



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**STUDI BENTUK ROTOR MAGNET PERMANEN  
PADA GENERATOR SINKRON MAGNET PERMANEN  
FLUKS AKSIAL TANPA INTI STATOR**

**SKRIPSI**

**EDY SOFIAN  
0706267654**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO  
DEPOK  
JUNI 2011**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**STUDI BENTUK ROTOR MAGNET PERMANEN  
PADA GENERATOR SINKRON MAGNET PERMANEN  
FLUKS AKSIAL TANPA INTI STATOR**

**SKRIPSI**

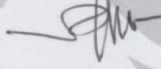
**diajukan sebagai salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Teknik**

**EDY SOFIAN  
0706267654**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO  
DEPOK  
JUNI 2011**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Skripsi ini adalah hasil karya sendiri,  
Dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk telah saya  
nyatakan benar**

**Nama** : Edy Sofian  
**NPM** : 07 06 26 7654  
**Tanda Tangan** :   
**Tanggal** : 4 Juli 2011

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Edy Sofian

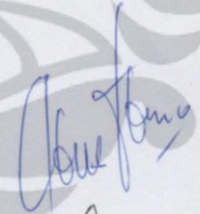
NPM : 0706267654

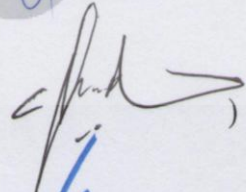
Program Studi : Teknik Elektro

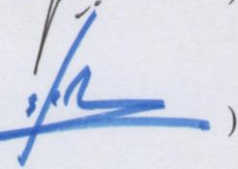
Judul Skripsi : Studi Bentuk Rotor Magnet Permanen pada Generator Sinkron Magnet Permanen Fluks Aksial Tanpa Inti Stator

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Ir. Agus R utomo, MT. (  )

Penguji : Ir. I Made Ardita Y MT (  )

Penguji : Dr. Ing. Eko Adhi Setiawan (  )

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 4 Juli 2011

## KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur kehadiran Tuhan Yang Maha Esa yang telah memberikan bimbingan dan rahmat-Nya kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan skripsi ini tepat pada waktunya. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu persyaratan untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Jurusan Teknik Elektro pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Penulis menyadari bahwa skripsi ini tidak akan selesai tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak. Oleh karena itu penulis mengucapkan terima kasih kepada:

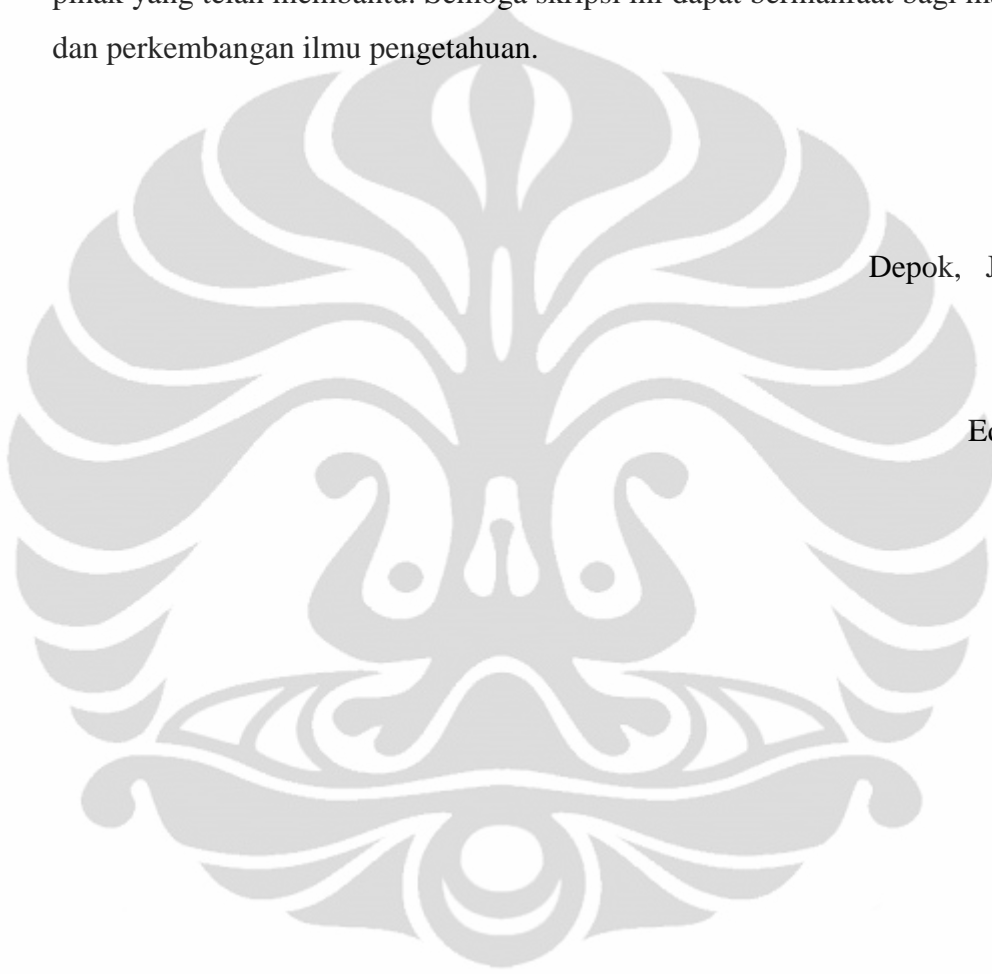
1. Bapak. Ir. Agus R Utomo MT selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan waktu, tenaga, masukan dan arahnya untuk penulisan skripsi ini.
2. Orang tua dan keluarga besar yang selalu memberikan perhatian, dukungan moril dan materiil serta do'a untuk penulis.
3. M. Kahlil F, M. Arief Y, dan Raja Tinjo yang telah bersedia mengajarkan ilmunya terkait penulisan skripsi ini.
4. Chatra Hagusta atas kerjasama dan bantuannya dalam penyelesaian skripsi ini.
5. PT Nokia Siemens Networks yang telah memberikan bantuan finansial kepada penulis sampai penulis menyelesaikan masa studinya.
6. Rekan-rekan mahasiswa Departemen Teknik Elektro khususnya angkatan 2007 yang telah mendukung dan memberikan bantuannya untuk penulisan skripsi ini.
7. Keluarga besar Sivitas Akademika Departemen Teknik Elektro yang tidak dapat saya sebutkan satu per satu.

Penulis juga menyadari bahwa dalam penulisan skripsi ini masih banyak terdapat kekurangan dan kesalahan, dan untuk itu penulis mengucapkan mohon maaf yang sebesar-besarnya serta mengharapkan kritik dan saran yang dapat melengkapi kekurangan tersebut agar skripsi ini bisa menjadi lebih baik lagi.

Akhir kata semoga Allah SWT berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi masyarakat dan perkembangan ilmu pengetahuan.

Depok, Juni 2011

Edy Sofian





## HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

Sebagai sivitas akademika Universitas Indonesia, Saya bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Edy Sofian  
NPM : 0706267654  
Program Studi : Teknik Elektro  
Departemen : Teknik Elektro  
Fakultas : Teknik  
Jenis Karya : Skripsi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul :

### STUDI BENTUK ROTOR MAGNET PERMANEN PADA GENERATOR SINKRON MAGNET PERMANEN FLUKS AKSIAL TANPA INTI STATOR

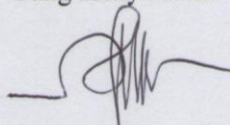
Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan hak Bebas Royalti Non Eksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia / formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta sebagai pemegang Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada Tanggal : Juni 2011

Yang menyatakan



Edy Sofian

## ABSTRAK

Nama : Edy Sofian  
Program Studi : Teknik Elektro  
Judul : Studi Bentuk Rotor Magnet Permanen pada Generator Sinkron Magnet Permanen Fluks Aksial Tanpa Inti Stator

Pada dasarnya unjuk kerja Generator Sinkron Magnet Permanen Fluks Aksial (GSMPPFA) ditentukan oleh tegangan dan arus. Baik nilai maupun bentuk gelombang untuk tegangan dan arus tersebut ditentukan oleh konfigurasi desain geometris pada generator. Desain konstruksi rotor pada GSMPPFA dapat dibedakan berdasarkan bentuk magnet permanennya. Skripsi ini membandingkan pola perubahan tegangan keluaran empat jenis bentuk magnet permanen pada variasi kecepatan putaran dan lebar celah udara. Hasil simulasi dan analisis menunjukkan bahwa desain konstruksi rotor dengan bentuk *trapezoidal* memberikan nilai tegangan keluaran yang maksimum.

Kata kunci :

Generator Sinkron Magnet Permanen Fluks Aksial (GSMPPFA), bentuk magnet permanen, tegangan keluaran.



## **ABSTRACT**

Name : Edy Sofian  
Study Programs : Electrical Engineering  
Title : Study of Pole Shapes Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Generator with Coreless Stator

The performances of Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Generator (AFPMSG) with Coreless Stator are basically considered from the current and voltage. Either wave form or magnitude for that current and voltage depend on geometric design configuration of generator. In AFPMSG with coreless stator, rotor construction design can be classified base on permanent magnet (PM) pole shapes. This study presents the comparison of change in output voltage in four types of PM pole shapes in various rotating speed and air gap. The result shows that design construction of rotor with trapezoidal pole shape produce maximum output voltage.

Keywords : Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Generator (AFPMSG), magnet permanent pole shape, output voltage.

## DAFTAR ISI

HALAMAN SAMBUTAN.....	i
HALAMAN JUDUL .....	ii
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	iii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iv
KATA PENGANTAR .....	v
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	vii
ABSTRAK .....	viii
ABSTRACT.....	ix
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR GAMBAR .....	xii
DAFTAR TABEL.....	xiv
<b>BAB 1 PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Tujuan .....	2
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Metodologi Penulisan .....	2
1.5 Sistematika Penulisan .....	3
<b>BAB 2 GENERATOR SINKRON FLUKS AKSIAL .....</b>	<b>4</b>
2.1 Generator Sinkron Konvensional.....	4
2.1.1 Konstruksi.....	4
2.1.2 Bentuk Penguatan ( <i>excitation</i> ).....	5
2.1.3 Prinsip Kerja.....	6
2.2 Generator Fluks Aksial .....	7
2.2.1 Sejarah Perkembangan Mesin Fluks Aksial .....	7
2.2.2 Radial vs Aksial.....	8
2.2.3 Stator.....	9
2.2.3.1 Stator Bentuk Torus.....	10
2.2.3.2 Stator Tanpa Inti Besi .....	11

2.2.4 Rotor .....	13
2.2.4.1 Bentuk magnet permanen. ....	14
2.2.4.2 Kombinasi Magnet Permanen .....	14
2.2.5 Magnet Permanen .....	15
2.2.6 Prinsip Kerja .....	16
2.2.7 Tipe – Tipe Generator Fluks Aksial .....	19
2.2.7.1 Rotor dan Stator Tunggal (Cakram Tunggal).....	19
2.2.7.2 Rotor Ganda dan Stator Tunggal .....	19
2.2.7.3 Stator Ganda dan Rotor Tunggal .....	20
2.2.7.4 Rotor dan Stator Banyak.....	21
2.2.8 Kerapatan Medan Magnet Permanen pada Celah Udara.....	22
2.2.9 Parameter Generator .....	23
<b>BAB 3 PEMODELAN DAN SIMULASI .....</b>	<b>24</b>
3.1 Desain Model Generator .....	24
3.1.1 Stator.....	25
3.1.2 Rotor .....	27
3.1.3 Celah Udara ( <i>air gap</i> ).....	30
3.2 Simulasi.....	31
<b>BAB 4 HASIL SIMULASI DAN ANALISIS .....</b>	<b>34</b>
4.1 Data Hasil Simulasi.....	34
4.1.1 Distribusi Medan Magnet .....	34
4.1.2 Hasil Simulasi Terhadap Perubahan Kecepatan .....	36
4.1.3 Hasil Simulasi Terhadap Perubahan Celah Udara.....	38
4.2 Analisis.....	40
4.2.1 Hubungan Antara Fluks dan Tegangan dengan Kecepatan Putar ( $n$ ).....	41
4.2.2 Hubungan antara Fluks dan Tegangan dengan Celah Udara ( <i>air gap</i> ) .....	49
4.2.3 Analisis Bentuk Optimum .....	53
<b>BAB 5 KESIMPULAN .....</b>	<b>54</b>
DAFTAR ACUAN .....	55
LAMPIRAN .....	57

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Generator Sinkron Konvensional .....	4
Gambar 2. 2 Rotor Non Salient pada Generartor Sinkron .....	5
Gambar 2. 3 Rangkaian Ekuivalen Generator Sinkron Konvensional .....	6
Gambar 2. 4 Perbandingan Fluks Aksial dan Radial .....	8
Gambar 2. 5 Contoh Kumparan Stator pada Generator Fluks Aksial.....	9
Gambar 2. 6 Generator Fluks Aksial Tipe Sloted .....	10
Gambar 2. 7 Aliran Fluks Tipe Slot .....	10
Gambar 2. 8 Generator aksial Tipe Tanpa Slot .....	10
Gambar 2. 9 Aliran Fluks Tipe Tanpa Slot .....	10
Gambar 2. 10 Konstruksi Stator <i>Overlapping</i> .....	11
Gambar 2. 11 Skematik Stator <i>Overlapping</i> .....	11
Gambar 2. 12 Konstruksi Stator <i>Non-overlapping</i> .....	12
Gambar 2. 13 Skematik Stator <i>Non-overlapping</i> .....	12
Gambar 2. 14 Skematik Stator <i>Concentrated</i> .....	12
Gambar 2. 15 Skematik Stator <i>Distributed</i> .....	12
Gambar 2. 16 Magnet Permanen <i>Surface Mounted</i> .....	13
Gambar 2. 17 Magnet Permanen <i>Embedded</i> .....	13
Gambar 2. 18 Contoh Bentuk Magnet Permanen pada Generator Fluks Aksial .	14
Gambar 2. 19 Aliran Fluks Tipe NN .....	15
Gambar 2. 20 Aliran Fluks Tipe NS .....	15
Gambar 2. 21 Kurva Karektetristik Material Magnet Permanen .....	16
Gambar 2. 22 Rangkaian Ekuivalen Generatorl Magnet Permanen Fluks Aksial..	16
Gambar 2. 23 Generator Fluks Aksial Cakram Tunggal.....	19
Gambar 2. 24 Bentuk Generator Aksial dengan Stator Ganda .....	20
Gambar 2. 25 Aliran Fluks pada Tipe Eksternal Stator .....	20
Gambar 2. 26 Strukstur Generator Aksial <i>Multi Stage</i> .....	21
Gambar 2. 27 Arah Fluks pada Generator Aksial <i>Multi Stage</i> .....	21
Gambar 2. 28 Model dan Koordinat Persebaran Kerapatan Fluks .....	22
Gambar 3. 1 Generator Fluks Aksial .....	24
Gambar 3. 2 Model Generator Aksial pada Simulasi .....	24
Gambar 3. 3 Konstruksi Stator pada Model.....	25
Gambar 3. 4 Distribusi Kumparan Stator.....	26
Gambar 3. 5 Bentuk <i>Rectangular</i> .....	27
Gambar 3. 6 Bentuk <i>Trapezoidal</i> .....	27
Gambar 3. 7 Bentuk <i>Annular</i> .....	27
Gambar 3. 8 Bentuk Campuran.....	27
Gambar 3. 9 Jari-jari Magnet Permanen .....	29
Gambar 3. 10 Jari-jari Tatakan .....	29

Gambar 3. 11 Konstruksi Rotor pada Model .....	29
Gambar 3. 12 Penampang Radial Model Generator .....	30
Gambar 3. 13 <i>Meshing</i> pada Model .....	31
Gambar 3. 14 Diagram Alir Simulasi .....	33
Gambar 4. 1 Model Generator saat Simulasi .....	34
Gambar 4. 2 Distribusi Medan Magnet Rotor Bentuk Rectangular .....	34
Gambar 4. 3 Distribusi Medan Magnet Rotor Bentuk Trapezoidal .....	35
Gambar 4. 4 Distribusi Medan Magnet Rotor Bentuk Annular .....	35
Gambar 4. 5 Distribusi Medan Magnet Rotor Bentuk Campuran .....	35
Gambar 4. 6 Grafik Hubungan Fluks terhadap Waktu pada Kecepatan Putar 500 rpm untuk Bentuk Rectangular .....	36
Gambar 4. 7 Grafik Hubungan Tegangan terhadap Waktu pada Kecepatan Putar 500 rpm untuk Bentuk Rectangular .....	36
Gambar 4. 8 Grafik Hubungan Fluks terhadap Waktu pada Fase b untuk Bentuk Rectangular .....	37
Gambar 4. 9 Grafik Hubungan Tegangan terhadap Waktu pada Fase b untuk Bentuk Rectangular .....	37
Gambar 4. 10 Grafik Hubungan Tegangan terhadap Waktu pada Fase b untuk Kecepatan Putar 500 rpm .....	37
Gambar 4. 11 Grafik Hubungan Fluks terhadap Waktu pada Celah Udara.....	38
Gambar 4. 12 Grafik Hubungan Tegangan terhadap Waktu pada Celah Udara...	38
Gambar 4. 13 Grafik Hubungan Fluks terhadap Waktu pada Fase b untuk Bentuk Rectangular.....	39
Gambar 4. 14 Grafik Hubungan Tegangan terhadap Waktu pada Fase b untuk Bentuk Rectangular .....	39
Gambar 4. 15 Grafik Hubungan Tegangan terhadap Waktu pada Fase b untuk Celah Udara 4 mm .....	39
Gambar 4. 16 Grafik Pola Perubahan Tegangan Fase b ( $V_b$ ) terhadap Waktu pada Semua Bentuk Model dan Kecepatan Putar.....	45
Gambar 4. 17 <i>Fringing Effect</i> .....	46
Gambar 4. 18 Grafik Pola Perubahan Tegangan Fase b ( $V_b$ ) terhadap Waktu pada Semua Bentuk Model dan Celah Udara.....	52



## DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Ukuran Geometri Model Stator.....	26
Tabel 3. 2 Ukuran Geometri Model Rotor.....	29
Tabel 3. 3 Variasi Celah Udara pada Model Generator.....	31
Tabel 4. 1 Tegangan Phasa b pada Kecepatan 500 rpm.....	44
Tabel 4. 2 Kenaikan Tegangan Phasa b (Vb) pada Semua Bentuk Model dan Kecepatan Putar.....	45
Tabel 4. 3 Jarak Antar Magnet Permanen pada Rotor.....	47
Tabel 4. 4 Tegangan Phasa b pada Celah Udara 4 mm.....	51
Tabel 4. 5 Kenaikan Tegangan Phasa b (Vb) pada Semua Bentuk Model dan Celah Udara.....	52

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Dalam beberapa tahun terakhir ini, mesin listrik magnet permanen telah semakin banyak digunakan dalam berbagai macam aplikasi. Hal ini sangat ditunjang dengan perkembangan teknologi material magnet permanen yang semakin baik. Generator magnet permanen fluks aksial (GMPFA) merupakan salah satu jenis penggunaan aplikasi dari mesin listrik magnet permanen yang dapat membangkitkan energi listrik dengan arah aliran fluks secara aksial. Berbeda dengan generator konvensional yang berjenis fluks radial, pada tipe aksial kerapatan daya keluaran dapat ditingkatkan dengan membuat konstruksi rotor menjadi lebih tipis, sedangkan pada tipe radial kerapatan daya keluarannya tetap. Selain itu, penggunaan fluks radial mengharuskan konstruksi generator menjadi lebih besar, dan generator menjadi lebih berat sehingga untuk beberapa sektor pembangkit, fluks ini dianggap kurang efektif.

