama mejalani perkuliahan.
7. Pak Puguh, Pak Wisnu, dan Mbah Irwan selaku alumni yang

memberikan banyak bimbingan, motivasi dan pengalaman didunia kerja.

8. Pak Bambang Jiwantoro, Pak Subli Ibrahim , dan Pak Indra selaku eksternal (sponsorship) yang memberikan dukungan dalam berorganisasi dan data pendukung pada Tugas Akhir ini.
9. Seluruh keluarga besar Teknik Mesin ITS 2016 M59 Departemen Teknik Mesin FTIRS - ITS yang turut membantu dan memberikan dukungan kepada penulis.
10. Seluruh keluarga Lembaga Bengkel Mahasiswa Mesin khususnya teman – teman B-Nalz beserta teman seperjuangan Divisi Umum dan Hubungan Luar yang selalu memberikan dukungan kepada penulis.
11. Muh Iqra Al Hamidy Iffagano dan Aqbil Ghafara, rekan satu tim *Magnetic*, yang selalu memberikan dukungan dan membagikan ilmunya kepada penulis.
12. Rinda Puspa Safitri yang selalu mendampingi, memberikan dukungan kepada penulis selama menjalankan lika liku perkuliahan
13. Seluruh keluarga besar ITS Tim Sapuangin 2019/2020
14. Seluruh keluarga Laboratorium Mekanika Benda Padat yang telah membagikan ilmunya dan memberikan dukungan kepada penulis dalam penyelesaian Laporan Tugas Akhir ini.
15. 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 ini. Semoga Laporan Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi penulis dan pembaca dalam pengembangan kemajuan teknologi terutama *bearing* di Indonesia. Akhir kata, penulis mengucapkan terima kasih.

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN PENGESAHAN</b> .....	<b>i</b>
<b>ABSTRAK</b> .....	<b>iii</b>
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	<b>vii</b>
<b>DAFTAR ISI</b> .....	<b>ix</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	<b>xii</b>
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	<b>xvi</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	2
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	<b>5</b>
2.1 <i>Bearing</i> .....	5
2.1.1 <i>Angular Contact Ball Bearing</i> .....	7
2.2 <i>Magnetic Bearing</i> .....	9
2.2.1 <i>Passive Magnetic bearing</i> .....	10
2.2.2 <i>Active Magnetic Bearing</i> .....	10
2.2.3 <i>Dasar Perhitungan Active Magnetic Bearing</i> .....	12
2.2.4 <i>Perhitungan Gaya Axial Active Magnetic Bearing</i> .....	14
2.2.5 <i>Perhitungan Gaya Axial Active Magnetic Bearing pada                 Tiap Elemen</i> .....	15
2.3 <i>Magnet</i> .....	18
2.3.1 <i>Soft Magnetic Material</i> .....	22
2.4 <i>Software Simulasi</i> .....	24
2.4.1 <i>Finite Element Method</i> .....	24
2.5 <i>Penelitian Terdahulu</i> .....	26

2.5.1 Analisis pengaruh <i>air gap</i> dan rasio ketebalan magnet terhadap gaya aksial pada <i>permanent magnetic bearing</i> .....	26
2.5.2 <i>Design and Analysis of Thrust Active Magnetic Bearing</i> .....	29
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....</b>	<b>33</b>
3.1 Diagram Alir Penelitian .....	33
3.1.1 Observasi.....	35
3.1.2 Perumusan Masalah.....	35
3.1.3 Studi Literatur.....	35
3.1.4 Penentuan Data Awal .....	35
3.1.5 Permodelan 3D <i>Axial Active Magnetic Bearing</i> .....	36
3.1.6 Validasi Simulasi.....	39
3.1.7 Simulasi FEM ( <i>Transient Solution</i> ) .....	39
3.1.8 Pengambilan dan Pengolahan Data .....	40
3.1.9 Analisa Data dan Pembahasan.....	40
3.1.10 Kesimpulan Penelitian.....	40
3.2 Diagram Alir Simulasi.....	40
3.2.1 <i>Input Model 3 Dimensi Desain</i> .....	43
3.2.2 <i>Assign Material</i> .....	44
3.2.3 <i>Assign Region</i> .....	45
3.2.4 <i>Assign Mesh Operation</i> .....	45
3.2.5 <i>Setup Analysis</i> .....	46
3.2.6 Iterate.....	46
3.2.7 Menentukan <i>Solution Type</i> .....	47
3.2.8 Menentukan <i>Excitation</i> .....	48



3.2.9 Create Band Region.....	49
3.10 Assign Motion .....	49
3.2.11 Assign Parameter .....	50
3.2.12 Menentukan Analysis Setup.....	51
3.2.13 <i>Validation Check</i> dan <i>Analyze All</i> .....	52
3.2.14 <i>Create Quick Report</i> .....	52
<b>BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>55</b>
4.1 Validasi Simulasi.....	55
4.2 Analisis Gaya Aksial Hasil Simulasi Transient.....	57
4.2.1 Analisis Pengaruh Air Gap Terhadap Gaya Aksial....	57
4.2.2 Analisis Pengaruh Besar Arus Terhadap Gaya Aksial	63
4.2.3 Analisis Pengaruh Jumlah Lilitan Terhadap Gaya Aksial .....	66
4.3 Kapasitas Gaya Aksial pada <i>Active Magnetic Bearing</i> ..	69
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>71</b>
5.1 Kesimpulan.....	71
5.2 Saran.....	72
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>73</b>
<b>LAMPIRAN .....</b>	<b>75</b>
<b>BIODATA PENULIS .....</b>	<b>77</b>

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Macam-macam beban yang diterima bearing.....	5
Gambar 2.2 Macam-macam jenis bearing.....	6
Gambar 2.3 Konstruksi angular contact ball bearing .....	8
Gambar 2.4 (a) karakteristik (b) jenis – jenis angular contact ball bearing.....	9
Gambar 2.5 Rangkaian magnetic bearing .....	10
Gambar 2.6 Konfigurasi dasar axial magnetic bearing .....	10
Gambar 2.7 (a) Passive magnetic bearing (b) Active magnetic bearing.....	11
Gambar 2.8 (a) Komponen axial AMB (b) 1 pasang thrust bearing .....	12
Gambar 2.9 Dasar geometri active magnetic bearing.....	12
Gambar 2.10 Geometri Axial Active Magnetic Bearing.....	14
Gambar 2.11 Perpindahan Nodal pada Elemen Tetrahedral .....	16
Gambar 2.12 Ilustrasi Perbandingan Ukuran Magnet dan Kumparan.....	18
Gambar 2.13 (a) Tipikal kurva histerisis soft ferromagnetic. (b) Hard Ferromagnetic.....	21
Gambar 2.14 Energy Product ( $B_h \max$ ).....	21
Gambar 2.15 Perbandingan antar soft magnetic material.....	22
Gambar 2.16 Antarmuka Software Ansys Maxwell 3D untuk Komputasi dan Visualisasi .....	25
Gambar 2.17 Grafik pengaruh air gap terhadap gaya aksial .....	26
Gambar 2.18 Grafik pengaruh tebal magnet terhadap gaya aksial .....	27

Gambar 2.19 Grafik pengaruh tebal magnet terhadap gaya aksial .....	28
Gambar 2.20 Parameter ukuran desain.....	30
Gambar 2.21 Rancangan eksperimen AMB.....	30
Gambar 2.22 Hasil analisa dan eksperimen dari active magnetic bearing.....	31
Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian.....	34
Gambar 3.2 Bentuk Awal Pembuatan Stator.....	36
Gambar 3.3 Sketsa 3D Stator .....	37
Gambar 3.4 Sketsa 3D Stator .....	37
Gambar 3.5 Sketsa 3D Kumparan.....	38
Gambar 3.6 Sketsa 3D Kumparan.....	38
Gambar 3.7 Sketsa 3D Axial Active Magnetic Bearing.....	39
Gambar 3.8 Diagram Alir Simulasi.....	42
Gambar 3.9 Model 3D Desain Axial Active Magnetic Bearing..	43
Gambar 3.10 Properties Material Stator.....	44
Gambar 3.11 Area Region yang Dipilih.....	45
Gambar 3.12 Assign Mesh Operation.....	46
Gambar 3.13 Solve Setup Analysis.....	46
Gambar 3. 14 Hasil analisis mesh yang telah dibuat.....	47
Gambar 3. 15 Solution Type Transient .....	47
Gambar 3. 16 (a) Eksitasi Coil Terminal. (b) Add Winding .....	48
Gambar 3. 17 Hasil pembuatan region band pada rotor .....	49
Gambar 3. 18 Motion setup pada region band (a.) tipe motion rotasi dengan sumbu putar pada sumbu pusat region band (b.) kecepatan putar 6 rpm untuk data pertama.....	50
Gambar 3. 19 Assign Force.....	50

Gambar 3. 20 (a) Solve Setup General. (b) Solve Setup Save Field .....	51
Gambar 3. 21 Validation Check .....	52
Gambar 3. 22 (a) Nilai dan arah vector flux density (b) Gaya axial AMB.....	53
Gambar 4.1 Kontruksi Active Magnetic Bearing Seok – Myeong Jang.....	55
Gambar 4.2 Hasil simulasi pada Ansys Electronics 19R1 .....	56
Gambar 4.3 Grafik Pengaruh Air Gap terhadap Gaya Aksial dan Beban Radial .....	58
Gambar 4.4 Hasil Simulasi Vector Flux Density (a) Pada Air Gap 0,1 mm (b) Pada Air Gap 2,5 mm .....	59
Gambar 4.5 Grafik Gaya Aksial terhadap Perpindahan Rotor ....	60
Gambar 4.6 Hasil Simulasi pada Rotor 7 mm dengan perpindahan 1,5 mm (a) Distribusi Flux Density (b) Arah Flux Density.....	61
Gambar 4.7 Hasil Simulasi pada Rotor 9 mm dengan perpindahan 0,5 mm (a) Distribusi Flux Density (b) Arah Flux Density.....	62
Gambar 4.8 Grafik Pengaruh Jumlah Arus terhadap Gaya Aksial .....	64
Gambar 4.9 Hasil Simulasi Pada Besar Arus 0,2 A (a) Distribusi Flux Density (b) Arah Flux Density.....	65
Gambar 4.10 Grafik Pengaruh Jumlah Lilitan terhadap Gaya Aksial .....	67
Gambar 4.11 Hasil Simulasi Pada Jumlah Lilitan 100 (a) Distribusi Flux Density (b) Arah Flux Density .....	68

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Perbandingan jenis bantalan dengan beban yang diterima .....	7
Tabel 3. 1 Variasi Percobaan.....	43
Tabel 4. 1 Dimensi dan properties desain validasi .....	56
Tabel 4. 2 Hasil Validasi .....	56

“Halaman ini sengaja dikosongkan”



# BAB I

## PENDAHULUAN

Pada bab pendahuluan akan dijelaskan mengenai latar belakang permasalahan, rumusan masalah, tujuan, batasan masalah, dan manfaat dari penelitian yang dilakukan.

### 1.1 Latar Belakang

*Bearing* memegang peranan penting dalam menjalankan peralatan yang menunjang kehidupan manusia, salah satunya bidang transportasi. *Bearing* dipakai pada alat transportasi seperti mobil, mesin-mesin perkakas, mesin-mesin perindustrian, dan lain lain. *Bearing* merupakan salah satu bagian kecil pada kendaraan yang memegang peranan penting dalam kestabilan kendaraan. Sebagai bantalan, fungsi utama *bearing* adalah untuk mengurangi gesekan dan menjaga komponen yang bergerak linier agar selalu berada pada jalurnya. Oleh karena itu, perkembangan dalam bidang transportasi makin berkembang pesat seiring dengan berkembangannya peradaban.

Mengingat sebuah *bearing* dapat mengalami berbagai macam kerusakan maka diperlukan adanya inovasi perancangan yang tepat, teliti dan akurat. Dalam beberapa pengaplikasian, *bearing* menghubungkan komponen satu dengan komponen lainnya. Apabila *bearing* rusak maka akan menyebabkan kegagalan yang beruntun pada komponen lain dalam sistem tersebut. Berbagai upaya dilakukan untuk meminimalisir kegagalan-kegagalan pada *bearing*, salah satunya dengan memberikan inovasi baru yaitu *magnetic bearing*. Dimana *magnetic bearing* ini menggantikan *bearing* konvensional. Alasan utama banyak penggunaan *magnetic bearing* yaitu karena dalam kenyataan tidak ada kontak dan karena tidak ada gesekan sama sekali antara bagian yang berputar dan tumpuannya. Karena tidak adanya kontak maka *magnetic bearing* memiliki banyak keunggulan dari *bearing* pada umumnya. *Magnetic bearing* dapat dengan signifikan menghilangkan gesekan yang tidak dapat dilakukan oleh *bearing* konvensional, mengefisiensi energi, *life time* yang tinggi, mampu beroperasi dengan putaran yang

sangat tinggi, tidak memerlukan pelumasan, bersih dan layak beroperasi pada ruangan yang vakum .

Jumlah penelitian mengenai *axial active magnetic bearing* dan penelitian yang membandingkan *magnetic bearing* dan *mechanical bearing* tidak banyak. Oleh karena itu, dilakukan penelitian yang membahas tentang *axial active permanent magnetic bearing* . Penelitian ini dilakukan untuk merancang sebuah *magnetic bearing* untuk dibandingkan dengan *bearing* produk dari *Toyota Manufacturing Indonesia* yang digunakan untuk *front wheel* dari mobil prius 2018, yaitu *double angular contact ball bearing* Penelitian diawali dengan perancangan *active permanent magnetic bearing* dengan dimensi yang mendekati dengan *bearing* tersebut menggunakan *finite element method* (FEM) pada *software* Ansoft Electronics Maxwell 3D v19R1. Penelitian ini dilakukan dengan memvariasikan.

## 1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh *air gap* terhadap gaya aksial yang dihasilkan?
2. Bagaimana pengaruh jumlah lilitan terhadap gaya aksial yang dihasilkan ?
3. Bagaimana pengaruh besar arus terhadap gaya aksial yang dihasilkan?

## 1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah di atas, tujuan tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis pengaruh *air gap* terhadap gaya aksial yang dihasilkan.
2. Menganalisis pengaruh jumlah lilitan terhadap gaya aksial yang dihasilkan.
3. Menganalisis pengaruh besar arus terhadap gaya aksial yang dihasilkan.

#### **1.4 Batasan Masalah**

Batasan masalah pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Pengaruh perubahan temperatur tidak dimodelkan.
2. Material coil adalah *copper*
3. Material rotor dan stator adalah iron cobalt
4. Dimensi *magnetic bearing* mengikuti produk
5. Jumlah pole yang digunakan 2
6. Putaran roda yang digunakan 1000 rpm
7. Volume ruang coil tetap
8. Diameter kumparan 0,7 mm

#### **1.5 Manfaat Penelitian**

Manfaat dari penelitian ini adalah menunjukkan potensi dari *active permanent magnetic bearing* untuk menggantikan *mechanical bearing* dengan memperhatikan perancangannya agar menjadi solusi dari permasalahan *bearing* pada kendaraan.

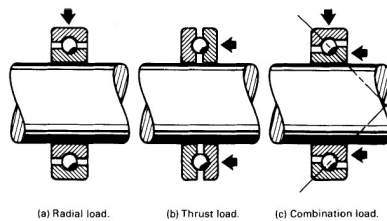
“Halaman ini sengaja dikosongkan”

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini dipaparkan landasan teori yang dijadikan acuan penelitian. Adapun dasar teori dan tinjauan pustaka yang digunakan berdasarkan perancangan *magnetic bearing* dan analisa menggunakan metode *finite element*.

### 2.1 *Bearing*

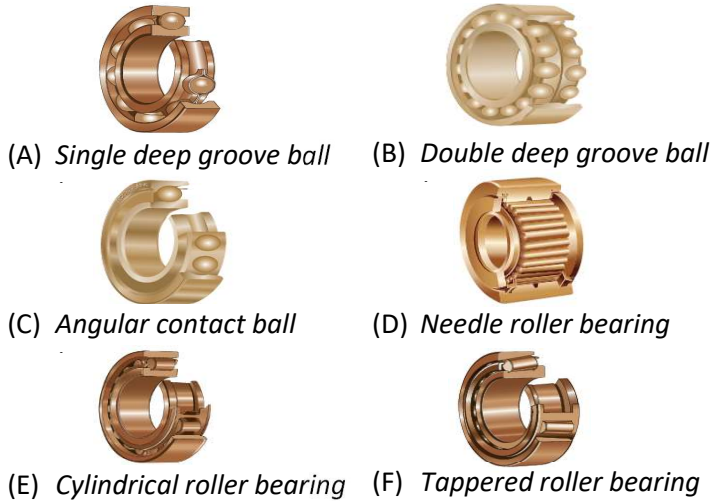
*Bearing* atau bantalan merupakan salah satu elemen mesin yang berfungsi untuk menopang suatu poros yang berotasi, bergeser dan berosilasi pada sebuah tumpuan supaya tetap pada sumbunya dan mengurangi gesekan pada keduanya. *Bearing* atau bantalan terdiri dari berbagai jenis sesuai dengan kondisi dan tujuan penggunaannya. *Bearing* digunakan untuk menerima dua buah beban, yaitu beban aksial, dan beban radial. Beban radial terjadi terhadap pusat dari bantalan sepanjang jari – jarinya, beban aksial terjadi searah dengan sumbu poros. Pada gambar 2.1 ditunjukkan beban yang diterima oleh bantalan. Beban yang diterima bantalan merupakan salah satu dasar pemilihan jenis bantalan. (R. Keith Mobley. 2004)



**Gambar 2.1** Macam-macam beban yang diterima *bearing*

Secara umum bearing terbagi menjadi dua jenis, yaitu ball bearing dan roller bearing. Ball Bearing memanfaatkan bola sebagai elemen terjadinya rolling. Bearing ini ditandai dengan kontak titik antara bola dan raceway (lintasan berputarnya bola). Bantalan ini memiliki karakteristik yaitu dapat berputar dengan

sangat cepat akan tetapi memiliki keterbatasan tidak dapat mendukung beban besar seperti pada roller bearing.



