

**UNIVERSITAS INDONESIA**

**STUDI DESAIN KUMPARAN STATOR PADA  
GENERATOR SINKRON MAGNET PERMANEN  
FLUKS AKSIAL TANPA INTI STATOR**

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat memperoleh gelar sarjana**

**CHATRA HAGUSTA PRISANDI  
0706267591**

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

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

**Nama : Chatra Hagusta Prisandi**

**NPM : 0706267591**

**Tanda Tangan : **




**Tanggal : 14 Juni 2011**

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :  
Nama : Chatra Hagusta Prisandi  
NPM : 0706267591  
Program Studi : Teknik Elektro  
Judul Skripsi : Studi Desain Kumparan Stator 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 S1 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. Eko Adhi Setiawan (  )

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 30 Juni 2011

## UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT yang selalu memberikan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik. Penyusunan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik dari Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak baik secara materil maupun moril, sangatlah sulit bagi penulis untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu dengan segenap ketulusan hati, penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada:

1. Bpk. Ir. Agus R. Utomo, MT selaku dosen pembimbing skripsi yang telah memberikan waktu, tenaga dan pikirannya untuk mengarahkan penulis dalam penyusunan skripsi ini. Terima kasih atas ilmu dan pelajaran hidup yang telah dibagikan kepada penulis.
2. Orang Tua (Papa dan Mama) tercinta yang selalu memberikan dukungan, mendoakan, memberikan perhatian, motivasi, masukan dan inspirasi serta selalu sabar dalam mendengarkan segala keluh kesah penulis. Adik tercinta (Wulan) yang dapat menambah cerita dan keceriaan ketika berada di rumah. Terima kasih atas kasih sayang dan kehangatan kalian semua.
3. Teman, saudara sekaligus rekan seperjuangan skripsi, saudara Edy Sofian yang telah banyak bertukar pikiran dalam menyelesaikan skripsi. Terima kasih juga untuk Jarek yang ikut serta bersama kami melakukan penelitian ini. Kebersamaan dan kerjasama kita untuk tetap kompak, sabar, dan bersemangat dalam penelitian ini sangat berkesan.
4. Saudara Raja Tinjo, Kahlil, dan Ardi yang telah mengorbankan waktunya untuk berbagi pengetahuan, bertukar pikiran, dan mengajari penulis mengenai simulasi dan tema skripsi ini.
5. Nurulita ST sebagai sahabat, pacar, dan pendamping hidup yang selalu setia mendampingi, memotivasi, dan mendorong penulis dalam menyelesaikan skripsi ini. Kasih sayang, cinta, perhatian, serta segala keceriaan yang selalu dihadirkan membuat hari-hari penulis menjadi indah dan amat menyenangkan.

6. Teman-teman Lab. Elektronika dan Konte Elektro atas pengalaman, obrolan, candaan, dan hiburan yang menyenangkan khususnya dalam pengerjaan tugas akhir. Kompetisi yang dihadirkan di tempat-tempat ini semakin mempererat dan mengakrabkan antar satu sama lain.
7. Teman-teman Elektro dan Komputer angkatan 2007 atas kekeluargaan dan keceriaan yang selalu menghiasi kehidupan kampus kita. Semua pengalaman ini tidak akan pernah terlupakan bagi penulis.
8. Karyawan, dosen, dan seluruh civitas akademik Departemen Teknik Elektro.
9. Teman-teman dari Teknik Elektro angkatan 2006 dan 2008 serta rekan-rekan teknik lainnya untuk pengalaman kampus yang luar biasa ini.
10. Serta pihak-pihak lain yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu.

Akhir kata, penulis berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan saudara-saudara semua. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi.

Depok, Juni 2011

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI  
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

---

---

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Chatra Hagusta Prisandi  
NPM : 0706267591  
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 Noneklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul:

***“Studi Desain Kumparan Stator pada Generator Sinkron Magnet Permanen  
Fluks Aksial Tanpa Inti Stator”***

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 14 Juni 2011

Yang menyatakan



( Chatra Hagusta Prisandi)

## ABSTRAK

Nama : Chatra Hagusta Prisandi  
Program Studi : Teknik Elektro  
Judul : Studi Desain Kumparan Stator pada Generator Sinkron Magnet Permanen Fluks Aksial Tanpa Inti Stator

Generator Sinkron Magnet Permanen Fluks Aksial Tanpa Inti Stator memiliki unjuk kerja yang pada umumnya ditentukan oleh gelombang tegangan dan arus. Kedua hal tersebut dipengaruhi oleh konfigurasi Desain geometris generator. Studi ini membandingkan pengaruh jumlah kumparan stator terhadap nilai dan bentuk gelombang fluks magnet dan tegangan keluaran. Asumsi jumlah kutub magnet rotor pada tiap Desain penelitian adalah sama yaitu 24 kutub. Kesimetrisan antara setiap permukaan stator yang menangkap fluks magnet dari rotor setiap waktu sangat mempengaruhi tegangan keluaran. Hasil studi menunjukkan bahwa Desain 9 stator sesuai untuk konfigurasi tiga fasa sedangkan Desain 12 stator selaras untuk generator konfigurasi satu fasa.

Kata kunci :

Generator Magnet Permanen Fluks Aksial, kumparan stator, fluks magnet, tegangan keluaran

## ABSTRACT

Name : Chatra Hagusta Prisandi  
Study Programs : Electrical Engginering  
Title : Study of Stator Coils Design in A Coreless Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Generator

A Coreless Axial Flux Permanent Magnet (AFPM) Synchronous Generator has a work quality that is determined by the voltage and current waves. Both of those things are influenced by geometric configuration of the generator. This research compares the effect of the number of stator coils to the magnet flux captured and the voltage generated for every design. It is stated that the number of rotor magnetic poles in every design are same, 24 poles. How symmetrical between every stator's surface capture the magnetic flux in every second is very extremely affecting the output voltage. The result of this research proves that design with 9 coils is appropriate for three phase configuration, while design with 12 coils is suitable for one phase configuration of generator.

Key words :

Coreless Axial Flux Permanent Magnet Generator, stator coils, magnetic flux, output voltage



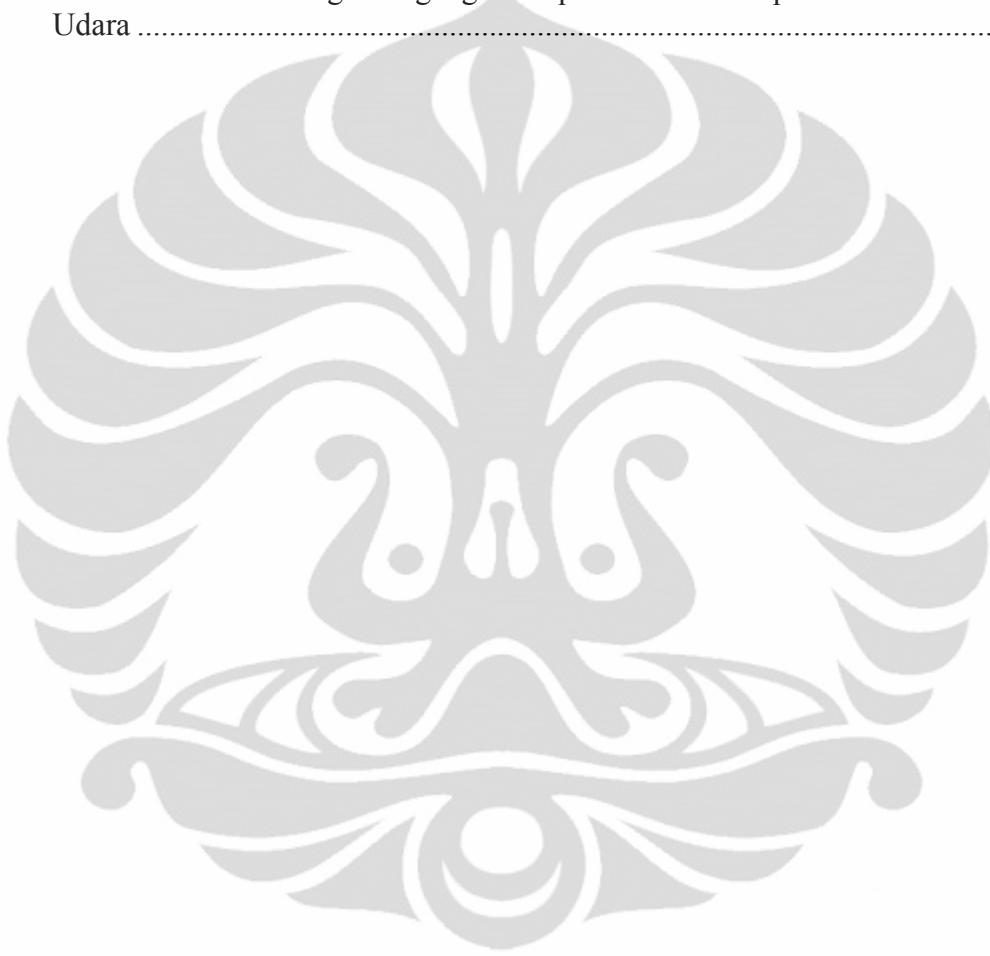
## DAFTAR ISI

UNIVERSITAS INDONESIA .....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS .....	ii
HALAMAN PENGESAHAN .....	iii
UCAPAN TERIMA KASIH .....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI .....	vi
ABSTRAK .....	vii
ABSTRACT .....	viii
DAFTAR ISI .....	ix
DAFTAR TABEL .....	xi
DAFTAR GAMBAR .....	xii
DAFTAR LAMPIRAN .....	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 LATAR BELAKANG .....	1
1.2 TUJUAN PENULISAN .....	3
1.3 RUANG LINGKUP PERMASALAHAN .....	3
1.4 METODOLOGI PENULISAN .....	4
1.5 SISTEMATIKA PENULISAN .....	6
BAB 2 GENERATOR SINKRON MAGNET PERMANEN FLUKS AKSIAL ...	8
2.1 KONSEP UMUM GENERATOR SINKRON MAGNET PERMANEN FLUKS AKSIAL (GSMPPFA) .....	8
2.2 PRINSIP KERJA GENERATOR FLUKS AKSIAL .....	8
2.3 KONSTRUKSI GENERATOR SINKRON MAGNET PERMANEN FLUKS AKSIAL .....	10
2.3.1 Magnet Permanen .....	11
2.3.2 Rotor .....	13
2.3.3 Kumparan Stator .....	14
2.3 PERBEDAAN GENERATOR FLUKS AKSIAL DAN FLUKS RADIAL	17
2.4 TIPE-TIPE KONSTRUKSI GENERATOR FLUKS AKSIAL .....	19
2.4.1 Konstruksi Satu Sisi .....	19
2.4.2 Konstruksi Dua Sisi dengan Stator Eksternal .....	19
2.4.3 Konstruksi Dua Sisi dengan Stator Internal .....	20
2.4.4 Konstruksi Sisi Berlapis-lapis .....	21
2.5 PARAMETER ELEKTROMAGNETIK .....	22

2.5.1	Medan magnet .....	22
2.5.2	Fluks magnet .....	22
2.5.3	Tegangan .....	24
2.5.4	Kurva Histeresis Magnetik.....	25
BAB 3 PEMODELAN DAN SIMULASI.....		27
3.1	KONSTRUKSI DAN DESAIN GENERATOR.....	27
3.1.1.	Desain Rotor dan Celah Udara.....	28
3.1.2.	Desain Stator .....	29
3.2	SIMULASI DAN PENGUMPULAN DATA.....	32
BAB 4 HASIL SIMULASI DAN ANALISIS .....		36
4.1.	HASIL SIMULASI DAN PENGOLAHAN DATA.....	36
4.1.1.	Medan Magnet.....	36
4.1.2.	Data Fluks Magnet .....	37
4.1.3.	Data Tegangan Induksi.....	38
4.1.4.	Data Perbandingan Kecepatan Putar Rotor.....	39
4.1.5.	Data Perbandingan Jarak Celah Udara.....	40
4.2.	ANALISA HASIL SIMULASI DAN PENGOLAHAN DATA .....	41
4.2.1.	Analisa Medan Magnet .....	41
4.2.2.	Analisa Fluks Magnet Hasil Simulasi .....	42
4.2.3.	Analisa Tegangan Hasil Pengolahan Data .....	47
4.2.4.	Analisa Pengaruh Kecepatan Putar Rotor .....	50
4.2.5.	Analisa Pengaruh Jarak Celah Udara Antar Rotor.....	52
BAB 5 KESIMPULAN .....		54
DAFTAR ACUAN.....		55
DAFTAR PUSTAKA.....		57
LAMPIRAN .....		58

## DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Karakteristik Material pada Bagian Generator.....	28
Tabel 3. 2 Keterangan Desain Rotor dan Celah Udara .....	29
Tabel 3. 3 Keterangan Desain Kumparan Stator .....	30
Tabel 3. 4 Perbandingan Kecepatan dan Frekuensi .....	35
Tabel 4. 1 Perbandingan Tegangan Tiap Desain terhadap Perubahan Kecepatan	51
Tabel 4. 2 Perbandingan Tegangan Tiap Desain terhadap Perbedaan Jarak Celah Udara .....	52