Berbagai kajian telah dilakukan untuk mendapatkan desain geometris GMPFA yang terbaik sehingga memberikan unjuk kerja yang optimum. Pada dasarnya unjuk kerja pada GMPFA adalah tegangan dan arus. Pada skripsi ini dilakukan kajian terhadap bentuk magnet permanen pada rotor serta pengaruhnya terhadap tegangan keluaran generator. Hal ini dilakukan dengan asumsi bahwa jumlah kumparan stator tetap yaitu 9 kumparan dengan bentuk trapezoidal dan tanpa inti stator. Kajian ini dilakukan pada beberapa variasi kecepatan putaran rotor dan lebar celah udara (*air gap*) antara stator dan rotor.

Kajian dilakukan dengan membuat rancangan model generator dengan desain geometri yang ditentukan. Setelah itu dilakukan simulasi secara komputatif berbasis pada metode elemen terhingga (*FEM*).

Dari hasil simulasi dan pembahasan yang dilakukan terlihat bahwa bentuk magnet permanen pada rotor akan memberikan pengaruh terhadap tegangan keluaran generator. Selain itu, terjadi pola perubahan tegangan untuk semua variasi kecepatan putaran dan lebar celah udara pada generator.

## 1.2 Tujuan

Adapun tujuan penulisan skripsi ini adalah sebagai berikut:

1. Merancang dan mensimulasikan desain model generator fluks aksial rotor ganda stator tunggal tanpa inti stator dengan beberapa bentuk rotor magnet permanen.
2. Mendapatkan hasil perbandingan pengaruh bentuk rotor magnet permanen terhadap nilai tegangan keluaran generator untuk variasi kecepatan putar rotor dan lebar celah udara antara rotor dan stator.

## 1.3 Batasan Masalah

Berikut adalah permasalahan yang akan dibahas dalam skripsi ini, yaitu :

1. Perancangan model generator yang dibuat adalah generator sinkron magnet permanen fluks aksial dengan rotor ganda eksternal dan stator tunggal internal tanpa inti stator. Model ini dibuat dengan ukuran dan spesifikasi tertentu yang akan dijelaskan pada bab 3.
2. Model-model generator yang dibuat memiliki ukuran dan spesifikasi yang sama persis, kecuali pada bentuk rotor magnet permanennya.
3. Model yang menjadi acuan atau patokan untuk perbandingan adalah model generator dengan bentuk rotor magnet permanen segi empat (rectangular).
4. Model dan simulasi yang dilakukan disesuaikan dengan kemampuan simulator.

## 1.4 Metodologi Penulisan

Metode yang digunakan dalam penulisan skripsi ini adalah

1. Studi pustaka (literatur), yaitu dengan mencari sumber-sumber terkait seperti handbook, ebook, atau jurnal ilmiah, yang dapat digunakan sebagai acuan (referensi) untuk merancang model generator dan analisis hasil simulasi.
2. Simulasi dari model yang telah dibuat dengan menggunakan perangkat lunak computer.
3. Analisis yang dibuat menggunakan metode analisis grafis berdasarkan pada hasil simulasi.

## 1.5 Sistematika Penulisan

Dalam pembuatan skripsi ini, penulis membaginya menjadi 5 bab, yaitu dengan sistematika sebagai berikut :

### BAB I : Pendahuluan

Bab ini terdiri atas latar belakang, tujuan penulisan, batasan masalah, metodologi penulisan, dan sistematika penulisan.

### BAB II : Teori Dasar

Pada bab ini akan dipaparkan secara umum mengenai teori dasar tentang generator konvensional (radial), prinsip-prinsip dasar generator fluks aksial, konstruksi dan komponen generator fluks aksial, tipe dan jenis generator fluks aksial, serta perbandingan generator fluks radial dan aksial.

### BAB III : Pemodelan dan Simulasi

Bab ini akan menjelaskan mengenai ukuran dan spesifikasi yang digunakan dalam pembuatan model generator. Selain itu, bab ini juga berisi langkah-langkah dan urutan simulasi.

### BAB IV : Hasil dan Pembahasan

Pada bab ini akan ditampilkan data hasil simulasi dalam bentuk grafis kemudian hasil tersebut akan dibahas dan dianalisis dengan metode analisis grafis sesuai dengan teori yang ada, serta parameter-parameter lain yang terkait.

### BAB V : Kesimpulan

Bab ini berisi kesimpulan yang dapat diambil dari pembahasan hasil simulasi yang dilakukan.

## **BAB 2**

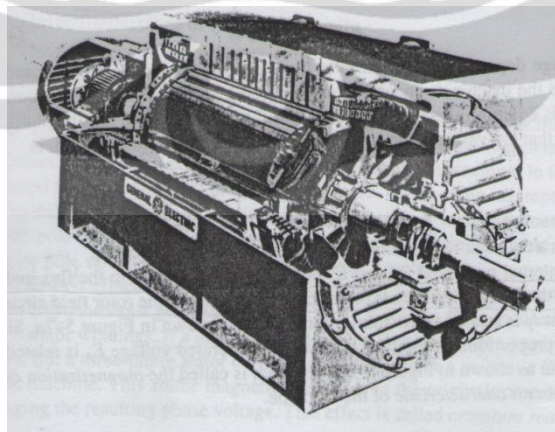
### **GENERATOR SINKRON FLUKS AKSIAL**

#### **2.1 Generator Sinkron Konvensional**

Pada dasarnya, generator sinkron konvensional merupakan jenis mesin AC yang mempunyai rangkaian medan yang disuplai oleh sumber DC eksternal. Generator sinkron adalah mesin sinkron yang digunakan untuk mengubah daya mekanik menjadi daya listrik AC.

##### **2.1.1 Konstruksi**

Secara umum, konstruksi generator sinkron adalah terdiri dari 2 bagian utama, yaitu stator dan rotor. Stator adalah bagian yang diam, dimana pada bagian ini terdapat lilitan sebagai tempat tegangan utama akan diinduksikan atau biasa disebut dengan kumparan jangkar. Rotor adalah bagian yang berputar dan terhubung dengan penggerak utama (prime mover), dimana bagian ini juga terdapat lilitan, yakni lilitan untuk mengalirkan arus DC yang akan menghasilkan medan magnet rotor. Lilitan pada rotor ini biasanya disebut kumparan medan.



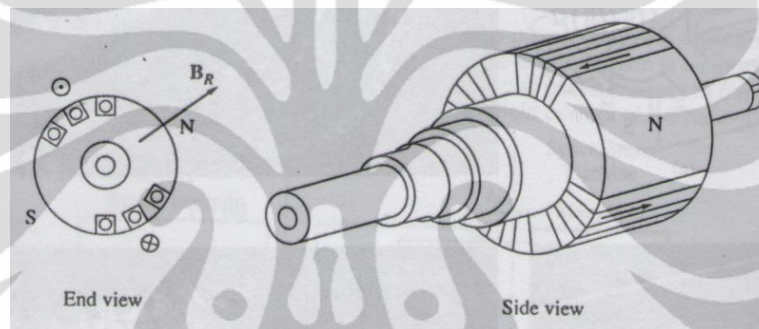
**Gambar 2. 1 Generator Sinkron Konvensional [14]**

Bentuk rotor pada generator sinkron ada 2 tipe, yaitu salient dan non salient. Generator dengan rotor salient memiliki konstruksi rotor dengan ujung



kutub magnet menonjol keluar sehingga bentuk rotor tidak silinder pempat tetapi berbentuk silinder menonjol yang tergantung dari banyaknya kutub. Rotor salient biasanya digunakan untuk rotor yang memiliki 4 kutub atau lebih. Bentuk salient ini digunakan untuk generator *prime mover* yang putarannya tidak terlalu cepat.

Generator dengan rotor non salient memiliki bentuk rotor silinder dengan kutub di bagian luar (kulit) silindernya. Bentuk rotor ini biasanya digunakan untuk konstruksi rotor yang memiliki 2 atau 4 jumlah kutub. Bentuk rotor non salient mengurangi hambatan udara, sehingga memungkinkan penggunaan kecepatan yang lebih tinggi.[14]



Gambar 2. 2 Rotor Non Salient pada Generartor Sinkron [14]

### 2.1.2 Bentuk Penguatan (*excitation*)

Sistem *excitacy* adalah sistem mengalirnya pasokan listrik DC sebagai penguatan pada generator listrik, sehingga menghasilkan tenaga listrik dan besar tegangan *output* bergantung pada besarnya arus *excitacy*.

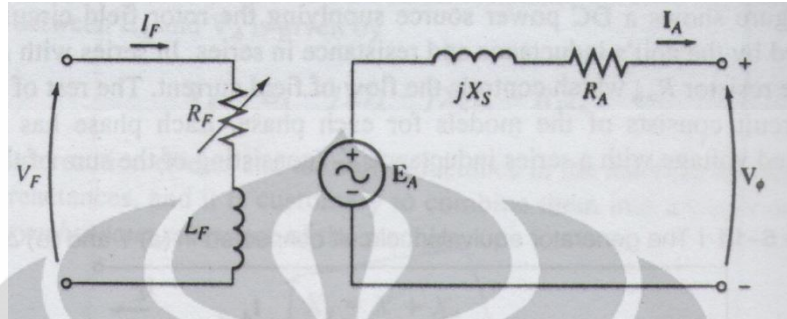
Sistem eksitasi pada generator listrik terdiri dari 2 macam, yaitu: (1) Sistem eksitasi dengan menggunakan sikat (*brush excitation*) dan (2) Sistem eksitasi tanpa sikat (*brushless excitation*).

Alternatif lainnya untuk penguatan eksitasi adalah menggunakan Diode silikon dan Thyristor. Dua tipe sistem penguatan “*Solid state*” sebagai berikut.

- Sistem statis yang menggunakan Diode atau Thyristor statis, dan arus dialirkan ke rotor melalui Slipring.
- *Brushless system*, pada sistem ini penyearah dipasangkan di poros yang berputar dengan rotor, sehingga tidak dibutuhkan sikat arang dan slipring.

### 2.1.3 Prinsip Kerja

Rangkaian ekivalen dari generator sinkron adalah sebagai berikut :



Gambar 2. 3 Rangkaian Ekivalen Generator Sinkron Konvensional [14]

Pada dasarnya, generator sinkron bekerja berdasarkan Hukum Faraday, yakni perubahan fluks terhadap satuan waktu yang memotong permukaan konduktor akan menghasilkan ggl induksi.

Adapun prinsip kerja dari generator sinkron secara umum adalah sebagai berikut :

1. Kumparan medan yang terdapat pada rotor dihubungkan dengan sumber eksitasi tertentu yang akan mensuplai arus searah terhadap kumparan medan. Dengan adanya arus searah yang mengalir melalui kumparan medan maka akan menimbulkan medan magnet ( $B_f$ ) yang besarnya terhadap waktu adalah tetap.
2. Penggerak mula (Prime Mover) yang sudah terkopel dengan rotor segera dioperasikan sehingga rotor akan berputar pada kecepatan nominalnya. Perputaran rotor ini akan menyebabkan medan magnet  $B_f$  juga akan ikut berputar dengan suatu kecepatan sudut ( $\omega$ ) tertentu.
3. Medan putar yang dihasilkan pada rotor, akan diinduksikan pada kumparan jangkar stator sehingga akan dihasilkan fluks magnetik ( $\phi$ ) yang berubah-ubah besarnya terhadap waktu.

## 2.2 Generator Fluks Aksial

Secara fungsional, pada dasarnya generator fluks aksial tidak jauh berbeda dengan generator konvensional pada umumnya, yakni merupakan salah satu jenis mesin yang dapat digunakan untuk mengkonversi energi mekanik menjadi energi listrik. Namun, yang membedakan adalah arah fluks magnetik yang digunakan oleh kedua generator tersebut. Pada generator konvensional arah fluksnya menyebar (radial) ke segala arah, sedangkan pada generator aksial arah fluks magnet yang digunakan untuk memotong kumparan stator secara aksial.

### 2.2.1 Sejarah Perkembangan Mesin Fluks Aksial

Sejarah mencatat bahwa, mesin elektrik pertama yang pernah ditemukan adalah berupa jenis mesin fluks aksial. Beberapa tokoh yang terkait dengan penemuan mesin ini antara lain M. Faraday 1831, Anonim dengan inisial P. M., 1832, W. Ritchie, 1833, B. Jacobi, 1834. Namun, pada awal masa penemuannya, mesin elektrik jenis ini sulit berkembang karena beberapa alasan antara lain;

1. Gaya tarik-menarik magnetik yang kuat yang terjadi antara stator dan rotor.
2. Proses fabrikasi yang sulit.
3. Membutuhkan biaya yang sangat mahal untuk proses manufakturnya.
4. Kesulitan dalam pemasangan mesin dan keseragaman celah udara.

Meskipun, system eksitasi dengan menggunakan magnet permanen telah ditemukan pada awal tahun 1830an, rendahnya kualitas bahan material magnet yang digunakan (histeresis loop yang lebar) juga membuat mesin ini jarang digunakan. Apalagi setelah ditemukannya mesin fluks radial pertama oleh T. Davenport yang dengan cepat dapat diterima dan digunakan oleh masyarakat luas sebagai konstruksi mesin listrik yang utama, hingga saat ini.

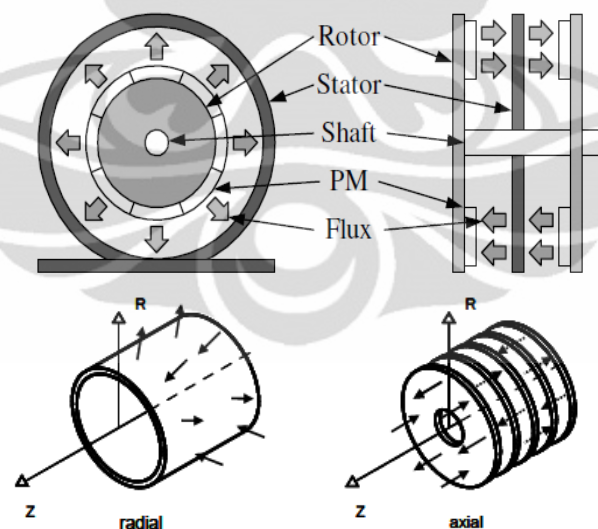
Namun, setelah ditemukannya material-material magnet permanen seperti Alnico (Al, Ni, Co, Fe) pada tahun 1931, Barium Ferrite di awal tahun 1950an, dan khususnya material rare-earth neodymium-iron-boron (NdFeB) pada tahun 1983 membuat perkembangan mesin listrik dengan eksitasi magnet permanen, khususnya mesin fluks aksial, kembali ke permukaan. Hal ini terlihat dengan

banyaknya penelitian dan karya ilmiah yang mencoba mengkaji penggunaan mesin fluks aksial ini untuk berbagai macam aplikasi.

Selain itu, perkembangan mesin fluks aksial ini juga didukung oleh kecenderungan harga material magnet permanen yang terus menurun dalam beberapa decade terakhir. Dengan melihat perkembangannya sekarang ini, bukan tidak mungkin bahwa mesin listrik jenis fluks aksial ini akan memegang peranan penting dalam teknologi konversi listrik dalam beberapa tahun ke depan.[12]

### 2.2.2 Radial vs Aksial

Pada mesin konvensional, medan magnet berada pada arah radial, artinya fluks menyebar ke segala arah. Jenis mesin yang mengacu pada fluks ini disebut Mesin Fluks Radial (RFM). Pada jenis Mesin Fluks Aksial (AFM), medan magnetnya berada pada arah aksial. Gambar berikut menunjukkan perbedaan arah medan magnet antara RFM dan AFM. Sebuah mesin fluks aksial dengan system eksitasi menggunakan magnet permanen disebut Mesin Fluks Aksial Magnet Permanen (AFPM).[1]



Gambar 2. 4 Perbandingan Fluks Aksial dan Radial [1] [3]

Seperti pada gambar, pada jenis radial, magnet ditempatkan pada permukaan rotor yang dikople ke batang poros (shaft), dan fluks magnetik dihasilkan dalam arah radial yang tegak lurus terhadap poros menuju stator yang berada pada sisi luar rotor. Pada jenis aksial, rotor yang berbentuk disk dikopel

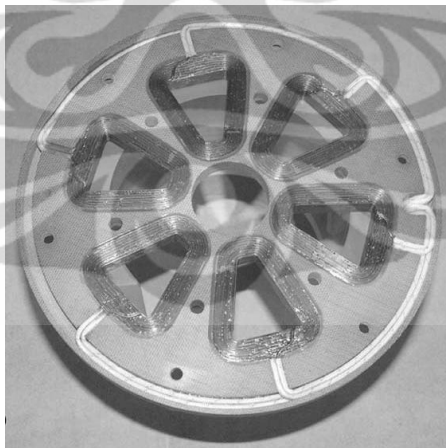
pada poros dan magnet diposisikan pada permukaan disk untuk menghasilkan fluks magnet yang parallel (sejajar) pada poros.

Pada tipe aksial, kerapatan daya keluaran dapat ditingkatkan dengan membuat konstruksi rotor menjadi lebih tipis, sedangkan pada tipe radial kerapatan daya keluarannya tetap. Selain itu, Penggunaan fluks radial mengharuskan konstruksi generator menjadi lebih besar, dan generator menjadi lebih berat. Sehingga untuk beberapa sektor pembangkit, fluks ini dianggap kurang efektif.[3]

### 2.2.3 Stator

Seperti generator pada umumnya, pada generator aksial juga terdapat komponen yang disebut stator. Stator merupakan tempat dimana tegangan akan diinduksikan. Stator merupakan terdiri dari sejumlah lilitan konduktor yang dibentuk dan disusun sedemikian rupa sesuai desain generator yang diinginkan.

Jumlah kumparan yang ada pada stator tergantung oleh banyaknya fasa yang ingin dihasilkan dan daya yang dihasilkan. Contoh konfigurasi stator pada generator magnet permanen aksial fluks dapat dilihat pada gambar .



**Gambar 2. 5 Contoh Kumparan Stator pada Generator Fluks Aksial [4]**

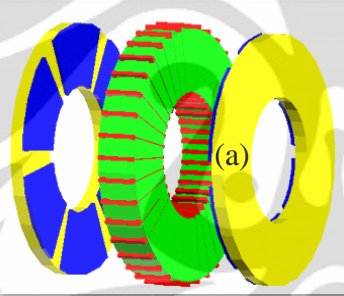
Berdasarkan konstruksi statornya, generator fluks aksial dapat dilihat dibagi menjadi beberapa jenis, yaitu sebagai berikut.



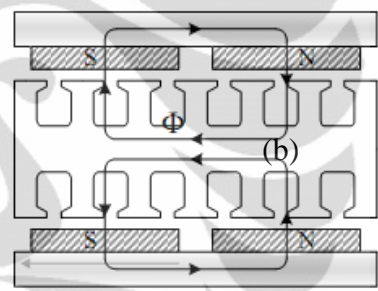
### 2.2.3.1 Stator Bentuk Torus

Stator dengan bentuk torus biasanya digunakan pada penggerak dengan putaran tinggi. Tipe ini memiliki inti besi di tengahnya yang selanjutnya dililitkan oleh kumparan. Hal tersebut dimaksudkan agar inti bisa lebih mengoptimalkan fluks yang mengalir. Tipe ini terdiri dari dua jenis yaitu tipe alur (*slotted*) dan tipe tanpa alur (*nonslotted*).

Pada tipe stator dengan alur ini, dapat dilihat bahwa arah fluks mengalir melewati celah antara sisi – sisi pada statornya. Sehingga celah udara yang dilewati oleh fluks ini lebih panjang jika dibandingkan dengan tipe stator dengan tanpa alur. Tentu saja hal ini akan mempengaruhi dari torsi beban yang ditimbulkan pada generator ini.