**Gambar 2.2** Macam-macam jenis bearing

Bearing terdiri atas berbagai jenis sesuai dengan kondisi dan tujuan penggunaannya. *Deep groove ball bearing* jenis bearing yang sering dijumpai di peralatan otomotif atau hanya untuk aplikasi yang mempunyai beban tidak terlalu berat karena kontak antara cincin dalam dan cincin luar sangat minim sehingga putarannya sangat lembut. *Double row deep groove ball bearing* dengan menambah satu baris bola – bola kedua pada *single grove ball bearing* untuk meningkatkan penerimaan gaya radial. *Angular contact ball bearing* dimana salah satu sisi tiap cincin dibuat lebih tinggi agar dapat menerima beban aksial lebih besar. *Cylindrical Roller Bearing* dengan mengganti bola – bola bundar dengan rol – rol silinder dan perubahan dalam rancangan cinin, akan memberikan kapasitas beban radial yang besar. *Needle roller bearing* bearing ini memiliki ukuran diameter rol yang kecil sehingga dalam menahan gaya aksial dinilai buruk. *Tapered roller*

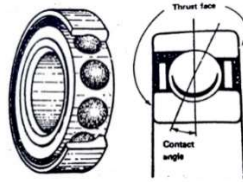
*bearing* biasanya digunakan untuk *bearing* roda kendaraan, karena *bearing* ini dirancang untuk menerima beban aksial dan radial yang tinggi. (Robert L Mott, Edward M. Vavrek, Jyhwen Wang. 2018)

**Tabel 2.1** Perbandingan jenis bantalan dengan beban yang diterima

Jenis Bantalan	Kemampuan menerima beban radial	Kemampuan menerima beban aksial
<i>Single row, deep groove ball</i>	Baik	Cukup
<i>Double row, deep groove ball</i>	Sempurna	Baik
<i>Angular contact</i>	Baik	Sempurna
<i>Cylindrical roller</i>	Sempurna	Buruk
<i>Neddle</i>	Sempurna	Buruk
<i>Spherical roller</i>	Sempurna	Cukup / Baik
<i>Tapered roller</i>	Sempurna	Sempurna








### 2.1.1 *Angular Contact Ball Bearing*

*Bearing* merupakan sebuah pondasi dari komponen mesin. *Ball bearing* mempunyai banyak keuntungan, salah satunya gesekan gelindingnya sangat kecil dibandingkan dengan *sliding bearing*. Konstruksi dari *ball bearing* jenis *angular contact ball bearing* ditunjukkan pada Gambar 2.3. Konstruksi *angular contact ball bearing*, terdiri dari cincin bagian luar (*outer ring*), cincin bagian dalam (*inner ring*), bola (*ball*) dan *cage* yang berfungsi untuk mengikat bola-bola pada *ball bearing* agar tetap berada pada posisinya. Pada *angular contact ball bearing*, bola memiliki sudut kontak yang besarnya menentukan beban yang dapat diterima. Elemen gelinding seperti bola atau rol dipasang diantara cincin bagian luar dan cincin bagian dalam. Dengan memutar salah satu cincin tersebut, bola atau rol akan membuat gerakan gelinding sehingga gesekan yang ada diantaranya akan jauh lebih kecil.



**Gambar 2.3** Konstruksi angular contact ball bearing

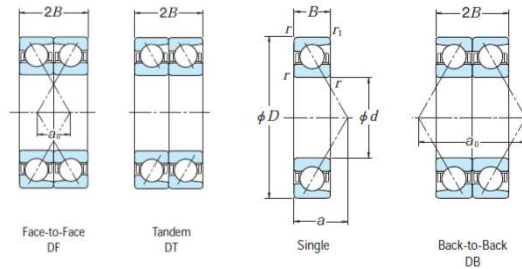
Pemilihan jenis *ball bearing* disesuaikan dengan pengaplikasiannya. Pada buku *Machine Design Theory and Practice* pada *Figure 9-4* hingga *Figure 9-25* dijelaskan mengenai karakteristik setiap *ball bearing* yang berbeda sesuai dengan kemampuannya menahan beban yang diterima. Menurut AFBMA Standard (*Anti-Friction Bearing Manufacturer Association*), hal tersebut dapat dipertimbangkan melalui *range* dari ukuran bearing dan nilai *relative capacity* pada setiap jenis *ball bearing* yang dijelaskan pada Gambar 2.4 sehingga akan lebih mudah dalam menentukan jenis *ball bearing* yang akan dipilih

Type	Approx Range of Ball Sizes (in.)	Relative Capacity		Linking Speed Factor	Tolerance to Misalignment		
		Min	Max			Radial	Thrust
One-directional thrust		0.3037	12.5004	1.00-1.15*	1.5-2.3* (1-direction)	1.1-3.0*	10°/2'
Double, back-to-back		0.3037	12.5004	1.85	1.5 (2-direction)	3.0	0°
Double, face-to-face		0.3037	12.5004	1.85	1.5 (2-direction)	3.0	0°
Double, tandem		0.3037	12.5004	1.85	2.4 (1-direction)	3.0	0°
Two-directional or split ring		0.3037	4.3307	1.15	1.5 (2-direction)	3.0	10°/2'
Double row		0.3037	5.5110	1.5	1.85 (2-direction)	0.8	0°
Double row, max in/out		0.3037	4.3307	1.65	0.5 (in 1 direction) 1.5 (in other direction)	0.7	0°

\* Depends on contact angle.

(a)



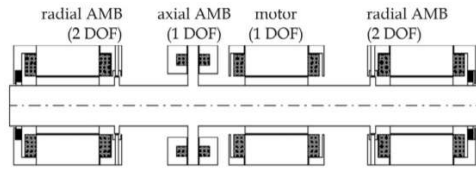


(b)

**Gambar 2.4** (a) karakteristik (b) jenis – jenis angular contact ball bearing

## 2.2 *Magnetic Bearing*

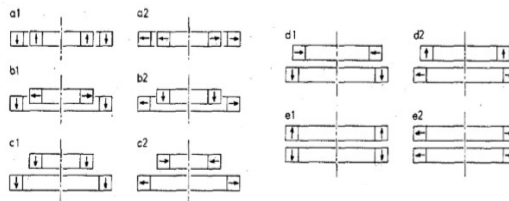
*Magnetic bearing* adalah suatu bearing yang mampu menumpu beban tanpa kontak fisik, melainkan menggunakan levitasi magnet. *Magnetic bearing* dapat melayangkan (levitasi) putaran poros atau pergerakan yang relatif tanpa menimbulkan gesekan dan keausan. Penggunaan *magnetic bearing* semakin populer dan terus dikembangkan karena pada kenyataannya tidak ada kontak dan tidak ada gesekan sama sekali antara bagian yang berputar dan tumpuannya. *Magnetic bearing* dibagi menjadi dua berdasarkan arah gaya yaitu *radial bearing* dan *axial bearing*. Dimana *radial bearing* menciptakan gaya levitasi radial terhadap rotor, dan *axial bearing* menghasilkan gaya dorong agar rotor tetap dalam posisi yang tetap. *Magnetic bearing* dinilai secara signifikan mampu menghilangkan gesekan yang terdapat pada bearing konvensional mengefisienkan energi, *life time* yang tinggi, mampu beroperasi dengan putaran yang sangat tinggi, tidak memerlukan pelumasan, bersih dan dapat beroperasi pada ruangan yang vakum. Namun *Magnetic Bearing* mempunyai dimensi yang besar, beban berat, dan kontrol yang rumit menyebabkan masalah dalam pengaplikasian yang mempunyai ruang terbatas. *Magnetic bearing* dibedakan lagi menjadi dua jenis berdasarkan sumber magnet yaitu *active magnetic bearing* (AMB) dan *passive magnetic bearing* (PMB). (Quang-Dich Nguyen, Satoshi Ueno. 2010)



**Gambar 2.5** Rangkaian magnetic bearing

### 2.2.1 *Passive Magnetic bearing*

*Passive magnetic bearing* terdiri dari susunan magnet permanen yang tetap, dimana memanfaatkan medan magnet yang dihasilkan oleh *gap* antar 2 magnet permanen. Magnet permanen dipertimbangkan dengan rigid *magnetization*. Jika magnetisasi suatu *radial magnetic bearing* dibalik dengan kekakuan dan kekuatan yang sama maka akan didapat arah yang lain. Jika *radial magnetic bearing* diubah menjadi aksial, maka hanya akan ada *one degree of freedom* yang dapat dikendalikan. Konfigurasi dasar dari *axial passive magnetic bearing* terdiri dari minimal dua ring magnet konsentris. Berdasarkan hasil penelitian, dapat ditunjukkan bahwa semakin banyak jumlah konfigurasi magnet penyusun *magnetic bearing*, maka nilai gaya aksial yang dihasilkan akan semakin besar (Kriswanto & Yudiono, 2014).



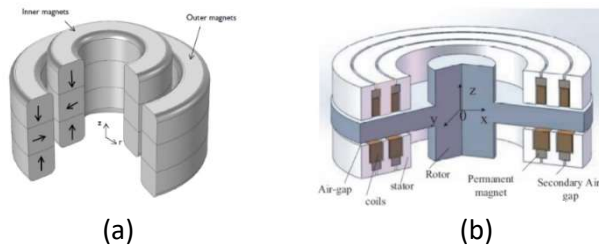
**Gambar 2.6** Konfigurasi dasar axial magnetic bearing

### 2.2.2 *Active Magnetic Bearing*

*Active magnetic bearing* terdiri dari perangkat elektromagnet, *amplifier* yang memberikan arus untuk elektromagnet, kontrol dan sensor yang tergabung dalam rangkaian

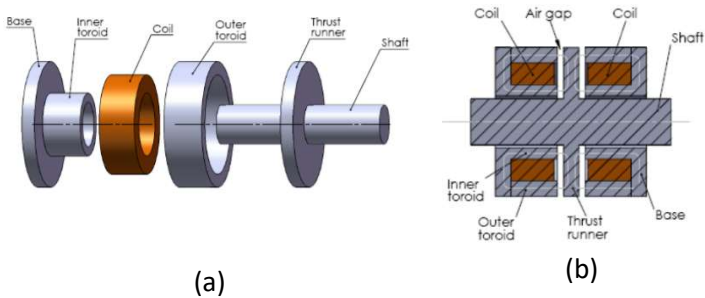
elektronik sebagai penyedia umpan balik untuk mengendalikan posisi rotor. Stabilitas pada semua *degree of freedom* dengan levitasi magnet tidak mungkin terjadi jika hanya dengan menggunakan levitasi magnet permanen. Maka perlu dilakukan pengendalian intensitas arus untuk menyalurkan dan memutus daya elektromagnetik pada frekuensi yang diinginkan. Hal ini dapat diwujudkan melalui *active magnetic bearing* atau dengan menggunakan bearing konvensional pada tumpuan lainnya.

Alasan memilih *active magnetic bearing* dibanding *passive magnetic bearing* adalah kemampuan gaya yang dihasilkan untuk menerima pembebanan dapat disesuaikan dengan kontrol namun dibatasi dengan dimensi *active magnetic bearing* tersebut dan dapat bekerja di kecepatan tinggi. (Maslen. 2009)



**Gambar 2.7** (a) Passive magnetic bearing (b) Active magnetic bearing

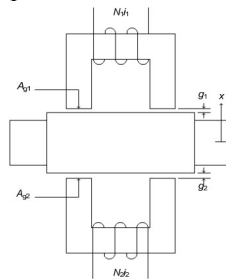
*Bearing axial active magnetic bearing* terdiri dari beberapa komponen, yaitu stator elektromagnetik dan *thrust runner* yang ada pada rotor. Stator dan rotor dipisahkan oleh celah udara, agar saat rotasi tidak terjadi gesekan. Gambar 2.8a menunjukkan komponen dari *axial AMB* yaitu stator, poros, koil, dan *thrust runner*. *Thrust runner* melekat pada poros. Umumnya *thrust bearing* menggunakan 1 pasang stator seperti gambar 2.8b. Dimana untuk mengontrol poros ke arah aksial positif dan negatif.



**Gambar 2.8** (a) Komponen *axial* AMB (b) 1 pasang *thrust bearing*

### 2.2.3 Dasar Perhitungan *Active Magnetic Bearing*

Geometri komponen magnetik dari rangkaian diilustrasikan dalam gambar 2.9 , komponen tersebut terbuat dari material magnetik biasa seperti baja silikon atau bahan magnetik tingkat saturasi tinggi lainnya. Celah udara memiliki ketebalan  $g$  dan area  $A_g$ . Fluks magnet dari aktuator diproduksi oleh kumparan  $N$  lilitan kawat dengan arus  $i$  yang mengalir. Amplifier menghasilkan arus listrik yang diinginkan pada coil.



**Gambar 2.9** Dasar geometri *active magnetic bearing*

*Ampere's circuital law* menyatakan intensitas medan magnet  $H$  diinduksi oleh lilitan sejumlah  $N$  yang dialiri arus  $I$  disekitar *closed magnetic path* sepanjang  $l$ , dan dirumuskan dengan

$$H = \frac{N I}{l} \quad (2.1)$$

Sehingga dapat diasumsikan bahwa arah intensitas medan magnet berbanding lurus dengan arus  $i$ , dan berbanding terbalik dengan *magnetic path*. Jumlah  $Ni$  biasa disebut dengan gaya magnetomotive (MMF). *Fluks magnetic* di sirkuit magnetik sama dengan kerapatan flux  $B$  dan luas penampang dari pole  $A_g$  yang juga sama dengan luas area dari celah udara di sirkuit magnetik tersebut. Maka dapat dirumuskan dengan

$$\Phi = \iint_A B \cdot dA \quad (2.2)$$

$$\Phi = B_a A_g$$

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

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

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.

$$B = \mu_0 H \quad (2.4)$$

Maka *flux density* ( $B$ )

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

Dimana :

$B$  = *flux density*

$H$  = medan magnet

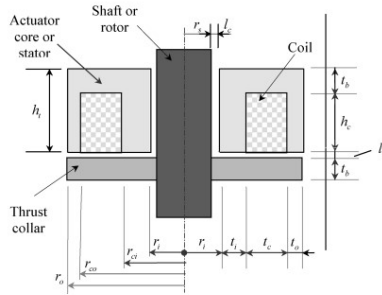
$I$  = arus listrik

$g$  = jarak gap

$\Phi$  = *flux magnetic total*

$\mu_0$  = permeabilitas magnetik ruang hampa

### 2.2.4 Perhitungan Gaya Axial Active Magnetic Bearing



**Gambar 2.10** Geometri *Axial Active Magnetic Bearing*

Dimana :

$r_c$  = clearance pada shaft dengan jari – jari dalam bearing

$r_i$  = jari – jari dalam bearing

$r_o$  = jari – jari luar bearing

$r_{ci}$  = jari – jari dalam coil

$r_{co}$  = jari – jari luar coil

$h_c$  = tebal dari coil

$t_i$  = tebal bearing dari dinding luar bearing

$t_o$  = tebal bearing dari dinding dalam bearing

$l_g$  = panjang celah udara

Dengan memperhatikan geometri pada gambar 2.10 ,perhitungan gaya Axial AMB merupakan metode turunan dari energi variasi

$$F(i, x) = -\frac{dW_m}{dx} = -\frac{1}{2}i^2 \frac{dL(x)}{dx} \quad (2.6)$$

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.

$$L = \frac{N\Phi}{i} = \frac{\mu_0 N^2 A_g}{2g} \quad (2.7)$$

Sehingga perhitungan gaya *axial active magnetic bearing* dengan mensubstitusi persamaan 2.5 dan 2.6

$$F = \mu_0 A_g \left( \frac{Ni}{2g} \right)^2 \quad (2.8)$$

Dengan

$$A_g = \pi(r_{ci}^2 - r_i^2) = 2\pi r_{cit_b} = \pi(r_o^2 - r_{co}^2) \quad (2.9)$$

Dimana

$A_g$  = Luas penampang pole

$F$  = Gaya *axial active magnetic bearing*

$W_m$  = Energi yang disimpan pada medan magnet

$i$  = arus listrik

$x = l_g$  = Jarak celah udara

### 2.2.5 Perhitungan Gaya *Axial Active Magnetic Bearing* pada Tiap Elemen

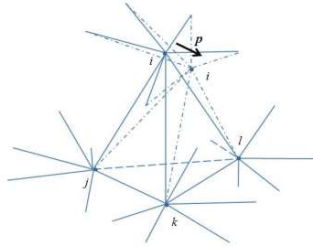
Berdasarkan Jay Panchal dalam jurnalnya “3 Dimensional Electromagnetic Analysis of An Axial Active Magnetic Bearing”. Tujuan *active magnetic bearing* adalah menghasilkan gaya yang diperlukan untuk melayangkan rotor. Banyak aspek yang mempengaruhi kapasitas maksimum pada aktuator. Besarnya gaya pada semua *air gap* harus dievaluasi dengan akurat. Pada sub bab 2.2.4 merupakan formulasi dasar secara *steady state* untuk memperhitungkan gaya statis. Metode ini dapat diperluas ke metode numerik. Dimana ketidaktepatan akan menambahkan kesalahan kesalahan dalam pengukuran. Untuk mencapai nilai yang akurat menggunakan FEM dimana pendekatan analitik dan numerik. Perhitungan gaya magnet dapat menggunakan metode gaya pada nodal dalam FEM

Untuk menghitung total gaya yang dihasilkan elektromagnet menggunakan prinsip *virtual work* atau turunan Jacobian matrix. Metode ini berdasarkan turunan parsial energi pada elemen yang berhubungan dengan perpindahan node elemen tersebut.

$$W = \int_{\mathcal{V}} \left( \int_0^B H \cdot dB \right) d\mathcal{V} \quad (2.10)$$

Dimana  $W$  adalah energi dari sistem, kekuatan medan magnet  $H$  dan *magnetic flux density*  $B$ . Perubahan energi terhadap perpindahan adalah gaya yang dirumuskan dengan

$$F = -\frac{\partial W}{\partial p} \quad (2.11)$$



**Gambar 2.11** Perpindahan Nodal pada Elemen Tetrahedral

Dengan melihat gambar 2.11, gaya akan dihitung berdasarkan perpindahan nodal dari node ke  $i$  pada arah  $p$ . Oleh karena itu gaya pada tiap elemen di rumuskan dengan

$$F^e = -\frac{\partial}{\partial p} \int_{\mathcal{V}^e} \left( \int_0^B H \cdot dB \right) d\mathcal{V}^e \quad (2.12)$$

$$F^e = -\int_{\mathcal{V}^e} \left( \frac{\partial}{\partial p} \left( \int_0^B H \cdot dB \right) |J_M| + \left( \int_0^B H \cdot dB \right) \frac{\partial |J_M|}{\partial p} \right) d\mathcal{V}^e \quad (2.13)$$