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Diagram Alir Metodologi Penelitian .....	5
Gambar 2. 1 Konstruksi Umum Generator Fluks Aksial .....	9
Gambar 2. 2 Prototipe Generator Fluks Aksial .....	10
Gambar 2. 3 Ilustrasi Aliran Garis-garis Medan Magnet .....	11
Gambar 2. 4 Kurva Demagnetisasi Magnet Permanen .....	12
Gambar 2. 5 Bentuk-bentuk Kutub Magnet Permanen .....	13
Gambar 2. 6 Tipe-tipe Penyusunan Magnet Permanen pada Rotor .....	14
Gambar 2. 7 Bentuk-bentuk Kumbaran Stator .....	15
Gambar 2. 8 Bentuk Stator dan Arah Fluks Stator Tipe Slot .....	15
Gambar 2. 9 Bentuk Stator dan Arah Fluks Stator Tipe Non-Slot .....	16
Gambar 2. 10 Stator Overlapping .....	16
Gambar 2. 11 Stator Non-Overlapping .....	17
Gambar 2. 12 Penampang Mesin Tipe Radial – Aksial .....	17
Gambar 2. 13 Perbedaan Arah Garis Medan Magnet Tipe Radial dan Aksial .....	18
Gambar 2. 14 Perbandingan Volume Mesin Tipe Radial dan Aksial .....	18
Gambar 2. 15 Konstruksi Mesin AFPM Tipe Satu Sisi .....	19
Gambar 2. 16 Konstruksi Mesin AFPM Tipe Dua Sisi Rotor Internal .....	20
Gambar 2. 17 Aliran Fluks Magnet pada tipe TORUS .....	21
Gambar 2. 18 Konstruksi Mesin AFPM Tipe Sisi Berlapis-lapis .....	21
Gambar 2. 19 Ilustrasi Fluks Magnet .....	22
Gambar 2. 20 Sistem Koordinat untuk Sebaran Kerapatan Fluks Magnet .....	23
Gambar 2. 21 Kurva Histeresis Magnetik .....	25
Gambar 2. 22 Kurva Histeresis pada Jenis Material Berbeda .....	26
Gambar 3. 1 Pemodelan Geometri Rotor - 24 Kutub Magnet .....	29
Gambar 3. 2 Pemodelan Geometri Kumbaran Stator .....	30
Gambar 3. 3 Geometri Desain 9 Kumbaran Stator .....	31
Gambar 3. 4 Geometri Desain 12 Kumbaran Stator .....	32
Gambar 3. 5 Geometri Desain 15 Kumbaran Stator .....	32
Gambar 3. 6 Hasil Meshing Model Generator .....	33
Gambar 3. 7 Diagram Alir Simulasi dan Pengumpulan Data .....	34
Gambar 4. 1 <i>Plotting</i> Medan Magnet secara Horizontal .....	36
Gambar 4. 2 <i>Plotting</i> Medan Magnet secara Vertikal .....	36
Gambar 4. 3 Grafik Waktu vs Fluks untuk Tiap Jumlah Stator .....	37
Gambar 4. 4 Grafik Waktu vs Tegangan untuk Tiap Jumlah Stator .....	38
Gambar 4. 5 Grafik Waktu vs Tegangan terhadap Variasi Kecepatan Putar .....	39
Gambar 4. 6 Grafik waktu vs Tegangan untuk Variasi Jarak Celah Udara .....	40
Gambar 4. 7 Penampang Melintang Hasil Simulasi Desain 9 Stator .....	43
Gambar 4. 8 Kumbaran Stator Fasa A1, B1, dan C1 Desain 9 Stator .....	44
Gambar 4. 9 Penampang Melintang Hasil Simulasi Desain 12 Stator .....	45
Gambar 4. 10 Kumbaran Stator Fasa A1, B1, dan C1 Desain 12 Stator .....	46
Gambar 4. 11 Penampang Melintang Hasil Simulasi Desain 15 Stator .....	46
Gambar 4. 12 Konfigurasi Kumbaran Stator Tiga Fasa .....	48
Gambar 4. 13 Grafik Waktu vs Tegangan untuk desain 12 Stator Satu Fasa .....	49

## DAFTAR LAMPIRAN

Data Hasil Simulasi Desain 9 Kumparan Stator.....	588
Data Hasil Simulasi Desain 12 Kumparan Stator.....	633
Data Hasil Simulasi Desain 15 Kumparan Stator.....	699



# **BAB 1**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 LATAR BELAKANG**

Kebutuhan akan adanya energi listrik kini meningkat pesat. Era globalisasi ini akan mendorong setiap individu dan perusahaan untuk terus menjaga tingkat produktivitas, kreativitas dan kualitas dari produk atau jasa yang ditawarkan. Hal ini sangat erat kaitannya dengan aplikasi teknologi yang harus selalu diiringi dengan persediaan dan pasokan tenaga listrik yang memadai. Tidak hanya pada daerah perkotaan saja, melainkan sekarang kebutuhan tersebut sudah menjamur sampai ke daerah pedesaan, terpencil, dan bahkan daerah yang belum terjamah sekalipun. Adanya pasokan listrik akan menandakan bahwa daerah tersebut sudah memiliki taraf hidup yang lebih baik. Sedangkan bagi daerah-daerah yang belum terjamah, maka adanya aliran listrik akan menandakan apakah daerah tersebut sudah berpenghuni atau belum.

Terlepas dari masalah transmisi dan distribusi energi listrik yang belum merata, alternatif pembangkitan energi listrik yang murah dan mudah dengan tingkat efisiensi yang tinggi adalah salah satu jawaban mutlak atas permasalahan akan kebutuhan listrik. Berbagai cara dilakukan agar kebutuhan listrik tersebut dapat dipenuhi, baik dengan cara menemukan sumber energi baru, maupun dengan pengoptimalan fungsi dan kinerja generator pembangkit listrik yang telah ada. Khususnya bagi pengembangan daerah-daerah pedesaan dan terpencil, maka adanya sumber energi alternatif dalam pembangkitan energi listrik akan memegang peran penting dalam berbagai aktivitas industri dan ekonomi.[1]

Khususnya untuk mengaliri listrik di daerah-daerah terpencil dan sulit dijangkau oleh jaringan listrik nasional, maka pembangkitan listrik dengan memanfaatkan energi angin merupakan salah satu alternatif yang baik karena diiringi dengan pengurangan biaya konektivitas jaringan, dan terhindar dari rugi-rugi daya akibat transmisi dan distribusi [1]. Kini energi alternatif angin sedang menjadi salah satu topik utama di dunia.

Untuk pembangkitan energi listrik skala kecil, generator magnet permanen fluks aksial merupakan salah satu pilihan terbaik untuk dikopling dengan turbin

angin tersebut. Hal ini disebabkan karena jumlah kutub magnet yang tinggi, densitas daya listrik yang tinggi, dan perawatan yang lebih ringan adalah karakter menarik dari generator fluks aksial [2]. Dibandingkan dengan generator fluks radial, generator ini memiliki keunggulan yaitu rasio daya per volume yang lebih besar, massa yang lebih ringan, pendinginan yang lebih baik, dan konstruksi lebih sederhana, serta kemudahan dalam meningkatkan kapasitas daya [3].

Generator fluks aksial adalah salah satu jenis mesin listrik yang dapat membangkitkan energi listrik dengan arah aliran fluks secara aksial. Generator ini biasa disebut dengan AFPM (*Axial Flux Permanent Magnet*) generator karena generator ini membangkitkan medan magnet dari kutub magnet permanen yang terletak pada rotor sehingga tidak diperlukan pencatutan arus searah untuk membangkitkan garis-garis medan magnet. Generator fluks aksial tipe rotor ganda stator tunggal tanpa inti besi adalah salah satu jenis generator yang seringkali digunakan untuk pembangkit listrik tenaga angin untuk putaran rendah. Generator jenis ini terus dikembangkan dengan berbagai variasi agar didapat tingkat efisiensi yang baik sesuai dengan sumber daya alam yang tersedia.

Dengan demikian diperlukan adanya Desain yang optimum untuk generator ini sehingga akan memberikan unjuk kerja yang optimum pula. Secara mendasar, unjuk kerja generator fluks aksial adalah berupa nilai tegangan dan arus. Desain keseluruhan dari generator fluks aksial seperti penampang rotor, jumlah dan bentuk magnet permanen serta kumparan stator akan sangat berpengaruh terhadap unjuk kerja dari generator tersebut.

Pada studi ini dilakukan kajian terhadap jumlah kumparan stator dalam tiap generator dengan asumsi konfigurasi rotor, celah udara, dan kecepatan putar rotor yang tetap. Studi ini dilakukan secara komputatif berbasis pada *Finite Element Method* (FEM). Dalam aplikasi untuk putaran rendah, maka sesuai [2] diperlukan lebih banyak jumlah kutub magnet sehingga studi ini memasang 24 kutub magnet pada permukaan rotor (*surface mounted rotor*). Seluruh magnet berbentuk *rectangular*. Studi dilakukan dengan asumsi jarak celah udara antar kedua rotor sebesar 20 mm dan generator berputar pada kecepatan konstan 300 rpm.

Studi akan menekankan kepada pengaruh jumlah kumparan stator terhadap hasil gelombang fluks magnet dan tegangan keluaran generator. Pada studi ini,

terdapat tiga variasi jumlah kumparan stator yaitu 9 stator, 12 stator, dan 15 stator yang terbagi pada tiap desain penelitian. Hasil simulasi dengan metode FEM menghasilkan nilai fluks magnet pada tiap kumparan stator. Dengan ini, dapat diketahui berapa besar perubahan nilai fluks tersebut pada setiap perubahan waktunya sehingga dapat ditentukan besar tegangan keluaran generator.

Hasil studi menunjukkan bahwa jumlah kumparan stator akan sangat berpengaruh pada hasil gelombang fluks magnet dan tegangan keluaran tiap fasa. Hal ini disebabkan karena adanya keselarasan antara desain stator dan rotor. Jumlah kumparan stator tertentu akan membagi permukaan rotor dengan jumlah kutub magnet tertentu pula sehingga adanya perbedaan kerapatan garis medan magnet yang diterima oleh tiap kumparan stator. Apabila susunan kumparan stator terbagi secara simetris terhadap permukaan rotor, maka generator menghasilkan nilai tegangan yang tinggi, sementara ketidaksimetrisan pembagian permukaan rotor akan menyebabkan ketidaksiharasan antara desain stator dan rotor sehingga hasil tidak optimal, ditunjukkan oleh gelombang keluaran yang terganggu.

## **1.2 TUJUAN PENULISAN**

Adapun tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Merancang pemodelan dan simulasi desain generator fluks aksial rotor ganda stator tunggal tanpa inti besi, dengan variasi jumlah kumparan stator disertai dengan perubahan kecepatan putar generator dan jarak celah udara.
2. Mengetahui adanya pengaruh yang signifikan atas perbedaan jumlah kumparan stator terhadap gelombang fluks medan magnet, dan tegangan keluaran pada generator.

## **1.3 RUANG LINGKUP PERMASALAHAN**

Ruang lingkup dari penelitian ini digunakan agar masalah yang diteliti dapat lebih terarah dan terfokus sehingga penelitian dapat dilakukan sesuai dengan apa yang telah direncanakan. Ruang lingkup penelitian ini adalah:

1. Desain pemodelan dan simulasi hanya terbatas pada generator fluks aksial dengan rotor ganda eksternal dan stator internal tanpa inti besi.



2. Desain pemodelan dan simulasi memiliki perbedaan jumlah stator yaitu 9 stator, 12 stator, dan 15 stator, serta dilengkapi dengan pengaruh perubahan kecepatan putar dan jarak celah udara pada ketiga desain tersebut.

#### 1.4 METODOLOGI PENULISAN

Metode penulisan yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari enam tahapan yang secara sistematis dapat dilihat pada gambar 1.2. dengan penjabaran sebagai berikut, yaitu:

1. Pemilihan topik penelitian

Tahap pertama dalam melakukan penelitian adalah menentukan topik atau bahasan yang akan diteliti. Pemilihan topik penelitian dilakukan melalui diskusi dengan dosen pembimbing. Pada penelitian ini, topik yang dipilih adalah simulasi desain generator magnet permanen fluks aksial dengan stator tanpa inti besi. Parameter variabel yang diambil dalam penelitian ini adalah jumlah dan susunan stator.

2. Pengumpulan dasar teori

Tahap selanjutnya adalah mengumpulkan dasar teori yang akan digunakan sebagai acuan atau landasan dalam mengembangkan penelitian. Terdapat banyak sumber landasan teori, diantaranya seperti dari buku penunjang, artikel, penelitian-penelitian sebelumnya seperti skripsi, tesis, disertasi maupun jurnal-jurnal dapat dijadikan sebagai landasan teori penelitian.