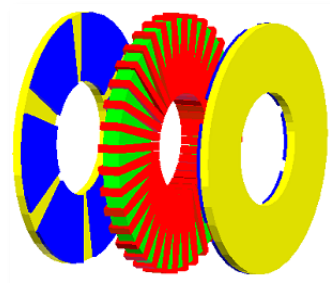


Gambar 2. 6 Generator Fluks Aksial Tipe Slotted [11]

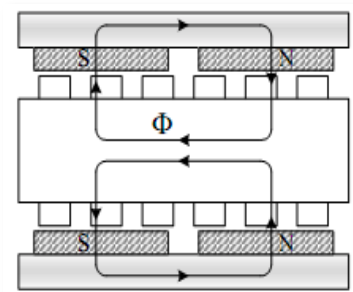


Gambar 2. 7 Aliran Fluks Tipe Slot [11]

Pada stator dengan tipe non slotted memiliki bentuk stator yang memiliki kumparan lebar dengan kumparan celah udara AC fasa banyak yang dibungkus oleh inti stator yang terhubung secara back-to-back.



Gambar 2. 8 Generator Aksial Tipe Tanpa Slot [11]



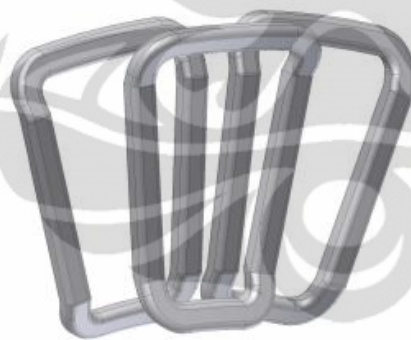
Gambar 2. 9 Aliran Fluks Tipe Tanpa Slot [11]

Pada stator dengan tipe tanpa alur biasanya antara kumparan diisi dengan resin yang berfungsi sebagai ketahanan dan menghasilkan transfer panas yang lebih baik. Tidak hanya itu, celah udara antara kumparan digunakan sebagai penghasil torsi.

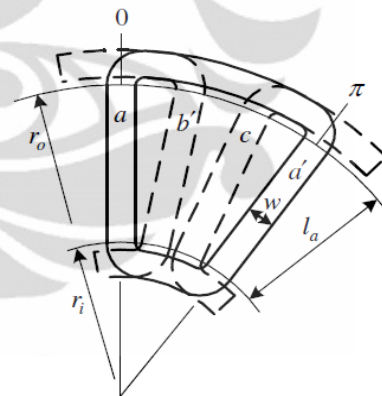
### 2.2.3.2 Stator Tanpa Inti Besi

Stator tanpa inti besi biasanya digunakan untuk putaran rendah dan torsi beban yang rendah. Tentunya hal ini disebabkan oleh tidak adanya inti besi yang terdapat didalamnya. Tipe ini memiliki keunggulan yakni dapat meminimalisir rugi yang terjadi karena efek *coging torque*, yakni efek tarik menarik antara inti besi dan magnet permanen pada generator aksial.

Pada stator tanpa inti besi susunan kumparannya terbagi menjadi 2 macam, ada yang tersusun secara *overlapping* dan *non-overlapping*. Pada stator yang susunan kumparannya secara *overlapping* susunan kumparannya berada tumpang tindih dengan kumparan yang lainnya. Tentunya dengan susunan phasa yang berbeda pada tiap phasanya.



Gambar 2. 8 Konstruksi Stator *Overlapping* [2]

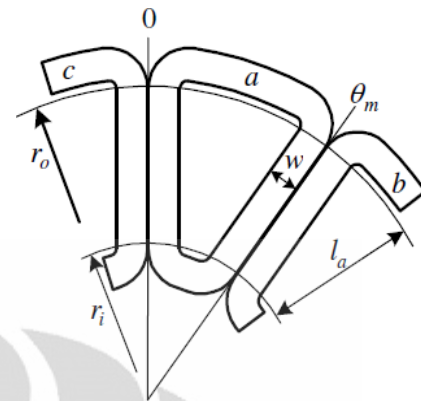


Gambar 2. 9 Sketematik Stator *Overlapping* [2]

Pada stator dengan susunan kumparan *non-overlapping*, suatu kumparan akan berada tepat disamping dan berimpit dengan kumparan lainnya. Dengan susunan phasanya saling berurutan sesuai dengan jumlah kumparan pada stator tersebut.

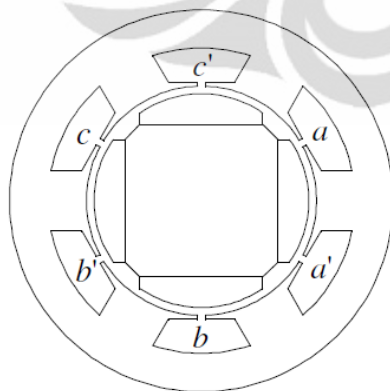


Gambar 2. 10 Konstruksi Stator *Non-overlapping* [2]

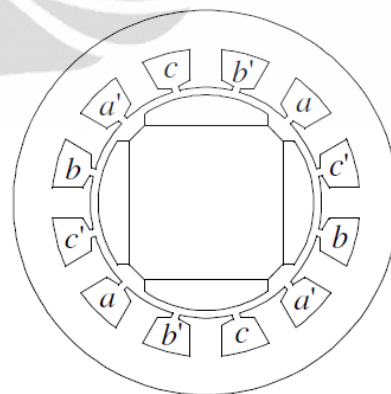


Gambar 2. 11 Skematik Stator *Non-overlapping* [2]

Stator pada generator aksial juga dapat dibedakan berdasarkan berdasarkan cara menyusun kumparan fase untuk desain generator tiga fase. Berdasarkan hal ini, stator dapat dibedakan menjadi dua jenis, yaitu susunan stator *concentrated* dan susunan stator *distributed*. Pada susunan *concentrated*, kumparan stator dengan fase yang sama disusun secara berdampingan. Sedangkan pada susunan *distributed*, kumparan stator dengan fase yang sama akan dipisahkan oleh kumparan fase yang lainnya. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 2. 12 Skematik Stator *Concentrated* [2]



Gambar 2. 13 Skematik Stator *Distributed* [2]

### 2.2.4 Rotor

Rotor pada generator FAMP terdiri dari dua komponen utama yakni magnet permanen dan tatakan penyangga yang berupa piringan besi. Tatakan penyangga harus merupakan konstruksi yang kokoh karena berfungsi untuk mempertahankan lebar celah udara antara kutub magnet permanen, sehingga pada umumnya tatakan penyangga ini terbuat dari inti besi lunak atau “soft iron”. Sedangkan untuk magnet permanen yang biasa digunakan adalah NdFeB karena kehandalannya yang sangat baik.

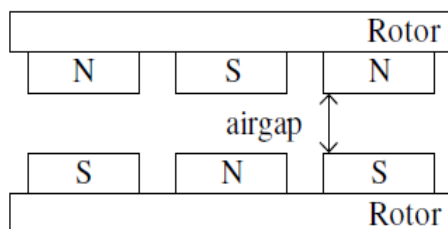
Terdapat dua cara memasang magnet permanen pada tatakan penyangga untuk generator FAMP.

#### 1. Magnet Permanen *Surface Mounted*.

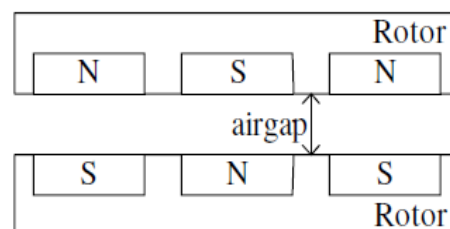
Pada tipe ini, magnet permanen hanya ditempelkan pada permukaan sisi bagian dalam dalam tatakan penyangga. Tipe ini memiliki keuntungan yaitu lebih mudah dalam proses pembuatannya sehingga lebih hemat biaya. Selain itu, magnet permanen yang menempel pada penyangga dapat bertindak sebagai kipas dengan efek ventilasi pada kumparan stator sehingga dapat menjadi sistem pendingin yang memungkinkan kerapatan arus stator yang lebih besar dan dapat pula mengurangi demagnetisasi pada magnet permanen saat rotor berputar lebih cepat.

#### 2. Magnet Permanen *Embedded*

Pada tipe ini, magnet permanen tidak hanya ditempelkan tapi juga ditanam pada sisi bagian dalam tatakan penyangga. Dengan konstruksi ini, permukaan rotor bagian dalam tetap rata sehingga celah udara (air gap) terlihat dengan jelas.



Gambar 2. 14 Magnet Permanen *Surface Mounted*[1]

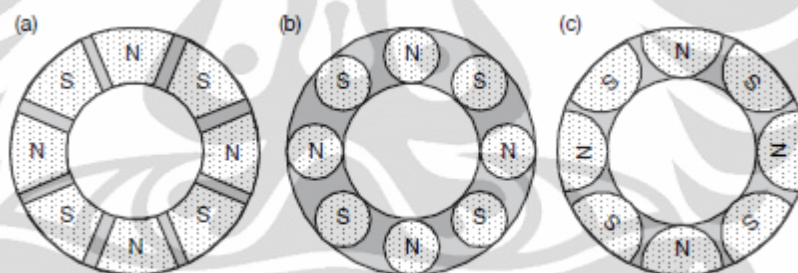


Gambar 2. 15 Magnet Permanen *Embedded*[1]

### 2.2.4.1 Bentuk magnet permanen.

Terdapat variasi bentuk kutub magnet permanen yang dapat digunakan pada generator FAMP, beberapa diantaranya yang biasa dipakai adalah bentuk persegi, sirkular, semi sirkular, dan trapezoidal (trapesium). Bentuk dari magnet permanen yang dipilih akan berpengaruh pada distribusi medan magnet pada celah udara. Selain itu, kualitas tegangan keluaran juga bergantung pada bentuk geometri magnet permanen dan jarak antar magnet yang berdampingan.

Pemilihan bentuk magnet yang dipakai pada generator FAMP sesuai dengan kriteria perancangan yang dibuat karena setiap bentuk memiliki kelebihan dan kekurangannya masing-masing. Bentuk persegi misalnya, bentuk ini secara proses manufaktur lebih mudah untuk dibuat sehingga lebih hemat biaya dan juga bentuk ini dapat menghasilkan tegangan keluaran yang lebih berbentuk sinusoidal. Namun, bentuk ini memiliki kerapatan fluks per kutub yang lebih rendah bila dibandingkan bentuk yang lain.



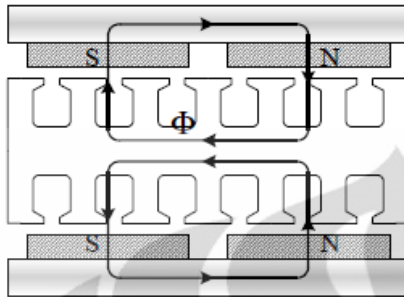
Gambar 2. 16 Contoh Bentuk Magnet Permanen pada Generator Fluks Aksial [12]

### 2.2.4.2 Kombinasi Magnet Permanen

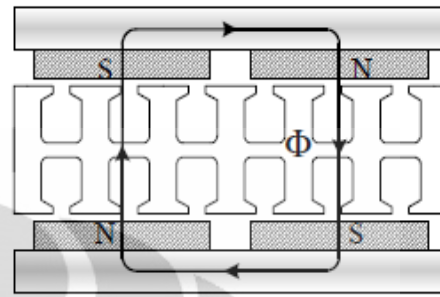
Rotor pada generator FAMP juga dapat dibedakan berdasarkan kombinasi magnet permanen pada rotornya, yaitu tipe NN (North-North) dan tipe NS (North-South). Kombinasi ini hanya dapat terjadi pada generator dengan 2 rotor atau lebih. Jika pada salah satu rotor dipasang magnet tipe N dan pada sisi rotor lain yang berhadapan juga dipasang magnet tipe N, maka dapat dikatakan bahwa rotor tersebut bertipe NN, sedangkan jika magnet yang dipasang berlawanan, tipe N pada satu sisi dan tipe S pada sisi yang lain, maka rotor tersebut bertipe NS. Namun, secara umum tipe NS memiliki keunggulan karena tipe ini cocok untuk



stator tanpa inti besi sehingga dapat mengurangi losses generator dan sekaligus meningkatkan kerapatan daya dan efisiensi generator.



Gambar 2. 19 Aliran Fluks Tipe NN [11]



Gambar 2. 20 Aliran Fluks Tipe NS [11]

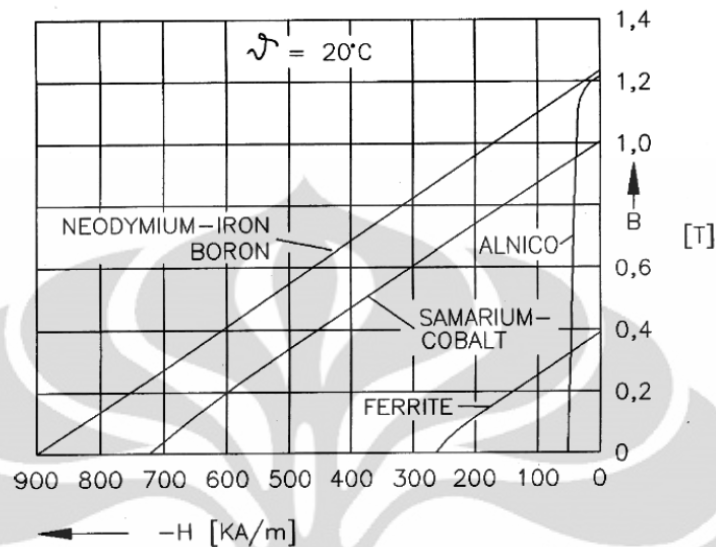
### 2.2.5 Magnet Permanen

Magnet permanen merupakan komponen utama untuk menghasilkan medan magnet pada celah udara. Medan magnet inilah yang kemudian akan diinduksikan pada kumparan stator untuk menjadi tegangan listrik. Sebagai penghasil medan magnet utama, medan magnet pada rotor merupakan medan magnet permanen yang kuat. Permanen magnet tidak memiliki kumparan penguat dan tidak menghasilkan desipasi daya elektrik. Seperti bahan ferromagnetik yang lain, permanent magnet dapat digambarkan oleh B-H hysteresis loop. Permanen magnet juga disebut hard magnetic material, yang artinya material ferromagnetik yang memiliki histeresis loop yang lebar. Histeresis loop yang lebar menunjukkan sedikitnya pengaruh induksi dari luar terhadap magnet tersebut (flux residu besar).

Ada 3 jenis pembagian material magnet permanen yang biasa digunakan pada mesin elektrik, yaitu :

- Alnicos (Al, Ni, co, Fe)
- Ceramics (ferrites), seperti barium ferrite  $BaO \times 6Fe_2O_3$  dan strontium ferrite  $SrO \times 6Fe_2O_3$
- Rare-earth material, seperti samarium-cobalt SmCo dan neodymium-iron-boron NdFeB.

Kurva demagnetisasi dari ketiga bahan feromagnetik tersebut dapat dilihat pada gambar berikut.

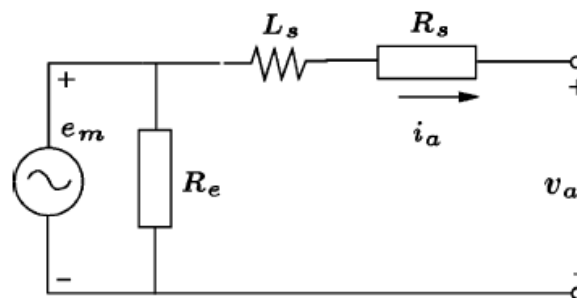


Gambar 2. 17 Kurva Karktetristik Material Magnet Permanen [12]

Dari kurva tersebut dapat terlihat bahwa Neodymium-iron-boron (NdFeB) merupakan bahan yang paling baik. NdFeB mempunyai densitas fluks yang lebih besar bila dibandingkan dengan bahan feromagnetik lainnya. Selain itu, Neodymium (Nd) merupakan unsur rare-earth yang sangat melimpah dibandingkan Sm sehingga harga NdFeB saat ini menjadi lebih terjangkau. Oleh karena itu, saat ini bahan feromagnetik jenis NdFeB lebih banyak digunakan untuk berbagai macam aplikasi.

### 2.2.6 Prinsip Kerja

Rangkaian ekivalen dari generator sinkron magnet permanen fluks aksial adalah sebagai berikut :



Gambar 2. 18 Rangkaian Ekivalen Generatorl Magnet Permanen Fluks Aksial [8]

Pada dasarnya, prinsip kerja generator fluks aksial hampir sama dengan generator konvensional yang mempunyai fluks radial. Perbedaan yang mendasar adalah pada generator fluks aksial medan magnet utama ( $B_f$ ) dihasilkan dari magnet permanen pada rotor sehingga tidak lagi memerlukan catu arus tambahan (sistem eksitasi) seperti pada generator konvensional pada umumnya. Medan magnet ( $B_f$ ) dari rotor kemudian akan memotong bidang lilitan pada stator yang kemudian akan menghasilkan fluks magnet pada stator, sesuai dengan persamaan :

$$\Phi_a = B_f A \cos \theta \quad (2.1)$$

Keterangan:  $A$  = Luas bidang yang ditembus oleh medan magnet  
 $\cos \theta$  = sudut antara  $B_f$  dengan bidang normal (neutral plane)

Penggerak mula (Prime Mover) yang sudah terkopel dengan rotor akan membuat rotor berputar pada kecepatan nominalnya. Perputaran rotor ini akan menyebabkan medan magnet  $B_f$  juga akan ikut berputar dengan suatu kecepatan ( $n$ ) tertentu. Adanya perputaran rotor inilah yang akan membuat medan  $B_f$  yang memotong lilitan stator berubah-ubah terhadap satuan waktu karena menghasilkan sudut tembus terhadap bidang normal stator yang berbeda-beda. Perubahan fluks terhadap satuan waktu yang memotong suatu permukaan konduktor akan menghasilkan ggl induksi sesuai dengan persamaan Hukum Faraday yakni :

$$\mathcal{E}_{ind} = -\frac{d\Phi_a}{dt} \quad (2.2)$$

Jika stator terdiri dari sebanyak  $N$  lilitan, maka persamaan di atas akan menjadi :

$$\mathcal{E}_{ind} = -N \frac{d\Phi_a}{dt} \quad (2.3)$$

Tanda negatif pada persamaan (2.3) di atas menunjukkan bahwa arah gaya gerak listrik berlawanan dengan tegangan sumber.

Dari persamaan (2.3) terlihat bahwa nilai ggl yang dihasilkan tergantung dari nilai perubahan fluks terhadap waktu.

Selain persamaan di atas, tegangan induksi pada lilitan stator juga dapat dibentuk dalam persamaan berikut :

$$\varepsilon_{ind} = N\Phi_a \omega \cos \omega t \quad (2.4)$$

Nilai maksimum dari persamaan diatas adalah:

$$\varepsilon_{max} = N\Phi_a \omega \quad \because \omega = 2\pi f \quad (2.5)$$

$$\varepsilon_{max} = 2\pi Nf\Phi_a \quad (2.6)$$

Penempatan kumparan pada stator menentukan tegangan output dari generator. Tiap pasang kumparan pada stator akan memiliki sudut fasa tertentu sehingga jika kita menempatkan 1 pasang kumparan saja, kita akan mendapatkan tegangan output dengan 1 fasa saja. Namun jika menempatkan 3 pasang kumparan pada stator dengan beda sudut 120 derajat, maka akan diperoleh tegangan keluaran dengan fasa yang juga berbeda 120 derajat.