$J_M$  adalah matrix jacobian untuk mentransformasi dari elemen aktual ke elemen acuan

Prinsip *virtual work* didasarkan pada energi magnetik dengan menggunakan transformasi dari fluks. Besarnya *flux density* tetap tidak berubah selama perpindahan elemen node. Untuk mencapai hal tersebut *magnetic vector potential* dibuat konstan selama penurunan energi. Pendekatan kedua



menggunakan energi, dimana turunan dari energi magnetik diambil dengan perpindahan elemen pada arus konstan.

$$F^e = - \int_{\mathcal{V}^e} \left( \frac{1}{2\mu} \frac{\partial B^2}{\partial p} |J_M| + \frac{\partial |J_M|}{\partial p} \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu} \right) d\mathcal{V}^e \quad (2.14)$$

$$F^e = - \int_{\mathcal{V}^e} \left( \frac{B^2}{\mu} \frac{\partial J_M}{\partial p} - \frac{1}{2} \left( \frac{B^2}{\mu} \cdot \frac{\partial |J_M|}{\partial p} \right) \right) d\mathcal{V}^e \quad (2.15)$$

Matrix jacobian didapatkan dari turunan fungsi bentuk koordinat referensi  $\xi, \eta, \Gamma$  yang berhubungan dengan koordinat lokal  $x, y, z$

Dimana :

$F$  = Gaya axial active magnetic bearing

$B$  = Flux density

$H$  = Medan magnet

$p$  = Arah vektor

$J_M$  = Matrix jacobia

$\mathcal{V}$  = Volume domain integrasi dari persamaan gaya

$N_i$  = Fungsi bentuk elemen

$\xi, \eta, \Gamma$  = Koordinat referensi

$$J_M = \begin{bmatrix} \sum_{i=1,n} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} x_i & \sum_{i=1,n} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} y_i & \sum_{i=1,n} \frac{\partial N_i}{\partial \xi} z_i \\ \sum_{i=1,n} \frac{\partial N_i}{\partial \eta} x_i & \sum_{i=1,n} \frac{\partial N_i}{\partial \eta} y_i & \sum_{i=1,n} \frac{\partial N_i}{\partial \eta} z_i \\ \sum_{i=1,n} \frac{\partial N_i}{\partial \Gamma} x_i & \sum_{i=1,n} \frac{\partial N_i}{\partial \Gamma} y_i & \sum_{i=1,n} \frac{\partial N_i}{\partial \Gamma} z_i \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} \\ J_{31} & J_{32} & J_{33} \end{bmatrix}$$

Dengan determinan  $J_M$  yang digunakan

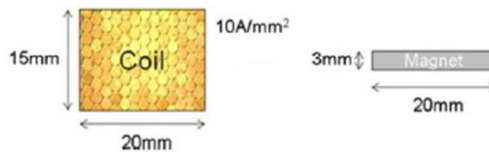
$$|J_M| = J_{11}(J_{22}J_{33} - J_{32}J_{23}) - J_{12}(J_{21}J_{33} - J_{31}J_{23}) + J_{13}(J_{21}J_{32} - J_{22}J_{31})$$

Perhitungan gaya diatas merupakan integrasi tiap elemen, jumlah kekuatan medan tidak memerlukan difersiasi partial dimana

dapat memperhatikan bidang diskontinyu. Total gaya dapat diperoleh dengan penjumlahan dari gaya tiap nodal. Perhitungan gaya tiap nodal memberikan hasil yang lebih akurat karena gaya dihitung dari energi. (Jay Panchal. 2016)

### 2.3 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 memiliki beberapa jenis dan tipe, salah satunya adalah magnet permanen. Dari segi ukuran, magnet permanen mampu menghasilkan medan magnet yang sama dengan kumparan elektromagnetik dengan ukuran yang lebih kecil. Hal ini diilustrasikan pada gambar 2.12 Ilustrasi Perbandingan Ukuran Magnet dan Kumparan.



**Gambar 2.12** Ilustrasi Perbandingan Ukuran Magnet dan Kumparan

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

#### 1. 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 di sekitarnya. Sifat susceptibility (kerentanan) bernilai negatif, seperti tembaga, perak, bismuth, dan emas.

## 2. 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 dengan kekuatan tarik yang lemah. Sifat susceptibility (kerentanan) bernilai positif, seperti aluminium, platinum, manganese, dan titanium.

## 3. 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 yang kuat. Sifat susceptibility (kerentanan) bernilai positif lebih dari satu, seperti besi, kobalt, nikel, rare earth dan campuran dari semuanya.

Beberapa elemen lain juga memperlihatkan sifat magnet, tapi tidak semua magnet berwujud logam. Teknologi mutakhir sekarang telah menggunakan keduanya, baik magnet metalik maupun keramik. Teknologi ini juga memanfaatkan elemen-elemen lain untuk meningkatkan kemampuan magnetik. 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

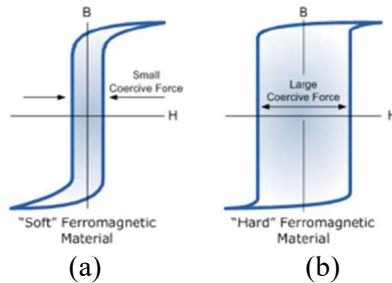
neodymium magnet (NdFeb), samarium-cobalt magnet (SmCo), keramik magnet, plastik magnet, alnico magnet.

Medan magnet ( $H$ ) adalah daerah disekitar magnet yang masih dipengaruhi gaya magnet dan digambarkan dengan garis-garis gaya magnet yang menyebar dari kutub-kutub magnet. Garis-garis gaya magnet ini selalu keluar dari kutub utara menuju kutub selatan dan garis-garis gaya magnet tidak pernah saling berpotongan dengan garis-garis gaya magnet yang lain yang berasal dari magnet yang sama sehingga dapat diketahui apabila medan magnet terkuat terdapat pada kutub-kutub magnet. 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. Namun jika medan magnet dihasilkan dari kutub magnet, maka garis-garis medan magnet keluar dari kutub utara menuju kutub selatan. Misal suatu sampel yang termagnetisasi oleh medan yang diaplikasikan dari kiri ke kanan dan kemudian medan tersebut dihilangkan, maka kutub utara akan terbentuk di ujung sebelah kanan dan kutub selatan terbentuk disebalah kiri. Kuat medan  $H$  yang menyebabkan bahan magnetik mencapai saturasi adalah  $M_{sat}$ . Pada kondisi saturasi ini seluruh momen magnetik telah disearahkan sesuai dengan arah medan magnet pengimbas. Jika medan pengimbas tersebut kemudian diperkecil atau sampai dihilangkan, masih terdapat medan sisa pada bahan magnetic yang disebut dengan remanence. *Remanence* adalah medan magnet yang tersisa setelah dihilangkannya medan magnet pengimbas.

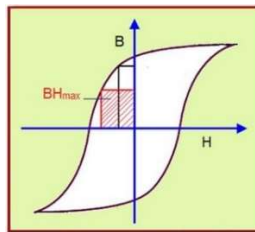
Histerisis menggambarkan proses *magnetitation reversal* pada bahan magnetik dari kondisi awal yang tidak termagnetitation kemudian diinduksi oleh medan magnetik luar sehingga membentuk kurva histerisis. Tipikal kurva histerisis untuk *soft* ferromagnetik dan *hard* ferromagnetik ditunjukkan pada Gambar 2.13 di bawah ini.

Karakteritik yang membedakan bahan *softmagnetic* dengan bahan *hardmagnetic* adalah *energy product* ( $BH_{max}$ ) yang bisa

dihasilkan. *Energy product* ( $BH_{max}$ ) merupakan luasan persegi terbesar yang dapat dibentuk pada quadran kedua



**Gambar 2.13** (a) Tipikal kurva histerisis soft ferromagnetic. (b) Hard Ferromagnetic



**Gambar 2.14** Energy Product ( $BH_{max}$ )

Bahan *hardmagnetic* merupakan bahan yang memiliki kurva histerisis yang besar dan lebar seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.14 di atas. 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* ( $BH_{max}$ ) berkisar antara 2-80  $\text{kJ/m}^3$ , seperti baja, paduan Cunife (Cu-Ni-Fe), paduan Alnico (Al-Ni-Co). Bahan

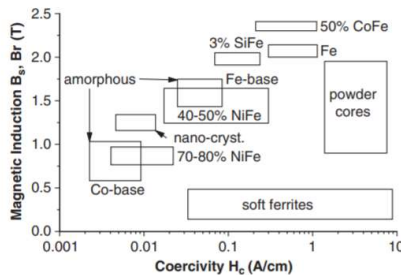
*hardmagnetic* yang memiliki energi tinggi seperti  $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ ,  $\text{SmCo}_5$  memiliki nilai  $\text{BH}_{\text{max}}$  lebih besar dari  $80 \text{ kJ/m}^3$  masuk dalam rare earth magnet. Bahan *hardmagnetic* biasanya banyak diaplikasikan pada motor, *speaker*, bor, dsb, dikarenakan semakin besar  $\text{BH}_{\text{max}}$  maka bahan magnet tersebut akan sangat susah untuk diberi perlakuan demagnetisasi. (Sara Hamidizadeh. 2016)

### 2.3.1 Soft Magnetic Material

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. Karakteristik yang diperlukan dari *soft magnetic material* antara lain :

- Induksi saturasi tinggi untuk meminimalkan berat dan volum dari iron
- Permeabilitas tinggi untuk desain reluktansi sirkuit magnetik
- Koersivitas rendah untuk meminimalkan kerugian histerisis
- Resitivitas tinggi untuk meminimalkan kerugian eddy-current

Karakteristik berbagai soft magnetic material ditunjukkan pada gambar di bawah.



**Gambar 2.15** Perbandingan antar soft magnetic material

Sifat-sifat magnetik tersebut tidak didapatkan hanya dari satu material, karena ada banyak faktor yang mempengaruhi sifat magnetik. Sifat magnetik material dapat dioptimalkan dengan penambahan elemen kimia, kerja mekanis material, dan perlakuan panas pada material.

#### A. Iron Cobalt Alloys

Material iron-cobalt memiliki magnetisasi saturasi tertinggi dari semua bahan soft magnetic material, dapat dilihat pada gambar 2.15. 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*.

#### B. 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

#### C. 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 AlliedSignal Inc, AS, adalah METGLAS 2826, yang memiliki komposisi  $\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{40}\text{P}_{14}\text{B}_6$ . 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 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.

#### D. 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 reaktif rendah membuatnya tidak cocok untuk digunakan pada power atau transformator fluks tinggi. (Collocott. 2016)

## 2.4 Software Simulasi

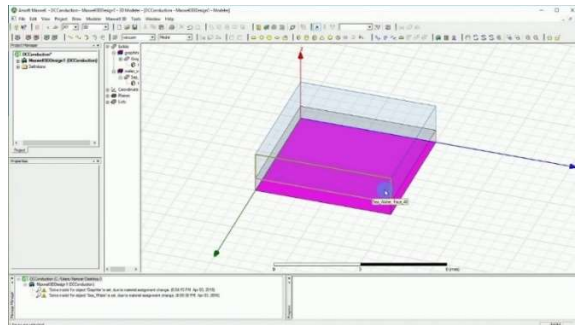
### 2.4.1 Finite Element Method

*Finite element method* merupakan suatu pendekatan numerik dimana bidang telaah dibagi menjadi banyak daerah geometri sederhana yaitu segitiga atau tetrahedral dan masing-



masing daerah mempergunakan persamaan secara khusus. Perhitungan--hingga ratusan persamaan--ini dikerjakan oleh *software* simulator secara simultan. Pengembangan dan penerapan metode ini mula-mula disarankan untuk menganalisis permasalahan struktur pada tahun 1960 dan dikenalkan pada komputasi *electromagnetic* pada tahun 1970.

Permasalahan *magnetostatic* adalah permasalahan magnetisme yang tidak berubah menurut waktu (*time-invariant*). Medan magnet seperti ini dihasilkan dari sumber arus konstan atau magnet permanen (Infolytica, 2010). Permasalahan *magnetostatic* pada penelitian ini dapat diselesaikan menggunakan *software* komputasi *finite element method*.



**Gambar 2.16** Antarmuka Software Ansys Maxwell 3D untuk Komputasi dan Visualisasi

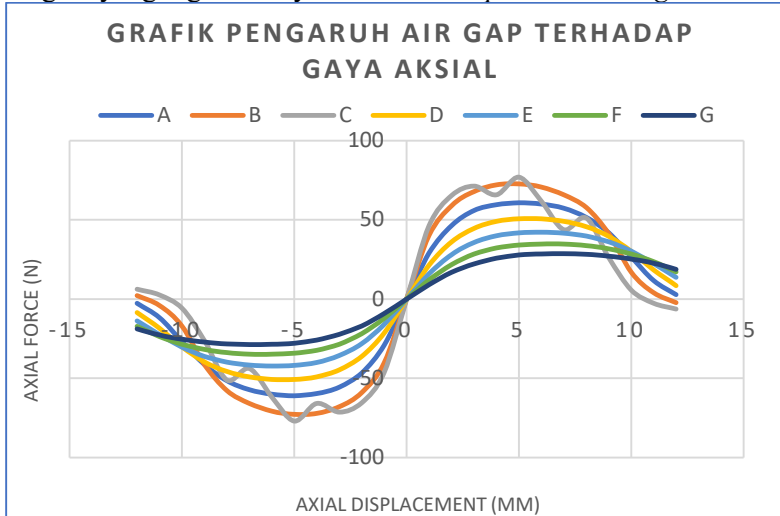
*Software* komputasi *finite element method* dalam bidang *magnetostatic* yang cukup handal dan memadai menurut hasil pencarian adalah Ansys Maxwell 3D, *software* ini memiliki antarmuka yang mudah dipahami dan mampu menyajikan data dengan sangat baik. *Software* alternatif lainnya antara lain : (a) MagNet dari Infolytica, (b) FEMM, (c) SEMFEM dari Python, (d) FLUX dari Magsoft, (e) JMAG dari JMAG Group, (f) COMSOL Multiphysic dari COMSOL, (g) Opera dari Vector Fields. Berikut ini adalah tampilan *software* Ansys Maxwell 3D yang digunakan dalam penelitian ini.

## 2.5 Penelitian Terdahulu

Terdapat beberapa penelitian terdahulu yang memiliki keterkaitan serta dapat menjadi acuan dalam melakukan penelitian ini.

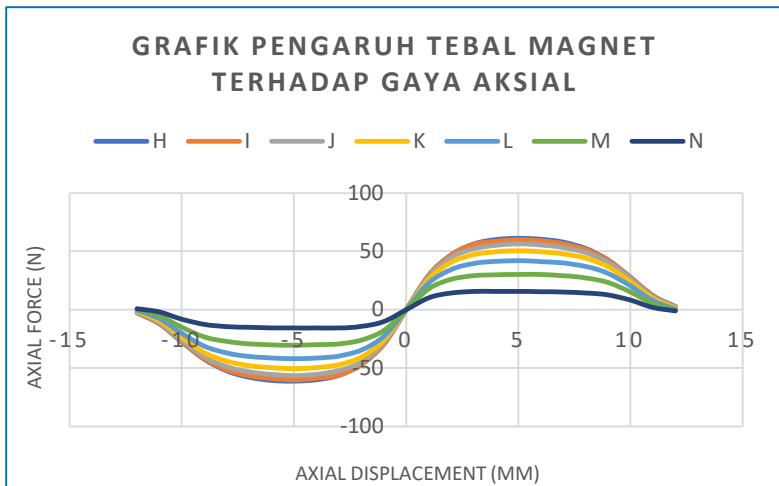
### 2.5.1 Analisis pengaruh *air gap* dan rasio ketebalan magnet terhadap gaya aksial pada *permanent magnetic bearing*

Topik yang dibahas yaitu perancangan dan simulasi *axial passive magnetic bearing* menggunakan magnet permanen. Penelitian yang dilakukan oleh Diah Utari pada tahun 2019 ini bertujuan untuk menjelaskan pengaruh dari parameter dalam perancangan *axial magnetic bearing* yaitu *air gap* dan ketebalan magnet terhadap gaya aksial yang dihasilkan pada *magnetic bearing*. Penelitian ini dilakukan dengan perhitungan menggunakan metode FEM. Dimensi dan konfigurasi rancangan awal pada penelitian ini adalah radius dalam *inner bearing* 25 mm, radius luar *inner bearing* 12.5 mm, radius dalam *outer bearing* 17.5 mm, radius luar *outer bearing* 35 mm dan tebal 10 mm. Material magnet yang digunakan yaitu *rare earth permanent magnet*.



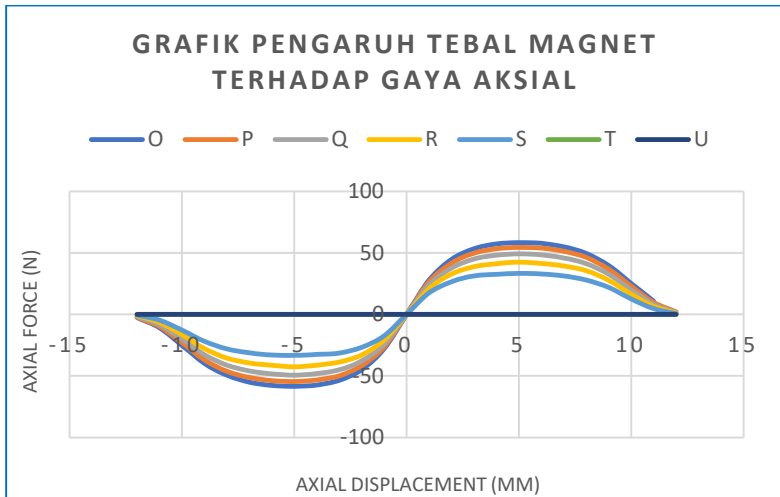
**Gambar 2.17** Grafik pengaruh *air gap* terhadap gaya aksial

Gambar 2.17 Grafik pengaruh *air gap* terhadap gaya aksial merupakan grafik perpindahan aksial terhadap gaya aksial yang dihasilkan pada tiap konfigurasi dengan variasi *air gap*. Gaya aksial terbesar dihasilkan pada konfigurasi C dengan *air gap* 0,01 yaitu sebesar 76,85 N. Dengan hasil tersebut, celah udara sebesar 0,01 mm memiliki pengaruh paling baik terhadap *flux density* karena nilai magnetisasi yang lebih besar akibat jarak yang lebih dekat dibandingkan variasi *air gap* yang lain. *Flux density* yang lebih besar dapat menghasilkan gaya aksial yang lebih besar. Namun terdapat kekurangan yang terjadi akibat dari celah udara yang kecil, yaitu *flux density* yang lebih banyak dan lebih beragam sehingga gaya aksial yang dihasilkan menjadi fluktuatif. Hal ini disebabkan permukaan yang mengalami magnetisasi lebih banyak karena jarak yang lebih dekat.