3. Pengumpulan data

Bagian ini memaparkan mengenai pengumpulan data yang dibutuhkan untuk melaksanakan penelitian. Pengumpulan data dilakukan dengan menjalankan simulasi seluruh desain pemodelan generator dengan 9 stator, 12 stator, dan 15 stator yang dijalankan oleh perangkat lunak berbasis FEM (*Finite Element Method*). Data yang diperoleh dari simulasi adalah fluks magnet per satuan luas permukaan stator yang melingkupi medan magnet.

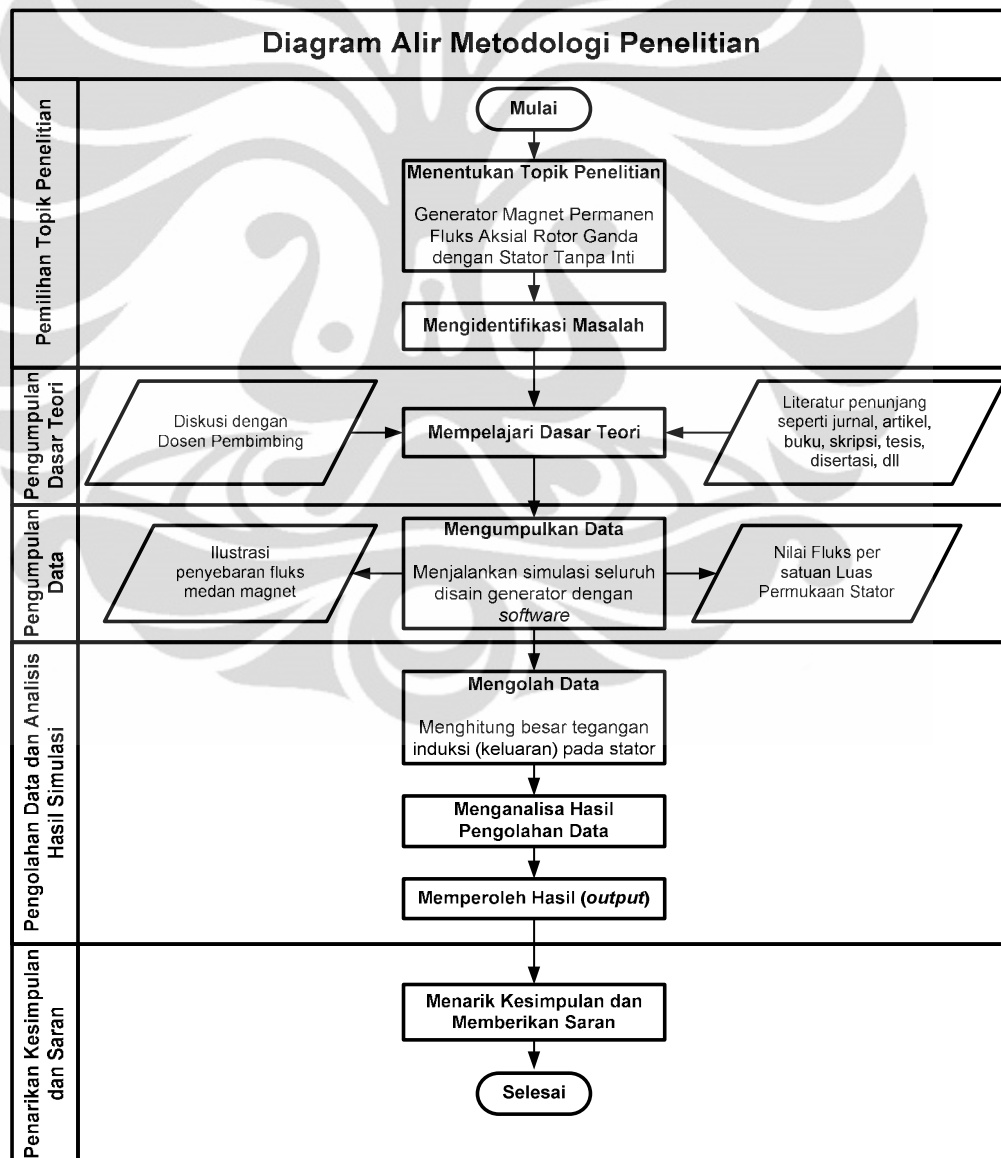
4. Pengolahan data dan analisa hasil simulasi

Tahap selanjutnya setelah semua data yang dibutuhkan diperoleh adalah mengolah data dan informasi tersebut untuk menghitung besarnya tegangan induksi pada keluaran tiap fasa. Keseluruhan data hasil simulasi, yaitu fluks

magnet per satuan luas permukaan stator, direkap kemudian dikategorikan berdasarkan jumlah stator dan kecepatan putar generator. Data fluks magnet dan tegangan induksi ditampilkan dalam bentuk grafik (waktu vs nilai). Selanjutnya adalah analisa grafis terhadap seluruh hasil pengolahan data.

#### 5. Penarikan kesimpulan dan saran

Merupakan tahap terakhir dari keseluruhan penelitian setelah semua tahap dilakukan. Penulis menarik kesimpulan akhir berdasarkan pengolahan data dan analisa yang telah dibuat. Selain itu, terdapat saran yang berkaitan dengan penelitian ini.



Gambar 1. 1 Diagram Alir Metodologi Penelitian

## 1.5 SISTEMATIKA PENULISAN

Dalam penulisan tugas akhir ini terdapat lima bagian yang memberikan gambaran sistematis sejak awal penelitian hingga tercapainya tujuan penelitian diantaranya yaitu sebagai berikut.

### **Bab I Pendahuluan**

Merupakan bagian awal sebagai pengantar untuk menjelaskan isi penelitian secara umum. Dalam bab ini terdapat uraian mengenai latar belakang masalah, tujuan penelitian, ruang lingkup penelitian, metodologi penelitian, dan sistematika penulisan.

### **Bab II Tinjauan Pustaka**

Berisi tentang landasan teori yang digunakan dalam penelitian. Secara umum, terdapat beberapa materi yang akan dibahas pada bab ini yaitu mengenai konstruksi, prinsip kerja, dan tipe-tipe generator fluks aksial, serta perbedaan antara generator fluks aksial dan fluks radial pada umumnya. Kemudian dijelaskan juga tentang metode FEM (*Finite Element Method*) yang digunakan dalam simulasi ini.

### **Bab III Pemodelan dan Simulasi**

Bagian ini memaparkan mengenai perancangan model generator fluks aksial yang akan disimulasikan. Berisi tentang bagaimana pemodelan konstruksi rotor (penyangga dan magnet permanen), kumparan stator, dan celah udara, diikuti dengan pengaturan parameter, konstanta, dan variabel pada model tersebut. Terdapat juga penjelasan mengenai parameter elektromagnetika yang berkaitan dengan prinsip kerja generator fluks aksial seperti medan magnet, fluks-fluks magnet, dan tegangan induksi. Disamping itu, bab ini juga memaparkan langkah-langkah dalam simulasi dan pengumpulan data.

### **Bab IV Pengolahan Data dan Analisa Permasalahan**

Bagian ini menjabarkan tentang pengolahan data dan analisisnya. Pada bab ini, terdapat data fluks magnet per satuan luas permukaan stator dan data tegangan induksi pada keluaran tiap fasa. Untuk mempermudah analisis, data-data diatas ditampilkan dalam bentuk

grafik. Kemudian diakhiri dengan analisa grafis pada hasil pengolahan data tersebut.

## **Bab V    Kesimpulan dan Saran**

Merupakan bagian terakhir yang berisi kesimpulan dari pembahasan yang telah dilakukan pada bab-bab sebelumnya, disertai dengan saran atas penelitian yang telah dilakukan.



## BAB 2

### GENERATOR SINKRON MAGNET PERMANEN FLUKS AKSIAL

#### 2.1 KONSEP UMUM GENERATOR SINKRON MAGNET PERMANEN FLUKS AKSIAL (GSMFPA)

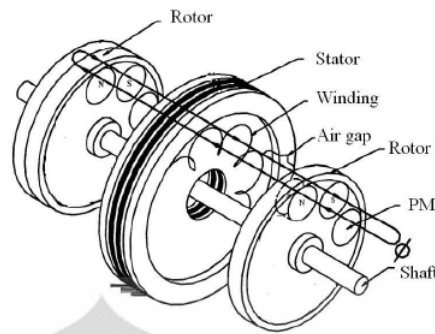
Mesin magnet permanen fluks aksial (AFPM), yang biasa disebut mesin *disc-type*, merupakan sebuah mesin alternatif atas mesin RFPM berbentuk silinder, dikarenakan bentuknya seperti *pancake* yang terlihat rapi dan tersusun padat, sehingga menghasilkan berat jenis daya (daya keluaran per massa/volume mesin) yang lebih besar [4].

Sedangkan generator fluks aksial adalah suatu mesin fluks aksial yang dapat mengkonversikan energi mekanik menjadi energi listrik yang menghasilkan arus bolak – balik yang terdiri dari stator dan rotor dengan memiliki arah aliran fluks yang memotong stator secara aksial. Tentunya berbeda dengan generator generator konvensional lainnya yang aliran fluksnya secara radial. Generator fluks aksial ini tentunya memiliki ukuran yang jauh lebih kecil dari yang biasanya, dan sering dimanfaatkan untuk pembangkit listrik tenaga angin [2].

#### 2.2 PRINSIP KERJA GENERATOR FLUKS AKSIAL

Prinsip kerja generator fluks aksial sesungguhnya tidak jauh berbeda dengan prinsip kerja generator konvensional pada umumnya. Penggunaan magnet permanen menghasilkan medan magnet yang tetap sehingga tidak memerlukan pencatutan arus searah untuk menghasilkan medan magnet. Sedangkan fluks aksial diperoleh dari magnet permanen yang telah diberikan perlakuan khusus sehingga arah garis-garis gaya magnet keluar dari kutub magnet secara aksial atau vertikal.

Generator ini juga memiliki konstruksi umum yang sama yaitu terdapat rotor yang memiliki magnet permanen sebagai sumber medan magnet, kumparan stator sebagai tempat terjadinya induksi elektromagnetik, dan celah udara antara rotor dan stator.



Gambar 2.1 Konstruksi Umum Generator Fluks Aksial [5]

Medan magnet [B] dari rotor tersebut yang akan menembus bidang stator [A] sehingga menghasilkan fluks magnet [ $\Phi$ ] sesuai dengan persamaan ini [6].

$$\Phi = B \cdot A \cos \theta \quad (2.1)$$

Keterangan:  $B$  = induksi magnetik [T]

$A$  = luas bidang yang ditembus garis medan magnet [ $m^2$ ]

$\Phi$  = fluks – fluks magnet [Wb]

Besar nilai fluks ( $\Phi$ ) akan berubah-ubah karena adanya perubahan  $\theta$ . Sudut  $\theta$  berubah karena medan B yang bergerak menembus stator dan menghasilkan sudut tembus terhadap bidang normal stator yang berbeda-beda. Perubahan fluks terhadap waktu akan menghasilkan ggl induksi dengan persamaan sebagai berikut.

$$E_A = -NN \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.2)$$

Tanda negatif pada persamaan 2.2 menunjukkan bahwa arah gaya gerak listrik berlawanan dengan tegangan sumber. Dari persamaan 2.2 terlihat bahwa nilai tegangan induksi yang dihasilkan berbanding lurus dengan nilai perubahan fluks magnet terhadap waktu, dan jumlah lilitan pada tiap kumparan stator [6].