Adapun hubungan antara frekuensi listrik yang dihasilkan dengan kecepatan medan putar rotor, yaitu :

$$f = \frac{nP}{120} \quad (2.7)$$

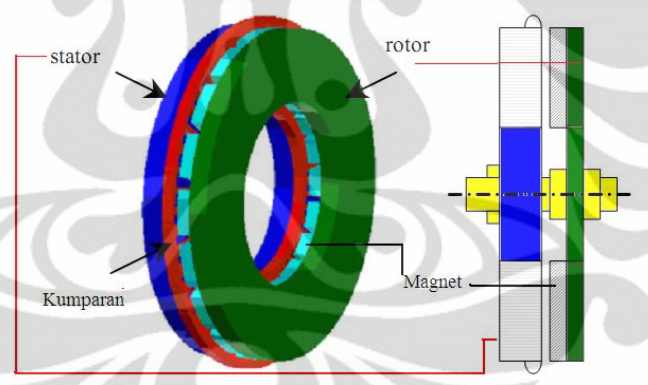
dengan,      n = kecepatan medan putar rotor (rpm)  
                   P = jumlah kutub pada rotor  
                   f = frekuensi listrik yang dihasilkan (Hz)

### 2.2.7 Tipe – Tipe Generator Fluks Aksial

Apabila melihat dari jumlah stator dan rotor yang digunakan untuk meningkatkan daya keluaran pada generator, generator fluks aksial dapat dibedakan menjadi beberapa tipe diantaranya: generator fluks aksial rotor tunggal stator tunggal, generator fluks aksial rotor ganda dan stator tunggal (eksternal rotor), generator fluks aksial stator ganda dan rotor tunggal (internal rotor), dan generator fluks aksial rotor dan stator banyak.

#### 2.2.7.1 Rotor dan Stator Tunggal (Cakram Tunggal)

Generator dengan rotor dan stator tunggal terdiri dari sebuah stator dan sebuah rotor. Generator ini terdiri dari 3 jenis yaitu *slotted stator*, *slotless stator*, dan *saliant pole stator*. Rotornya terdiri dari sebuah piringan besi kuat yang tertanam magnet di dalamnya. Sedangkan statornya terdiri dari kumparan jenis cincin yang tertanam di epoxy seperti material dan lempeng besi.



Gambar 2. 19 Generator Fluks Aksial Cakram Tunggal

Generator ini biasa digunakan pada torsi kecil. Sehingga sangat efektif, bila digunakan pada generator angin dengan kapasitas penggerak yang kecil.

#### 2.2.7.2 Rotor Ganda dan Stator Tunggal

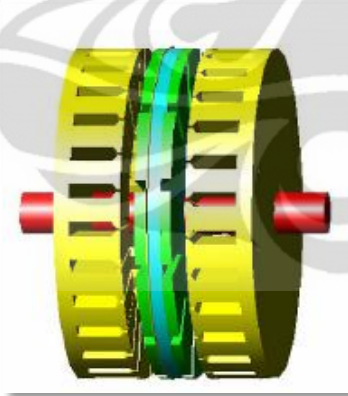
Pada generator dengan tipe yang memiliki 2 rotor dan 1 stator ini juga dibedakan menjadi dua tipe berdasarkan arah fluksnya yaitu tipe N-N dan tipe N-S. Tidak hanya melihat dari pergerakan fluksnya, dapat melihat perbandingan pula dari ukuran diameter stator dari kedua tipe tersebut. Pada diameter tipe N-S lebih

besar daripada tipe N-N, ini disebabkan lilitan pada tipe N-N lebih pendek daripada tipe N-S.

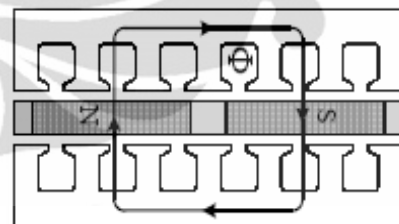
Selain itu, tipe ini juga dibagi lagi dengan bentuk stator, yakni stator berinti seperti yang telah dijelaskan, dan stator tanpa inti.

### 2.2.7.3 Stator Ganda dan Rotor Tunggal

Pada generator yang memiliki 2 stator dan sebuah rotor atau dikenal sebagai tipe stator eksternal memiliki perbedaan yang jelas dengan konstruksi pada rotor eksternal atau tipe yang memiliki 2 rotor dan sebuah stator. Pada Tipe ini pun juga memiliki perbedaan konstruksi rotor dengan tipe rotor eksternal. Tidak ada variasi tipe N-N atau N-S pada rotornya, tetapi variasi bentuk terjadi pada konstruksi statornya. Hanya saja pada tipe eksternal stator, konstruksi rotornya tidak semudah dengan pada tipe rotor eksternal. Akan tetapi, dengan alasan pergerakan fluks utamanya yang tidak melewati rotornya. Sehingga pada tipe ini sangat efektif bila digunakan pada mesin dengan momen inersia yang kecil yang memiliki sedikit besi pada bagaian rotornya.



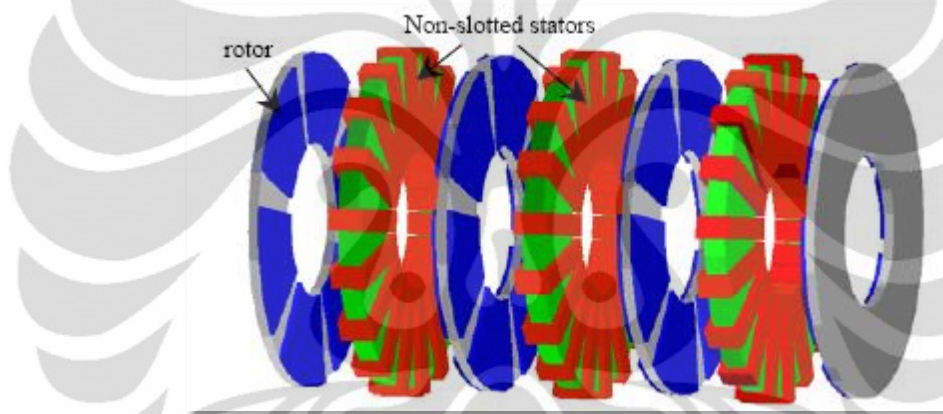
Gambar 2. 24 Bentuk Generator Aksial dengan Stator Ganda [13]



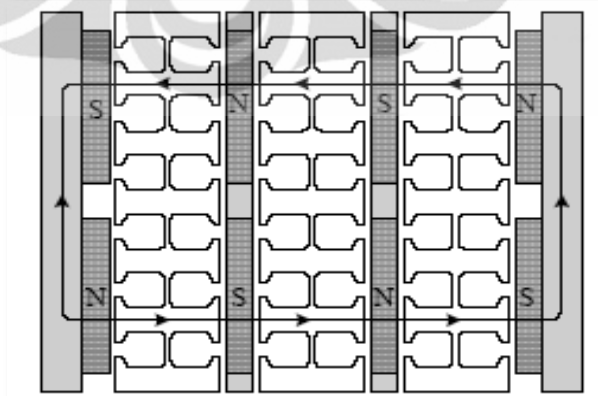
Gambar 2. 25 Aliran Fluks pada Tipe Eksternal Stator [11]

#### 2.2.7.4 Rotor dan Stator Banyak

Pada generator tipe ini memiliki lebih dari dua stator atau dua rotor. Dengan alasan kebutuhan akan tenaga yang lebih besar (torsi), generator ini didesain. Hanya saja pada generator ini cukup besar jika dibandingkan pada dua tipe sebelumnya telah dibahas di atas. Tidak hanya itu, pada generator ini juga memiliki transfer panas yang tidak begitu baik dibandingkan dengan kedua tipe sebelumnya. Pada generator ini juga memiliki tipe N-N dan tipe N-S.



Gambar 2. 20 Struktur Generator Aksial *Multi Stage* [11]



Gambar 2. 21 Arah Fluks pada Generator Aksial *Multi Stage* [11]



### 2.2.8 Kerapatan Medan Magnet Permanen pada Celah Udara

Pada sub bab ini akan dijelaskan tentang perumusan kerapatan fluks magnetik pada celah udara. Sistem kordinat dari perumusan kerapatan fluks magnetiknya dapat dilihat pada Gambar 2.28. Gambar ini merupakan penampang melintang dari mesin dilihat secara radial untuk mesin *double rotor single stator*. x dan y menunjukkan keliling dan arah aksial. Kerapatan fluks pada posisi y untuk tiap kutub magnet dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut:

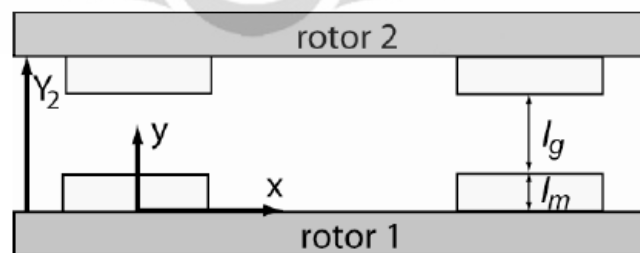
$$B_{y1}(x) = \left( \frac{\hat{J}_n \mu_0 \sinh(u_n l_m)}{u_n \sinh(u_n Y_2)} \cosh(u_n (Y_2 - y)) \right) \cos(u_n x) \quad (2.8)$$

$$B_{y2}(x) = \left( \frac{\hat{J}_n \mu_0 \sinh(u_n l_m)}{u_n \sinh(u_n Y_2)} \cosh(u_n (y)) \right) \cos(u_n x) \quad (2.9)$$

Dimana

$$Y_2 = l_g + 2 l_m \text{ dan } u_n = 2\pi n / \lambda ; \lambda = 2\pi R_m / p$$

P adalah jumlah pasang kutub,  $R_m$  adalah jari-jari inti.  $B_{y1}$  adalah kerapatan fluks pada titik y karena pengaruh rotor 1 dan  $B_{y2}$  adalah kerapatan fluks pada titik y karena pengaruh rotor 2. hal ini ditunjukkan seperti pada gambar berikut ini.



Gambar 2. 22 Model dan Koordinat Persebaran Kerapatan Fluks [1]

Selain medan magnet dari rotor, medan magnet juga dihasilkan oleh stator. Medan magnet tersebut disebut juga medan magnet jangkar. Medan magnet ini

mengakibatkan reaksi jangkar. Medan magnet jangkar ini diakibatkan adanya arus yang mengalir pada stator yang kemudian menghasilkan medan magnet pada celah udara. Medan magnet tersebut dapat menambah atau mengurangi nilai medan magnet yang dihasilkan oleh rotor.[1]

### 2.2.9 Parameter Generator

Untuk menentukan besar emf, seluruh nilai fluks dari rotor dan stator dijumlahkan dengan cara superposisi. Flux linking dari sebuah mesin dapat dinyatakan dengan persamaan berikut ini:

$$\lambda_{slice}(\theta) = N \iint_S B \cdot dS \quad (2.10)$$

Dimana S merupakan luas dari tiap potongan yang dihitung. Jumlah dari fluks linking tiap potongan radial merupakan fluks total yang dihasilkan.

$$\lambda_{coil}(\theta) = \sum_1^{slices} \lambda_{slice}(\theta) \quad (2.11)$$

Dengan hukum faraday, dapat dengan mudah dicari besarnya induksi yang terjadi di stator. Induksi tersebut menghasilkan emf pada stator. Yang dinyatakan oleh persamaan berikut ini.[1]

$$e_{coil}(t) = \frac{\Delta \lambda_{coil}}{\Delta t} \quad (2.12)$$

Karena satu lilitan phasa terdiri dari kombinasi dari seri atau paralel kumparan yang terinduksi medan magnet. Maka total induksi medan magnet dari tiap phasa dapat dirumuskan menjadi:

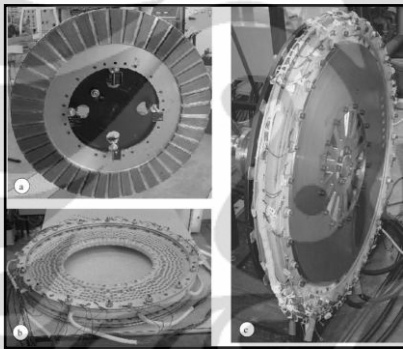
$$e_{phase}(t) = \sum_1^{series\ coils} e_{coil}(t) \quad (2.13)$$

## BAB 3

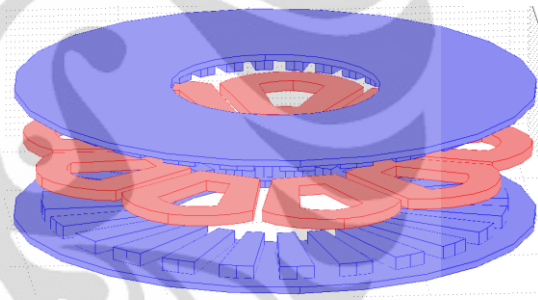
### PEMODELAN DAN SIMULASI

#### 3.1 Desain Model Generator

Desain model yang dibuat dalam skripsi ini adalah sebuah generator magnet permanen fluks aksial tanpa inti stator (GMPFATIS) dengan rotor ganda eksternal dan stator tunggal internal. Jenis generator yang digunakan sebagai model merupakan tipe cakram dimana konstruksi generator berbentuk seperti piringan yang berlapis yang terdiri dari stator tunggal yang berada diantara dua buah rotornya, seperti yang ditunjukkan pada gambar berikut.



Gambar 3. 1 Generator Fluks Aksial [6]



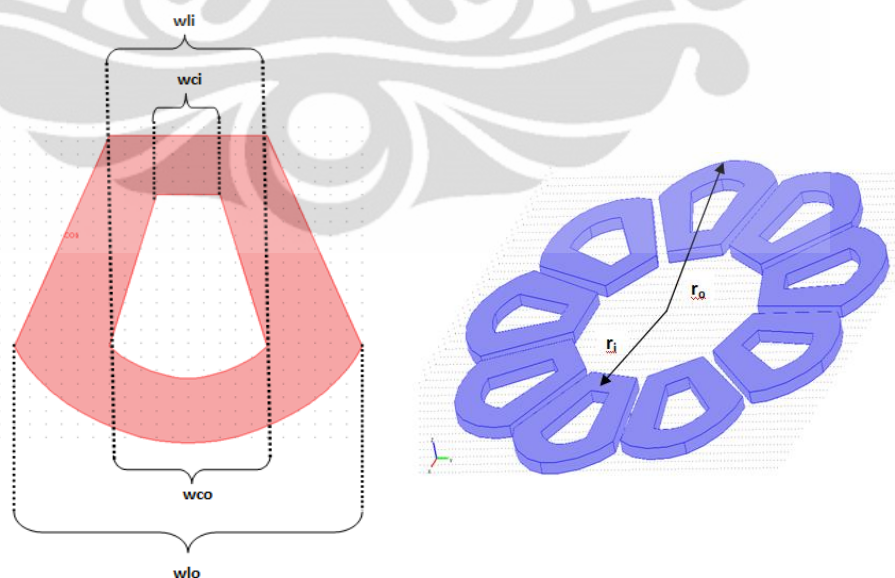
Gambar 3. 2 Model Generator Aksial pada Simulasi

Generator yang didesain untuk simulasi merupakan desain yang sesuai dengan besar generator sesungguhnya (skala 1:1). Dalam pemodelan ini, ukuran dan dimensi generator yang dibuat mengacu pada beberapa referensi jurnal yang ada. Desain generator ini terdiri dari 3 bagian utama, yakni bagian rotor, stator dan bagian celah udara (*air gap*). Dalam pelaksanaannya dibuat beberapa model generator berdasarkan bentuk magnet permanen pada rotor dan juga lebar celah udara pada generator. Namun setiap desain dibuat dengan material dan ukuran yang sama. Selain itu, setiap juga memiliki jumlah kutub yang sama yaitu 24 pasang kutub.

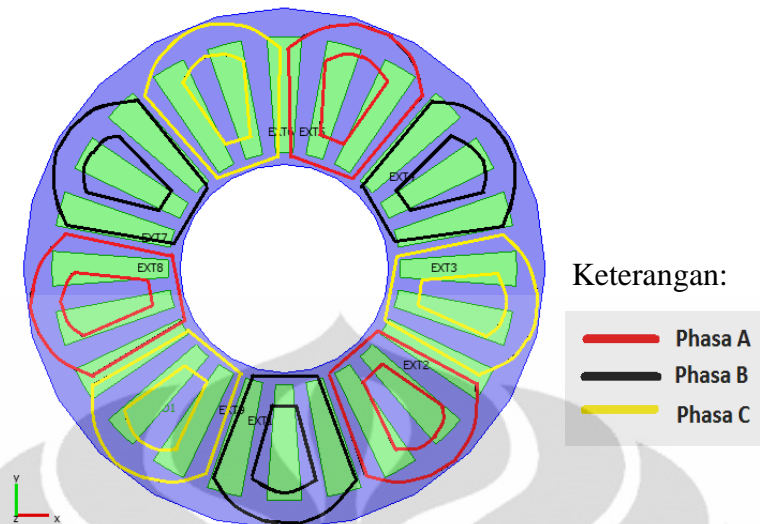
Desain tersebut kemudian dijalankan dengan beberapa nilai kecepatan putar yang berbeda untuk kemudian akan dibandingkan besar fluks dan tegangan yang dihasilkan. Dari hasil simulasi ini diharapkan akan diperoleh kesimpulan tentang seberapa besar pengaruh bentuk magnet permanen pada rotor terhadap fluks dan tegangan yang dihasilkan generator.

### 3.1.1 Stator

Stator yang digunakan pada model generator adalah tipe stator tanpa inti (coreless) sehingga model stator hanya berupa kumpulan lilitan kawat yang bagian tengahnya adalah celah udara. Untuk setiap model generator yang dibuat, desain stator selalu dibuat sama dan identik. Stator yang dibuat diatur agar menghasilkan tegangan keluaran 3 fase (a-b-c) dan tiap fase terdiri dari 3 kumparan stator. Jadi pada setiap model generator terdapat 9 buah kumparan stator. Tiap fase yang sama dari stator terpisah 120 derajat konstruksi, dan terhubung secara seri untuk fase yang sama. Susunan kumparan stator pada generator dibuat tidak menumpuk (*non-overlapping*) dengan susunan fase terdistribusi (*distributed design*).



Gambar 3. 1 Konstruksi Stator pada Model



Gambar 3. 2 Distribusi Kumbaran Stator

Tebal stator yang digunakan disesuaikan dengan tebal magnet permanen dan lebar celah udara pada generator. Perhitungan tebal stator ini dilakukan sesuai dengan referensi [1]. Bentuk stator pada model dibuat dengan bentuk trapezoidal. Pemilihan bentuk ini berdasarkan alasan karena hasil tegangan induksi pada bentuk stator trapezoidal lebih baik bila dibandingkan dengan bentuk rectangular.[1]

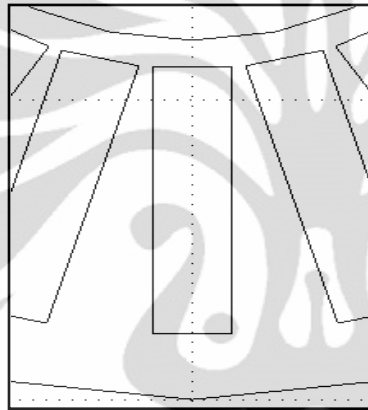
Untuk ukuran detail dari model stator yang dibuat dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 3. 1 Ukuran Geometri Model Stator

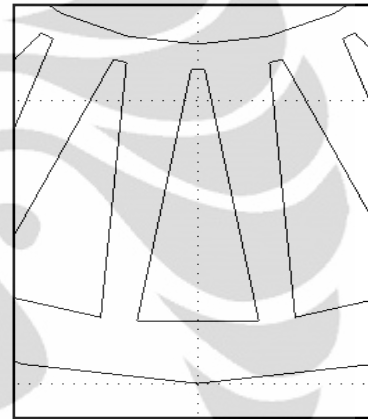
Dimensi	Keterangan	Jumlah	Satuan (m)	Bidang
$t_s$	Ketebalan stator		0.008	z
$r_i$	Jari-jari dalam stator		0.083	x/y
$r_o$	Jari-jari luar stator		0.197	x/y
$w_{ci}$	Lebar lubang stator dalam		0.02	x/y
$w_{co}$	Lebar lubang stator luar		0.05	x/y
$w_{ji}$	Lebar stator dalam		0.05	x/y
$w_{lo}$	Lebar stator luar		0.11	x/y
$N$	Jumlah lilitan stator	100		
$N_s$	Jumlah kumparan	9		
$N_{ph}$	Jumlah phasa pada stator	3		

### 3.1.2 Rotor

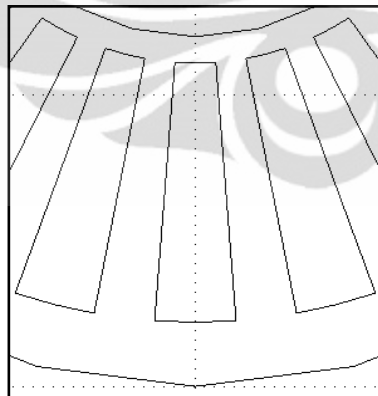
Generator yang dibuat pada model mempunyai dua buah rotor identik yang berhadapan satu sama lain, atau disebut rotor ganda. Untuk masing-masing terdiri dari 2 bagian yaitu tatakan peyangga (*yoke*) dan magnet permanen. Jumlah kutub yang dipakai adalah 24 pasang kutub. Ukuran dan spesifikasi rotor untuk tiap model dibuat sama kecuali bentuk magnet permanennya. Bentuk magnet permanen pada rotor divariasikan menjadi empat bagian yaitu, bentuk *rectangular*, yang dipakai sebagai bentuk acuan, bentuk *trapezoidal*, bentuk *annular*, dan bentuk campuran antara *rectangular* dan *trapezoidal*.