**Gambar 2.18** Grafik pengaruh perbesaran pada diameter inner magnet terhadap gaya aksial

Gambar 2.18 grafik pengaruh perbesaran diameter luar *inner* magnet terhadap gaya aksial merupakan grafik perpindahan aksial terhadap gaya aksial yang dihasilkan pada tiap konfigurasi dengan variasi ketebalan magnet. Nilai gaya aksial terbesar yang didapat pada konfigurasi H yaitu 61,265 N saat perpindahan aksialnya 5 mm, pada konfigurasi I sebesar 59,99 N saat perpindahan aksialnya 5 mm, pada konfigurasi J sebesar 56,44 saat perpindahan aksialnya 5 mm, pada konfigurasi K sebesar 50,509 N saat perpindahan aksialnya 5 mm, pada konfigurasi L sebesar 41,992 N saat perpindahan aksialnya 5 mm, pada konfigurasi M sebesar 30,342 N saat perpindahan aksialnya 5 mm, dan pada konfigurasi N sebesar 15,721 N saat perpindahan aksialnya 5 mm.



**Gambar 2.19** Grafik pengaruh perbesaran diameter outer magnet terhadap gaya aksial

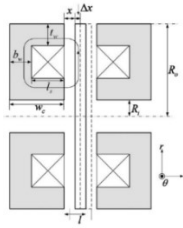
Gambar 2.19 merupakan grafik pengaruh perbesaran diameter dalam *outer* magnet terhadap gaya aksial merupakan grafik perpindahan aksial terhadap gaya aksial yang dihasilkan pada tiap konfigurasi dengan variasi ketebalan magnet. Nilai gaya aksial terbesar yang didapat pada konfigurasi O yaitu 58,323 N saat perpindahan aksialnya 5 mm, pada konfigurasi P sebesar 54,464 N saat perpindahan aksialnya 5 mm, pada konfigurasi Q sebesar 49,243 saat perpindahan aksialnya 5 mm, pada konfigurasi R sebesar 42,49 N saat perpindahan aksialnya 5 mm, pada konfigurasi S sebesar 33,311 N saat perpindahan aksialnya 5 mm

Sehingga berdasarkan hasil penelitian terlihat bahwa *air gap* dan rasio ketebalan magnet memiliki pengaruh terhadap gaya aksial yang dihasilkan *permanent magnetic bearing*. Variasi *air gap* sebesar 0,01 mm merupakan variasi celah udara yang menghasilkan gaya aksial terbesar yaitu 76,85 N. Namun terdapat kekurangan yang terjadi akibat dari celah udara yang terlalu kecil yaitu gaya aksial yang dihasilkan menjadi fluktuatif dan proses pembuatan *permanent magnetic bearing* terbilang tidak mudah sehingga perlu dilakukan banyak pertimbangan lebih lanjut. Pada variasi ketebalan magnet saat tebal *inner* lebih besar dibandingkan tebal *outer* dengan rasio ketebalan *inner* dibanding *outer* 9/7 didapatkan gaya aksial maksimal sebesar 61,625 N. (Diah Utari. 2018)

### **2.5.2 Design and Analysis of Thrust Active Magnetic Bearing**

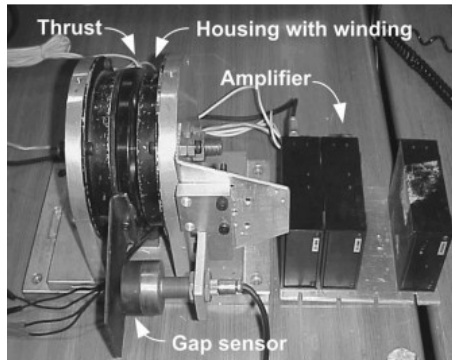
Topik yang dibahas yaitu perancangan, simulasi dan eksperimen axial active magnetic bearing. Penelitian yang dilakukan oleh Seok-Myeong Jang, Un-Ho Lee, dan Jang-Young Choipada tahun 2007 ini bertujuan untuk menjelaskan pengaruh dari parameter dalam perancangan *axial active magnetic bearing* yaitu *air gap* dan arus terhadap gaya aksial yang dihasilkan pada *magnetic bearing*. Penelitian ini dilakukan dengan merancang

*bearing* dengan *finite element analysis*, dimana setelah mendapatkan rancangan simulasi terbaik seperti gambar 2.19 dilakukan eksperimen untuk memvalidasi hasil tersebut dengan rancangan alat pada gambar 2.20.



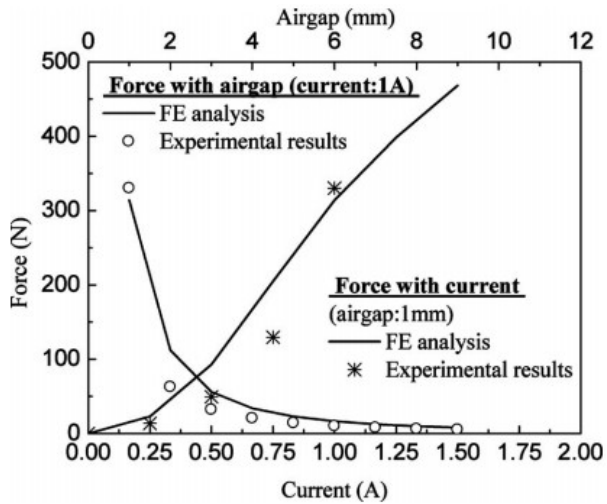
Design variable	Value
Inner radius ( $R_i$ )	34.5 mm
Outer radius ( $R_o$ )	75 mm
Core's thickness ( $t_w = b_w$ )	6 mm
Housing's width ( $w_h$ )	23 mm
Maximum magnetic force	344 N
Turns (winding packing factor: 0.4)	750 turns
Coil's diameter (bias current: 1 A)	0.5 mm

**Gambar 2.20** Parameter ukuran desain



**Gambar 2.21** Rancangan eksperimen AMB

Sehingga berdasarkan simulasi dengan variasi air gap dan arus didapatkan grafik seperti gambar 2.21. terlihat gaya aksial terdapat pada arus yang paling besar yaitu 1,5 A dan air gap yang paling kecil yaitu 1 mm



**Gambar 2.22** Hasil analisa dan eksperimen dari *active magnetic bearing*

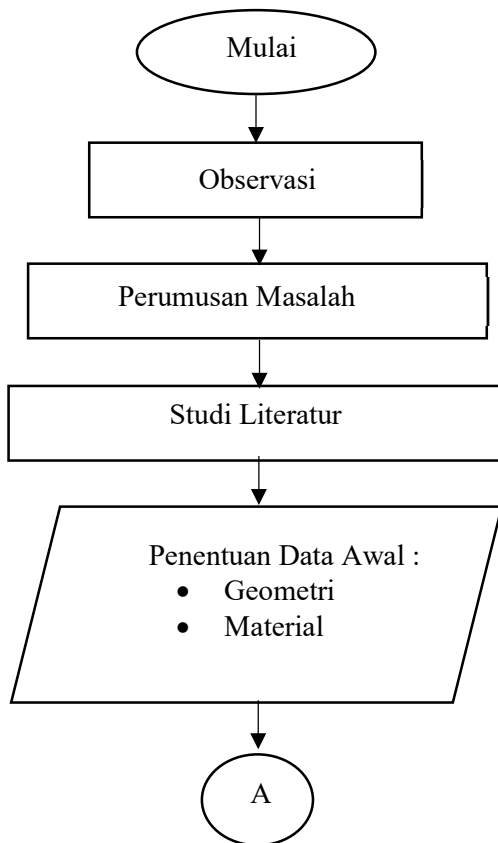
“Halaman ini sengaja dikosongkan”

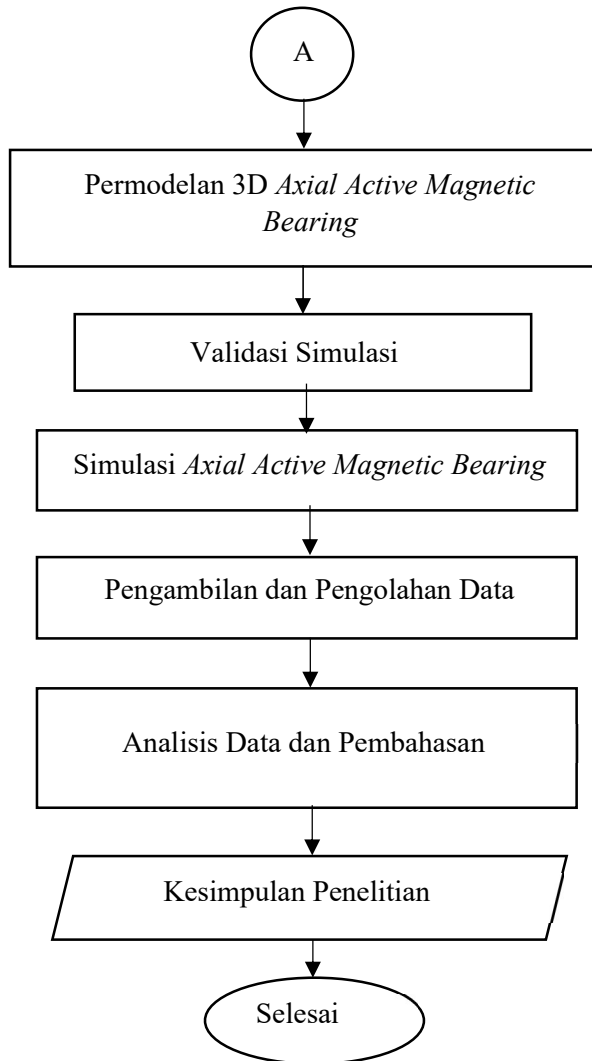


## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian mengenai *axial 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





**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**

Langkah awal yang dilakukan penulis dalam penelitian ini yaitu melakukan observasi. Tujuan dilakukan observasi adalah meninjau dengan cermat dalam penentuan ruang lingkup permasalahan yang akan dijadikan penelitian. Observasi dilakukan secara umum oleh penulis mengenai perkembangan teknologi otomotif kemudian penelitian dilanjutkan secara khusus mengenai kemajuan objek yang akan diteliti yaitu *axial active magnetic bearing*. Pelaksanaan penelitian dimulai dengan meneliti jurnal ilmiah yang sudah dipublikasikan.

### **3.1.2 Perumusan Masalah**

Studi literatur dilakukan untuk mendapatkan informasi yang lebih detail untuk menunjang penelitian yang akan dilakukan. Studi literatur dilakukan terhadap buku teks, jurnal ilmiah, dan tugas akhir terdahulu. Informasi yang diperoleh dari studi literatur terdiri atas penelitian terdahulu yang berkaitan dengan tugas akhir ini dan dasar teori terkait bearing, *axial active magnetic bearing*, magnet, dan tinjauan software simulasi

### **3.1.3 Studi Literatur**

Tahap selanjutnya yaitu studi literatur dengan tujuan untuk mendapatkan informasi secara lebih detail serta menunjang penelitian yang akan dilakukan. Studi literatur informasi berupa dasar teori *magnetic bearing*, pencarian gaya pada *magnetic bearing* maupun penelitian terdahulu yang dirangkum penulis berasal dari berbagai sumber.

### **3.1.4 Penentuan Data Awal**

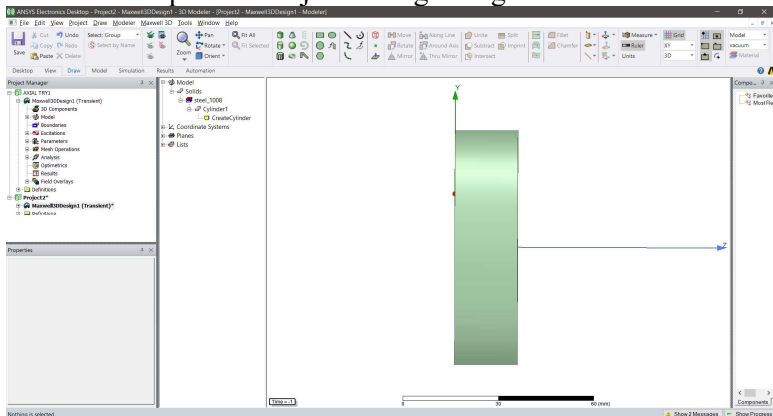
Data awal yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari spesifikasi *double row angular contact* produksi dari Toyota

Manufacturing Indonesia dengan kode DAC4075W – 2CS73. Dari spesifikasi tersebut diambil dimensi yang dijadikan acuan penelitian ini untuk membuat model magnetic bearing dengan volume yang konstan. Spesifikasi *double row angular contact* produksi dari Toyota Manufacturing Indonesia dengan kode DAC4075W – 2CS73 memiliki nilai  $d = 40$  mm,  $D = 75$  mm,  $B = 39$  mm, dan  $C = 39$  mm.

### 3.1.5 Permodelan 3D *Axial Active Magnetic Bearing*

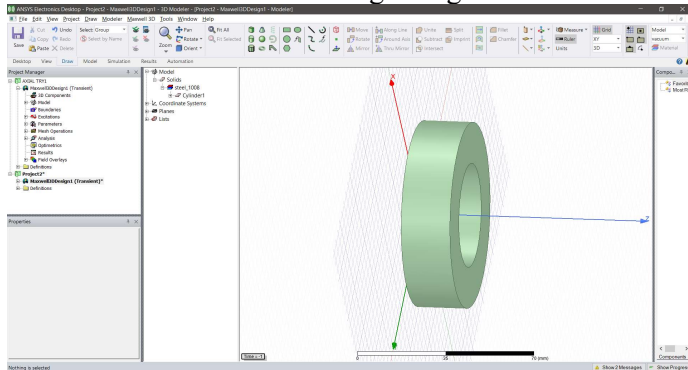
Perancangan desain 3D *bearing* menggunakan *software* ANSYS Electronics v19 R1 sehingga mempermudah dalam hal optimasi. Setelah dilakukan pemodelan 3D menggunakan *software* ANSYS Electronics v19 R1 telah selesai, selanjutnya dilakukan proses simulasi menggunakan *software* yang sama. Simulasi FEM dilakukan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

- a. Membuat sketsa *cylinder* 3D yang kemudian akan diproses menjadi setengah bagian stator



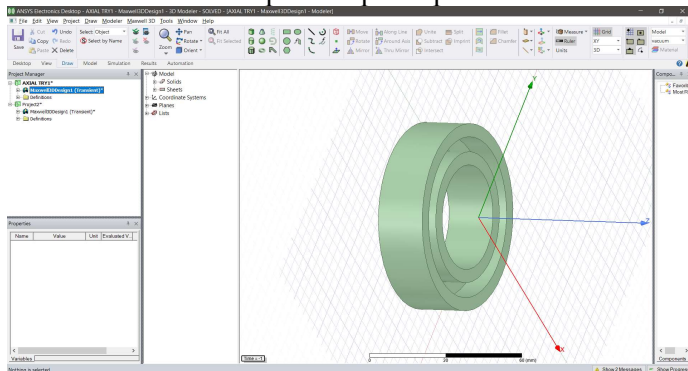
**Gambar 3.2** Bentuk Awal Pembuatan Stator

- b. Membuat sketsa cylinder 3D dengan dimensi yang lebih kecil kemudian diproses *subtract* untuk membuat bentuk setengah bagian stator



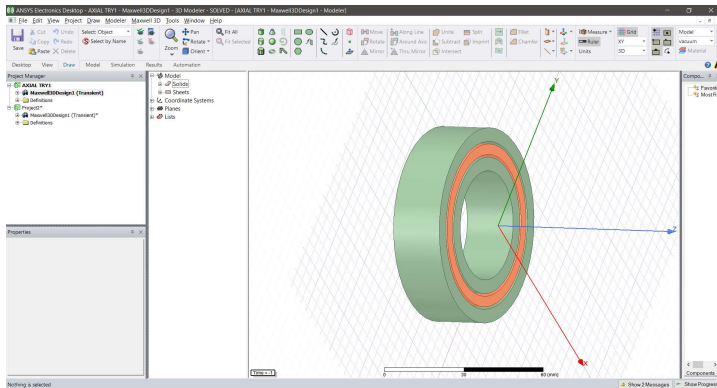
Gambar 3.3 Sketsa 3D Stator

- c. Membuat sketsa cylinder 3D dengan dimensi yang lebih kecil kemudian diproses *subtract* untuk membuat tempat kumparan pada stator



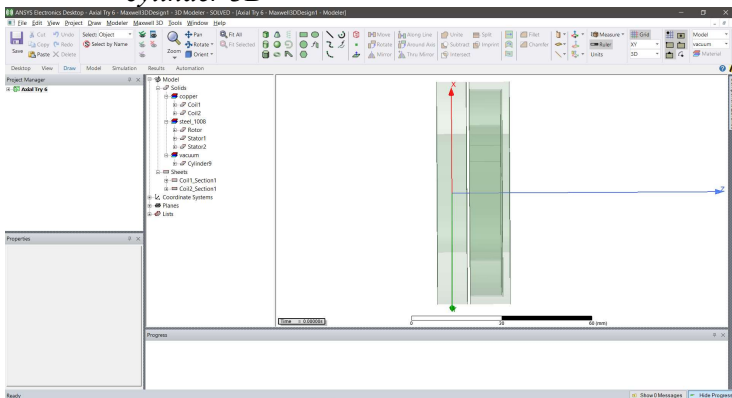
Gambar 3.4 Sketsa 3D Stator

- d. Membuat kumparan dengan menggunakan menu sketsa *circle* dan di proses *sweep* ke arah Z untuk menjadi 3D



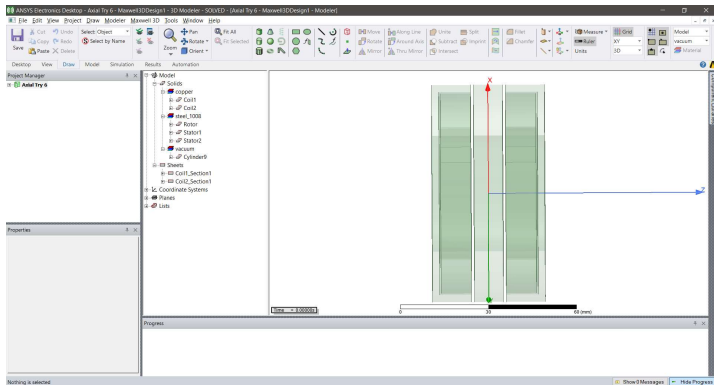
**Gambar 3.5** Sketsa 3D Kumparan

e. Membuat rotor dengan menggunakan menu sketsa *cylinder 3D*



**Gambar 3.6** Sketsa 3D Kumparan

f. Membuat seluruh bagian *axial active magnetic bearing* dengan cara menggunakan menu *thru mirror* terhadap sumbu YZ



**Gambar 3.7** Sketsa 3D Axial 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. Penelitian yang dilakukan oleh Diah Utari menggunakan *software* Ansys Electronics v18. Pada penelitian ini dengan menggunakan *software* Ansys Electronics v19. melakukan simulasi dalam proses validasi hasil tersebut. Validasi dilakukan dengan cara membandingkan nilai gaya *axial active magnetic bearing* yang diperoleh dari hasil simulasi terhadap nilai gaya *axial passive magnetic bearing* yang dihasilkan pada penelitian Diah Utari. Pelaksanaan simulasi dikatakan valid apabila perbandingan hasil yang diperoleh konvergen dengan memiliki eror di bawah atau sama dengan 1%.