Penempatan kumparan pada stator menentukan tegangan output dari generator. Tiap pasang kumparan pada stator akan memiliki sudut fasa tertentu sehingga jika kita menempatkan satu pasang kumparan saja, kita akan mendapatkan tegangan output dengan satu fasa saja. Namun jika menempatkan tiga pasang kumparan pada stator dengan beda sudut 120 derajat, maka akan diperoleh tegangan keluaran dengan fasa yang berbeda 120 derajat juga [6].

$$\begin{aligned}
 e_{fasa\ A} &= N_C \varphi \omega \sin(\omega t) \text{ Volt} \\
 e_{fasa\ B} &= N_C \varphi \omega \sin(\omega t - 120^\circ) \text{ Volt} \\
 e_{fasa\ C} &= N_C \varphi \omega \sin(\omega t - 240^\circ) \text{ Volt}
 \end{aligned}
 \tag{2.3}$$

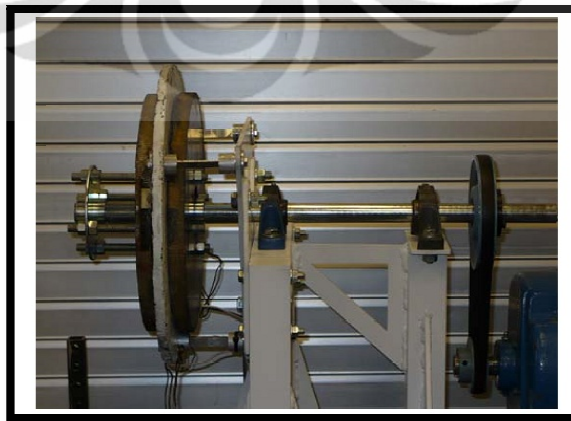
Persamaan frekuensi yang dihasilkan oleh generator aksial adalah sama dengan frekuensi yang dibangkitkan oleh generator konvensional yaitu [6].

$$f = \frac{n.p}{120} \tag{2.4}$$

Keterangan:  $f$  = frekuensi yang dibangkitkan [Hz]  
 $n$  = kecepatan putar generator [rpm]  
 $p$  = jumlah kutub magnet

### 2.3 KONSTRUKSI GENERATOR SINKRON MAGNET PERMANEN FLUKS AKSIAL

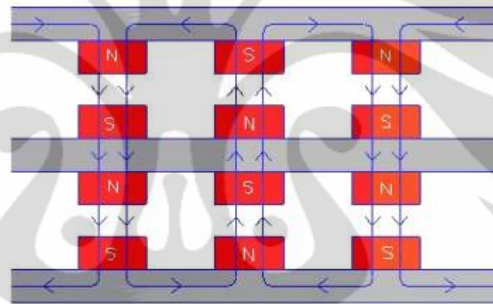
Serupa dengan generator konvensional pada umumnya, generator fluks aksial ini memiliki konstruksi yang sama dengan memiliki stator, rotor dan air gap. Hanya saja dengan memiliki perbedaan aliran fluks, generator fluks aksial ini memiliki kecenderungan melebar diameternya untuk memperbesar daya keluarannya. Tidak hanya itu, variasi bentuk dan jumlah stator dan rotornya pun dapat dimodifikasi sesuai dengan efisiensi kebutuhan.



Gambar 2. 2 Prototipe Generator Fluks Aksial <sup>[7]</sup>

### 2.3.1 Magnet Permanen

Sebagai penghasil medan magnet utama, medan magnet pada rotor merupakan medan magnet permanent yang kuat. Magnet permanen tidak memiliki kumparan penguat dan tidak menghasilkan desipasi daya elektrik. Seperti bahan ferromagnetik yang lain, sebuah magnet permanen dapat digambarkan oleh B-H hysteresis loop. Magnet permanen merupakan material feromagnetik yang memiliki histeresis loop yang lebar. Histeresis loop yang lebar menunjukkan sedikitnya pengaruh induksi dari luar terhadap magnet tersebut [4]. Magnet permanen dibuat atas perlakuan khusus pada besi atau baja sehingga mayoritas dari garis-garis medan magnet yang keluar dari kutub hanya mengarah ke atas dan bawah secara vertikal seperti pada gambar 2.3 di bawah ini.



Gambar 2. 3 Ilustrasi Aliran Garis-garis Medan Magnet

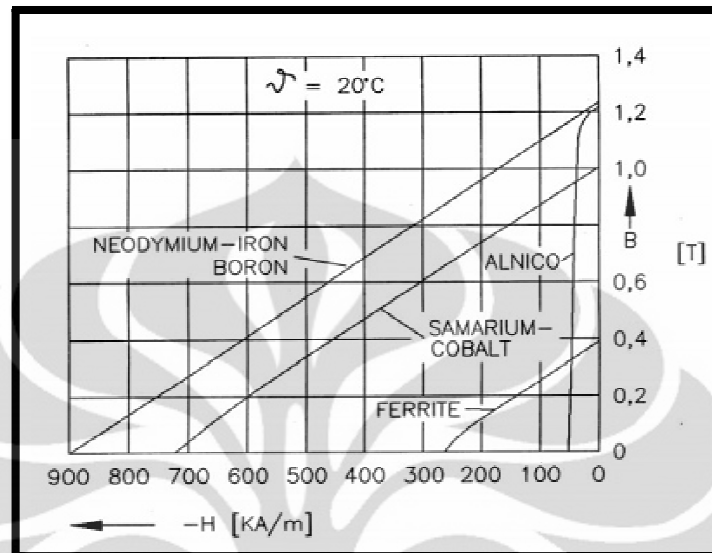
Terdapat dua tipe dari magnet langka yang masih ada di bumi, yaitu magnet SmCo (Samarium-Cobalt), dan magnet NdFeB (Neodymium-Iron-Boron). Penggunaan rare earth Nd-Fe-B magnet dapat memberikan power density yang tinggi dalam volume material yang kecil sehingga membantu desainer untuk memproduksi mesin berkualitas terbaik dengan sedikit rugi-rugi daya dan material yang lebih ringan. Selain itu, mesin dengan stator tanpa inti dapat bekerja dengan jika menggunakan teknologi Nd-Fe-B ini.

Ada tiga jenis pembagian magnet permanen yang digunakan untuk mesin elektrik, diantaranya yaitu: [4]

- a. Alnicos (Al, Ni, Co, Fe);
- b. Ceramics (ferrites), contohnya barium ferrite  $BaOx6Fe_2O_3$  dan strontium ferrite  $SrOx6Fe_2O_3$ ;



- c. Rare-earth materials, contohnya samarium-cobalt SmCo dan neodmium-iron-boron NdFeB.



Gambar 2. 4 Kurva Demagnetisasi Magnet Permanen

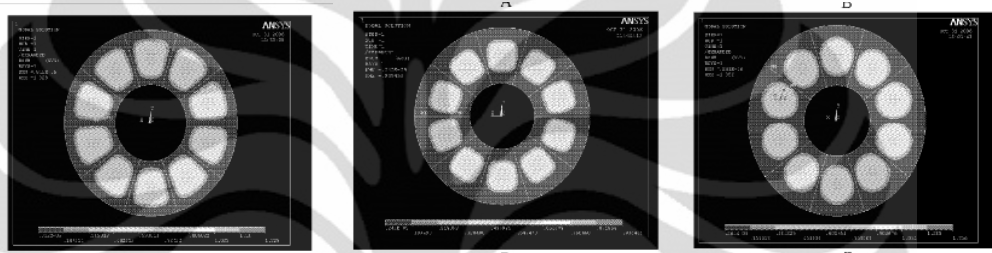
Berdasarkan pada kurva demagnetisasi di atas, Neodymium-iron-boron menjadi bahan yang paling baik dari ketiga jenis bahan yang lain. NdFeB mempunyai densitas fluks yang lebih besar dibandingkan bahan feromagnetik yang lain. Selain itu, harga dari NdFeB saat ini menjadi lebih terjangkau. Itulah sebabnya saat ini lebih banyak digunakan bahan feromagnetik jenis ini. Kurva demagnetisasi dari ketiga bahan feromagnetik dapat dilihat pada Gambar 2.84 [4].

Generator dengan magnet permanen memiliki tingkat efisiensi yang lebih baik dibandingkan dengan generator induksi, karena tidak ada rugi-rugi eksitasi yang dihasilkan sehingga banyak digunakan terutama untuk turbin angin. Bentuknya yang lebih sederhana membuat generator magnet permanen menjadi lebih rapi, ringan, dan tersusun padat walaupun harganya lebih mahal karena kelangkaan magnet permanen di bumi. Akan tetapi, generator magnet permanen tidak dapat diatur seberapa besar eksitasi yang diberikan kepada generator, karena fluks magnetik yang dihasilkan magnet ini tetap sehingga arus eksitasi yang dihasilkan pun tidak dapat diubah sesuai kebutuhan.

Dengan menggunakan magnet permanen sebagai penghasil medan magnet utama, generator ini tidak membutuhkan lagi adanya pencatuan arus DC sehingga biaya dan tenaga untuk merawat serta mengganti komponen-komponen pencatuan

tersebut dapat dihilangkan. Terdapat dua buah tipe generator magnet permanen bila dikategorikan berdasarkan arah fluks-fluks magnetik, yaitu tipe fluks radial dan fluks aksial yang akan dibahas lebih lengkap perbedaan antara keduanya pada subbab lain.

Terdapat beberapa macam bentuk magnet permanen yang baik digunakan dalam mesin AFPM, yaitu trapezoidal, persegi (*rectangular*), dan bulat (*circular*). Perbedaan bentuk diantara ketiganya dapat dilihat dalam gambar 2.5. Bentuk-bentuk magnet ini disesuaikan dengan jumlah dan susunan kumparan stator dengan mempertimbangkan efisiensi dan keselarasan antara rotor dan stator [8].

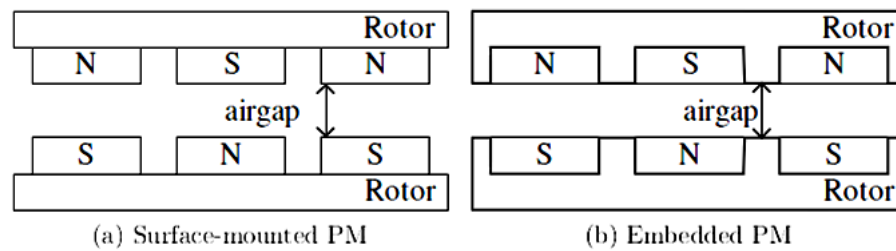


Gambar 2. 5 Bentuk-bentuk Kutub Magnet Permanen [8]  
(a) trapezoidal, (b) rectangular, (c) lingkaran

### 2.3.2 Rotor

Bagian rotor ini terdiri atas bagian penyangga atau yang biasa disebut dengan *yoke*, dan kutub magnet sebagai penghasil medan magnet utama yang menggantikan peran pencatuan arus searah. Bagian penyangga rotor biasanya menggunakan material berbahan inti besi lunak "*soft iron*" sedangkan pada magnet permanen menggunakan "*Neodymium Iron Boron*" (NdFeB).

Terdapat dua cara dalam menyusun atau menempelkan PMs pada mesin AFPM, diantaranya yaitu *surface-mounted PM* dan *embedded PM*. Pada tipe *surface-mounted PM*, kutub magnet ditempelkan di atas permukaan rotor sehingga terdapat celah udara antar PM. Sedangkan pada tipe *embedded PM*, kutub magnet seolah-olah dimasukkan ke dalam rotor kemudian permukaan rotor dan magnet di buat rata. Berikut adalah ilustrasi perbedaan penyusunan magnet permanen diantara kedua tipe tersebut.



Gambar 2. 6 Tipe-tipe Penyusunan Magnet Permanen pada Rotor

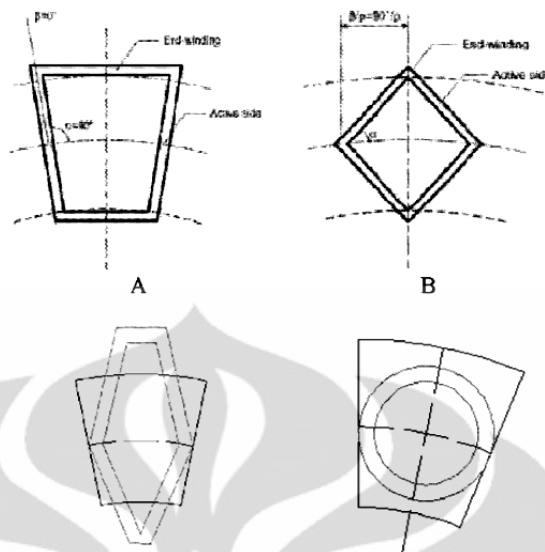
Tipe yang lebih banyak digunakan adalah surface-mounted PM karena proses manufaktur rotor disk ini lebih mudah sehingga biaya produksi mesin lebih murah. Kelebihan lainnya adalah tipe *surface mounted PM* dapat bertindak sebagai kipas pendingin karena terdapat celah udara antara magnet sehingga muncul efek ventilasi pada kumparan stator apabila mesin fluks aksial berputar pada kecepatan tinggi.

### 2.3.3 Kumparan Stator

Setiap kumparan stator terdiri atas lilitan konduktor yang berfungsi sebagai tempat terjadinya induksi elektromagnetik. Tidak hanya kutub magnet, melainkan kumparan stator juga memiliki beberapa macam bentuk yang biasa digunakan seperti pada gambar 2.7. Untuk setiap bentuk magnet dan ukuran rotor disk, setiap bentuk kumparan stator dapat dimodifikasi berdasarkan parameter-parameter tertentu, seperti jari-jari, kelengkungan (inklinasi) sisi aktif kumparan, panjang ujung sambungan, dll [8].

Bentuk trapezoidal, yang diadopsi dari mesin dengan inti stator, memiliki *flux linkage* yang maksimum, namun membutuhkan ujung sambungan yang panjang. Alternatif lain adalah stator bentuk rhomboidal yang karakteristiknya berkebalikan dari trapezoidal. Bentuk rhomboidal memiliki ujung sambungan yang lebih pendek, namun kemampuan *flux linkage* pada stator adalah lebih kecil.

Kolaborasi antara bentuk trapezoidal dan rhomboidal dapat membentuk stator hexagonal yang dapat dimodifikasi berdasarkan fungsi sudut inklinasi. Bentuk terakhir adalah circular (lingkaran) yang tidak memiliki titik sudut sama sekali. Bentuk ini baik bila dipasangkan dengan magnet berbentuk persegi [8].