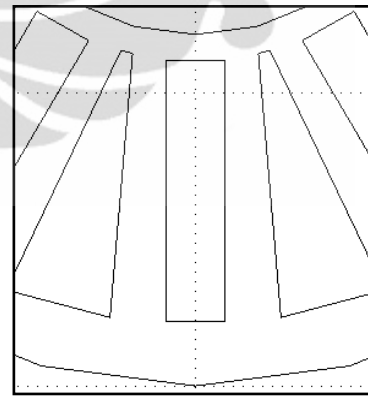
Gambar 3. 3 Bentuk *Rectangular*



Gambar 3. 4 Bentuk *Trapezoidal*



Gambar 3. 5 Bentuk *Annular*



Gambar 3. 6 Bentuk Campuran

Pemakaian keempat bentuk ini berdasarkan pertimbangan sebagai berikut :

1. Bentuk *rectangular* merupakan bentuk yang paling umum digunakan. Hal ini disebabkan karena secara proses manufaktur lebih mudah untuk

dibuat sehingga lebih hemat biaya. Selain ini bentuk ini yang menjadi dimensi standar pasar sehingga bentuk ini mudah untuk ditemukan.

2. Bentuk *trapezoidal* dan *annular* merupakan bentuk yang sering ditemukan pada beberapa referensi jurnal yang dijadikan acuan. Artinya bentuk ini juga menjadi pilihan favorit dalam pembuatan generator aksial.
3. Bentuk campuran dipilih hanya sebagai pembanding diantara ketiga bentuk lainnya.

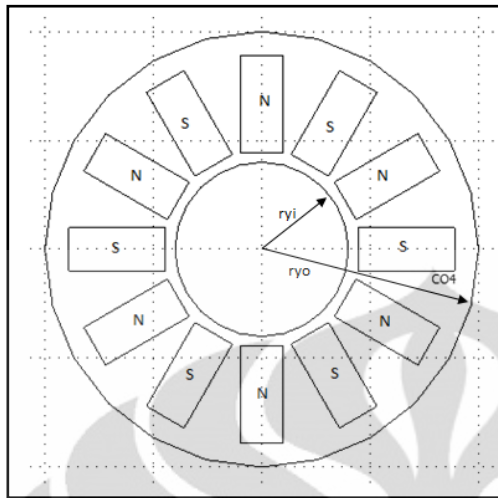
Pada semua bentuk magnet permanen yang digunakan, ukuran luas permukaan sisi yang menghadap stator semuanya dibuat dengan ukuran yang sama yakni sebesar  $0,00178 \text{ m}^2$ . Sebagai contoh, bentuk *rectangular* memiliki panjang  $0,089 \text{ m}$  dan lebar  $0,02 \text{ m}$  sehingga luasnya  $0,00178 \text{ m}^2$ . Untuk bentuk *trapezoidal* memiliki sisi pendek  $0,004 \text{ m}$ , sisi panjang  $0,036 \text{ m}$ , dan tinggi  $0,089 \text{ m}$  sehingga luasnya pun  $0,00178 \text{ m}^2$ .

Magnet permanen dipasang secara *surface mounted* pada tatakan penyangga rotor. Distribusi magnet permanen pada yang digunakan disusun dengan tipe NS, artinya magnet permanen yang berdampingan akan saling berlawanan kutub, baik dengan yang di samping kiri atau pun yang di kanannya, bahkan juga berlawanan kutub dengan magnet permanen yang ada di seberangnya. Pemilihan tipe NS ini memang tepat untuk generator aksial tanpa inti agar kerapatan fluks menjadi lebih besar. Pada desain rotor ganda tipe NS, pengaturan magnet permanen disusun secara selang-seling. Untuk magnet permanen yang berhadapan dan bersebelahan di pasang magnet permanen yang berlainan kutub. [5]

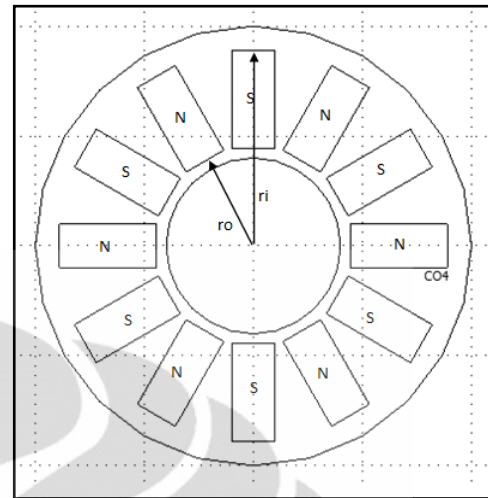
Tebal tatakan penyangga yang digunakan adalah setengah kali ketebalan magnet permanennya [1]. Jari –jari luar magnet permanen pada model dibuat dua kali lipat jari-jari dalamnya. Hal ini perbandingan tersebut merupakan yang terbaik untuk menghasilkan tegangan keluaran yang optimum.[7][10]

Magnet permanen yang digunakan pada model adalah NdFeB (neodymium-iron-boron) dengan  $B_r 1,27 \text{ T}$  dan  $H_c = 905 \text{ kA/m}$ .

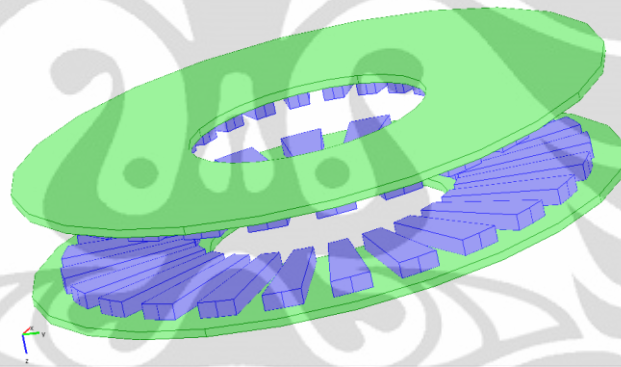




Gambar 3. 9 Jari-jari Tatakan  
Peyangga Rotor



Gambar 3. 10 Jari-jari Magnet Permanen



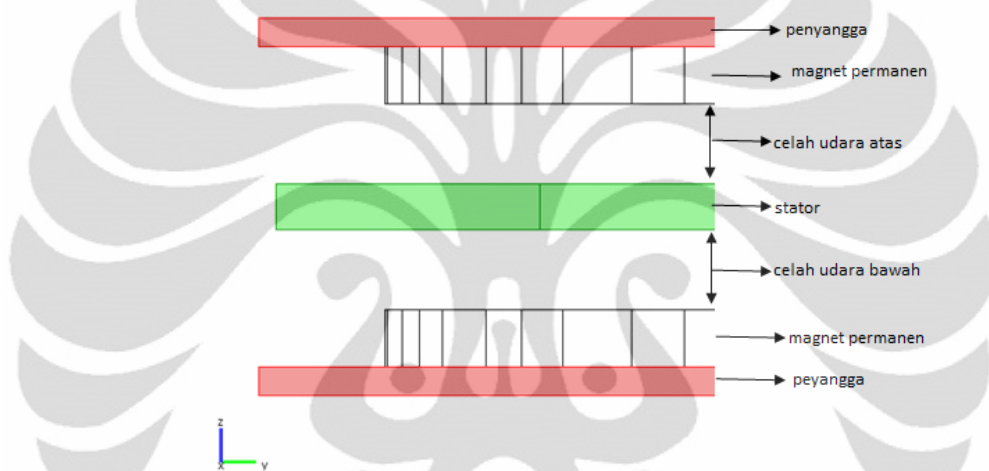
Gambar 3. 7 Konstruksi Rotor pada Model

Tabel 3. 2 Ukuran Geometri Model Rotor

Dimensi	Keterangan	Satuan (m)	Bidang
$r_{yo}$	Jari-jari penyangga rotor bagian luar	0.08	x/y
$r_{yi}$	Jari-jari penyangga rotor bagian dalam	0.2	x/y
$l_y$	Tebal penyangga rotor	0.005	z
$r_o$	Jari-jari luar magnet permanen	0.178	x/y
$r_i$	Jari-jari dalam magnet permanen	0.089	x/y
$w_o$	Lebar magnet permanen bagian luar	0.02	x/y
$w_i$	Lebar magnet permanen bagian dalam	0.02	x/y
$l_m$	Tebal magnet permanen	0.01	z

### 3.1.3 Celah Udara (*air gap*)

Pada generator aksial, celah udara merupakan komponen yang memegang peranan yang sangat penting karena melalui celah ini lah tegangan dapat diinduksikan pada kumparan stator. Celah udara ini juga menjadi salah satu karakteristik khas dari setiap desain model yang dibuat. Kontruksi generator harus dibuat sedemikian rupa sehingga lebar celah udara tidak berubah saat generator berputar. Karena jika jarak ini berubah, maka karakteristik generator juga akan berubah.



**Gambar 3. 8 Penampang Radial Model Generator**

Pada jurnal [1], celah udara yang dimaksud adalah jarak antara magnet permanen bagian atas dan bawah. Namun dalam pemodelan skripsi ini, celah udara yang dimaksud adalah jarak antara magnet permanen bagian bawah ke stator atau jarak antara stator ke magnet permanen bagian atas. Jadi, pada model yang dibuat celah udara terbagi menjadi dua bagian, yaitu celah udara bawah dan celah udara atas.

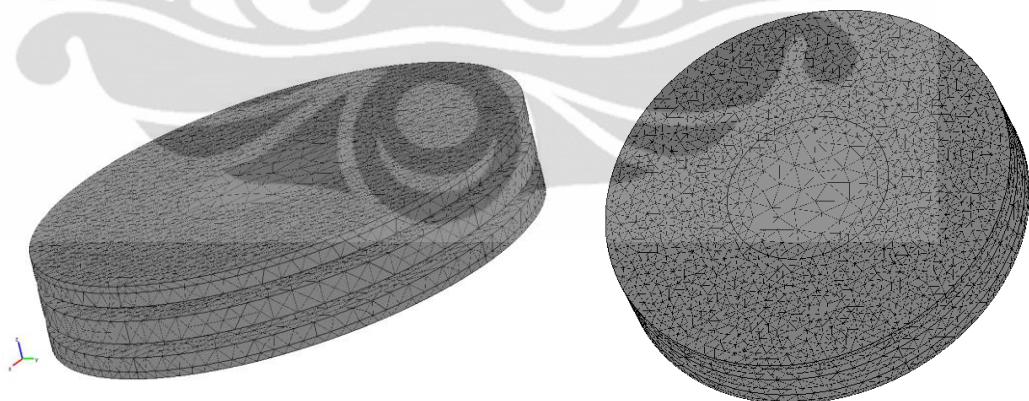
Pada skripsi ini dibuat beberapa model yang memiliki lebar celah udara yang berbeda. Lebar celah udara tersebut mulai dari 4 mm, 6 mm, 8 mm, dan 10 mm. Namun perlu dicatat bahwa lebar yang menjadi patokan pada desain awal adalah yang lebar celah udaranya 6 mm. Selain itu saat model divariasikan lebar celah udaranya, maka semua model disimulasikan dengan kecepatan putar yang sama yakni 300 rpm.

Tabel 3. 3 Variasi Celah Udara pada Model Generator

Bentuk magnet permanen	Celah udara (g)		Satuan (m)	Bidang
Rectangular, Trapezoidal, Annular, Campuran	g <sub>1</sub>	Atas	0.006	z
		Bawah	0.006	z
	g <sub>2</sub>	Atas	0.004	z
		Bawah	0.004	z
	g <sub>3</sub>	Atas	0.008	z
		Bawah	0.008	z
	g <sub>4</sub>	Atas	0.01	z
		Bawah	0.01	z

### 3.2 Simulasi

Setelah membuat beberapa desain model yang dibutuhkan langkah selanjutnya adalah mensimulasikan model-model tersebut. Simulasi yang digunakan adalah dengan perangkat lunak computer berbasis metode *FEM (Finite Element Method)*. Dimana setiap bagian dibagi menjadi potongan-potongan limas segitiga kecil terhingga (*Mesh*). Setiap bagian dihitung besarnya komponen variabel yang ingin dicari.



Gambar 3. 9 Meshing pada Model

Sebelum melakukan simulasi langkah pertama yang harus dilakukan setelah membuat geometri model generator adalah memasukkan berbagai parameter dan persamaan yang dibutuhkan, seperti persamaan fluks magnet yang

tertangkap pada kumparan stator, besar medan magnet pada magnet permanen, penentuan komponen yang berputar dan tidak, dan lain sebagainya.

Simulasi dilakukan secara 2 tahap, yakni tahap pertama model dengan lebar celah udara yang sama, yakni 6 mm disimulasikan pada beberapa nilai kecepatan putar mulai dari 150 rpm, 300 rpm, 500 rpm, dan 800 rpm. Kemudian simulasi dilakukan dengan mengubah parameter lebar celah udara (*air gap*) pada generator, mulai dari 4mm, 6mm, 8 mm, dan 10 mm. tahap kedua ini dilakukan pada satu nilai kecepatan putar saja, yakni pada kecepatan 300 rpm. Kedua tahap simulasi ini dilakukan untuk semua bentuk magnet permanen pada rotor, mulai dari *rectangular*, *trapezoidal*, *annular*, dan campuran.

Oleh karena data dari simulasi tidak bisa diambil secara kontinu, maka pengambilan data pada simulasi ini dilakukan dengan cara diskrit (pencuplikan). Untuk menghasilkan suatu periode gelombang, mula-mula gelombang tersebut dibagi menjadi 20 bagian titik waktu. Besarnya perubahan titik waktu tersebut disesuaikan dengan periode gelombangnya. Misalnya untuk gelombang dengan frekuensi 50 Hz, didapat periode satu gelombang sebesar 0.02 detik. Hasil tersebut sesuai dengan persamaan di bawah ini.

$$T = \frac{1}{f}$$

Keterangan :

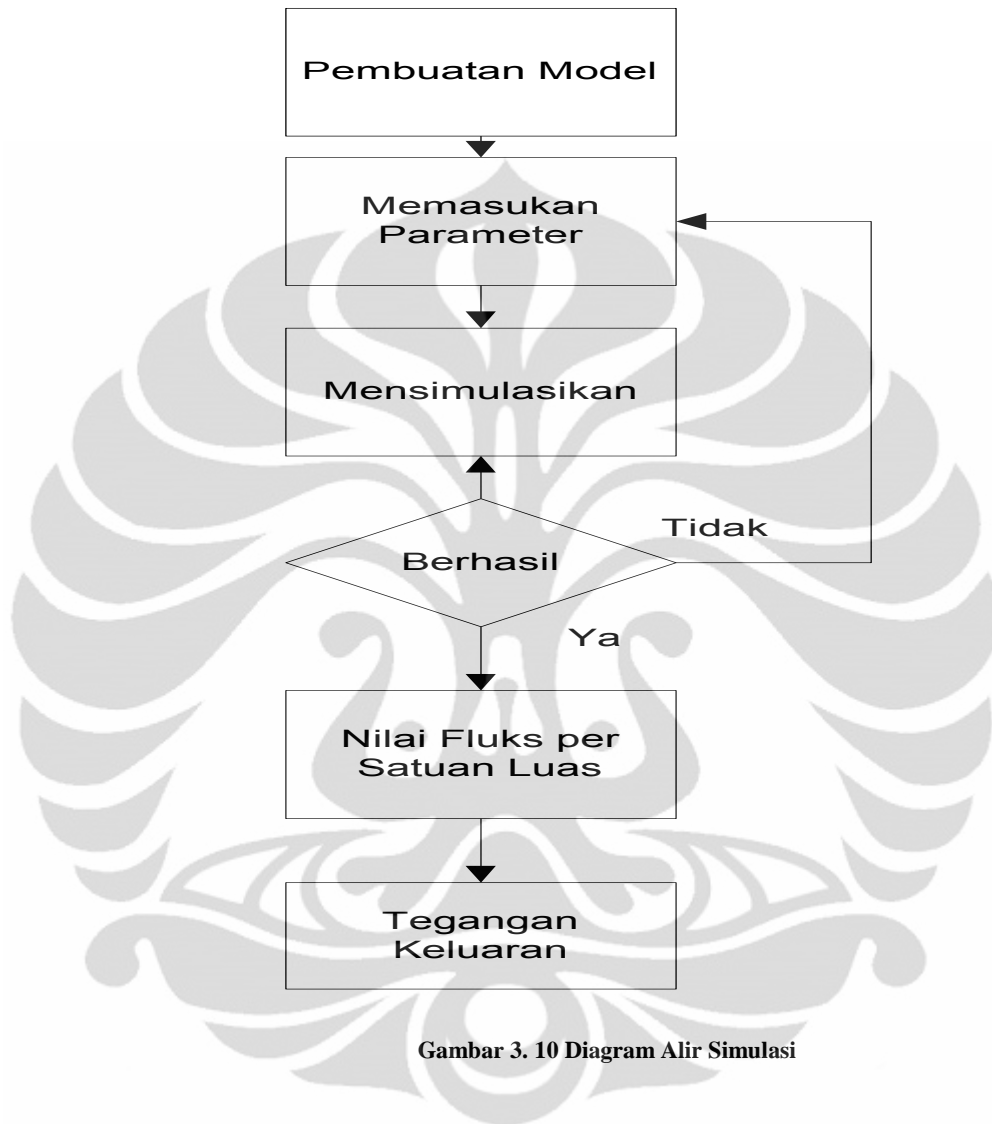
f = frekuensi yang ingin dibangkitkan (Hz)

T = periode 1 gelombang (s)

Periode tersebut kemudian dibagi menjadi 20 bagian titik waktu, sehingga didapat waktu untuk pencuplikan adalah sebesar  $0.02/20 = 0.001$  detik.

Data yang diperoleh dari hasil simulasi berupa nilai fluks magnet yang tertangkap pada kumparan stator untuk interval waktu yang ditentukan. Kemudian untuk menghasilkan nilai tegangan nilai fluks tersebut diolah sesuai dengan persamaan-persamaan yang ada. Data ini kemudian diplot dalam bentuk grafik menggunakan Microsoft Excel 2007. Data dan grafik ini yang kemudian dibandingkan dan dianalisis.