### 3.1.7 Simulasi FEM (*Transient Solution*)

Setelah model 3 dimensi *axial active magnetic bearing* selesai dibuat, simulasi FEM dengan penyelesaian *transient* dilakukan.. Dari simulasi ini akan didapatkan hasil berupa berupa *magnetic flux density* (B), *static magnetic field* (H), dan *current density* (J), beserta arah vektornya. Selain itu, didapatkan juga besaran turunan seperti gaya. Penjelasan lebih lanjut mengenai

tahapan pada simulasi FEM (*transient solution*) akan dijelaskan pada sub bab 3.2.

### 3.1.8 Pengambilan dan Pengolahan Data

Penggunaan *air gap*, jumlah lilitan, dan besar arus 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.

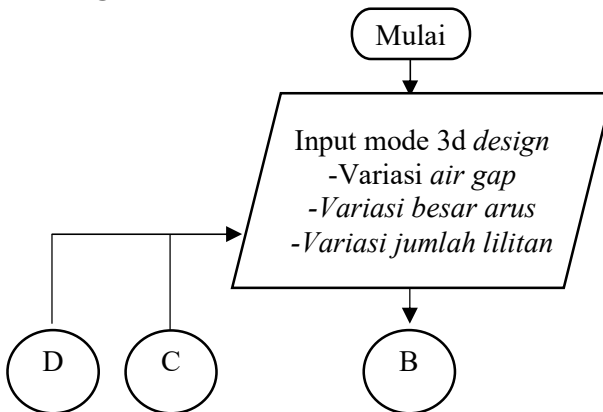
### 3.1.9 Analisa Data dan Pembahasan

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

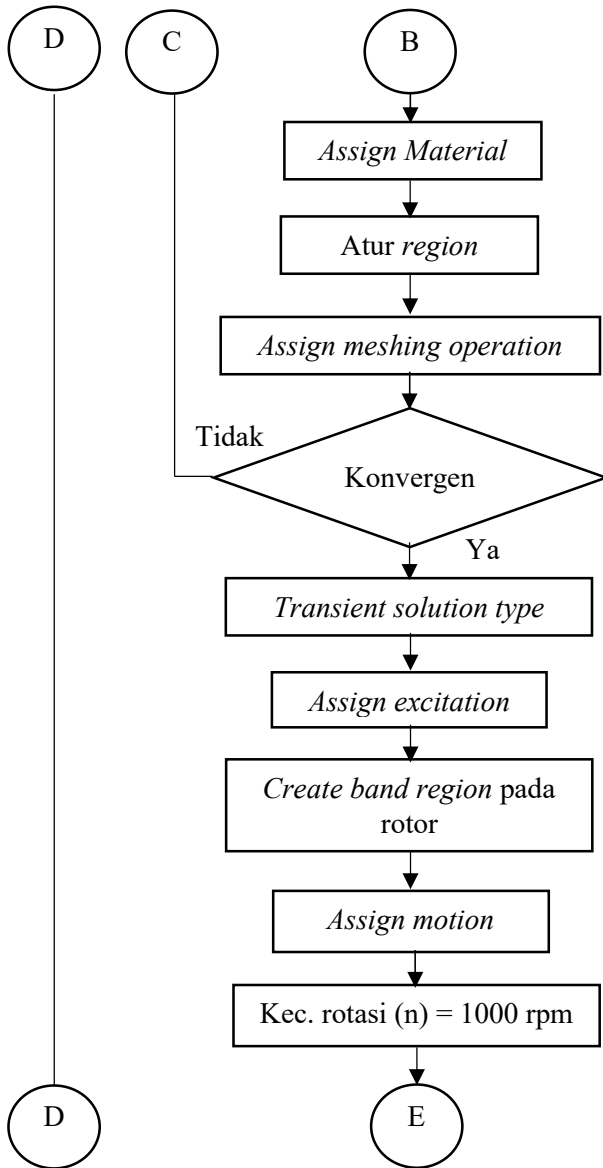
### 3.1.10 Kesimpulan Penelitian

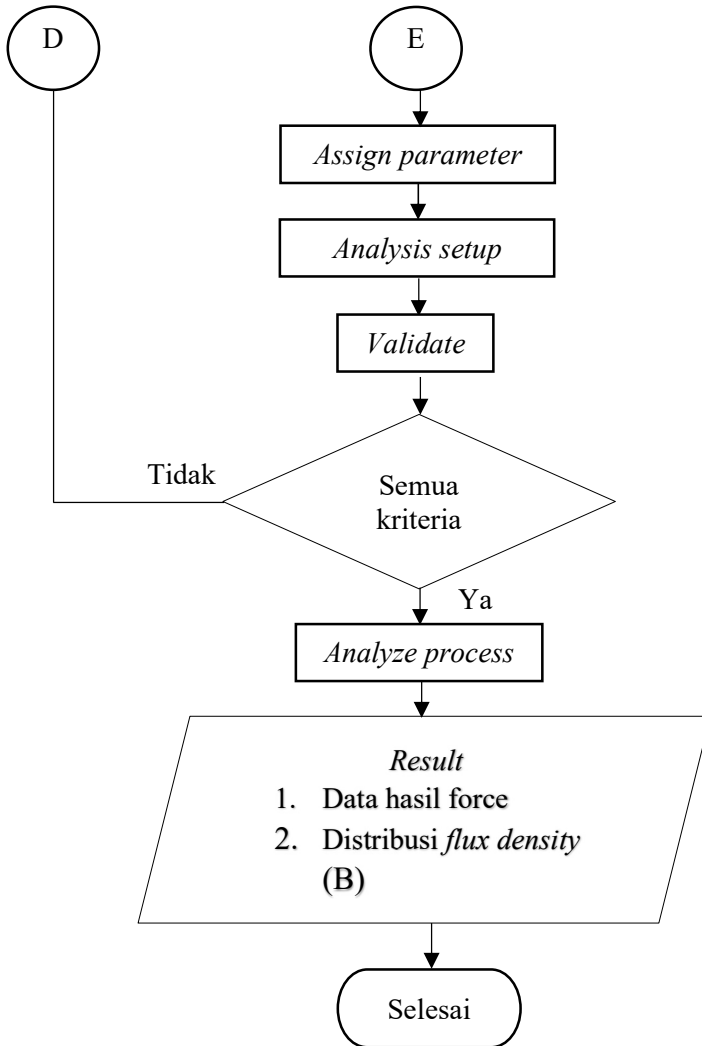
Berdasarkan data dan pembahasan yang telah dilakukan, dapat ditarik beberapa kesimpulan yang dapat menjawab tujuan dilaksanakannya penelitian ini.

## 3.2 Diagram Alir Simulasi



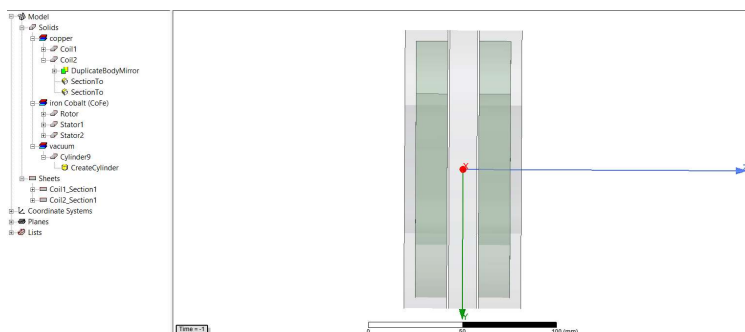






**Gambar 3.8** Diagram Alir Simulasi

### 3.2.1 *Input* Model 3 Dimensi Desain



**Gambar 3.9** Model 3D Desain Axial Active Magnetic Bearing

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 yaitu 1 pasang rotor, 1 pasang kumparan dan 1 rotor yang terdapat pada menu *Modeler* dan menginputkan variasi model sesuai pada tabel 3.1.

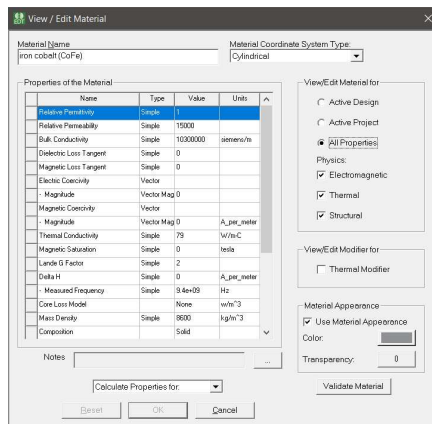
**Tabel 3.1** Variasi percobaan

Variasi yang digunakan dalam percobaan ini yaitu *air gap* dan besar arus, dan jumlah lilitan dengan pergeser rotor hingga *air gap minimum*.

Jenis Variasi	Variasi
<i>Air Gap</i>	0.1 mm
	0.5 mm
	1 mm
	1.5 mm
	2 mm
	2.5 mm

BesAr Arus	0.2 A
	0.5 A
	0.75 A
	1 A
	1.5 A
	2 A
Jumlah lilitan	3 A
	100
	150
	210
	275
	330
	366

### 3.2.2 Assign Material



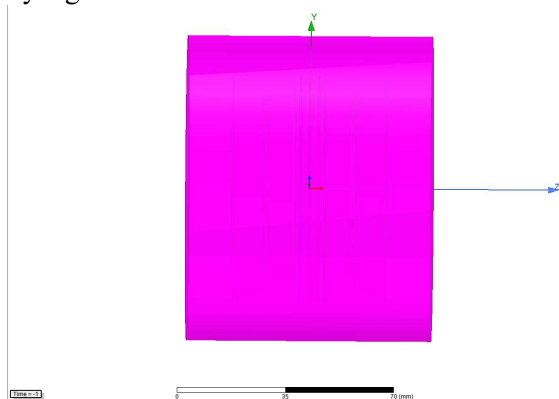
Gambar 3.10 Properties Material Stator

Setelah memodel ke dalam *project*, dilakukan proses *assign material* untuk menentukan jenis material yang digunakan.

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* dengan tipe *cylindrical*. Pada bagian kumparan dipilih material *copper*.

### 3.2.3 Assign Region

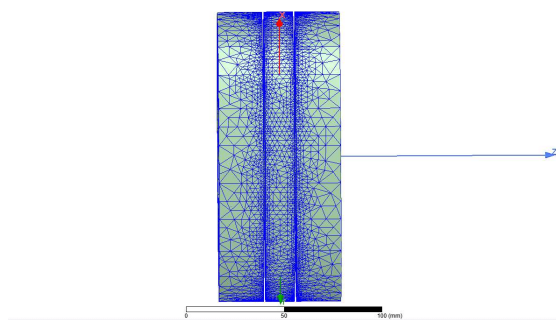
*Assign Region* adalah daerah di sekitar *axial active magnetic bearing* yang dianggap sebagai ruang permeabilitas. Pembuatan *region* dilakukan dengan membuat model 3D berbentuk *cylinder* dan diatur sebagai daerah berisikan udara seperti pada gambar. Region membantu mendefinisikan batasan ruang permeabilitas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



**Gambar 3.11** Area Region yang Dipilih

### 3.2.4 Assign Mesh Operation

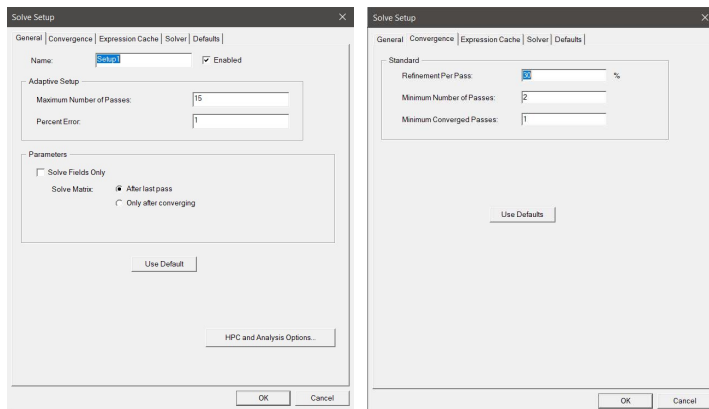
pengaturan *mesh* pada setiap model 3 dimensi. *Mesh operation* diterapkan pada rotor, stator, dan kumparan. Bentuk *meshing* volume yang digunakan dalam *software* ini adalah tipe tetrahedral. Sedangkan metode *mesh* yang digunakan yaitu *Mesh inside selection, length based*. Ukuran elemen maksimum yang digunakan yaitu untuk rotor, stator dan 2 koil adalah 5 mm.



**Gambar 3.12** Assign Mesh Operation

### 3.2.5 *Setup Analysis*

Merupakan langkah pengaturan untuk mendapatkan proses iterasi *mesh* yang mencapai konvergen. Dengan menggunakan metode *adaptive passes* pada *software* sebanyak 15 dengan persentase *error* sebesar 1% seperti pada Gambar 3.13.



**Gambar 3.13** Solve Setup Analysis

### 3.2.6 Iterate

Langkah terakhir adalah iterate, yakni proses perhitungan yang dilakukan *software* untuk mengetahui apakah panjang mesh yang ditentukan telah mencapai kriteria konvergen. Jika hasil

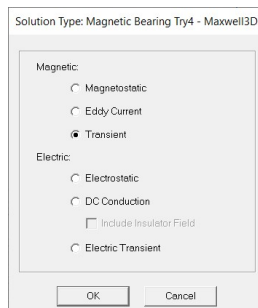
analisa tidak mencapai kriteria untuk dianggap konvergen, maka perlu dilakukan perbaikan pada meshing yang telah dibuat. Gambar 3.14 merupakan hasil meshing yang telah konvergen sebab telah memenuhi kriteria untuk konvergen.

Pass	# Tetrahedra	Total Energy (J)	Energy Error (%)	Delta Energy (%)
1	9605	6.5371e-06	34.444	N/A
2	12492	6.0132e-06	21.506	8.0149
3	16244	5.7509e-06	18.204	4.3633
4	21119	5.6189e-06	16.945	2.2936
5	27467	5.4841e-06	9.7356	2.2215
6	35713	5.3955e-06	6.9805	1.795
7	46429	5.3296e-06	5.7487	1.2212
8	60366	5.2899e-06	4.6822	0.80198
9	78496	5.2495e-06	3.7454	0.72006
10	102042	5.2168e-06	3.0779	0.60411
11	132660	5.1945e-06	2.5834	0.42672
12	172481	5.1784e-06	2.0198	0.31007
13	224207	5.1623e-06	1.546	0.29866
14	291479	5.1518e-06	1.2505	0.21511
15	379929	5.1432e-06	1.0514	0.16552
16	492614	5.1355e-06	0.83539	0.15083
17	640402	5.1281e-06	0.63375	0.14309
18	832531	5.1219e-06	0.51282	0.12057

Gambar 3. 14 Hasil analisis mesh yang telah dibuat

### 3.2.7 Menentukan *Solution Type*

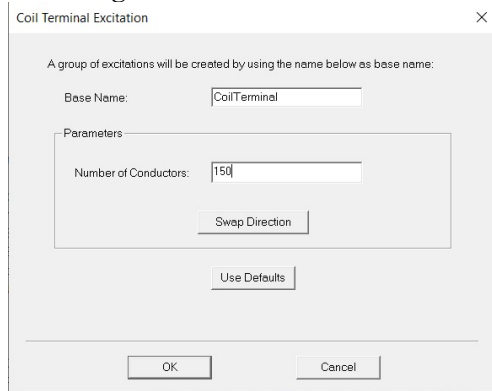
*Solution type* berfungsi untuk menentukan jenis penyelesaian simulasi yang diinginkan. Pada penelitian ini menggunakan penyelesaian *transient*, karena transient sesuai dengan pengaplikasiannya yaitu *active magnetic bearing* dengan sumber *current*.