Gambar 2. 7 Bentuk-bentuk Kumparan Stator [8]

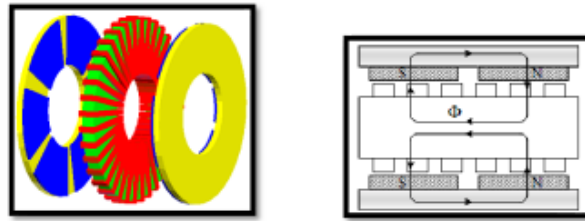
Berdasarkan pada berbagai variasi Desain rotor dan konstruksinya, maka generator AFPM dapat dibedakan menjadi dua jenis yaitu stator dengan inti besi, dan stator tanpa inti besi (*coreless stator*). Kedua jenis ini akan membedakan aliran fluks magnetik seperti dijelaskan berikut ini:

Pada stator dengan inti besi ini terdapat kumparan yang membentuk barisan dan dihubungkan dengan slotnya secara back to back. Stator jenis ini baik digunakan untuk putaran kecepatan tinggi. Ada dua variasi pada inti stator, yaitu stator tipe slot, dan stator tipe non slot [9].



Gambar 2. 8 Bentuk Stator dan Arah Fluks Stator Tipe Slot [9]

Gambar di atas adalah tipe stator dengan slot. Aliran fluks mengalir melewati celah antara sisi-sisi pada statornya sehingga celah udara yang dilewati oleh fluks ini lebih panjang dibandingkan dengan tipe non slot.

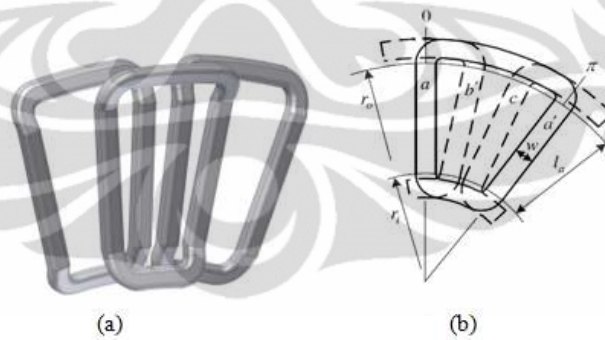


Gambar 2. 9 Bentuk Stator dan Arah Fluks Stator Tipe Non-Slot <sup>[9]</sup>

Berdasarkan pada gambar 2.9 diatas yaitu stator tipe non slot, terdapat kumparan lebar dengan kumparan celah udara AC fasa banyak yang dibungkus oleh inti stator. Pada stator tipe non slot ini, antar kumparan diisi dengan resin yang berfungsi sebagai ketahanan dan menghasilkan transfer panas lebih baik.

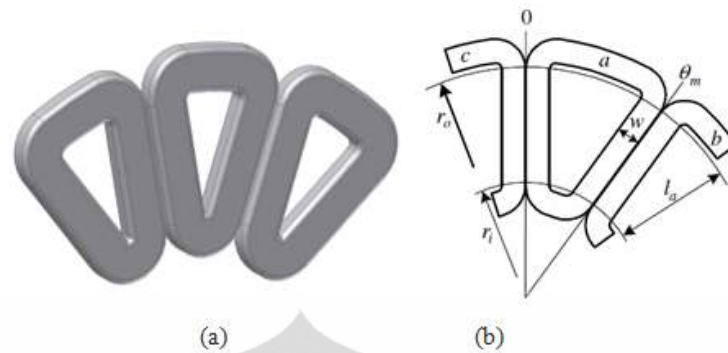
Stator tanpa inti besi biasanya digunakan untuk putaran rendah dan torsi beban yang rendah. Tentunya hal ini disebabkan oleh tidak adanya inti besi yang terdapat didalamnya. Pada stator tanpa inti besi susunan kumparannya terbagi menjadi dua macam, ada yang tersusun secara *overlapping* dan *non-overlapping*. Tidak hanya itu, bentuk dari kumparannya dapat divariasikan.

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. 10 Stator Overlapping (a), dan Skematik Stator Overlapping (b) <sup>[10]</sup>

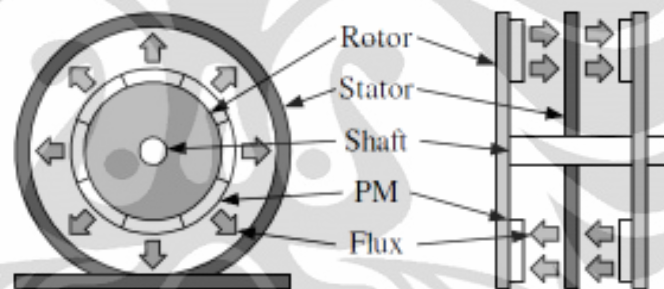
Pada stator dengan susunan kumparan secara *non-overlapping*, susunan kumparannya berada di sejajar dan berimpit di samping kumparan lainnya. Sedangkan susunan fasa akan saling berurutan sesuai dengan jumlah kumparan pada stator tersebut, dapat dilihat pada gambar 2.11



Gambar 2. 11 Stator Non-Overlapping(a) Skematik Stator Non-Overlapping(b) <sup>[10]</sup>

### 2.3 PERBEDAAN GENERATOR FLUKS AKSIAL DAN FLUKS RADIAL

Terdapat dua buah tipe generator magnet permanen bila dikategorikan berdasarkan arah fluks-fluks magnetik, yaitu tipe fluks radial dan fluks aksial.

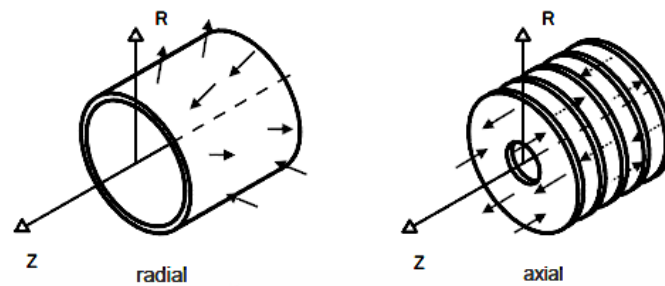


Gambar 2. 12 Penampang Mesin Tipe Radial – Aksial <sup>[10]</sup>

Pada gambar generator tipe radial, magnet permanen atau eksitasi arus DC diletakkan di atas permukaan rotor yang dikopling dengan shaft. Fluks magnetik dihasilkan mengarah secara radial dan tegak lurus terhadap shaft diarahkan agar memotong kumparan stator yang disusun di sisi luar rotor.

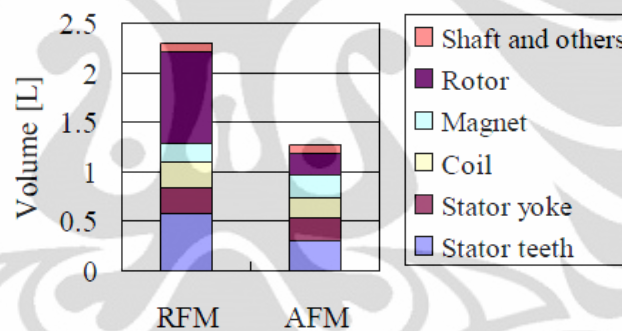
Sedangkan pada tipe aksial, rotor berbentuk disk dikopling dengan shaft, dimana magnet permanen diletakkan di permukaan rotor untuk menghasilkan fluks magnetik yang berarah tidak menyebar, melainkan hanya secara aksial dan paralel dengan shaft. Bentuk fluks aksial menjadi jawaban atas kekurangan efisiensi kerugian daya pada tipe radial karena tidak banyak fluks terbuang dan memungkinkan fluks memotong stator secara lebih baik [11].





Gambar 2. 13 Perbedaan Arah Garis Medan Magnet Tipe Radial dan Aksial <sup>[11]</sup>

Pada tipe radial, medan magnet hanya terdapat pada celah diantara rotor dan stator sehingga daya keluaran tidak dapat ditingkatkan, kecuali dengan melapisi sisi stator dengan baja silikon berlapis-lapis. Namun hal ini mengakibatkan penurunan keluaran mesin saat starting, karena adanya gaya tarik menarik antara magnet dengan lapisan stator. Efisiensi juga menurun disebabkan karena adanya rugi-rugi inti pada sisi stator.



Gambar 2. 14 Perbandingan Volume Mesin Tipe Radial dan Aksial

Di sisi lain, generator tipe fluks aksial dapat meningkatkan daya keluaran yang dengan membuat dimensi rotor yang setipis mungkin secara aksial, namun tetap menjaga luasnya permukaan medan magnetik yang dimiliki oleh rotor. Oleh sebab itu, generator tipe aksial dapat menghasilkan besarnya daya yang sama untuk volume mesin yang lebih kecil daripada tipe radial.

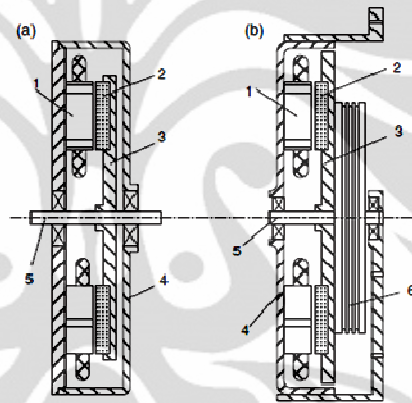
Selain itu, dengan meletakkan stator pada kedua sisi rotor, akan menghasilkan efisiensi yang lebih tinggi karena fluks-fluks magnetik pada kedua sisi magnet dapat seluruhnya dimanfaatkan untuk menghasilkan GGL induksi. Oleh sebab itu, untuk meningkatkan daya keluaran generator, alih-alih memperluas diameter rotor, lebih baik dilakukan suatu penumpukan sejumlah rotor dan stator dalam arah aksial, seperti terlihat dalam gambar 2.20

Apabila menganalisa perbandingan kedua tipe ini, maka dapat ditarik kesimpulan bahwa generator tipe aksial dapat meningkatkan efisiensi dan daya keluaran generator dengan melakukan inovasi mesin secara lebih mudah daripada generator tipe radial.

## 2.4 TIPE-TIPE KONSTRUKSI GENERATOR FLUKS AKSIAL

### 2.4.1 Konstruksi Satu Sisi

Ini merupakan konstruksi mesin fluks aksial yang paling sederhana karena hanya memiliki satu buah rotor dan satu rangkaian stator. Akan tetapi, torsi yang dihasilkan lebih kecil dari pada jenis konstruksi lainnya. Konstruksi ini dapat digunakan di industri sebagai motor traksi, atau lift pengangkat [4].



Gambar 2. 15 Konstruksi Mesin AFPM Tipe Satu Sisi <sup>[4]</sup>

1 – Stator, 2 – Magnet Permanen, 3 Rotor, 4 – Bingkai, 5 – *shaft*, 6 – *sheave*

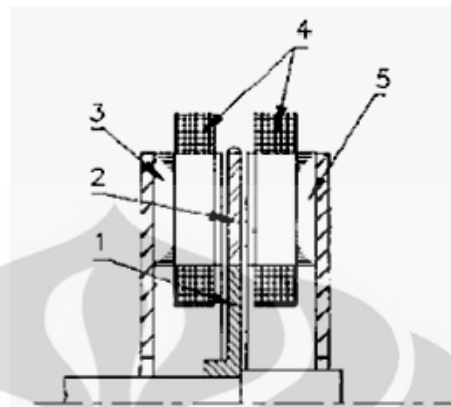
### 2.4.2 Konstruksi Dua Sisi dengan Stator Eksternal

Mesin ini memiliki  $N$  rotor dan  $N+1$  stator ( $N > 0$ ), dimana kumparan armaturnya terletak pada dua stator, serta terdapat rotor disk dengan magnet permanen terletak di antara kedua stator tersebut. Konstruksi ini sering disebut dengan tipe AFIR atau eksternal stator. Pada tipe ini tidak ada variasi tipe N-N dan N-S pada rotornya, melainkan terdapat variasi bentuk konstruksi statornya[4].

Celah udara yang dimiliki lebih besar daripada jenis konstruksi sebelumnya, yaitu terdiri atas dua celah mekanis antara stator dan rotor, ditambah dengan jarak aksial antara magnet permanen. Konstruksi dua sisi dengan kedua stator terhubung paralel dapat beroperasi apabila salah satu statornya rusak, namun di



sisi lain, apabila terhubung secara seri, akan menghasilkan dua gaya sama besar tetapi saling berlawanan.