Berikut ini adalah diagram alir dari simulasi yang dijalankan



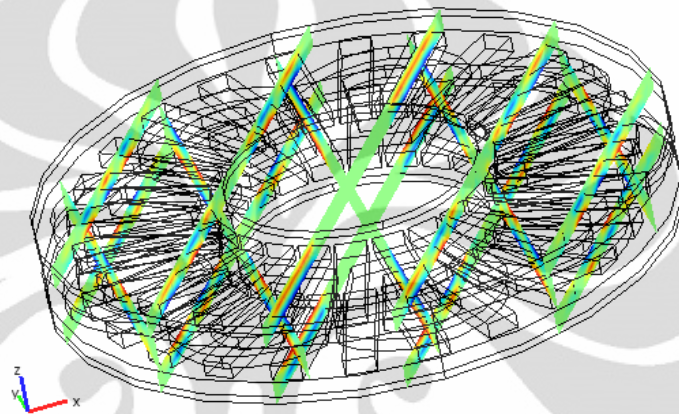
Gambar 3. 10 Diagram Alir Simulasi

## BAB 4

### HASIL SIMULASI DAN ANALISIS

#### 4.1 Data Hasil Simulasi

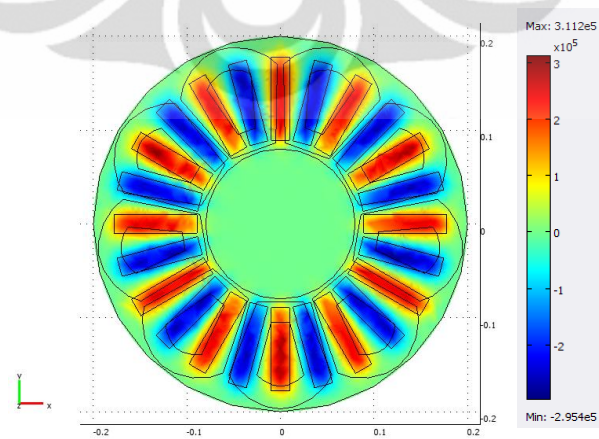
Berikut ini adalah contoh model generator yang dipakai pada saat simulasi.



Gambar 4. 1 Model Generator saat Simulasi

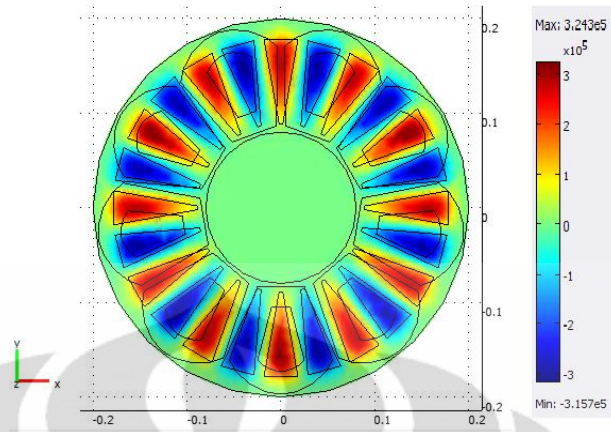
#### 4.1.1 Distribusi Medan Magnet

Berikut ini merupakan gambaran distribusi medan magnet yang terjadi pada model generator saat simulasi.

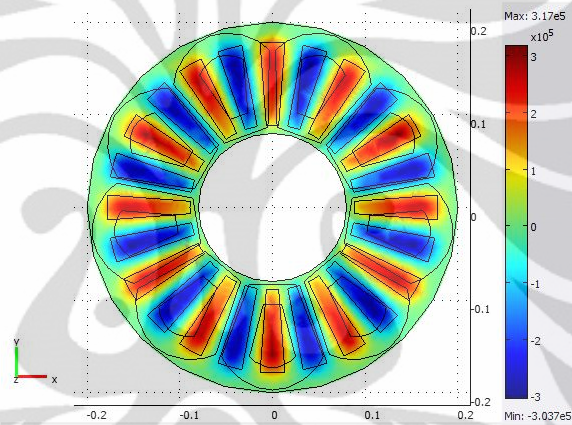


Gambar 4. 2 Distribusi Medan Magnet Rotor Bentuk Rectangular

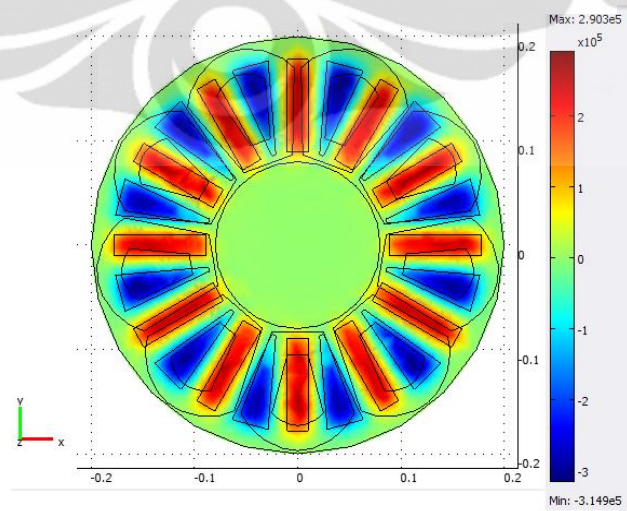




**Gambar 4. 3 Distribusi Medan Magnet Rotor Bentuk Trapezoidal**



**Gambar 4. 4 Distribusi Medan Magnet Rotor Bentuk Annular**

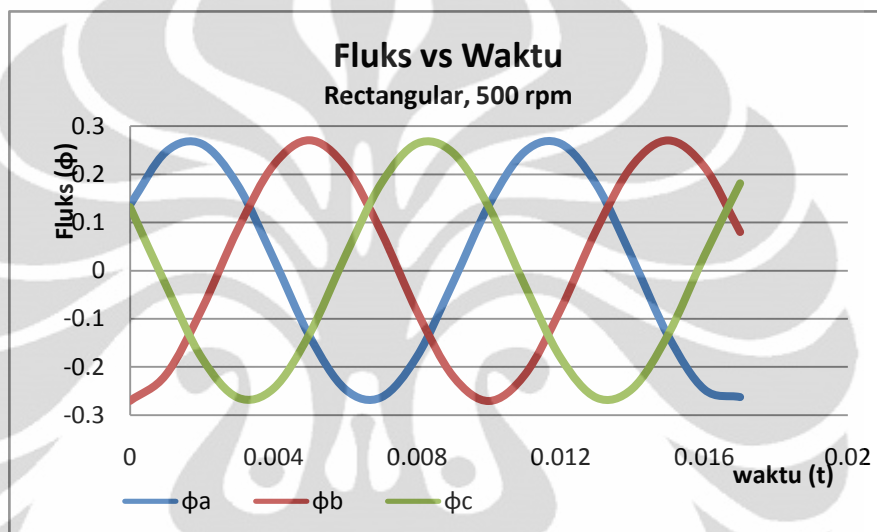


**Gambar 4. 5 Distribusi Medan Magnet Rotor Bentuk Campuran**

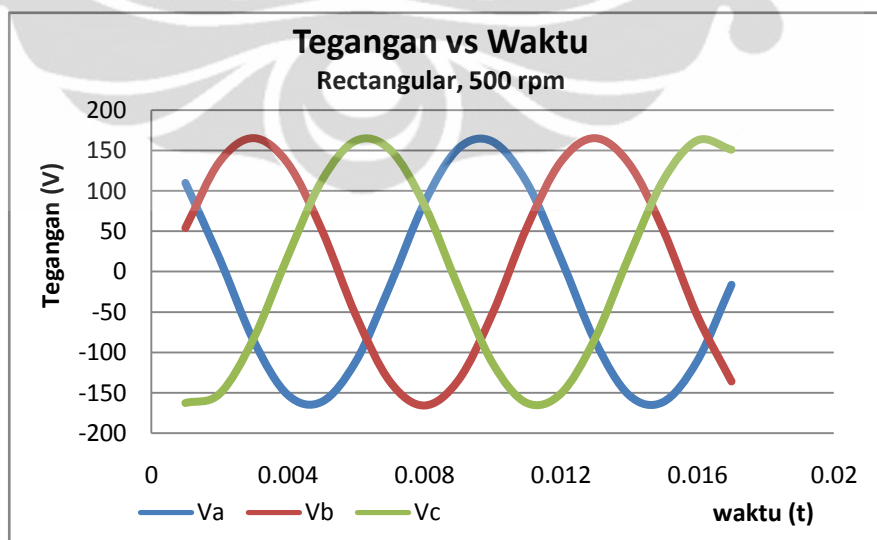


#### 4.1.2 Hasil Simulasi Terhadap Perubahan Kecepatan

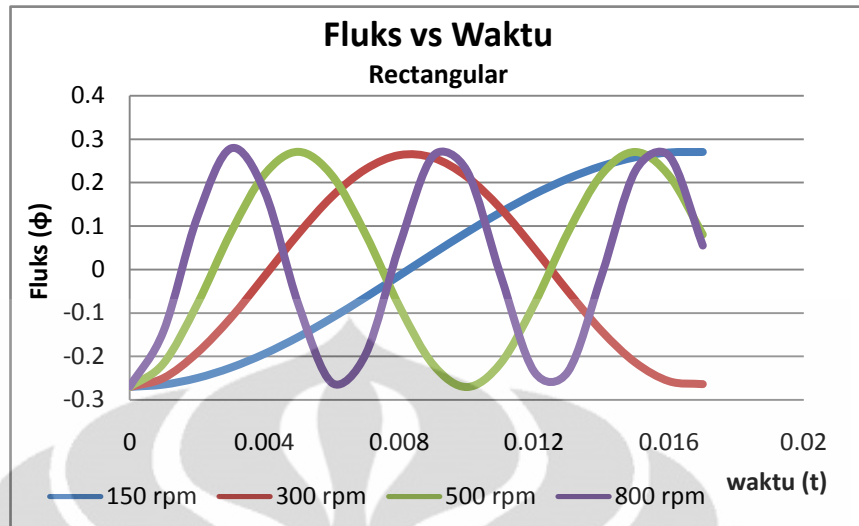
Berikut merupakan data hasil simulasi dari model yang dilakukan yang sudah dibuat dalam bentuk grafik. Data ini merupakan hasil simulasi empat model magnet permanen yang telah dibuat terhadap perubahan kecepatan putar. Data yang ditampilkan hanya sebagian dari sekian banyak data yang ada. Untuk mengetahui data secara lengkap dari hasil simulasi yang dilakukan dapat dilihat pada lembar Lampiran.



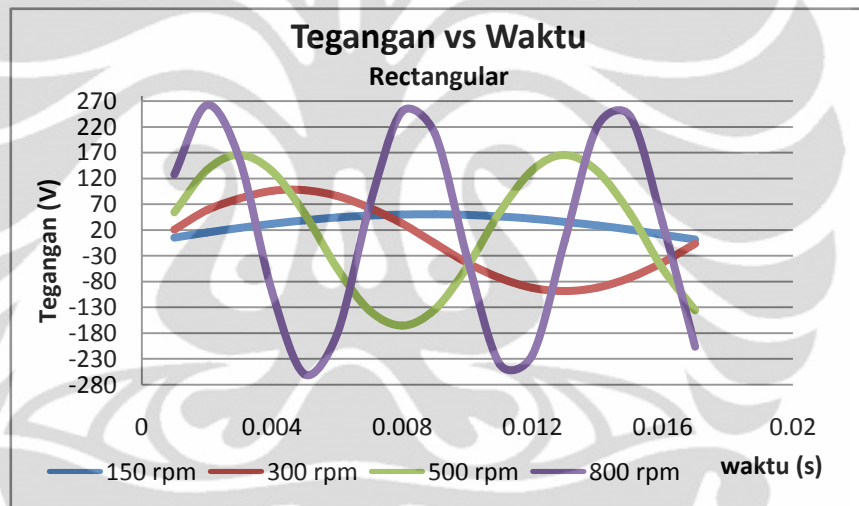
Gambar 4. 6 Grafik Hubungan Fluks terhadap Waktu pada Kecepatan Putar 500 rpm untuk Bentuk Rectangular



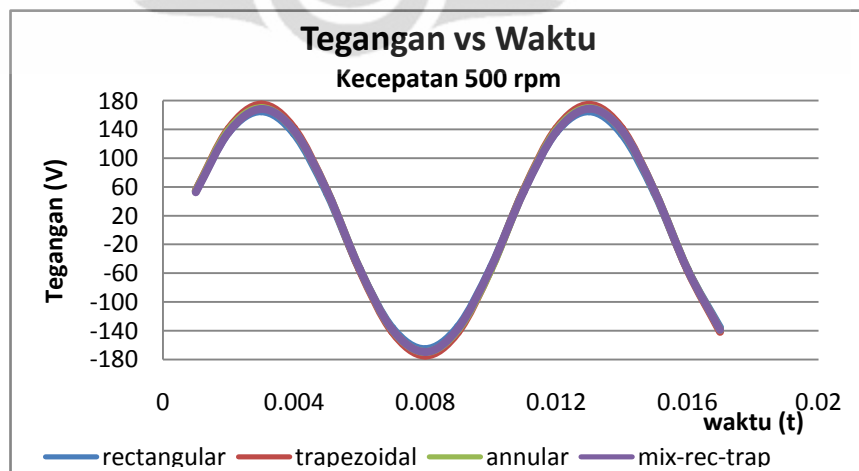
Gambar 4. 7 Grafik Hubungan Tegangan terhadap Waktu pada Kecepatan Putar 500 rpm untuk Bentuk Rectangular



Gambar 4. 8 Grafik Hubungan Fluks terhadap Waktu pada Fase b untuk Bentuk Rectangular



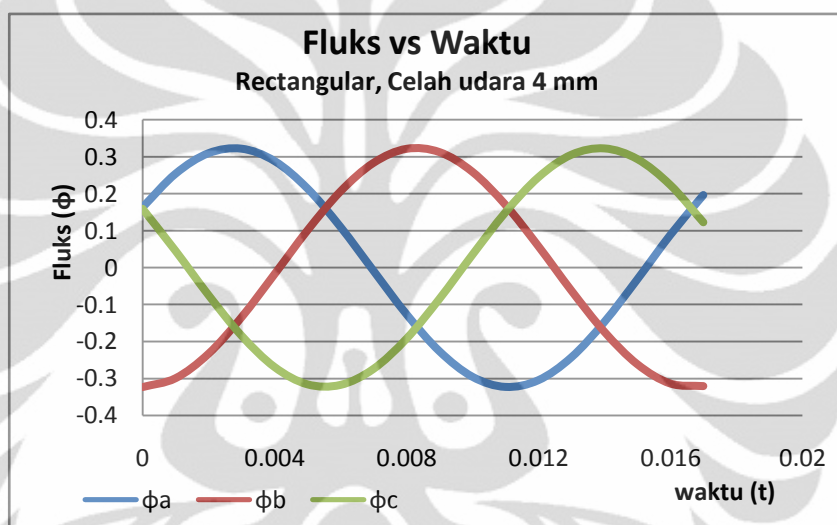
Gambar 4. 9 Grafik Hubungan Tegangan terhadap Waktu pada Fase b untuk Bentuk Rectangular



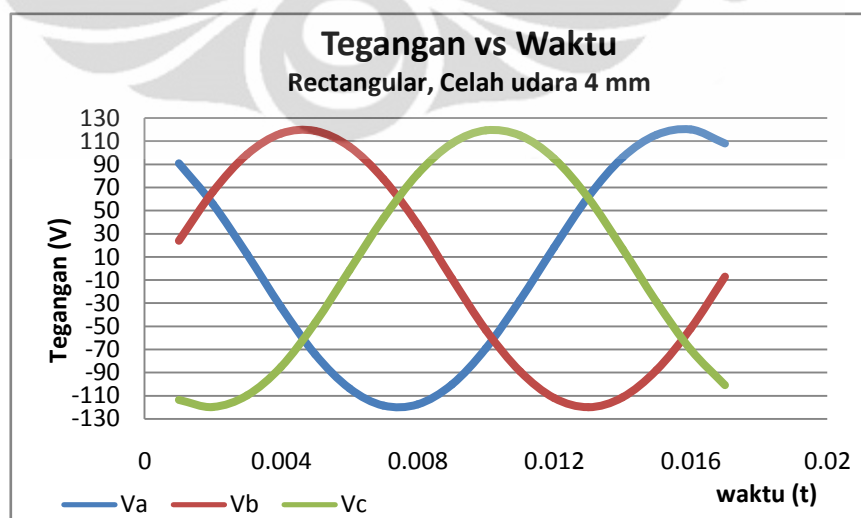
Gambar 4. 10 Grafik Hubungan Tegangan terhadap Waktu pada Fase b untuk Kecepatan Putar 500 rpm

### 4.1.3 Hasil Simulasi Terhadap Perubahan Celah Udara

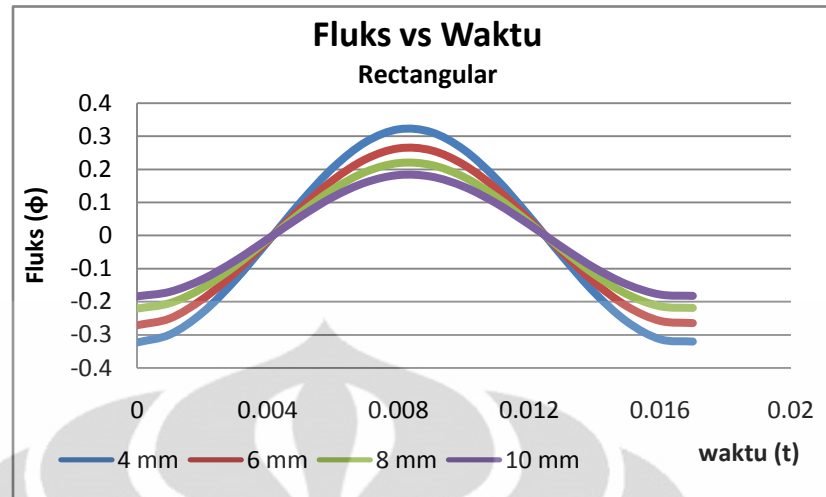
Berikut merupakan data hasil simulasi dari model yang dilakukan yang sudah dibuat dalam bentuk grafik. Data ini merupakan hasil simulasi empat model magnet permanen yang telah dibuat terhadap perubahan lebar celah udara antara stator dan rotor. Sama seperti sebelumnya, data yang ditampilkan hanya sebagian dari sekian banyak data yang ada. Untuk mengetahui data secara lengkap dari hasil simulasi yang dilakukan dapat dilihat pada lembar Lampiran.