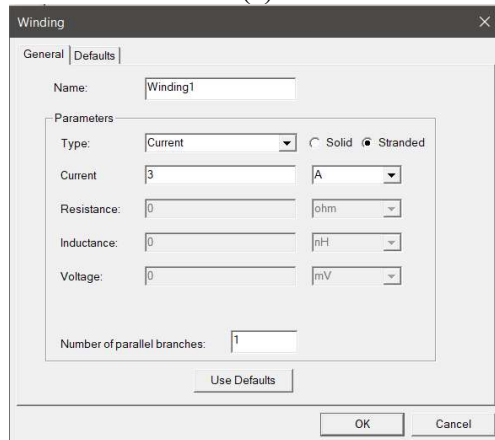
Gambar 3. 15 Solution Type Transient

### 3.2.8 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)



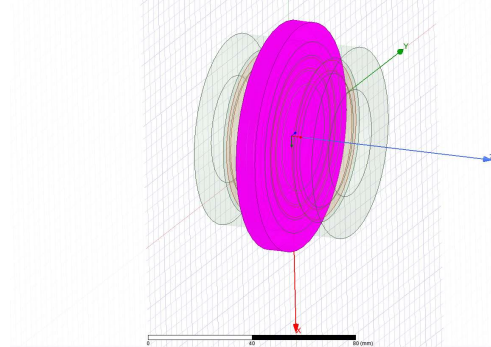
(b)

**Gambar 3. 16** (a) Eksitasi Coil Terminal. (b) Add Winding



### 3.2.9 Create Band Region

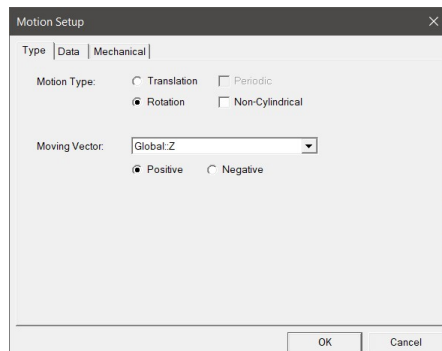
Merupakan langkah untuk membuat region berbentuk *cylinder* bervolume vakum yang menyelubungi rotor yang merupakan bagian input putaran seperti pada gambar 3.17. Region ini nantinya akan digunakan untuk setting motion.



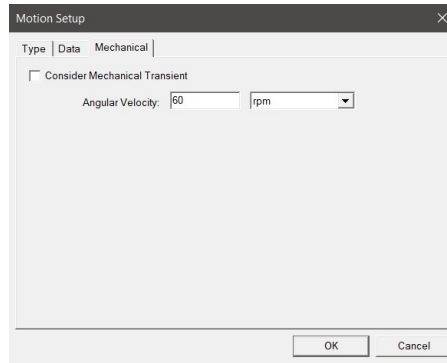
Gambar 3. 17 Hasil pembuatan region band pada rotor

### 3.10 Assign Motion

Selanjutnya menentukan *part* yang dianggap sebagai *driving part* dengan cara memberikan *motion* pada part tersebut. *Driving part* yang ditentukan adalah HS rotor yang diberi *input* putaran sebesar 1000 rpm seperti pada gambar 3.18



(a)

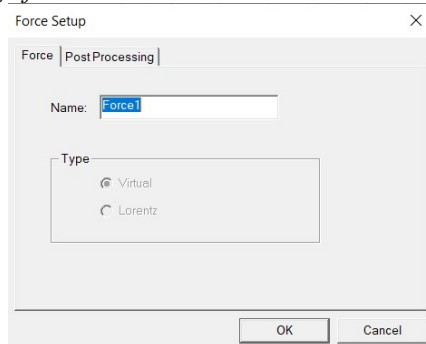


(b)

**Gambar 3. 18** Motion setup pada region band (a.) tipe motion rotasi dengan sumbu putar pada sumbu pusat region band (b.) kecepatan putar 1000 rpm untuk data pertama

### 3.2.11 Assign Parameter

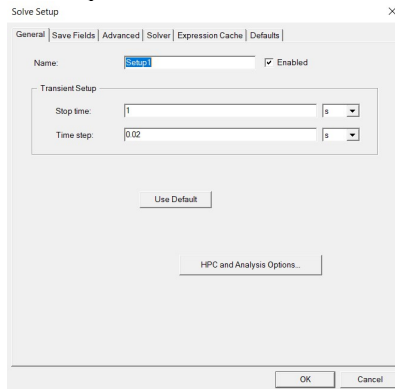
*Assign Parameter* berfungsi untuk menentukan parameter yang nantinya dihasilkan dari simulasi. Pada penelitian ini, parameter yang digunakan adalah *force*. Penentuan parameter dilakukan dengan terlebih dulu memilih objek yang akan dianalisis, yaitu coil dan stator. Kemudian buka menu parameters dan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



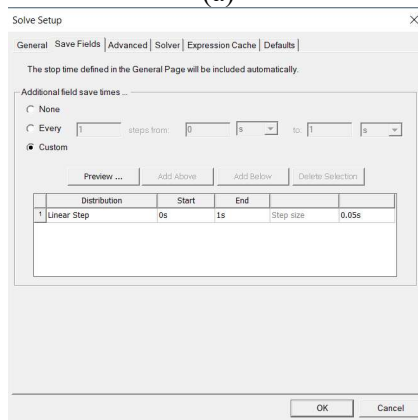
**Gambar 3. 19** Assign Force

### 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 0.02 s. Pada menu *save field* pilih *custom* dan *input linear step* dengan *start* 0s, *end* 1s, dan *step size* sebesar 0.05s



(a)

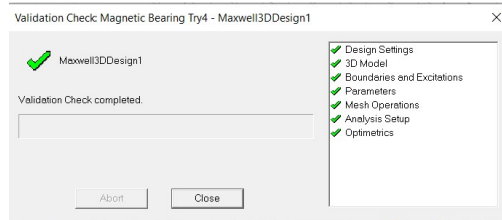


(b)

**Gambar 3. 20** (a) Solve Setup General. (b) Solve Setup Save Field

### 3.2.13 *Validation Check* dan *Analyze All*

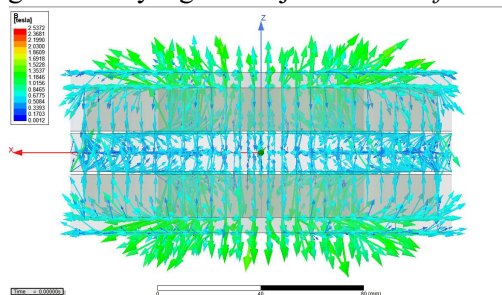
*Validation check* merupakan tahapan terakhir sebelum simulasi dijalankan. Tahapan ini berfungsi untuk memastikan bahwa seluruh kriteria yang dibutuhkan sudah terpenuhi. Apabila seluruh kriteria terpenuhi, seperti ditunjukkan pada gambar 3.21, maka simulasi dapat dimulai ke tahap analisis dengan memilih menu *analyze all*.



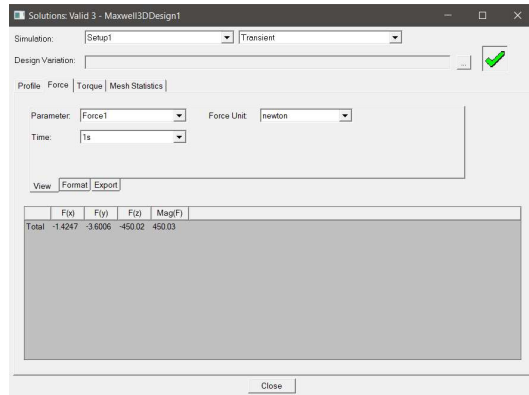
**Gambar 3. 21** Validation Check

### 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. Untuk menampilkan grafik dilakukan dengan cara memilih *create transient report* pada menu *result* kemudian pilih *rectagular plot*. Pada Gambar 3.22 (a) ditunjukkan grafik antara gaya dengan derajat putaran *bearing*. Pada Gambar 3.22 (b) terlihat anak anah yang menunjukkan vektor dari *flux density* disertai dengan warna yang menunjukkan besar *flux density*.



(a)



(b)

**Gambar 3. 22** (a) Nilai dan arah vector *flux density* (b) Gaya *axial* AMB

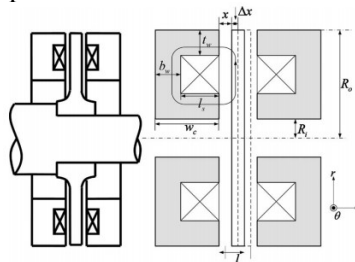
“Halaman ini sengaja dikosongkan”

## BAB IV ANALISIS DAN PEMBAHASAN

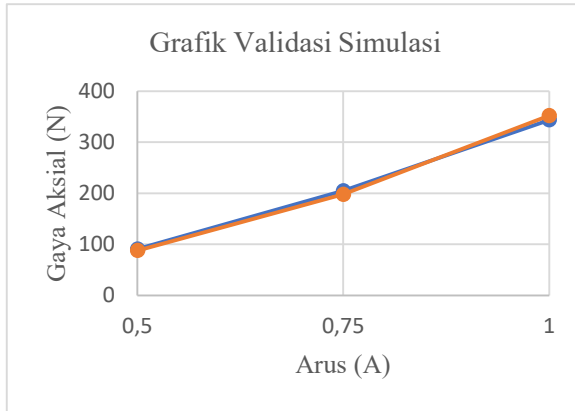
Penelitian ini menggunakan metode elemen hingga untuk mendapatkan nilai *flux density* dan gaya aksial pada *active magnetic bearing*. Simulasi dilakukan dengan tahap *magnetostatic* untuk mencari konvergensi, dan tahap *transient* untuk mendapatkan data gaya aksial dan nilai *flux density*. Simulasi dilakukan berdasarkan variasi *air gap* 0,1 mm hingga 2,5 mm, jumlah arus 0,2 A hingga 3 A, dan lilitan 100 hingga 366 lilitan. Hasil simulasi digunakan untuk mempelajari pengaruh *air gap*, jumlah arus, dan jumlah lilitan terhadap karakteristik gaya aksial *active magnetic bearing* dengan membandingkan hasil simulasi dari tiap variasi sehingga diketahui gabungan variasi yang memiliki performa paling optimal dari desain yang telah dibuat.

### 4.1 Validasi Simulasi

Berdasarkan penelitian yang dilakukan Seok-Myeong Jang, Un-Ho Lee, dan Jang-Young pada tahun 2007 menggunakan analisis perhitungan menggunakan *finite element analysis* selanjutnya dilakukan validasi dengan menggunakan software Ansys Electronics Maxwell pada dimensi yang sama dan menggunakan material *iron cobalt* untuk stator dan rotor, dan *copper* untuk kumparan.



**Gambar 4.1** Kontruksi *Active Magnetic Bearing* Seok – Myeong Jang



**Tabel 4. 1** Dimensi dan properties desain validasi

<i>Design Variable</i>	<i>Value</i>
Inner radius ( $R_i$ )	34.5 mm
Outer radius ( $R_o$ )	75 mm
Tebal Stator ( $w_c$ )	23 mm
Tebal Coil ( $t_w=b_w$ )	6 mm
Jumlah lilitan	750
Coil diameter	0.5 mm

**Tabel 4. 2** Hasil Validasi

Arus (mm)	Gaya Aksial (N)		Error (%)
	Seok – Myeong J	Validasi	
1	344	355,91	3,346
0,75	205	198,63	3,107
0,5	90,5	86,374	4,559

**Gambar 4.2** Hasil simulasi pada Ansys Electronics 19R1

Dapat dilihat pada Gambar 4.2 Hasil Validasi didapatkan hasil simulasi berupa gaya aksial sebesar 352,42 N saat arus 1 A, 198,23 N saat *air gap* 0,75 A, dan 88,104 N saat *air gap* 0.5 A. Jika dibandingkan dengan nilai gaya aksial yang didapatkan pada



penelitian Seok – Myeong Jang, terdapat *error* sebesar 2,389 % pada penelitian dengan arus 1 A, *error* sebesar 3.302 % pada penelitian dengan arus 0,5 A, dan *error* sebesar 3,182 % pada penelitian dengan arus 1 A Dengan demikian, proses validasi simulasi dapat dikatakan valid untuk selanjutnya dapat digunakan untuk proses simulasi penelitian ini.

## **4.2 Analisis Gaya Aksial Hasil Simulasi Transient**

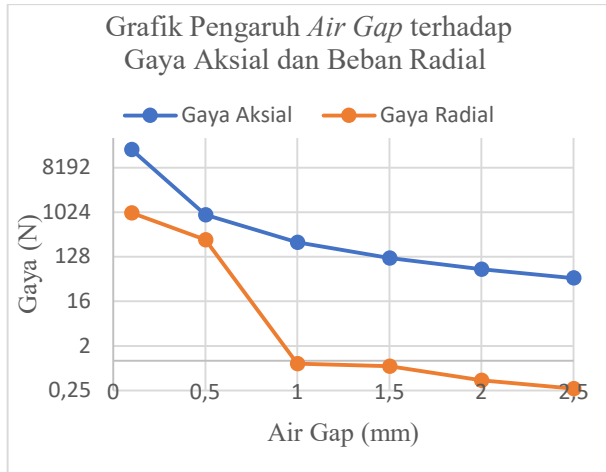
Simulasi *transient* dilakukan untuk mendapatkan gaya aksial dengan beberapa macam variasi yang digunakan. Yaitu *air gap*, jumlah arus dan jumlah lilitan kumparan. Desain *Axial Magnetic Bearing* menggunakan dimensi yang konstan menyesuaikan dimensi *mechanical bearing* tipe *double row angular contact ball bearing* dengan diameter terluar sebesar 75 mm, diameter terdalam sebesar 40 mm, dan lebar *bearing* sebesar 39 mm. Dari proses simulasi ini, dapat diketahui nilai maksimal dari gaya aksial, nilai dan arah *flux density* yang dapat dihasilkan dari setiap variasi *axial active magnetic bearing*.

### **4.2.1 Analisis Pengaruh Air Gap Terhadap Gaya Aksial**

Pada analisis ini dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi dengan variasi *air gap* yaitu yang pertama dengan meninjau 1 pole untuk menentukan *air gap* minimum yang dapat digunakan, dan yang kedua dengan meninjau 2 pole untuk mengetahui pengaruh lebar rotor yang digunakan.

#### **4.2.1.1 Analisis Pengaruh Gaya Aksial dengan Meninjau 1 pole**

Pada analisis ini dilakukan untuk menentukan *air gap* minimal yang dapat digunakan dengan membandingkan hasil simulasi pengaruh variasi *air gap* dengan *air gap* 0,1 mm hingga 2,5 mm dengan memperbesar lebar rotor dari 7 mm hingga 11,8 mm meninjau gaya aksial dari 1 pole stator *axial active magnetic bearing* dengan menggunakan jumlah lilitan 360 dan arus 3 A. Berikut adalah grafik pengaruh *air gap* terhadap gaya aksial

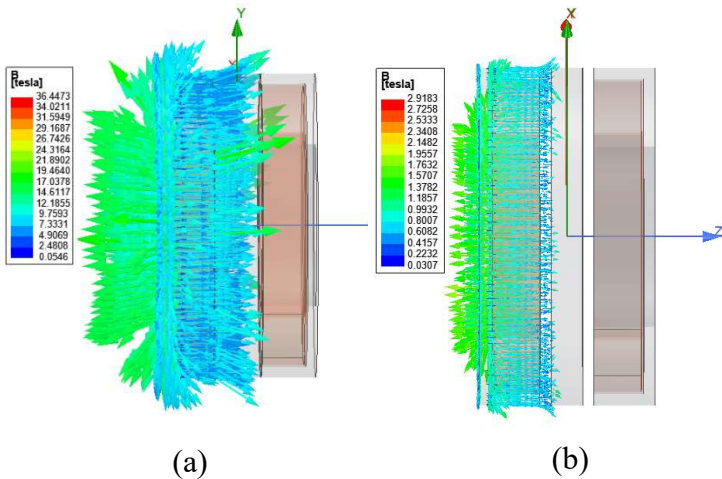


**Gambar 4.3** Grafik Pengaruh *Air Gap* terhadap Gaya Aksial dan Beban Radial

Gambar 4.3 merupakan grafik gaya aksial yang dihasilkan dengan variasi *air gap*. Mempunyai *trendline* menurun seiring besarnya *air gap*. Nilai gaya aksial terbesar terjadi pada *air gap* 0,1 mm dengan nilai gaya aksial 19085 N dan nilai gaya aksial terkecil terjadi pada *air gap* 2,5 mm dengan nilai gaya aksial 47,556 N. Sehingga dapat disimpulkan bahwa semakin kecil *air gap* maka nilai gaya aksial yang dihasilkan semakin besar.

Dari Gambar 4.3 dapat dilihat beban gaya radial yang dihasilkan *bearing* aksial ini dimana semakin kecil air gap akan menimbulkan beban gaya kearah radial semakin besar. Beban radial adalah hal yang tidak diinginkan karena menyebabkan *shaft* tidak bergerak secara linier, membuat *shaft bending* dan menambah beban pada *bearing radial*. Pada *air gap* 1 mm hingga 2,5 mm memberikan beban radial dibawah 1 N yang dianggap sangat kecil sehingga tidak mempengaruhi gerak *shaft*. Namun untuk *air gap* 0,5 N dan 0,1 N memberikan beban radial yang sangat besar yaitu 282,325 N dengan *air gap* 0,5 N dan 1000,058 N dengan *air gap* 0,1 mm sehingga mempengaruhi arah gerak dari *shaft*. Hal tersebut terjadi saat *air gap* terlalu kecil yang

menyebabkan *flux density* ke arah radial sehingga menghasilkan gaya beban ke arah radial. Maka *air gap* minimum yang dapat digunakan agar tidak memberikan beban radial pada desain *axial active magnetic bearing* ini adalah 1 mm dengan menghasilkan gaya aksial maksimum 249,51 N. Berikut adalah ilustrasi *vector flux density* dari *air gap* 0,1 mm dan 2,5 mm

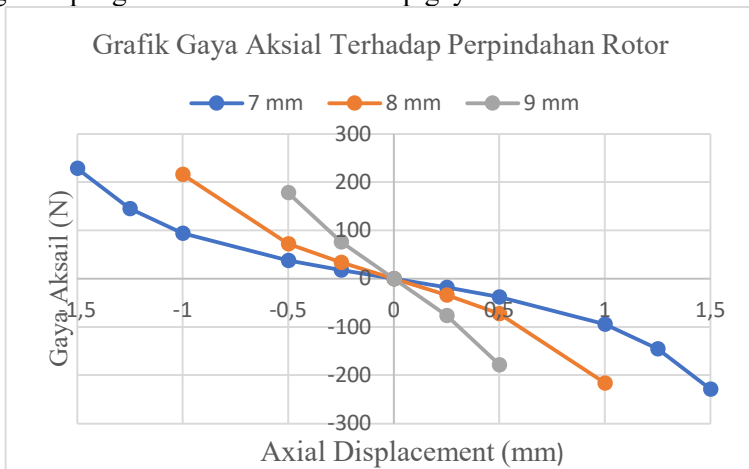


**Gambar 4.4** Hasil Simulasi Vector Flux Density (a) Pada Air Gap 0,1 mm (b) Pada Air Gap 2,5 mm

Gambar 4.4 merupakan hasil simulasi *vector flux density* (a) pada *air gap* 0,1 mm (b) pada *air gap* 2,5 mm. Dapat dilihat perbedaannya pada *vector flux density* pada *air gap* 0,1 mm mempunyai distribusi *vector flux density* ke arah radial yang tidak merata yang mempunyai nilai 0,0546 – 14,617 T yang menyebabkan timbul beban ke arah radial. Sedangkan pada *vector flux* pada *air gap* 2,5 mm mempunyai distribusi *flux density* ke arah radial yang merata dengan nilai 0,0292 – 0,9922 T sehingga tidak menimbulkan beban ke arah radial. Selain itu dapat disimpulkan berdasarkan simulasi semakin kecil *air gap* nilai *flux density* semakin besar

#### 4.2.1.2 Analisis Gaya Aksial dengan Meninjau 2 pole

Pada analisis ini dilakukan dengan meninjau resultan gaya aksial 2 pole dengan perpindahan aksial dari rotor dengan minimum *air gap* 1 mm antara rotor dan stator. Dengan variasi lebar rotor 7 mm yang mempunyai *axial clearance* 2,5 mm, lebar rotor 8 mm yang mempunyai *axial clearance* 2 mm, dan lebar rotor 9 mm yang mempunyai *axial clearance* 1,5 mm. Dengan menggunakan jumlah lilitan 360 dan arus 3 A. Berikut adalah grafik pengaruh lebar rotor terhadap gaya aksial.