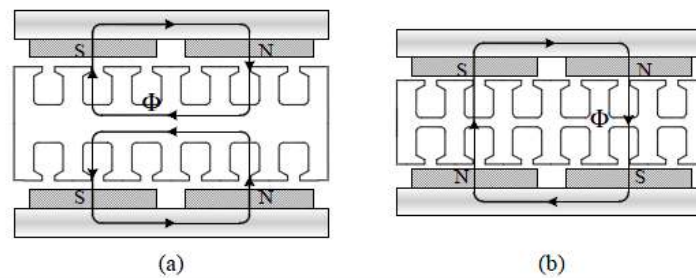


Gambar 2. 16 Konstruksi Mesin AFPM Tipe Dua Sisi Rotor Internal  
1 – Rotor, 2 – Magnet Permanen, 3 Inti Stator, 4 – Kumputan Stator

#### 2.4.3 Konstruksi Dua Sisi dengan Stator Internal

Mesin ini memiliki  $N$  stator dan  $N+1$  rotor ( $N > 0$ ) dimana dua buah rotor disk dengan permanen magnet mengapit kumparan stator di tengah. Konstruksi ini disebut dengan tipe TORUS. Berdasarkan pada arah dari fluks-fluks magnetiknya, mesin AFPM tipe TORUS dapat dibagi menjadi dua tipe, yaitu TORUS N-N (*North-North*) dan TORUS N-S (*North-South*) seperti pada gambar dibawah ini.

Pada konfigurasi tipe TORUS N-N, kutub N dan N atau kutub S dan S saling berhadapan satu sama lain. Fluks magnetik mengalir dari kutub utara (N) melewati *air gap* lalu ditangkap oleh kutub selatan (S) yang berada di samping kanan dan kiri kutub utara (N) di rotor yang sama. Sedangkan pada tipe TORUS N-S, fluks mengalir dari kutub utara (N) melewati *air gap* dan stator lalu ditangkap oleh kutub selatan (S), yang berhadapan dengan kutub utara (N), pada rotor yang berbeda. Dengan ini, tipe TORUS N-S membutuhkan diameter stator yang lebih besar bila dibandingkan dengan tipe N-N, sehingga rugi-rugi tembaga pada kumparan meningkat dan efisiensi akan berkurang. Namun, tipe N-S tidak membutuhkan inti pada stator dikarenakan aliran fluks yang tegak lurus secara aksial sehingga rugi-rugi inti stator dapat dihilangkan dan efisiensi kembali naik.



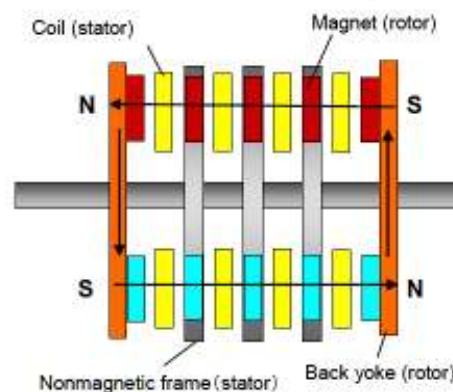
Gambar 2. 17 Aliran Fluks Magnet pada tipe TORUS <sup>[12]</sup>  
 (a) TORUS tipe NN ; (b) TORUS tipe NS

#### 2.4.4 Konstruksi Sisi Berlapis-lapis

Konsep ini muncul karena adanya keterbatasan pada meningkatnya torsi yang dapat dicapai dengan cara memperbesar diameter mesin AFPM. Faktor-faktor yang membatasi adalah:

1. Tekanan aksial yang ditahan bearing terlalu besar
2. Kekuatan mekanis pada sendi antara disk rotor dan shaft.
3. Pada kecepatan putar yang tinggi, maka disk yang terlalu lebar akan bergetar sehingga torsi yang dihasilkan pun tidak konstan melainkan terdapat *ripple* pada keluarannya.

Solusi yang mungkin dilakukan untuk terus meningkatkan besar torsi mesin adalah dengan menumpuk dua, tiga, atau lebih disk mesin AFPM seperti pada gambar di bawah ini. Konstruksi 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.



Gambar 2. 18 Konstruksi Mesin AFPM Tipe Sisi Berlapis-lapis

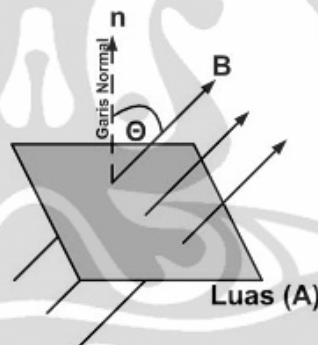
## 2.5 PARAMETER ELEKTROMAGNETIK

### 2.5.1 Medan magnet

Konsep yang diaplikasikan pada generator fluks aksial magnet permanen adalah medan dan fluks magnet. Menurut Michael Faraday, medan magnet digambarkan sebagai garis-garis yang disebut dengan garis medan magnet. Semakin rapat garis-garis medan, maka menandakan semakin tingginya kekuatan medan magnet tersebut. Kekuatan medan magnet ditunjukkan oleh induksi magnetik  $[B]$ , sebagai ukuran kerapatan garis-garis medan magnet.

### 2.5.2 Fluks magnet

Kekuatan medan magnet ditunjukkan oleh induksi magnetik  $[B]$ , sebagai ukuran kerapatan garis-garis medan magnet. Sedangkan fluks magnetik adalah banyaknya garis-garis medan magnet yang menembus dan terlingkupi oleh suatu luasan stator tertentu  $[A]$ .



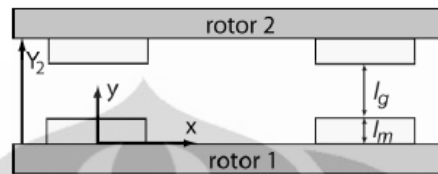
Gambar 2. 19 Ilustrasi Fluks Magnet  
(sumber: [http://noordiyono.blogspot.com/2011\\_03\\_01\\_archive.html](http://noordiyono.blogspot.com/2011_03_01_archive.html))

Dalam penghitungan, fluks yang ditangkap tidak memperhitungkan besarnya fluks akibat kerapatan medan magnet yang diakibatkan oleh arus pada stator. Menurut referensi jurnal [7], besarnya fluks akibat arus di stator dapat dianggap tidak ada karena pengaruhnya yang sangat kecil.

Generator magnet permanen fluks aksial menggunakan magnet permanen didalamnya sehingga besar medan magnet pada rotor selalu bernilai tetap. Saat generator ini aktif diputar, maka akan ada medan magnet yang menembus permukaan stator dengan besaran fluks yang berubah-ubah.

Kerapatan fluks magnetik pada tinggi aksial tertentu semakin berkurang berdasarkan beberapa parameter yang mempengaruhinya. Gambar 2.20 adalah

gambar penampang vertikal dari generator fluks aksial cakram ganda dimana stator diletakkan di antara kedua cakram rotor. Gambar tersebut juga menunjukkan jarak aksial pada Desain generator, yaitu tinggi magnet ( $l_m$ ), jarak celah udara ( $l_g$ ), dan jarak antar rotor ( $Y_2$ ).



Gambar 2. 20 Sistem Koordinat untuk Sebaran Kerapatan Fluks Magnet

Besar kerapatan fluks magnet yang ditangkap oleh stator pada posisi  $y$  yang dipengaruhi oleh kedua rotor yang saling berhadapan dapat ditentukan oleh persamaan berikut.

$$\begin{aligned} B_{yn1}(x) &= \left( \frac{\hat{J}_n \mu_0 \sinh(u_n l_m)}{u_n \sinh(u_n Y_2)} \cosh(u_n (Y_2 - y)) \right) \cos(u_n x) \\ B_{yn2}(x) &= \left( \frac{\hat{J}_n \mu_0 \sinh(u_n l_m)}{u_n \sinh(u_n Y_2)} \cosh(u_n (y)) \right) \cos(u_n x) \end{aligned} \quad (2.5)$$

dimana parameter lain adalah:

$$\begin{aligned} Y_2 &= l_g + 2l_m \\ u_n &= \frac{2\pi n}{\lambda} ; \lambda = \frac{2\pi R_m}{p} \end{aligned} \quad (2.6)$$

Keterangan:  $p$  = jumlah pasangan pole

$R_m$  = jari-jari inti rotor

$\hat{J}_n$  = perumpamaan arus pada medan magnet tertentu

Dengan demikian total fluks magnet yang dihasilkan untuk rotor dengan jarak yang sama adalah jumlah superposisi dari persamaan 2.2.a dan 2.3.a yaitu:

$$B_{y1}(x) = \sum_{n=1} B_{yn1}(x) ; B_{y2}(x) = \sum_{n=1} B_{yn2}(x) \quad (2.7)$$

Selain itu, medan magnet juga dihasilkan oleh kumparan stator yang sering disebut dengan medan magnet jangkar yang mengakibatkan reaksi armature atau reaksi jangkar. Medan magnet ini disebabkan karena adanya arus yang mengalir pada lilitan stator sehingga menambah medan magnet pada celah udara.

Besar medan magnet jangkar ini dapat mengurangi atau menambah besar medan magnet yang dihasilkan oleh magnet permanen pada rotor.

### 2.5.3 Tegangan

Tegangan terinduksi pada stator muncul karena adanya perubahan garis-garis medan magnet yang menembus luasan permukaan stator per satuan waktu.

$$\begin{aligned}
 E &= -NN \frac{\delta\varphi}{\delta\theta} \omega \\
 E &= -NN \frac{\delta\varphi}{\delta\theta} \frac{\delta\theta}{\delta t} = -NN \frac{\delta\varphi}{\delta t} \\
 E &= -NN \cdot A \frac{\delta B}{\delta t}
 \end{aligned}
 \tag{2.8}$$

Keterangan:  $E$  = tegangan induksi stator [V]

$NN$  = banyaknya lilitan

$A$  = luasan stator yang ditembus medan magnet [ $\text{m}^2$ ]

$B$  = kerapatan medan magnet [T]

$\varphi$  = fluks - fluks magnetic [Wb]

$\theta$  = sudut pada generator

$\omega$  = kecepatan putar generator [rpm]

Ketika generator diputar pada kecepatan rpm tertentu, maka akan ada perubahan besar fluks-fluks magnetik yang muncul dari magnet permanen terhadap perpindahan sudut generator. Hal inilah yang menghasilkan tegangan induksi pada stator. Seiring dengan itu, garis-garis medan magnet [B] yang menembus permukaan stator [A] juga berubah-ubah per satuan waktu [ $\delta t$ ].

Selain dengan cara diatas, nilai tegangan (*back emf*) pada tiap stator dapat ditentukan dengan mengetahui *flux linking* dari tiap kumparan stator. Peristiwa ditangkapnya garis-garis medan magnet oleh bidang stator dapat disebut dengan *flux linking*, yang dapat dihitung dari penjumlahan superposisi dari seluruh nilai fluks magnet pada celah udara [7].

Untuk seluas bidang kumparan stator (S) yang ditembus fluks magnet dengan sudut  $\theta$  tertentu, *flux linking* dapat diperoleh berdasarkan persamaan berikut ini [7].

$$\lambda_{slice}(\theta) = N \iint_S B \cdot dS \tag{2.9}$$

$$\lambda_{coil}(\theta) = \sum_1^{slices} \lambda_{slice}(\theta) \quad (2.10)$$

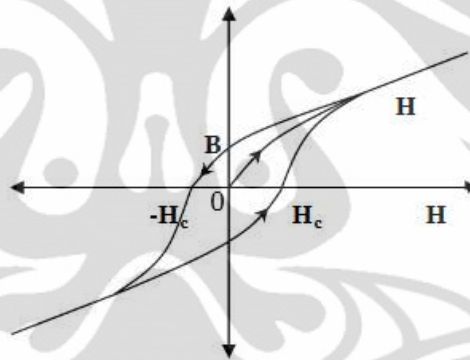
Saat generator berputar dengan sudut putar rotor ( $\theta$ ), nilai *flux linking* pada sebuah kumparan dapat ditentukan pada tiap waktu cuplik [7]. Sedangkan dengan menggunakan hukum Faraday, besar tegangan induksi yang terjadi pada sebuah kumparan stator dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$e_{coil}(t) = \frac{\Delta\lambda_{coil}}{\Delta t} \quad (2.11)$$

Oleh karena tiap lilitan fasa terdiri atas kombinasi secara seri atau parallel kumparan-kumparan stator yang terinduksi medan magnet, maka total tegangan induksi dari tiap fasa dapat ditentukan berdasarkan persamaan:

$$e_{phasa}(t) = \sum_1^{series\ coils} e_{coil}(t) \quad (2.12)$$

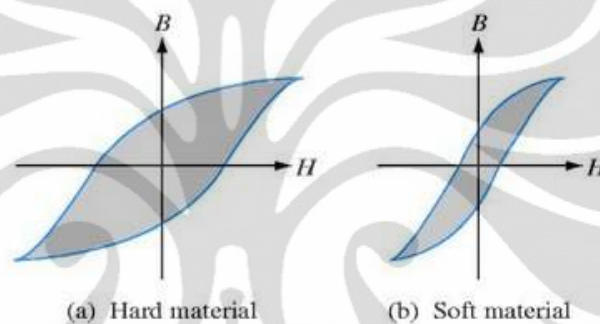
#### 2.5.4 Kurva Histeresis Magnetik



Gambar 2. 21 Kurva Histeresis Magnetik<sup>[13]</sup>

Gambar diatas merupakan ilustrasi *Hysteresis Loop*, merupakan kurva magnetisasi hubungan B-H. Kurva yang menunjukkan suatu perilaku magnetisasi yang dialami oleh material-material bersifat magnetik, berbentuk kurva medan magnet [B] sebagai fungsi intensitas magnet eksternal [H], diukur berdasarkan perubahan nilai fluks magnetik [B] pada material ketika gaya magnet eksternal [H] diberikan kepada material tersebut. Proses magnetisasi dilakukan dengan memberikan gaya magnetik eksternal [H] kepada material yang ingin dimagnetisasi sesuai dengan garis 0-a sampai pada keadaan saturasi dimana medan magnet B tidak berubah kembali. Besar medan magnet saat itu disebut dengan  $B_s$  yaitu *remanence (residual flux density)* [14].