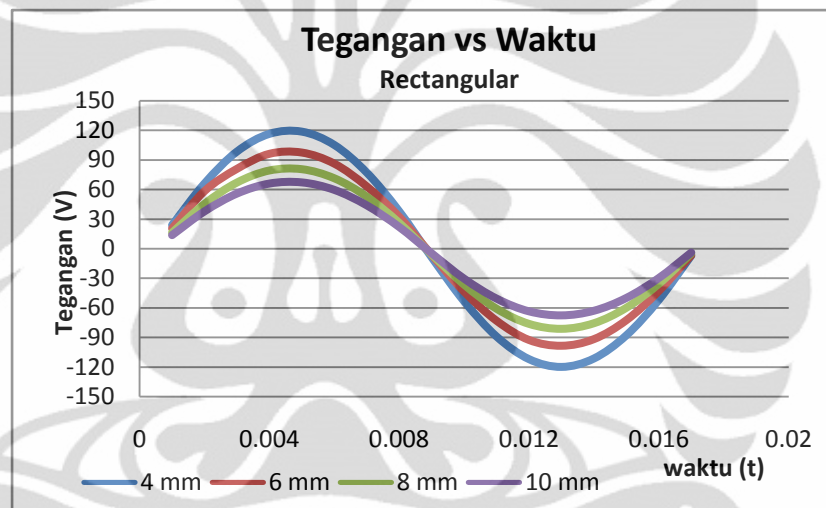
Gambar 4. 11 Grafik Hubungan Fluks terhadap Waktu pada Celah Udara 4 mm untuk Bentuk Rectangular



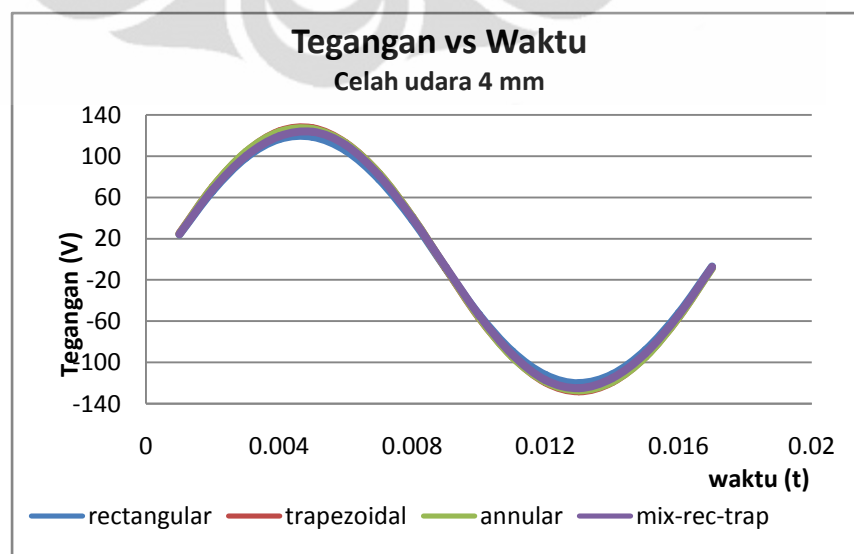
Gambar 4. 12 Grafik Hubungan Tegangan terhadap Waktu pada Celah Udara 4 mm untuk Bentuk Rectangular



Gambar 4. 13 Grafik Hubungan Fluks terhadap Waktu pada Fase b untuk Bentuk Rectangular



Gambar 4. 14 Grafik Hubungan Tegangan terhadap Waktu pada Fase b untuk Bentuk Rectangular



Gambar 4. 15 Grafik Hubungan Tegangan terhadap Waktu pada Fase b untuk Celah Udara 4 mm

## 4.2 Analisis

Seperti yang sudah disebutkan sebelumnya bahwa pada simulasi ini dilakukan secara dua tahap, yakni pertama mensimulasikan model terhadap variable kecepatan putar ( $n$ ) yang berbeda-beda, setelah itu mensimulasikan model terhadap variable lebar celah udara yang diubah-ubah. Oleh karena itu, analisis hasil simulasi juga akan dilakukan dengan cara yakni dengan melihat hubungan fluks dan tegangan yang dihasilkan pada simulasi terhadap dua variabel tersebut. Untuk lebih memudahkan dalam analisis, istilah model yang dipakai dalam analisis dibagi menjadi empat sesuai dengan bentuk magnet permanen pada rotornya, yakni model rectangular, model trapezoidal, model annular, dan model campuran (rectangular dan trapezoidal).

Pada model generator yang dibuat, stator yang dirancang mempunyai karakteristik untuk menghasilkan tegangan 3 fasa, yakni tegangan fasa  $V_a$ ,  $V_b$ , dan  $V_c$ . Oleh karena itu, fluks yang dihasilkan juga akan terbagi menjadi tiga yakni  $\Phi_a$ ,  $\Phi_b$ , dan  $\Phi_c$ , dan setiap fasa akan berbeda 120 derajat terhadap fasa yang lainnya seperti yang terlihat pada Gambar 4.6 dan 4.7. Hal ini terjadi untuk semua model dengan berapa pun nilai kecepatan putar dan lebar celah udara yang diberikan.

Sebetulnya data yang diperoleh secara langsung dari hasil simulasi adalah nilai fluks ( $\Phi$ ) yang dihasilkan pada waktu ( $t$ ) tertentu. Sedangkan untuk nilai tegangan keluaran dihitung berdasarkan perubahan fluks yang terjadi pada interval waktu tertentu. Sebagai contoh, pada data hasil simulasi model rectangular untuk kecepatan 500 rpm, fluks yang dihasilkan fasa b ( $\Phi_b$ ) pada  $t$  0,001 detik adalah -0,216476 Wb dan pada waktu  $t$  0,002 sebesar -0,080228 Wb, maka tegangan yang diperoleh adalah :

$$V_b = \frac{\Phi_{b2} - \Phi_{b1}}{t_2 - t_1} = \frac{-0,080228 - (-0,216476)}{0,002 - 0,001} = 136,248 \text{ Volt}$$

Cara yang sama digunakan untuk menghitung tegangan keluaran pada semua model untuk semua simulasi yang dilakukan.

#### 4.2.1 Hubungan Antara Fluks dan Tegangan dengan Kecepatan Putar ( $n$ )

Pada simulasi kecepatan putar ini, semua model disimulasikan dengan 4 variasi kecepatan yakni 150 rpm, 300 rpm, 500 rpm, dan 800 rpm. Perlu dicatat bahwa saat mensimulasikan dengan kecepatan putar berapa pun semua nilai pada model generator dibuat sama, termasuk lebar celah udara pada semua model yang dibuat tetap, yakni sebesar 6 mm.

Sebelum menganalisis nilai tegangan yang dihasilkan pada simulasi oleh masing-masing model generator, maka akan dianalisis terlebih dahulu nilai fluks yang terinduksikan pada kumparan stator untuk masing-masing model generator, mulai dari rectangular, trapezoidal, annular, dan campuran.

Bentuk magnet permanen yang dibuat pada masing-masing model dirancang agar memiliki luas permukaan sisi yang menghadap stator sama untuk semua bentuk, yakni sebesar  $0.00178 \text{ m}^2$ , seperti yang sudah dirincikan pada bab III. Dengan luas permukaan yang sama ini maka diharapkan tidak menjadi variabel baru dalam simulasi karena simulasi yang dibuat hanya ingin membandingkan pengaruh dari faktor bentuk magnet permanen, bukan faktor yang lainnya. Karena jika salah satu bentuk magnet permanen memiliki luas permukaan yang lebih besar maka otomatis magnet ini akan menghasilkan kerapatan medan magnet yang lebih banyak dibanding bentuk yang lain sehingga juga akan menghasilkan tegangan yang lebih tinggi. Oleh karena itu, luas permukaan magnet permanen pada simulasi ini dibuat sama untuk semua bentuk agar kerapatan medan magnet total yang dihasilkan pun akan sama, sehingga yang membedakan hanyalah adalah persebaran kerapatan medan magnet pada masing-masing bentuk dan hal ini hanya akan dipengaruhi oleh bentuk geometri model tersebut. Persebaran medan magnet untuk masing-masing model bisa dilihat pada Gambar 4.2 sampai Gambar 4.5.

Selanjutnya, masih tentang fluks magnet yang dihasilkan pada simulasi oleh masing-masing model generator. Jika melihat Gambar 4.8 dan data fluks hasil simulasi pada semua model, maka akan terlihat bahwa tidak ada hubungan yang terjadi antara besar maksimum fluks magnet yang tertangkap pada kumparan stator dengan kecepatan putar pada rotor. Artinya, berapa pun besar nilai kecepatan putar rotor yang dipakai, nilai maksimum fluks magnet yang dihasilkan



akan selalu tetap. Suatu hal yang akan berubah sesuai kecepatan putar adalah besar perubahan fluks manet dari suatu interval waktu ke interval waktu lainnya. Namun secara nilai maksimum, besar fluks yang dihasilkan adalah tetap.

Misalnya pada bentuk rectangular, pada kecepatan 150 rpm nilai terbesar fluks terdapat pada waktu  $t$  0,017 detik yakni sebesar 0,27021 Wb. Pada saat  $t$  0,016 detik nilai fluksnya sebesar 0,269075 Wb. Artinya besar perubahan fluks yang terjadi adalah sebesar 0,001135 Wb (dalam harga mutlak). Sedangkan pada kecepatan 300 rpm nilai terbesar fluks terdapat pada waktu  $t$  0,008 detik yakni sebesar 0,263621 Wb. Pada saat  $t$  0,007 detik fluksnya sebesar 0,231354 Wb. Artinya perubahan fluks yang terjadi adalah sebesar 0,032267 Wb (dalam harga mutlak). Dari data-data ini terlihat bahwa untuk kecepatan yang lebih tinggi besar perubahan fluks yang terjadi akan lebih besar untuk interval waktu yang sama, sedangkan untuk nilai maksimum fluks yang dihasilkan cenderung tetap. Hal serupa juga terjadi pada semua model generator yang disimulasikan.

Hal ini sesuai secara teori bahwa tidak ada satu rumusan pun yang menghubungkan antara kecepatan putar dengan nilai maksimum fluks yang dihasilkan pada generator.

Selanjutnya akan dianalisis mengenai tegangan yang dihasilkan pada simulasi model generator yang dibuat. Seperti yang telah dijelaskan pada bab III, data fluks yang diperoleh dari simulasi diolah untuk mendapatkan besar tegangan. Kemudian dari data tegangan tersebut dibuat grafik. Gambar 4.7 menunjukkan grafik tegangan yang dihasilkan pada model rectangular untuk kecepatan 500 rpm, dan Gambar 4.9 menunjukkan grafik tegangan yang dihasilkan pada model rectangular untuk semua variasi kecepatan, yakni 150 rpm, 300 rpm, 500 rpm, dan 800 rpm.

Dari kedua grafik tersebut terlihat bahwa tegangan yang dihasilkan membentuk grafik fluks yang baik, dalam hal ini grafik tersebut berbentuk sinusoidal sempurna dan tidak memiliki riak. Bentuk grafik yang sama juga dihasilkan pada model generator lainnya, baik trapezoidal, annular, atau pun campuran. Bentuk sinusoidal ini diakibatkan oleh keselarasan antara desain rotor dan stator yang dibuat. Bila desain rotor tidak cocok dengan desain stator yang ada, maka grafik tegangan yang dihasilkan akan memiliki riak sehingga dihasilkan

grafik sinusoidal terganggu. Hal ini menunjukkan bahwa desain model generator yang dibuat sudah cukup baik karena berdasarkan pada referensi-referensi yang ada.

Untuk selanjutnya, tegangan yang digunakan untuk analisis berikutnya adalah tegangan pada fasa b ( $V_b$ ), yang digunakan sebagai perwakilan dari tegangan 3 fasa yang dihasilkan pada simulasi model.

Berdasarkan Gambar 4.9 terlihat bahwa pada model bentuk rectangular saat kecepatan putar dinaikkan maka frekuensi tegangan juga ikut naik, dan tegangan induksi yang diperoleh akan semakin besar. Pada saat kecepatan putar 150 rpm tegangan maksimum fasa b ( $V_b$ ) untuk model rectangular adalah 50,335 V, sedangkan pada saat kecepatan 300 rpm, 500 rpm, dan 800 rpm, tegangannya berturut-turut adalah 97,331 V; 165,47 V; dan 257,986 V. Fenomena ini pun terjadi untuk 3 model lainnya. Hal ini sesuai dengan teori, yakni sesuai dengan persamaan (2.6). Pada persamaan (2.7) terlihat bahwa kenaikan kecepatan putar membuat frekuensi menjadi lebih besar, dan dari persamaan (2.6) menunjukkan jika frekuensi naik maka akan menyebabkan tegangan induksi menjadi lebih besar.

Hubungan kenaikan tegangan terhadap kenaikan kecepatan ini berjalan secara linear jika semua faktor lain dijaga konstan. Pada data hasil simulasi juga terlihat bahwa hubungan kenaikan kecepatan putar dengan tegangan induksi juga berjalan linear dengan persen kesalahan mencapai 3,899 %.

Analisis selanjutnya adalah melihat pengaruh perubahan bentuk magnet permanen pada rotor terhadap tegangan keluaran generator. Pertama, pengaruh tersebut akan dilihat pada masing-masing kecepatan putar yang diujikan, kemudian akan dilihat pola perubahan yang terbentuk pada semua kecepatan putar.

Sebagai contoh pada kecepatan 500 rpm, tegangan keluaran pada fasa b ( $V_b$ ) dari masing-masing bentuk magnet permanen dapat dilihat pada Gambar 4.10. Pada grafik tersebut semua garis terlihat saling berhimpit. Namun jika dilihat lebih detail, maka sebetulnya keempat garis tersebut memiliki perbedaan pada nilai maksimum dan minimumnya.

Perhatikan table di bawah ini untuk melihat perbedaan yang terjadi antara keempat model generator secara lebih jelas.

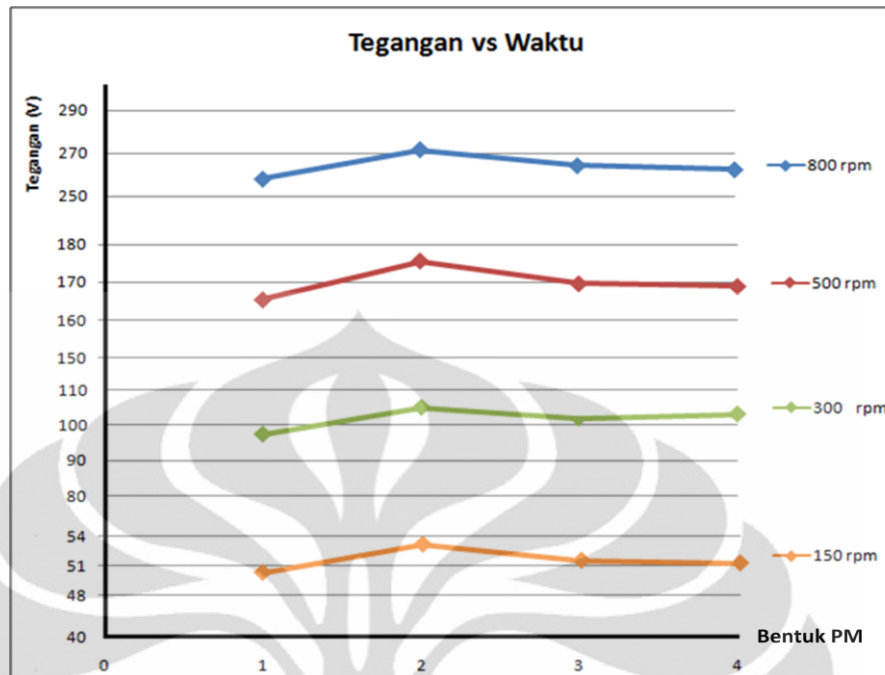
**Tabel 4. 1 Tegangan Phasa b pada Kecepatan 500 rpm**

No	Bentuk	Kecepatan Putar (rpm)	Vb (Volt)
1	Rectangular	500	165.47
		500	-165.521
2	Trapezoidal	500	175.458
		500	-174.246
3	Annular	500	169.604
		500	-169.509
4	Campuran	500	168.952
		500	-169.306

Dari table di atas terlihat bahwa nilai tegangan tertinggi untuk simulasi pada kecepatan putar 500 rpm diperoleh pada model trapezoidal, yakni sebesar 171,076 V dan -170,816 V. Hal ini sesuai dengan Gambar 4.10 dimana titik tertinggi dan terendah berada pada garis berwarna merah, yang mewakili model trapezoidal.

Dari data hasil simulasi ini terlihat bahwa pada kecepatan putar 500 rpm, tegangan keluaran terbesar terdapat pada model trapezoidal, dengan kenaikan mencapai 6,036 % terhadap model rectangular yang dijadikan sebagai acuan. Sedangkan pada dua model lainnya, annular dan campuran, kenaikan yang terjadi berturut-turut adalah sebesar 2,498 % dan 2,287 %.

Pada saat kecepatan putar diubah, ternyata perubahan tegangan keluaran pada stator juga terjadi seperti pada kecepatan 500 rpm tersebut. Pola perubahan yang terjadi pada semua kecepatan putar dapat dilihat pada grafik berikut.



Gambar 4.16 Grafik Pola Perubahan Tegangan Fase b ( $V_b$ ) terhadap Waktu pada Semua Bentuk Model dan Kecepatan Putar

\*Keterangan: 1 = rectangular, 2 = trapezoidal,  
3 = annular, 4 = campuran

Perhatikan tabel berikut untuk melihat besar perubahan tegangan yang terjadi secara lebih jelas.

Tabel 4.2 Kenaikan Tegangan Fase b ( $V_b$ ) pada Semua Bentuk Model dan Kecepatan Putar

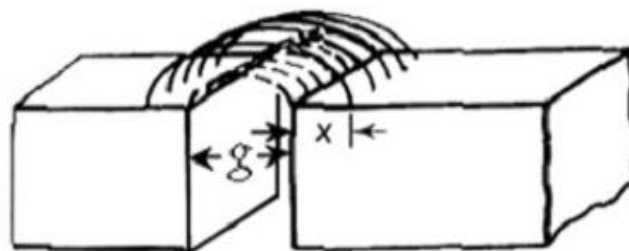
Kecepatan Putar	Bentuk	Kenaikan Tegangan (%)
150 rpm	Trapezoidal	5.844
	Annular	3.021
	Campuran	2.040
300 rpm	Trapezoidal	7.979
	Annular	4.695
	Campuran	5.955
500 rpm	Trapezoidal	6.036
	Annular	2.498
	Campuran	2.104
800 rpm	Trapezoidal	5.348
	Annular	2.595
	Campuran	1.650

\*Keterangan : model rectangular digunakan sebagai acuan untuk kenaikan tegangan.

Dari data hasil simulasi yang diperoleh, baik yang berupa grafik atau pun tabel, terjadi pola perubahan tegangan keluaran yang cenderung sama pada keempat model yang dibuat untuk semua variasi kecepatan putar yang dilakukan. Pola perubahan tegangan yang terjadi adalah pada model trapezoidal tegangan yang dihasilkan merupakan yang paling tinggi sedangkan pada model rectangular menghasilkan tegangan yang paling rendah dibandingkan dengan model lainnya dan hal ini terjadi untuk semua kecepatan putar yang diberikan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.16

Ada dua faktor yang menyebabkan terjadinya pola perubahan tegangan keluaran seperti pada hasil simulasi tersebut. Pertama adalah perubahan bentuk magnet permanen pada rotor akan berpengaruh pada distribusi medan magnetnya, meskipun nilai kerapatan medan magnet totalnya tetap. Perbedaan bentuk magnet permanen ini juga akan mempengaruhi interaksi antara dua magnet yang berdampingan. Seperti yang diuraikan pada bab III bahwa dua magnet yang berdampingan akan berlawanan kutub, baik dengan yang disamping kiri ataupun yang di kanannya.

Jika jarak antara dua magnet permanen yang berdampingan ini sangat dekat maka garis-garis gaya magnet dari kutub utara akan langsung mengarah pada kutub selatan yang ada disampingnya dengan sudut yang kecil atau bahkan tanpa membentuk sudut sama sekali terhadap arah horizontal. Hal ini akan membuat garis-garis medan tersebut tidak akan memotong kumparan stator yang ada di atasnya sehingga tidak ada fluks magnet yang akan terinduksikan menjadi tegangan. Fenomena ini dikenal dengan istilah *Fringing effect*. [9]



Gambar 4. 17 *Fringing Effect*

*Fringing effect* merupakan salah satu kerugian (losses) dalam generator aksial. Jika losses ini besar maka nilai tegangan keluaran pada generator akan menjadi berkurang dan tidak optimal. Rumus untuk rugi akibat *fringing effect* seperti pada persamaan berikut.

$$Per(\text{permiance}) = \frac{W}{\pi} \ln\left(1 + 2\left(\frac{x + x^2 + xg}{g}\right)^{0.5}\right) \quad (4.1)$$

Keterangan :

W = tebal magnet permanen

g = jarak antar magner permanen

x = titik mulai *fringing effect*

Dari persamaan (4.1) tersebut, terlihat bahwa rugi akibat *fringing effect* berbanding terbalik dengan jarak antar magnet permanen dan hubungan ini berkorelasi secara eksponensial. Artinya, jika pada mulanya jarak antara magnet permanen kecil, maka rugi akibat *fringing effect* menjadi besar. Namun, saat jarak tersebut sedikit diperbesar maka rugi akibat *fringing effect* akan berkurang secara drastis sampai pada titik tertentu hingga penambahan jarak tersebut tidak lagi memberikan perubahan yang signifikan pada pengurangan rugi akibat *fringing effect*.