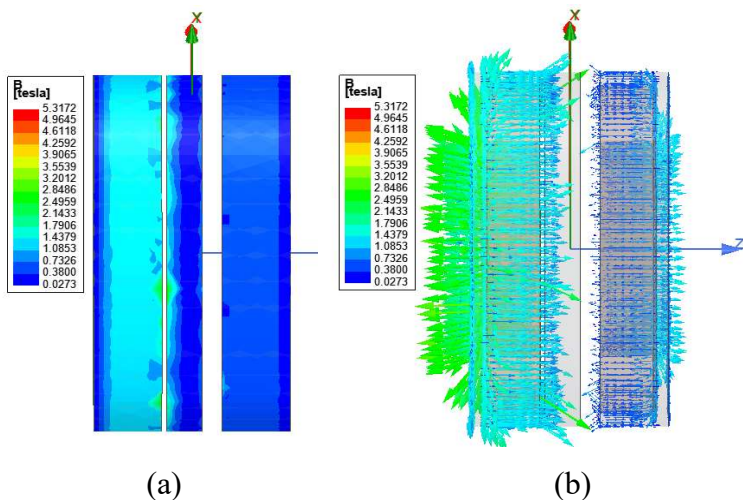


**Gambar 4.5** Grafik Gaya Aksial terhadap Perpindahan Rotor

Gambar 4.5 merupakan grafik perpindahan aksial dari rotor terhadap gaya aksial yang dihasilkan. Nilai gaya aksial dari tebal rotor 7 mm, 8 mm dan 9 mm dengan perpindahan rotor 0 mm adalah 0 N, karena gaya yang dihasilkan dari stator kanan dan kiri seimbang. Nilai gaya aksial terbesar pada tebal rotor 7 mm yaitu 228,33 N dengan perpindahan aksial 1,5 mm, pada tebal rotor 8 mm yaitu 216,11 N dengan perpindahan aksial 1 mm, pada tebal rotor 9 mm yaitu 178,23 N dengan perpindahan aksial 0,5 mm. Berdasarkan data yang didapatkan semakin kecil lebar rotor semakin jauh rotor dapat bergeser dan gaya aksial yang dihasilkan semakin besar. Hal tersebut terjadi karena fluks density yang

dihasilkan dari stator kiri dan kanan berbeda karena pergeseran rotor yang menyebabkan *air gap* dari stator kiri dan kanan berbeda.

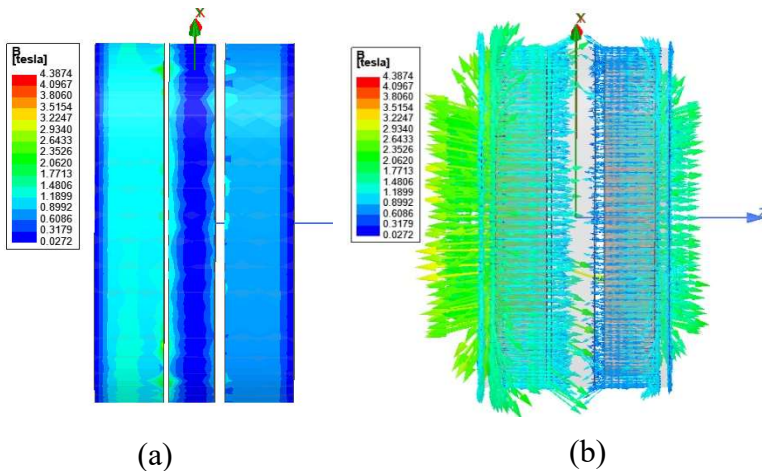
Pada rotor 7 mm memiliki nilai gaya aksial lebih besar dari bandingkan rotor 8 mm dan 9 mm saat mengalami pergeseran ke kiri karena gaya aksial yang dihasilkan oleh stator kanan dari rotor 7 mm paling kecil di bandingkan rotor 8 mm dan 9 mm. Karena rotor saat diberikan beban ke kiri maka gaya tolak yang dihasilkan stator kiri akan berkurang karena beban gaya tolak yang dihasilkan stator kanan. Untuk mengatasi hal tersebut diperlukan kontrol agar saat stator kiri bekerja maka sistem akan mematikan stator kanan agar tidak memberikan beban tambahan untuk stator kiri. Berikut adalah hasil ilustrasi flux density dari rotor 7 mm.



**Gambar 4.6** Hasil Simulasi pada Rotor 7 mm dengan perpindahan 1,5 mm (a) Distribusi Flux Density (b) Arah Flux Density

Gambar 4.6 merupakan hasil simulasi *axial active magnetic bearing* dengan menggunakan lebar rotor 7 mm dengan perpindahan aksial 1,5 mm. Gambar 4.6 (a) adalah ilustrasi besar dari *flux density*. Terlihat bahwa mayoritas warna distribusi *flux*

*density* dari stator kiri adalah biru muda memiliki nilai 1,0853 – 1,7906 Tesla dan stator kanan berwarna biru tua memiliki nilai 0,0273 – 0,7326 Tesla. Hal ini diperkuat dengan gambar 4.6 (b) yaitu mayoritas anak panah dari stator kiri berwarna biru muda. Selain itu, terdapat anak panah berwarna biru tua yang mempunyai nilai 0,0273 – 0,7326 Tesla dan hijau muda yang mempunyai nilai 2,1433 – 3,5539 Tesla dan stator kanan mempunyai mayoritas anak panah berwarna biru tua. Selain itu, terdapat anak panah berwarna biru muda yang mempunyai nilai 0,0273 – 0,7326 Tesla. Nilai *flux density* dari stator kiri dan stator kanan memiliki selisih jauh sehingga gaya aksial yang dihasilkan stator kiri berkurang sedikit akibat ada beban tambahan dari gaya aksial stator kanan yang mempunyai arah gaya yang berlawanan. Selanjutnya perbandingan *flux density* yang dihasilkan dari rotor 9 mm.



**Gambar 4.7** Hasil Simulasi pada Rotor 9 mm dengan perpindahan 0,5 mm (a) Distribusi *Flux Density* (b) Arah *Flux Density*

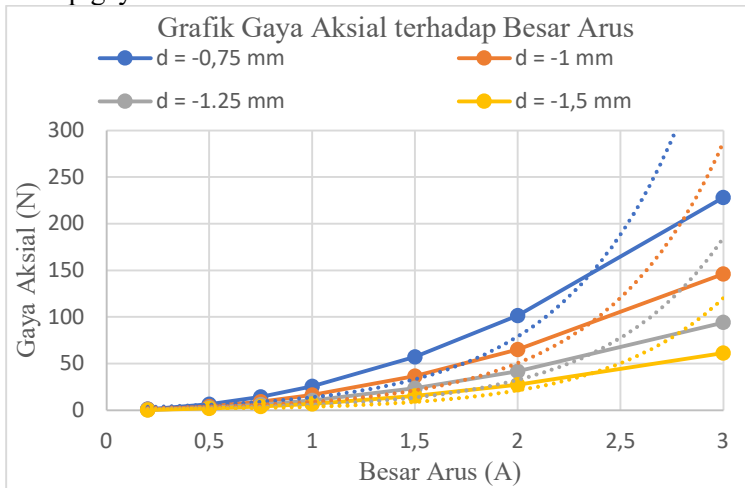
Gambar 4.7 merupakan hasil simulasi *axial active magnetic bearing* dengan menggunakan lebar rotor 9 mm dengan perpindahan aksial 0,5 mm. Gambar 4.7 (a) adalah ilustrasi besar dari *flux density*. Terlihat bahwa mayoritas warna distribusi *flux density* dari stator kiri adalah biru muda memiliki nilai 0.8992 – 1,4806 Tesla dan stator kanan berwarna biru langit memiliki nilai 0,0273 – 0,8992 Tesla. Hal ini diperkuat dengan gambar 4.7 (b) yaitu mayoritas anak panah dari stator kiri berwarna biru muda. Selain itu, terdapat anak panah berwarna biru tua yang mempunyai nilai 0,273 – 0,6086 Tesla dan hijau muda yang mempunyai nilai 1,7813 – 2,934 Tesla dan stator kanan mempunyai mayoritas anak panah berwarna biru langit. Selain itu, terdapat anak panah berwarna biru muda yang mempunyai nilai 0.8992 – 1,4806 Tesla. Nilai *flux density* dari stator kiri dan stator kanan memiliki selisih sedikit sehingga gaya aksial yang dihasilkan stator kiri berkurang cukup besar akibat ada beban tambahan dari gaya aksial stator kanan yang mempunyai arah gaya berlawanan.

Dari Gambar 4.6 dan 4.7 dapat dibandingkan bahwa lebar rotor 7 mm menghasilkan gaya aksial maksimal lebih besar dibandingkan lebar rotor 9 mm karena pengaruh selisih *air gap* dari stator kanan dan stator kiri dari rotor 7mm lebih besar dibandingkan rotor 9 mm yang menyebabkan nilai *flux density* dan gaya aksial yang dihasilkan lebih besar. Besar dan arah *flux density* dipengaruhi oleh jarak *air gap*. Dimana stator bagian kiri atau yang paling dekat dengan stator mempunyai distribusi *flux density* warna biru muda atau memiliki nilai *flux density* lebih besar dibandingkan stator kanan yang jauh dari rotor dan mempunyai distribusi *flux density* berwarna biru tua.

#### 4.2.2 Analisis Pengaruh Besar Arus Terhadap Gaya Aksial

Pada analisis ini dilakukan perbandingan hasil simulasi pengaruh variasi jumlah arus dengan besar arus 0,2 A hingga 3 A dengan meninjau gaya aksial yang dihasilkan *axial active magnetic bearing*. Nilai gaya aksial ditinjau dengan variasi besar arus pada setiap kondisi perpindahan aksial yang berbeda dari rotor 7 mm

dan jumlah lilitan 360. Berikut adalah grafik pengaruh besar arus terhadap gaya aksial.



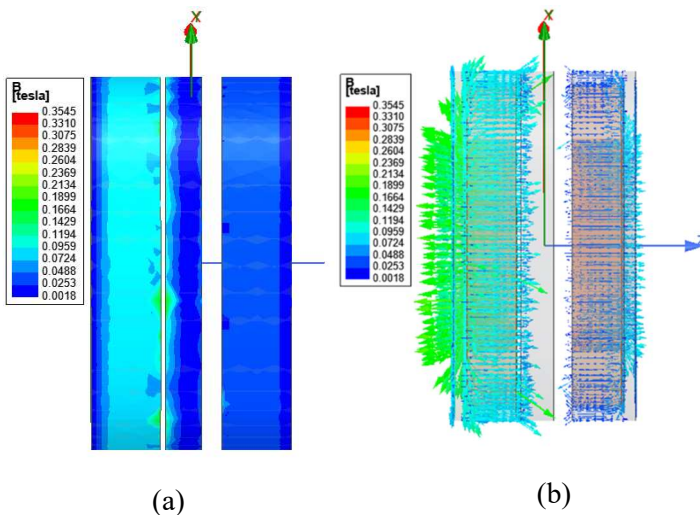
**Gambar 4.8** Grafik Pengaruh Jumlah Arus terhadap Gaya Aksial

Pada gambar 4.8 merupakan grafik hasil simulasi pengaruh besar arus terhadap gaya aksial dengan variasi besar arus 0,2 A, 0,5 A, 0,75 A, 1 A, 1,5 A, 2 A, 2,5 A, 3 A. Gaya Aksial terbesar dihasilkan pada arus 3 A. Dimana pada rotor bergeser 1,5 mm kekiri menghasilkan gaya aksial 228,33 N, pada perpindahan rotor 1,25 mm kekiri menghasilkan gaya aksial 146,16 N, pada perpindahan rotor 1 mm kekiri menghasilkan gaya aksial 94,088 N pada perpindahan rotor 0,75 mm kekiri menghasilkan gaya aksial 61,25 N. Berdasarkan data yang diperoleh mempunyai *trendline* yang sama. Sehingga dapat disimpulkan bahwa gaya aksial yang dihasilkan semakin besar seiring dengan bertambahnya besar arus yang digunakan.

Berdasarkan grafik gambar 4.8 mempunyai bentuk non linear dan *trendline* kemiringan yang berbeda pada tiap perpindahan rotor. Pada perpindahan rotor 1 mm ke kiri mempunyai kemiringan yang paling curam karena memiliki



sensitifitas penambahan gaya aksial terhadap penambahan besar arus akibat *air gap* semakin kecil dan memiliki nilai magnetisasi yang lebih besar. Hal tersebut terjadi karena flux density yang dihasilkan semakin besar seiring penambahan besar arus. Dimana penambahan nilai dari gaya aksial sesuai pada rumus dasar hubungan arus dengan gaya aksial adalah kuadrat. Namun besar arus yang digunakan terbatas tergantung dengan ukuran diameter kumparan dan jenis kumparan yang digunakan. Untuk desain pada *active magnetic bearing* ini menggunakan diameter kumparan 0,7 mm dan *current density* 8 A/mm, sehingga arus yang bisa dialirkan maksimal 3 A agar kumparan tidak putus. Berikut adalah hasil ilustrasi *flux density* dari *active magnetic bearing* dengan besar arus 0,2 A.



**Gambar 4.9** Hasil Simulasi Pada Besar Arus 0,2 A (a) Distribusi *Flux Density* (b) Arah *Flux Density*

Dari gambar 4.9 merupakan hasil simulasi *axial active magnetic bearing* dengan menggunakan rotor 7 mm yang bergeser 1,5 mm ke kiri dan menggunakan besar arus 0,2 A.

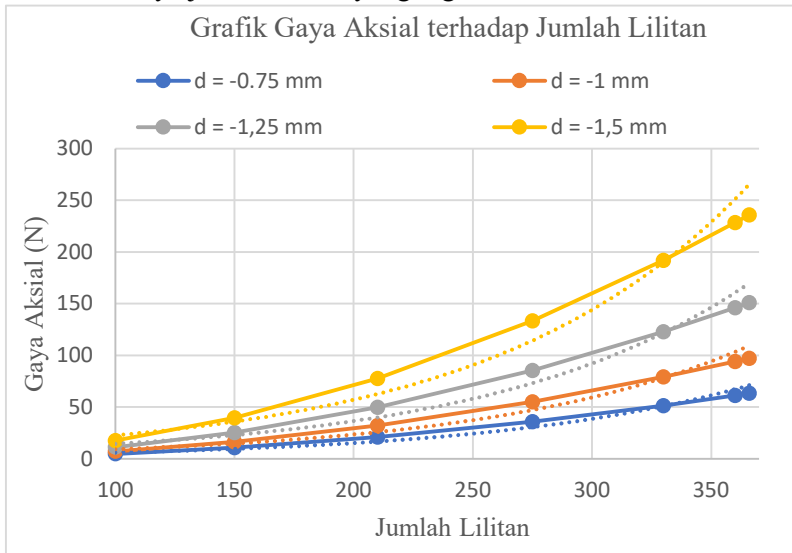
Gambar 4.9 (a) adalah ilustrasi besar dari *flux density*. Dengan meninjau stator kiri terlihat mayoritas warna distribusi *flux density* pada bagian yang paling dekat dengan stator adalah biru muda memiliki nilai 0,0724 – 0,1194 Tesla. Hal ini diperkuat dengan gambar 4.9 (b) yaitu mayoritas anak panah dari stator kiri berwarna biru muda. Selain itu, terdapat anak panah berwarna biru tua yang mempunyai nilai 0,0018 – 0,0488 Tesla dan berwarna hijau muda yang mempunyai nilai 0,5446 – 0,8147 Tesla. Hal tersebut dibandingkan dengan gambar 4.6 yang merupakan hasil simulasi *axial active magnetic bearing* dengan menggunakan rotor 7 mm yang bergeser 1,5 mm ke kiri dengan menggunakan besar arus 3 A. Gambar 4.9 (a) dan 4.9 (b) memiliki distribusi *flux density* yang sama. Namun mempunyai nilai yang berbeda. Dimana distribusi *flux density* warna biru tua mempunyai nilai 0,0273 – 0,7326 Tesla, warna biru muda mempunyai nilai 1,0853 – 1,7906 Tesla, dan warna hijau muda mempunyai nilai 2,1433 – 3,5539 Tesla. Dari hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa nilai *flux density* dari besar arus 3 A lebih besar dibandingkan besar 0,2 A. Sehingga gaya aksial yang dihasilkan semakin besar.

### 4.2.3 Analisis Pengaruh Jumlah Lilitan Terhadap Gaya Aksial

Pada analisis ini dilakukan perbandingan hasil simulasi pengaruh variasi jumlah lilitan dengan jumlah lilitan 100 hingga 360 dengan dengan meninjau gaya aksial yang dihasilkan *axial active magnetic bearing*. Nilai gaya aksial ditinjau dengan variasi jumlah lilitan pada setiap kondisi perpindahan aksial yang berbeda dari rotor 7 mm dan besar arus 3 A. Berikut adalah grafik pengaruh jumlah lilitan terhadap gaya aksial.