Untuk bahan ferromagnetik, ketika sudah mencapai saturasi, intensitas medan  $H$  diperkecil hingga mencapai  $H=0$ . Namun ternyata kurva  $B$  tidak melewati jalur awal, melainkan menurun lebih landai. Ketika  $H=0$ , ternyata dalam bahan masih tersimpan fluks induksi yaitu  $B_r$  yang disebut dengan induksi remanensi material. Pada gambar 2.21 terlihat bahwa setelah mencapai nol, intensitas magnet  $H$  dibuat negatif, sehingga kurva  $B[H]$  memotong sumbu  $x$  pada titik  $H_c$  yang dikenal dengan koersivitas material. Apabila selanjutnya diperbesar, maka akan kembali mencapai masa saturasi dan berbalik kembali melalui nol, sehingga membentuk kurva tertutup [14].



Gambar 2. 22 Kurva Histeresis pada Jenis Material Berbeda  
(sumber: [http://www1.mmu.edu.my/~wslim/lecture\\_notes/Chapter4.pdf](http://www1.mmu.edu.my/~wslim/lecture_notes/Chapter4.pdf))

Gambar 2.22 menunjukkan bahwa terdapat perbedaan luas hysteresis loop pada jenis material magnetik yang berbeda. Untuk mencapai besar fluks magnet  $[B]$  yang sama, terlihat bahwa besi magnet keras (*hard material*) membutuhkan gaya magnetik eksternal yang lebih besar daripada besi lunak (*soft material*). Dengan demikian, *hard material* akan memiliki luas hysteresis loop yang jauh lebih besar daripada *soft material*, sehingga *hard material* memiliki sifat magnetisasi yang lebih kuat dengan nilai *remanence* (*residual flux density*) yang lebih besar.

## **BAB 3**

### **PEMODELAN DAN SIMULASI**

Bab ini berisi tentang perancangan model generator fluks aksial yang akan disimulasikan. Pemodelan dan simulasi memegang peranan yang penting dalam perancangan suatu alat karena dengan adanya simulasi, karakteristik dari alat tersebut dapat diketahui, sehingga dapat dihasilkan alat dengan kualitas terbaik.

Inti penelitian ini adalah membandingkan tiga buah desain generator fluks aksial dengan jumlah dan susunan stator yang berbeda satu sama lain, yaitu 9 stator untuk model pertama, 12 stator untuk model kedua, dan 15 stator untuk model ketiga. Parameter desain lain seperti jumlah kutub magnet, dimensi rotor, bentuk magnet permanen, dan bahkan bentuk kumparan stator dijaga tetap sama. Disamping itu, luas seluruh permukaan kumparan stator pada ketiga desain generator ini pun dirancang sama besar sehingga tidak mempengaruhi hasil penelitian, mengingat luas permukaan stator merupakan komponen inti dalam hal menangkap fluks-fluks magnet (*flux linking*).

Variasi lain yang dilakukan dalam penelitian adalah kecepatan putar generator dan susunan konfigurasi keluaran stator (satu fasa dan tiga fasa). Dengan ini dapat diambil suatu kesimpulan mengenai kualitas kerja generator fluks aksial hanya atas perbedaan susunan dan jumlah kumparan stator pada Desain generator (rotor dan stator) tertentu.

#### **3.1 KONSTRUKSI DAN DESAIN GENERATOR**

Model generator yang disimulasikan memiliki dimensi yang sama besar dengan generator sesungguhnya, yaitu berskala 1:1 sehingga hasil simulasi dari pemodelan generator ini diharapkan mendekati kinerja generator asli walaupun pada kenyataannya terdapat % error antara hasil simulasi dan hasil sesungguhnya.

Generator fluks aksial rotor ganda tanpa inti stator memiliki tiga buah bagian utama, yaitu rotor (magnet permanen dan penampang rotor), lilitan stator, dan celah udara.



### 3.1.1. Desain Rotor dan Celah Udara

Ketiga buah model generator yang disimulasikan memiliki desain rotor yang sama, yaitu tipe rotor ganda yang memiliki dua buah rotor identik dan saling berhadapan satu sama lain. Dengan menggunakan tipe rotor ganda, maka seluruh permukaan kumparan stator dapat dimanfaatkan untuk menangkap fluks-fluks magnetik dari kedua rotor yang mengapitnya [4].

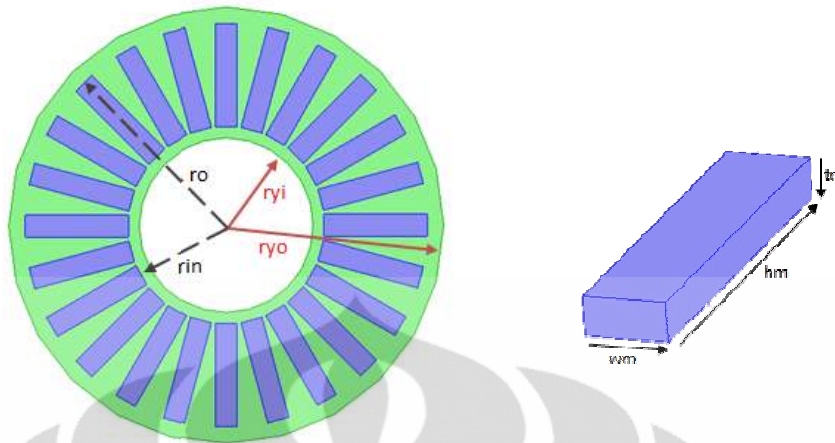
Menurut referensi [12], pengaturan magnet permanen pada rotor dengan menggunakan tipe N-S akan dapat menghasilkan kerapatan fluks yang lebih besar pada stator sehingga akan menghasilkan tegangan yang lebih tinggi pula daripada rotor tipe N-N. Magnet permanen yang digunakan adalah NdFeB memiliki remanent fluks magnet ( $B_r$ ) = 1.27 T dan  $H_c = 905$  kA/m [4] dengan bentuk *rectangular*. Sedangkan yoke rotor dibuat dari bahan besi lunak (*soft iron*) dengan rugi-rugi inti yang lebih kecil daripada besi biasa.

Tabel 3. 1 Karakteristik Material pada Bagian Generator

Bagian Generator	Bahan Material	B - H	Keterangan
Magnet Permanen	<i>Neodymium Ferrum Boron (NdFeB)</i>	$B = \mu_0 \mu_r H + B_r$	$B_r = 1,27$ [T] $H_c = 905$ [kA/m] $\mu_r = 1$
Penyangga Rotor	<i>Soft Iron</i>	$B = \mu_0 \mu_r H$	$\epsilon_r = 1$
Lilitan Stator	<i>Copper</i>	$B = \mu_0 \mu_r H$	$\epsilon_r = 1$ $\mu_r = 1$
Celah Udara	<i>Air</i>	$B = \mu_0 \mu_r H$	$\epsilon_r = 1$

Penelitian ini mengacu kepada referensi [15] yang menunjukkan bahwa untuk generator berkecepatan rendah, rotor dengan 24 pole menghasilkan unjuk kerja tegangan yang paling baik dibandingkan dengan rotor dengan 12 pole dan 48 pole. Oleh sebab itu, penelitian ini menggunakan rotor dengan 24 kutub magnet. Celah udara antara kedua rotor bernilai sama dengan dua kali dari tinggi magnet permanen agar dapat menghasilkan hasil yang optimal [7].

Dalam pemodelan, penyangga rotor dan medan magnet ditempel seperti generator fluks aksial pada kenyataannya. Kemudian ketika simulasi, keseluruhan rotor bergerak memutar searah jarum jam (*clockwise*).



Gambar 3. 1 Pemodelan Geometri Rotor - 24 Kutub Magnet  
yoke rotor (hijau) dan magnet permanen (biru)

Tabel 3. 2 Keterangan Desain Rotor dan Celah Udara

Simbol	Keterangan	Ukuran (m)	Bidang
ryo	jari-jari bagian luar yoke rotor	0,2	x/y
ryi	jari-jari bagian dalam yoke rotor	0,08	x/y
ty	tinggi yoke rotor	0,005	z
ro	jari-jari bagian luar magnet	0,185	x/y
rin	jari-jari bagian dalam magnet	0,09	x/y
hm	panjang kutub magnet	0,095	x/y
wm	lebar kutub magnet	0,02	x/y
tm	tinggi kutub magnet	0,01	z
tc	tinggi celah udara (antara 2 rotor)	0,02	z

### 3.1.2. Desain Stator

Penyusunan sejumlah stator merupakan inti dari penelitian ini. Terdapat tiga desain generator fluks aksial dengan susunan stator yang berbeda. Pada generator magnet permanen fluks aksial rotor ganda, stator diletakkan di tengah antara kedua rotor dengan jarak celah udara yang sama. Stator ini tidak memiliki inti besi ditengahnya (*coreless stator*), namun menggunakan resin sebagai bahan penyangga lilitan stator tersebut. Celah udara antara kedua rotor dibuat sama untuk ketiga desain, sehingga tinggi stator (sumbu z) pun sama untuk ketiga desain generator pada penelitian ini.

Bentuk stator setiap desain adalah sama yaitu trapezoidal karena menurut jurnal [8] stator berbentuk trapezoidal dapat menangkap lebih banyak fluks daripada bentuk-bentuk lainnya, terutama ketika stator berbentuk trapezoidal dipasangkan dengan kutub magnet berbentuk rectangular. Dengan ini, hasil sinusoidal yang muncul akan lebih baik. Tipe kumparan stator juga dibuat sama, yaitu “distributed” dan “non-overlapping” yang lebih mudah dibuat konstruksinya daripada tipe lainnya. Seluruh stator pada ketiga desain generator terdiri atas 100 lilitan, yang menggunakan bahan tembaga (Cu) dengan diameter yang berbeda-beda pada setiap desain, disesuaikan dengan ukuran lebar dan tebal setiap stator.



Gambar 3. 2 Pemodelan Geometri Kumparan Stator

Tabel 3. 3 Keterangan Desain Kumparan Stator

Simbol	Keterangan	Ukuran (m)		
		9 stator	12 stator	15 stator
rco	jari-jari lubang stator bagian luar	0,168	0,170	0,176
rci	jari-jari lubang stator bagian dalam	0,108	0,106	0,102
rso	jari-jari bagian luar stator	<b>0,192</b>	<b>0,192</b>	<b>0,192</b>
rsi	jari-jari bagian dalam stator	<b>0,084</b>	<b>0,084</b>	<b>0,084</b>
wco	lebar lubang bagian luar	0,048	0,044	0,04
wci	lebar lubang bagian dalam	0,016	0,016	0,008
wso	lebar bagian luar stator	0,108	0,084	0,068
wsi	lebar bagian dalam stator	0,048	0,032	0,024
ts	tebal stator	<b>0,008</b>	<b>0,008</b>	<b>0,008</b>

Merujuk pada tabel di atas, terdapat tiga bagian yang bernilai sama, yaitu tebal stator [ts], jari-jari bagian luar lilitan stator [rso], dan jari-jari bagian dalam

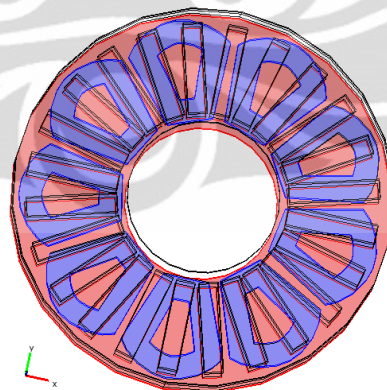
lilitan stator [rsi]. Tebal stator didesain sama agar celah udara antara stator dan kedua rotor adalah tetap sama untuk ketiga desain penelitian dan tidak akan mempengaruhi hasil yang diperoleh. Sedangkan jari-jari stator dibuat sama agar panjang seluruh stator pada desain yang berbeda tetap sama sehingga tidak mempengaruhi kemampuan stator dalam melingkupi fluks-fluks magnet.

Penelitian ini memvariasikan jumlah kumparan stator yaitu antara 9 stator, 12 stator, dan 15 stator. Adanya pemilihan variasi tersebut disebabkan karena ketiga jumlah stator diatas merupakan yang relatif paling banyak digunakan dalam penelitian dan aplikasi perancangan generator fluks aksial sebelumnya. Batas atas variasi adalah 15 stator, dipilih karena pada aplikasinya, generator fluks aksial dengan jumlah stator diatas 15 kumparan adalah tidak baik karena konfigurasi akan semakin rumit.