Tabel berikut menunjukkan jarak antar magnet permanen pada masing-masing model.

Tabel 4.3 Jarak Antar Magnet Permanen pada Rotor

Bentuk	Jarak Antar Magnet Permanen	
	Jari-jari Dalam (m)	Jari-jari Luar (m)
Rectangular	0.003	0.026
Trapezoidal	0.019	0.011
Annular	0.009	0.019
Campuran	0.01	0.018

Dari tabel terlihat bahwa pada model rectangular jarak antara magnet permanen pada jari-jari dalam sangat kecil, bahkan merupakan yang terkecil dibandingkan dengan model lainnya. Dengan jarak yang paling kecil ini maka *fringing effect* yang terjadi akan lebih besar dibandingkan pada model lainnya. Hal inilah yang menyebabkan tegangan keluaran pada model rectangular adalah yang paling kecil. Sebaliknya, pada model trapezoidal jarak antara magnet permanen pada jari-jari dalam sangat jauh sehingga losses karena *fringing effect* turun secara eksponensial, sesuai dengan persamaan (4.1). Oleh karena itu, tegangan keluaran yang dihasilkan pada model trapezoidal merupakan yang paling besar dibandingkan model yang lainnya.

Faktor kedua yang menyebabkan terjadinya pola perubahan tegangan keluaran pada hasil simulasi model generator adalah fluks bocor. Peristiwa fluks bocor ini dapat disebabkan karena fluks yang dihasilkan oleh permanen magnet tidak tersampaikan ke stator. Fluks bocor merupakan fenomena yang terjadi karena adanya interaksi antar magnet permanen. Berdasarkan konstruksinya, maka pada model generator yang dibuat fluks bocor akan lebih besar terjadi pada jari-jari dalam generator karena pada posisi ini jarak antar magnet permanen sangat dekat.

Diantara keempat bentuk magnet permanen rotor pada model yang disimulasikan, fluks bocor lebih besar terjadi pada bentuk rentangular. Hal ini disebabkan karena pada jari-jari lingkaran dalam pada model bentuk rectangular terdapat area magnet permanen yang lebih besar sehingga interkasi antar magnet permanennya juga akan lebih tinggi. Rugi-rugi akibat fluks bocor yang besar ini yang juga menyebabkan tegangan keluaran pada model rectangular menjadi paling rendah dibandingkan bentuk lainnya.



#### 4.2.2 Hubungan antara Fluks dan Tegangan dengan Celah Udara (*air gap*)

Pada simulasi kedua yakni simulasi terhadap perubahan lebar celah udara pada model generator, semua model disimulasikan dengan 4 variasi lebar celah udara, yaitu 4 mm, 6 mm, 8 mm, dan 10 mm. Perlu dicatat bahwa saat simulasi kedua ini, kecepatan putar generator dijaga tetap yakni pada rating 300 rpm.

Sebelum menganalisis nilai tegangan yang dihasilkan pada simulasi oleh masing-masing model generator, maka akan dianalisis terlebih dahulu nilai fluks yang terinduksikan pada kumparan stator untuk masing-masing model generator, mulai dari rectangular, trapezoidal, annular, dan campuran.

Sama seperti pada simulasi pertama, untuk simulasi yang kedua ini pun, luas permukaan magnet permanen yang menghadap ke kumparan stator dibuat sama untuk semua model generator yakni sebesar  $0,00178 \text{ m}^2$ . Gambar 4.11 menunjukkan fluks yang dihasilkan pada model rectangular untuk lebar celah udara 4 mm. Dari grafik ini terlihat bahwa fluks yang dihasilkan berupa grafik sinusoidal. Bentuk sinusoidal ini juga terjadi untuk tiga variasi lebar celah udara lainnya pada keempat model. Hal ini terjadi karena adanya keselarasan antara desain rotor dan stator yang dibuat.

Perubahan yang terjadi saat model disimulasikan pada lebar celah udara yang berbeda-beda adalah terdapat pada nilai maksimum fluks yang dihasilkan. Sebagai contoh pada model rectangular untuk fasa b. Dari Gambar 4.13 dapat terlihat bahwa pada model rectangular, fluks tertinggi  $0,321305 \text{ Wb}$  diperoleh untuk waktu  $t$   $0,008$  detik pada saat lebar celah udara terkecil yakni 4 mm. Kemudian nilai fluks ini terus berkurang seiring dengan penambahan lebar celah udara hingga nilai fluks terkecil  $0,182589 \text{ Wb}$  diperoleh untuk waktu  $t$   $0,008$  detik saat lebar celah udara terbesar yaitu 10 mm.

Dari data-data ini terlihat bahwa untuk lebar celah udara yang lebih besar nilai fluks yang diperoleh akan lebih rendah dan sebaliknya, sedangkan untuk nilai frekuensi adalah tetap. Hal serupa juga terjadi pada semua model generator yang disimulasikan. Hubungan yang berkebalikan antara lebar celah udara dengan fluks yang dihasilkan ini tidak berjalan secara linear sesuai dengan persamaan (2.8) dan (2.9).

Selanjutnya akan dinalisa tegangan keluaran yang dihasilkan dari simulasi model generator untuk variasi lebar celah udara. Gambar 4.12 menunjukkan grafik tegangan yang dihasilkan pada model rectangular untuk lebar celah udara 4 mm. Grafik ini menunjukkan tegangan yang dihasilkan berupa tegangan 3 fasa ( $V_a$ ,  $V_b$ , dan  $V_c$ ) yang terpisah 120 derajat sesuai dengan perancangannya. Bentuk keluaran yang sama juga terjadi untuk model generator lainnya.

Selanjutnya seperti simulasi pertama, tegangan yang digunakan untuk analisis berikutnya adalah tegangan pada fasa b ( $V_b$ ), yang digunakan sebagai perwakilan dari tegangan 3 fasa yang dihasilkan pada simulasi model.

Gambar 4.14 menunjukkan grafik tegangan yang dihasilkan pada model rectangular untuk semua variasi lebar celah udara, yakni 4 mm, 6 mm, 8 mm, dan 10 mm. Dari grafik tersebut terlihat bahwa tegangan keluaran tertinggi terdapat pada lebar celah 4 mm, yaitu sebesar 118,762 Volt, sedangkan untuk tegangan keluaran terendah terdapat pada lebar celah udara 8 mm, yaitu sebesar 67,181 Volt.

Dari data-data ini terlihat bahwa untuk lebar celah udara yang lebih besar nilai tegangan yang diperoleh akan lebih rendah dan sebaliknya, sedangkan untuk nilai frekuensi adalah tetap. Hal serupa juga terjadi pada semua model generator yang disimulasikan. Hubungan yang berkebalikan antara lebar celah udara dengan tegangan keluaran ini sebetulnya sama dengan hubungan kebalikan antara lebar celah udara dengan fluks seperti yang dijelaskan sebelumnya. Hal ini terjadi karena jika fluks yang ditangkap pada kumparan stator sedikit, maka tegangan keluaran pun akan rendah, sesuai dengan persamaan (2.6).

Analisis selanjutnya adalah melihat pengaruh perubahan lebar celah udara pada generator terhadap tegangan keluarannya. Pertama, pengaruh tersebut akan dilihat pada masing-masing lebar celah udara yang diujikan, kemudian akan dilihat pola perubahan yang terbentuk pada semua lebar celah udara.

Sebagai contoh pada kecepatan celah udara 4 mm, tegangan keluaran pada fasa b ( $V_b$ ) dari masing-masing bentuk magnet permanen dapat dilihat pada Gambar 4.15. Pada grafik tersebut semua garis terlihat saling berhimpit. Namun jika dilihat lebih detail, maka sebetulnya keempat garis tersebut memiliki perbedaan pada nilai maksimum dan minimumnya.

Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada table berikut.

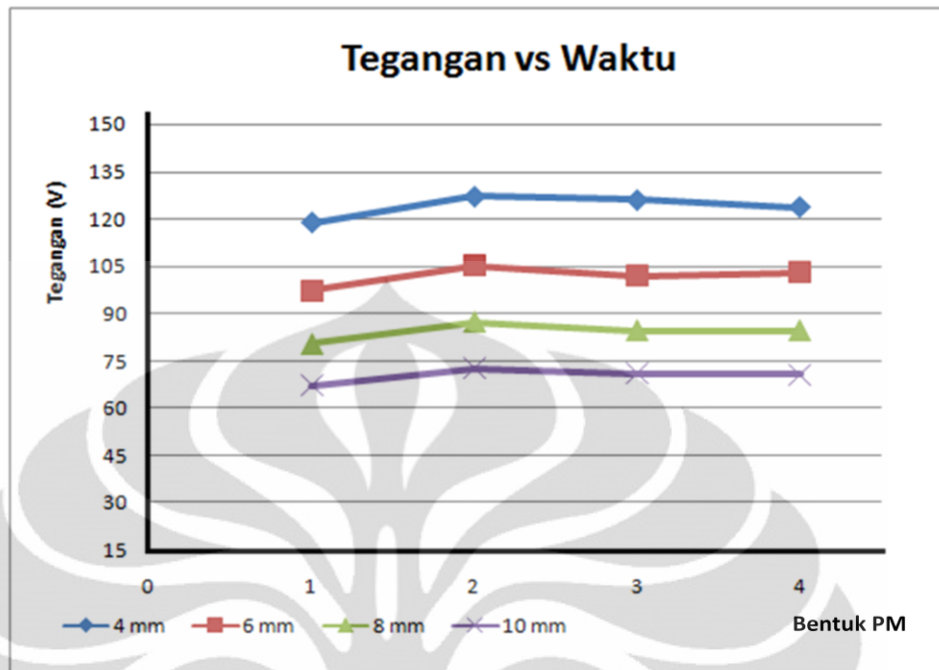
**Tabel 4. 4 Tegangan Phasa b pada Celah Udara 4 mm**

No	Bentuk	Celah Udara (mm)	Vb (Volt)
1	Rectangular	4	118.762
		4	-119.98
2	Trapezoidal	4	127.112
		4	-127.916
3	Annular	4	126.108
		4	-127.045
4	Campuran	4	123.529
		4	-124.841

Dari table di atas terlihat bahwa nilai tegangan tertinggi diperoleh pada model trapezoidal, yakni sebesar 127,112 V dan -127,916 V. Hal ini sesuai dengan Gambar 4.15 dimana titik tertinggi dan terendah berada pada garis berwarna merah, yang mewakili model trapezoidal. Dari data hasil simulasi ini terlihat bahwa pada lebar celah udara 4 mm, tegangan keluaran terbesar terdapat pada model trapezoidal, dengan kenaikan mencapai 7,031 % terhadap model rectangular yang dijadikan sebagai acuan. Sedangkan pada dua model lainnya, annular dan campuran, kenaikan yang terjadi berturut-turut adalah sebesar 6,185 % dan 4,014%.

Pada saat lebar celah udara diubah, ternyata perubahan tegangan keluaran pada stator juga terjadi seperti pada celah udara 4mm tersebut. Pola perubahan yang terjadi pada semua variasi lebar celah udara dapat dilihat pada Gambar 4.18.

Dari data hasil simulasi yang diperoleh, terjadi pola perubahan tegangan keluaran yang cenderung sama pada keempat model yang dibuat untuk semua variasi lebar celah udara yang diberikan. Pola perubahan tegangan yang terjadi adalah pada model trapezoidal tegangan yang dihasilkan merupakan yang paling tinggi sedangkan pada model rectangular menghasilkan tegangan yang paling rendah dibandingkan dengan model lainnya dan hal ini terjadi untuk semua lebar celah udara yang diberikan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.18.



Gambar 4. 18 Grafik Pola Perubahan Tegangan Fase b ( $V_b$ ) terhadap Waktu pada Semua Bentuk Model dan Celah Udara

\*Keterangan: 1 = rectangular, 2 = trapezoidal, 3 = annular, 4 = campuran

Perhatikan tabel berikut untuk melihat besar perubahan tegangan yang terjadi pada masing-masing bentuk secara lebih jelas.

Tabel 4. 5 Kenaikan Tegangan Fase b ( $V_b$ ) pada Semua Bentuk Model dan Celah Udara

Celah Udara (mm)	Bentuk	Kenaikan Tegangan (%)
4	Trapezoidal	7.031
	Annular	6.185
	Campuran	4.014
6	Trapezoidal	7.979
	Annular	4.695
	Campuran	5.955
8	Trapezoidal	8.209
	Annular	4.795
	Campuran	4.803
10	Trapezoidal	8.255
	Annular	5.695
	Campuran	5.348

\*Keterangan : model rectangular digunakan sebagai acuan untuk kenaikan tegangan.

Dari table terlihat bahwa pada semua celah udara kenaikan tegangan keluaran yang tertinggi terjadi pada bentuk rectangular. Kenaikan tegangan keluaran ini mencapai 8,255 %.

Seperti halnya pada simulasi yang pertama, pola perubahan tegangan keluaran terhadap variasi lebar celah udara (*air gap*) yang terjadi pada empat model generator yang dibuat disebabkan oleh dua faktor. Faktor pertama adalah fenomena yang disebut *fringing effect* dan faktor kedua adalah fluks bocor. Kesamaan faktor ini disebabkan pada kedua simulasi secara geometri, desain rotor dan stator yang dibuat memang sama persis sehingga fenomena yang terjadi pada simulasi pertama juga akan terjadi pada simulasi kedua.

#### **4.2.3 Analisis Bentuk Optimum**

Dari kedua hasil simulasi ini terlihat bahwa terjadi pola yang sama untuk perubahan tegangan yang terjadi antara keempat model generator yang dibuat baik pada saat dilakukan perubahan kecepatan seperti pada Gambar 4.16 atau pun saat dilakukan perubahan lebar celah udara seperti pada Gambar 4.18.

Secara nominal, memang nilai kenaikan tegangan antara dua simulasi ini berbeda, yakni pada simulasi kecepatan putar kenaikan mencapai 7,979 % sedangkan pada simulasi lebar celah udara kenaikan mencapai 8,225 %. Namun, jika dilihat secara pola perubahan terjadi, maka antara simulasi pertama dan kedua terjadi pola yang sama. Hal ini lah yang merupakan informasi yang paling penting yang dapat diambil dari kedua simulasi tersebut.

Jadi, dari semua simulasi yang dilakukan dapat disimpulkan bahwa pada desain model yang dibuat terjadi pola perubahan yang unik antara tegangan keluaran dengan bentuk magnet permanen pada rotor untuk generator sinkron magnet permanen fluks aksial tanpa inti stator. Pola tersebut adalah bentuk rectangular menghasilkan tegangan keluaran terendah dan bentuk trapezoidal menghasilkan tegangan keluaran yang paling tinggi, sedangkan dua bentuk lainnya, annular dan campuran menghasilkan tegangan keluaran yang nilainya diantara nilai terendah dan tertinggi tersebut.

Dari keseluruhan penjelasan analisis yang telah dijabarkan, baik yang terkait dengan parameter kecepatan putara atau pun parameter lebar celah udara, maka dapat dikatakan bahwa dari keempat bentuk yang digunakan pada model dan simulasi, maka bentuk yang paling optimum untuk menghasilkan tegangan keluaran yang tertinggi adalah bentuk *trapezoidal*. Meskipun begitu, perubahan tegangan keluaran yang terjadi masih tergolong kecil yakni berkisar antara 1,650% sampai 8,255%.

Hasil ini mungkin tidak terlalu terlihat pengaruhnya pada generator aksial dengan dimensi yang kecil dan daya keluaran yang rendah seperti pada model yang digunakan, dimana tegangan keluaran hanya mencapai 270 Volt. Namun, jika generator yang dibuat memiliki dimensi yang besar dan daya keluaran yang juga besar, misalnya beberapa Mega Watt (MW), dimana tegangan keluaran dapat mencapai puluhan Kilo Volt (KV) atau mungkin lebih, maka perubahan tegangan ini akan sangat terasa pengaruhnya dan tentu akan diperhitungkan dengan lebih cermat.

## **BAB 5**

### **KESIMPULAN**

1. Pola perubahan tegangan keluaran antar bentuk magnet permanen cenderung tetap untuk semua variasi kecepatan putar dan lebar celah udara.
2. Bentuk magnet permanen mempengaruhi nilai rugi-rugi akibat *fringing effect* dan fluks bocor yang terjadi. Rugi terbesar terdapat pada bentuk rectangular dan rugi terkecil terdapat pada bentuk trapezoidal.
3. Bentuk magnet permanen trapezoidal menghasilkan tegangan keluaran tertinggi, sedangkan tegangan keluaran terendah terdapat pada bentuk rectangular.
4. Pengaruh bentuk magnet permanen terhadap tegangan keluaran generator adalah kecil, yakni berkisar antara 1,650% sampai 8,255% untuk variasi kecepatan putar dan lebar celah udara.



## DAFTAR ACUAN

- [1] Garrison F. Price, Todd D. Batzel dkk. “*Design and Testing of a Permanent Magnet Axial Flux Wind Power Generator*”, 2008.
- [2] Rossouw F.G. “*Analysis and Design of Axial Flux Permanent Magnet Wind Generator System for Direct Battery Charging Applications*” Departement of Electrical & Electronic Engineering, Stellenbosch University, Matieland, 2009.
- [3] Hideki Kobayashi, Yuhito Doi, Koji Miyata, Takehisa Minowa. “*Design of The Axial-Flux Permanent Magnet Coreless Generator for The Multi-Megawatts Wind Turbine*”, Magnetic Materials R&D Center, Shin-Etsu Chemical Co., Ltd, 2-1-5 Kitago, Echizen-shi, Fukui, Japan.
- [4] Park, Sung-Ho dan Lee, Chong-Won. “*Lorentz Force-Type Integrated Motor-Bearing System in Dual Rotor disk Configuration*”. IEEE, 2005.
- [5] Metin Aydin, Surong Huang, Thomas A Lipo “*A New Axial Flux Surface Mounted Permanent Magnet Machine Capable of Field Control*”. University of Wisconsin-Madison College of Engineering, 2001.
- [6] Wang, Rong-Jie et.al. “*Optimal Design of a Coreless Stator Axial Flux Permanent-Magnet Generator*”. IEEE, 2005.
- [7] Sadeghierad, M et.al. “*High-Speed Axial-Flux Permanent-Magnet Generator With Coreless Stator*”. Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering, 2009.
- [8] Hosseini, Seyed M et. Al. “*Design, Prototyping, and Analysis of a Low Cost Axial-Flux Coreless Permanent-Magnet Generator*”. IEEE Transactions on Magnetics, 2008
- [9] Sadeghierad, M et.al. “*Leakage Flux Consideration in modeling of High Speed Axial Flux PM Generator*”. IEEE, 2008.
- [10] Sadeghierad, M et.al. “*Design Analysis of High-Speed Axial-Flux Generator*”. American J. of Engineering and Applied Sciences. 2008

- [11] Metin Aydin, Surong Huang, Thomas A Lipo, “*Torus Concept Machine : Pre – Prototyping Design Assesment for Two Major Topologies*”, University of Wisconsin-Madison College of Engineering, 2001
- [12] Gieras, Jacek F. et.al. “*Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines Second Edition*”. Springer, 2008.
- [13] Yicheng Chen. Et.al, “*PM Wind Generator Comparison of Different Topologies*”IEEE, 2004
- [14] Chapman, Stephen J. “*Electric Machinery and Power System Fundamentals International Edition*”. McGraw-Hill Companies, Inc. 2002.