Pada gambar 4.10 merupakan grafik hasil simulasi pengaruh jumlah lilitan terhadap gaya aksial dengan variasi jumlah lilitan 100, 150, 210, 275, 330, 360, dan 366. Gaya Aksial terbesar dihasilkan pada jumlah lilitan 366. Dimana pada rotor bergeser 1,5 mm kekiri menghasilkan gaya aksial 236 N, pada perpindahan rotor 1,25 mm kekiri menghasilkan menghasilkan

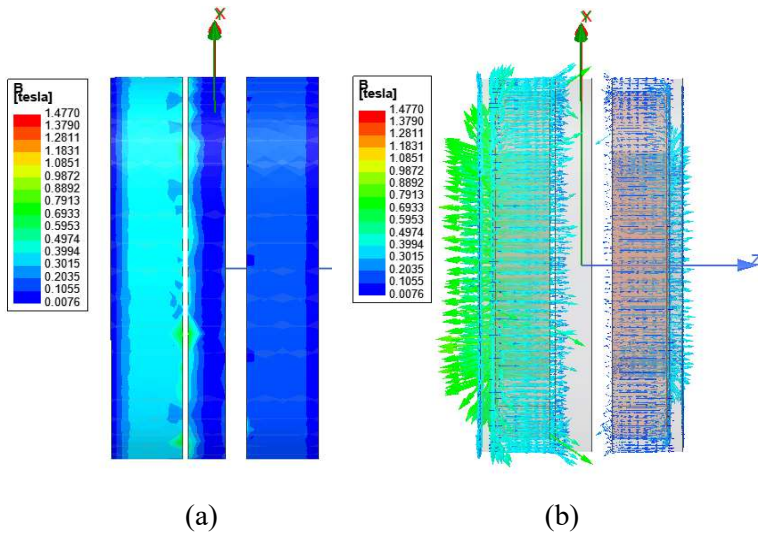
gaya aksial 151,07 N, pada perpindahan rotor 1 mm ke kiri menghasilkan gaya aksial 97,251 N pada perpindahan rotor 0,75 mm ke kiri menghasilkan gaya aksial 63,308 N. Berdasarkan data yang diperoleh mempunyai *trendline* sama semakin naik, dapat disimpulkan bahwa gaya aksial yang dihasilkan semakin besar seiring dengan bertambahnya jumlah lilitan yang digunakan.



**Gambar 4.10** Grafik Pengaruh Jumlah Lilitan terhadap Gaya Aksial

Berdasarkan grafik gambar 4.10 mempunyai bentuk non linear dan *trendline* kemiringan yang berbeda pada tiap perpindahan rotor. Pada perpindahan rotor 1,5 mm ke kiri mempunyai kemiringan yang paling curam karena memiliki sensitifitas penambahan gaya aksial terhadap penambahan jumlah lilitan akibat *air gap* yang semakin kecil dan memiliki nilai magnetisasi yang lebih besar. Hal tersebut terjadi karena flux density yang dihasilkan semakin besar seiring penambahan jumlah

lilitan. Dimana penambahan nilai dari gaya aksial sesuai pada rumus dasar hubungan jumlah lilitan dengan gaya aksial adalah kuadratik. Namun lilitan yang digunakan terbatas dengan ukuran ruang kumparan pada stator yang digunakan. Untuk desain pada *active magnetic bearing* ini menggunakan diameter kumparan 0,7 mm yang mempunyai luas penampang 0,375 mm<sup>2</sup>, dan luas penampang rumah coil 137,5 mm<sup>2</sup>. Sehingga jumlah lilitan maksimal yang dapat digunakan adalah 366. Berikut adalah hasil ilustrasi *flux density* dari *active magnetic bearing* dengan jumlah lilitan 100



**Gambar 4.11** Hasil Simulasi Pada Jumlah Lilitan 100 (a) Distribusi *Flux Density* (b) Arah *Flux Density*

Dari gambar 4.11 merupakan hasil simulasi *axial active magnetic bearing* dengan menggunakan rotor 7 mm yang bergeser 1,5 mm ke kiri dan menggunakan jumlah lilitan 100. Gambar 4.11 (a) adalah ilustrasi besar dari *flux density*. Dengan meninjau stator kiri terlihat mayoritas warna distribusi *flux density* pada bagian yang paling dekat dengan stator adalah biru muda

memiliki nilai 0,3015 – 0,4974 Tesla. Hal ini diperkuat dengan gambar 4.11 (b) yaitu mayoritas anak panah dari stator kiri berwarna biru muda. Selain itu, terdapat anak panah berwarna biru tua yang mempunyai nilai 0,0076 – 0,2035 Tesla dan berwarna hijau muda yang mempunyai nilai 0,5953 – 0,9872 Tesla. Hal tersebut dibandingkan dengan gambar 4.6 yang merupakan hasil simulasi *axial active magnetic bearing* dengan menggunakan rotor 7 mm yang bergeser 1,5 mm ke kiri dengan menggunakan jumlah lilitan 360. Gambar 4.6 (a) dan 4.6 (b) memiliki distribusi *flux density* yang sama. Namun mempunyai nilai yang berbeda. Dimana distribusi *flux density* warna biru tua mempunyai nilai 0,0273 – 0,7326 Tesla, warna biru muda mempunyai nilai 1,0853 – 1,7906 Tesla, dan warna hijau muda mempunyai nilai 2,1433 – 3,5539 Tesla. Dari hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa nilai *flux density* dari jumlah lilitan 360 lebih besar dibandingkan jumlah lilitan 100. Sehingga gaya aksial yang dihasilkan semakin besar.

### 4.3 Kapasitas Gaya Aksial pada *Active Magnetic Bearing*

Berdasarkan hasil simulasi yang dilakukan dari beberapa macam variasi, didapatkan nilai gaya aksial yang menunjukkan kapasitas angkat aksial maksimal dari *active magnetic bearing*. Nilai tersebut diperoleh dengan konfigurasi desain dengan jumlah lilitan 366, lebar rotor 7 mm, *axial displacement* 1,25 mm, dan arus *input* sebesar 3 Ampere. Gaya maksimal tersebut kemudian dibandingkan dengan gaya maksimal dari *mechanical bearing* dengan dimensi yang sama. Referensi *mechanical bearing* pembanding yang digunakan pada penelitian ini diperoleh dari *wheel bearing* milik mobil Toyota Prius HEV, yaitu tipe *double row angular contact ball bearing* dengan kode produksi DAC4075W-2CS73.

Kapasitas angkat aksial maksimal dari *active magnetic bearing* yaitu sebesar 236 N. Nilai tersebut memiliki perbedaan yang cukup besar jika dibandingkan dengan kapasitas angkat aksial maksimal dari *mechanical bearing* yang bernilai 1749,39 N. Dengan perbedaan tersebut menunjukkan bahwa dengan ukuran

yang sama *active magnetic bearing* tidak bisa menggantikan fungsi dari *mechanical bearing* milik roda mobil Toyota Prius HEV. Namun, *active magnetic bearing* memiliki keunggulan yaitu tidak terjadi kontak antara stator dengan rotornya sehingga *active magnetic bearing* tidak menimbulkan gesekan yang mengakibatkan memiliki umur pakai yang lama dan perawatan lebih minimal jika dibandingkan dengan *mechanical bearing* yang masih terdapat gesekan sehingga memiliki keterbatasan pada umur pakainya. Dan apabila dibandingkan dengan *permanent magnetic bearing*, *active magnetic bearing* menghasilkan gaya aksial yang lebih besar karena *flux density* pada *permanent magnetic bearing* hanya bergantung pada magnet yang digunakan, sedangkan pada *active magnetic bearing* bergantung pada jumlah lilitan dan arus pada kumparan yang digunakan.

Gaya yang maksimal pada *active magnetic bearing* dapat diperoleh dengan cara memperbesar dimensi ukuran bearing. Hal tersebut akan mempengaruhi ruang lilitan menjadi lebih besar sehingga jumlah lilitan yang digunakan dapat bertambah dan diameter lilitan yang digunakan dapat bertambah pula yang mengakibatkan arus *input*-nya lebih besar. Namun apabila hanya menambah jumlah lilitan dengan dimensi ruang lilitan sama akan mengurangi ukuran lilitan yang menyebabkan input arus maksimal juga berkurang. Sehingga gaya aksial yang dihasilkan tetap

## BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Kesimpulan

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

1. *Air gap* mempengaruhi nilai gaya aksial dimana semakin kecil *air gap* yang digunakan maka gaya aksial yang dihasilkan akan semakin besar, dimana penelitian ini gaya aksial optimum terjadi pada *air gap* 1 mm karena tidak menimbulkan beban radial yang menyebabkan *shaft* bergerak tidak linier dan membuat *shaft bending*. Pada lebar rotor 7 mm dan perpindahan aksial 1,5 mm didapatkan gaya aksial pada desain ini. Dengan gaya aksial maksimum 228,33 N
2. Besar arus mempengaruhi nilai gaya aksial dimana semakin besar arus yang digunakan maka gaya aksial yang dihasilkan akan semakin besar, besar arus bergantung dengan ukuran diameter kumparan dan jenis kumparan yang digunakan. Dimana penelitian ini menggunakan diameter kumparan 0,7 mm dan *current density* 8A/mm<sup>2</sup> maka gaya aksial terbesar terjadi pada besar arus 3A dengan nilai gaya aksial 228,33 N
3. Jumlah lilitan mempengaruhi nilai gaya aksial dimana semakin banyak jumlah lilitan yang digunakan maka gaya aksial yang dihasilkan akan semakin besar, jumlah lilitan bergantung pada luas penampang ruang kumparan dan luas penampang kumparan yang digunakan. dimana penelitian menggunakan luas penampang ruang kumparan 137,5 mm<sup>2</sup> dan luas penampang kumparan 0,375 mm<sup>2</sup> maka gaya aksial terbesar terjadi pada jumlah lilitan 366 dengan nilai gaya aksial 236 N

## 5.2 Saran

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

1. Diperlukan *controller input* arus untuk mengatur gaya aksial yang dihasilkan agar sesuai dengan kebutuhan.
2. Memperbesar gaya aksial dan *flux density* yang dihasilkan dengan cara memperbesar dimensi *axial active magnetic bearing* agar dapat memperbesar stator dan ruang rumah coil agar dapat menambahkan jumlah lilitan dan ukuran kumparan untuk jumlah maksimal arus yang digunakan.
3. Menggunakan jenis kumparan yang memiliki *current density* besar agar dapat menginputkan arus yang lebih besar dengan ukuran yang sama.



## DAFTAR PUSTAKA

- Alexei V. F, Patrick T. M, Lawrence A. H, and Eric B. 2005. "Magnetic bearing actuator design for a gas expander generator." **Lexington, Kentucky, USA**
- ANSYS Inc. 2010. *ANSYS Maxwell 3D User's Guide*.  
Canonsburg: ANSYS Incorporated.
- Collocott, S. J. 2016. *Magnetic Materials : Domestic Application*.  
CSIRO Materials Science and Engineering. Linfold.  
Australia
- Deutschman, A. D., *et al.* 1975. *Machine Design Theory and Practice*. New York: Macmillan Publishing Co., Inc.
- Hamidizadeh, S. 2016. "Study of Magnetic Properties and Demagnetization Models of Permanent Magnets for Electric Vehicles Application". **Department of Mining and Materials Engineering, Faculty of Engineering, McGill University.**
- Jagu, S. R and Tiwari, R. 2008. "Optimum Design and Analysis of Thrust Magnetic Bearings Using Multi Objective Genetic Algorithms". *Indian Institute of Technology Guwahati, Guwahati, India*
- Jang, S. M., Lee, *et al.* 2007. "Design and Analysis of Thrust Active Magnetic Bearing". *Department of Electrical Engineering, Chungnam National University*
- Keith, M. R. 2004. **Maintenance Fundamentals 2nd Edition**.  
**Oxford OX2 8DP, UK**
- Mott R. L., *et al.* 2018. **Machine Elements in Mechanical Design 6th Edition**.
- Myburgh, S. 2007. "The development of a fully suspended AMB system for a high speed flywheel application".  
**Potchefstroom Campus.**
- Nguyen Q., Ueno, S. 2010. "Salient pole permanent magnet axial-gap self-bearing motor".
- Polajžer, Boštjan., *et al.* 2010. "Linearization of radial force characteristic of active magnetic bearings using finite

- element method and differential evolution”. **Magnetic Bearings, Theory and Application**. Slovenia.
- Schweitzer, G. Eric H. M. 2009. **Magnetic Bearings : Theory, Design, and Application to Rotating Machinery**. New York : Springer
- Setiawan, J. D. 2006. “Active magnetic bearings for frictionless rotating machineries”. Volume 8 Nomor 3
- Utari, D. 2019. “Analisis pengaruh *air gap* dan rasio ketebalan magnet terhadap gaya aksial pada *permanent magnetic bearing*”. **Institut Teknologi Sepuluh Nopember**.
- Yonnet, J. P. 1981. “*Permanent Magnetic Bearing and Coupling*”. **IEEE Transaction on Magnetics**, Vol. MAG-14, Vol. MAG-17

## LAMPIRAN

### 1. Variasi *Air Gap*

Konfigurasi	Lebar Rotor (mm)	Jumlah Lilitan	Besar Arus (A)	Air Gap (mm)	Gaya Aksial (N)	Beban Radial (N)
A1	11,8	360	3	0,1	19085	1000,06
B1	11	360	3	0,5	904,01	282,32
C1	10	360	3	1	249,51	0,87
D1	9	360	3	1,5	120,9	0,78
E1	8	360	3	2	71,149	0,40
F1	7	360	3	2,5	47,556	0,27

Konfigurasi	Lebar Rotor (mm)	Jumlah Lilitan	Besar Arus (A)	Axial Force (N)				
				Axial Displacement				
				-0,5	-0,25	0	0,25	0,5
D2	8	360	3	178,23	76,41	0,1	-76	-178,2

Konfigurasi	Lebar Rotor (mm)	Jumlah Lilitan	Besar Arus (A)	Axial Force (N)				
				Axial Displacement				
				-1	-0,5	-0,25	0	0,25
E2	8	360	3	216,01	72,21	33,67	0,07	-33,83

<b>0,5</b>	<b>1</b>
-72,1	-216,1

Konfigurasi	Lebar Rotor (mm)	Jumlah Lilitan	Besar Arus (A)	Axial Force (N)				
				Axial Displacement				
				-1,5	-1,25	-1	-0,5	-0,25
F2	7	360	3	228,33	146,2	94,09	37,8	17,77

<b>0</b>	<b>0,25</b>	<b>0,5</b>	<b>1</b>	<b>1,25</b>	<b>1,5</b>
-0,08	-17,74	-37,79	-94,08	-146,14	-228,35

## 2. Variasi Besar Arus

Konfigurasi	Lebar Rotor (mm)	Jumlah Lilitan	Besar Arus (A)	Axial Force (N)			
				Axial Displacement (mm)			
				-1,5	-1,25	-1	-0,75
H1	7	360	0,2	1,015	0,65	0,42	0,27
H2	7	360	0,5	6,343	4,06	2,61	1,7
H3	7	360	0,75	14,27	9,135	5,88	3,83
H4	7	360	1	25,37	16,24	10,5	6,81
H5	7	360	1,5	57,08	36,54	23,5	15,3
H6	7	360	2	101,5	64,96	41,8	27,2
H7	7	360	3	228,3	146,2	94,1	61,3

## 3. Variasi Jumlah Lilitan

Konfigurasi	Lebar Rotor (mm)	Jumlah Lilitan	Besar Arus (A)	Axial Force (N)			
				Axial Displacement (mm)			
				-1,5	-1,25	-1	-0,75
G1	7	100	3	17,62	11,28	7,26	4,73
G2	7	150	3	39,64	25,37	16,3	10,6
G3	7	210	3	77,7	49,73	32	20,8
G4	7	275	3	133,2	85,29	54,9	35,7
G5	7	330	3	191,9	122,8	79,1	51,5
G6	7	360	3	228,3	146,2	94,1	61,3
G7	7	366	3	236	151,1	97,3	63,3

## BIODATA PENULIS



Muhammad Darma Susilo Aji lahir di Sidoarjo, 28 Januari 1998 merupakan anak pertama dari dua bersaudara yang terlahir dari orang tua Bapak Heri Susilo dan Ibu Siti Asrifah. Penulis menempuh pendidikan dimulai dari SD Negeri 2 Tembekrejo pada tahun 2004-2010, melanjutkan ke SMP Negeri 2 Pasuruan pada tahun 2010-2013 dan SMA Negeri 1 Pasuruan pada tahun 2013-2016, dan kemudian dapat melanjutkan masa kuliah jenjang S-1 di Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Penulis juga aktif dalam kegiatan organisasi. Dalam organisasi penulis aktif sejak tahun 2017 di Lembaga Bengkel Mahasiswa Mesin. Pada periode 2017/2018 penulis aktif menjadi Kabiro Internal Divisi Umum. Selanjutnya menjadi Kepala Divisi Hubungan Luar pada periode 2018/2019. Kemudian di tahun terakhir masa perkuliahan penulis aktif sebagai Wakil Ketua Bengkel bagian Eksternal di Lembaga Bengkel Mahasiswa Mesin dan Manager Non Teknis ITS Tim Sapuangin. Selain aktif berorganisasi, penulis juga aktif magang di perusahaan PT INKA Madiun pada *Quality Control* divisi *Final Test*, dan Perusahaan *Scandinavian Tobacco Group* Pasuruan divisi *Quality Control* Produksi.

Dengan ketekunan usaha, ikhtiar, dan doa penulis telah berhasil menyelesaikan penulisan Laporan Tugas Akhir ini. Semoga Laporan Tugas Akhir ini dapat bermanfaat dalam kemajuan teknologi, khususnya di Indonesia. Penulis percaya bahwa melakukan suatu hal yang bermanfaat akan menghasilkan hal yang bermanfaat pula. Untuk informasi beserta kritik saran mengenai Laporan Tugas Akhir ini dapat menghubungi penulis melalui *email* : [darmasaji100@gmail.com](mailto:darmasaji100@gmail.com)