Berikut ini adalah perbedaan susunan stator pada ketiga desain yang digunakan pada penelitian ini:

#### 1. Susunan 9 kumparan stator

Terdapat 9 stator yang tersusun secara simetris, dimana setiap fasa terpisah 120 derajat konstruksi dan terhubung secara seri untuk tiap fasa yang sama. Luas permukaan tiap stator adalah  $0,017 \text{ m}^2$  sehingga total luas permukaan lilitan 9 stator adalah  $0,153 \text{ m}^2$ .



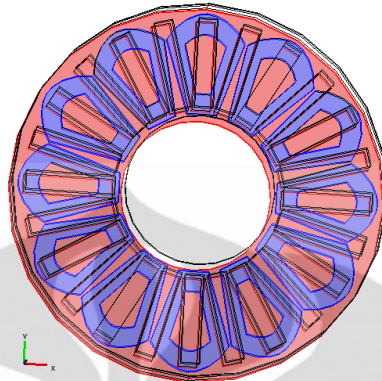
Gambar 3. 3 Geometri Desain 9 Kumparan Stator yoke rotor (merah), magnet permanen (bening), stator (merah)

#### 2. Susunan 12 kumparan stator

Terdapat 12 stator yang tersusun secara simetris, dimana setiap fasa terpisah 90 derajat konstruksi dan terhubung secara seri untuk tiap fasa



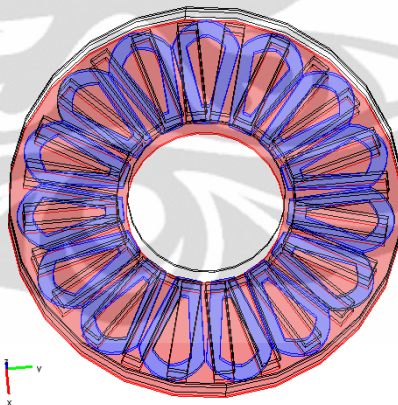
yang sama. Luas permukaan tiap stator adalah  $0,0125 \text{ m}^2$ , sehingga total luas permukaan lilitan 12 stator yaitu  $0,150 \text{ m}^2$ .



Gambar 3. 4 Geometri Desain 12 Kumbaran Stator yoke rotor (merah), magnet permanen (bening), stator (merah)

### 3. Susunan 15 kumparan stator

Terdapat 15 stator yang tersusun secara simetris, dimana setiap fasa terpisah 72 derajat konstruksi dan terhubung secara seri untuk tiap fasa yang sama. Luas permukaan tiap stator adalah  $0,01024 \text{ m}^2$ , sehingga total luas permukaan lilitan 15 stator yaitu  $0,153 \text{ m}^2$ .



Gambar 3. 5 Geometri Desain 15 Kumbaran Stator yoke rotor (merah), magnet permanen (bening), stator (merah)

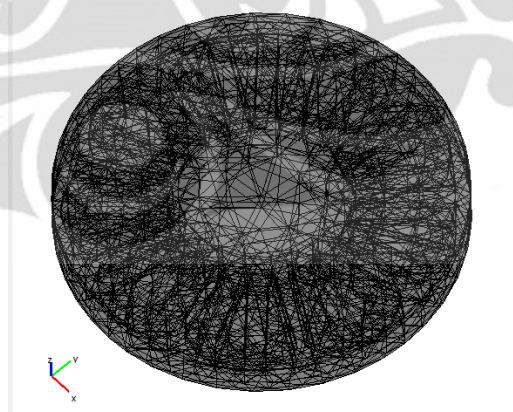
## 3.2 SIMULASI DAN PENGUMPULAN DATA

Tujuan dari simulasi model adalah untuk menunjukkan bagaimana kerja, karakteristik dan perbedaan dari ketiga model generator yang telah dirancang. Parameter keluaran yang digunakan adalah fluks magnet per satuan luas

permukaan stator yang menangkapnya. Metode yang digunakan dalam penyelesaian simulasi ini adalah FEM (*Finite Element Method*), yaitu setiap daerah model generator dibagi-bagi menjadi bagian-bagian kecil berbentuk limas segitiga yang sangat banyak terhingga, dan kemudian dilakukan penyelesaian pada setiap bagian kecil tersebut.

Berikut adalah beberapa tahapan mulai dari perancangan sampai dengan penyelesaian model generator magnet permanen fluks aksial, yang dapat dilihat pula pada gambar *flowchart* dibawah, yaitu sebagai berikut:

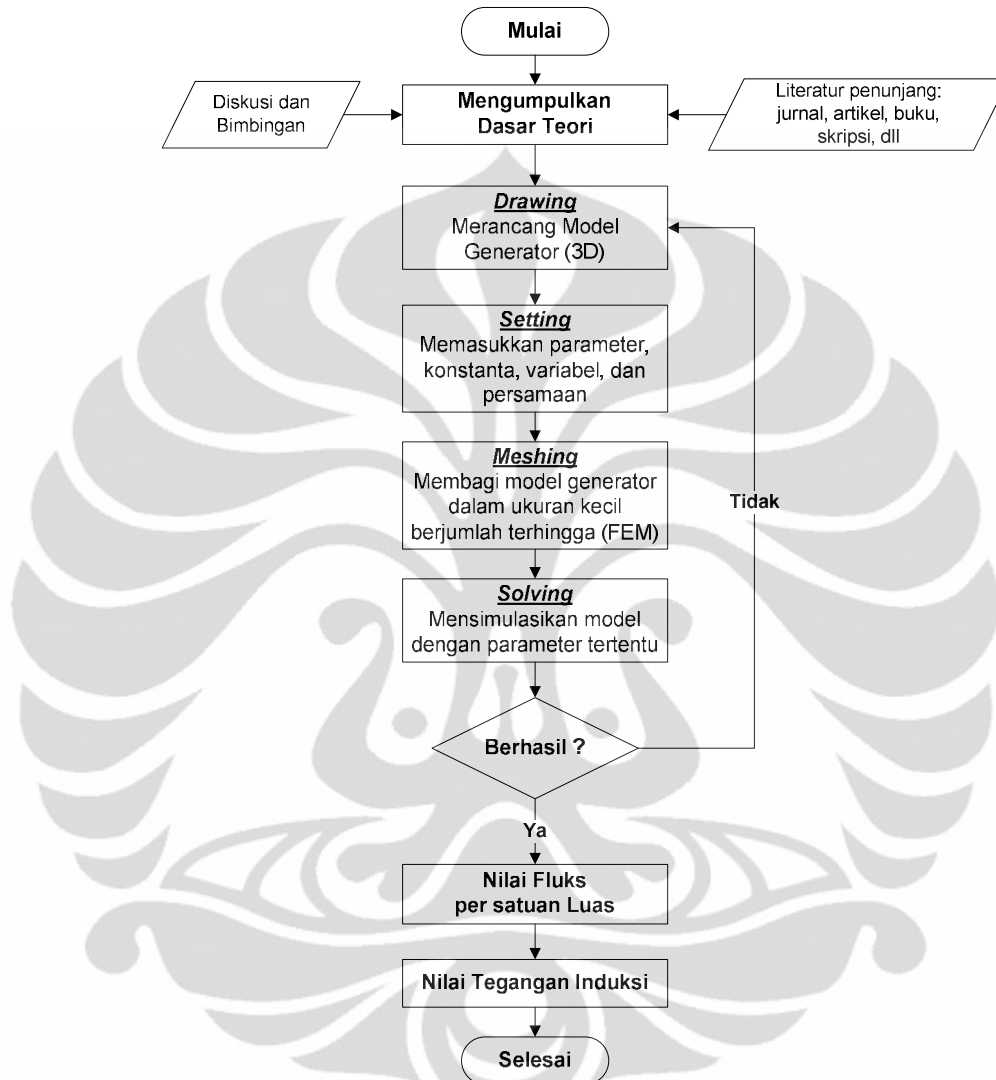
1. Merancang geometri ketiga model generator, mulai dari rotor, stator, dan celah udara. Hampir seluruh geometri pada ketiga model yang dibuat adalah sama, kecuali pada stator yang menjadi inti penelitian.
2. Mendefinisikan dan mengidentifikasi setiap model geometri yang telah dibuat pada tahap sebelumnya. Setelah itu dilanjutkan dengan memasukkan berbagai parameter, konstanta, persamaan, dan pengaturan lain yang diperlukan sesuai dengan prinsip kerja generator fluks aksial.
3. Melakukan *meshing*, yaitu pembagian model generator kedalam bagian-bagian kecil berbentuk segitiga dan limas, untuk menghitung hasil simulasi berdasarkan pengaturan di atas.



Gambar 3. 6 Hasil Meshing Model Generator

4. Menentukan metode penyelesaian masalah simulasi yang ingin dipakai. Metode ini akan mempengaruhi waktu penyelesaian, dan tingkat akurasi dari nilai yang dihasilkan.

5. Mengumpulkan data hasil simulasi dan menganalisis hasil *plotting* medan magnet pada generator. Kemudian tahap ini dilanjutkan dengan menganalisis berbagai hasil simulasi di antara ketiga model penelitian.



Gambar 3. 7 Diagram Alir Simulasi dan Pengumpulan Data

Penelitian juga dilakukan untuk kecepatan putar yang berbeda-beda yaitu 300 rpm, 500 rpm, dan 800 rpm. Pemilihan ketiga variasi kecepatan putar merupakan penyesuaian dari tingkat kecepatan angin di Indonesia. Berdasarkan pada penjelasan Penelitian dan Pengembangan Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM), pada umumnya kecepatan angin di Indonesia tergolong rendah yaitu di bawah 5,9 m/s. Oleh sebab itu, penelitian ini menggunakan variasi kecepatan putar kategori rendah yaitu 300 rpm, 500 rpm, dan 800 rpm.

Pada aplikasinya, terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi besarnya kecepatan putar generator terhadap kecepatan angin di daerah tersebut, yaitu:

- Konstruksi turbin angin yang digunakan, seperti bentuk turbin, bentuk *blade* turbin, jumlah sudu-sudu turbin, dan karakteristik lainnya.
- Variasi perbandingan besar jari-jari pada *gear-gear* yang menghubungkan antara turbin dan *shaft* generator sehingga dapat menaikkan atau menurunkan kecepatan putar pada generator sesuai yang diinginkan.
- Rangkaian pengendali yang diaktifkan untuk mengontrol kecepatan putar *shaft* generator agar menghasilkan keluaran yang diinginkan.

Dalam penelitian ini, data diambil selama 1 periode gelombang. Periode gelombang didapatkan dengan persamaan berikut:

$$f = \frac{n.p}{120} \longrightarrow T = \frac{1}{f} \quad (3.1)$$

Tabel 3. 4 Perbandingan Kecepatan dan Frekuensi

Jumlah Kutub	Kec. putar [rpm]	Frekuensi [Hz]	Periode [s]
24	300	60	0.016667
24	500	100	0.01
24	800	160	0.00625

Ketika dilakukan penyelesaian simulasi, aplikasi metode FEM (*Finite Element Method*) ini dapat mengetahui besarnya fluks magnet yang ditangkap stator pada tiap waktu tertentu. Setiap fasa pada stator dicatat besarnya fluks untuk waktu cuplik tertentu. Kemudian simulasi dilanjutkan dengan menaikkan waktu cuplik sehingga didapat besar fluks magnet pada setiap stator untuk waktu yang berbeda-beda. Perbedaan fluks yang diperoleh karena rotor tersebut bergerak, sehingga fluks yang diterima oleh stator berubah-ubah. Data ini kemudian dibuat grafik fluks, kemudian grafik tersebut dibandingkan untuk tiap fasa dan setiap desain generator. Data ini dapat diolah sehingga dapat ditentukan besarnya perubahan fluks per perubahan waktu, yaitu tegangan keluaran generator.



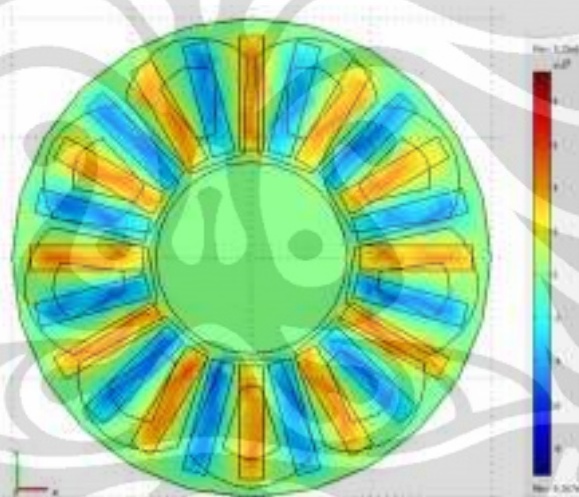
## BAB 4

### HASIL SIMULASI DAN ANALISIS

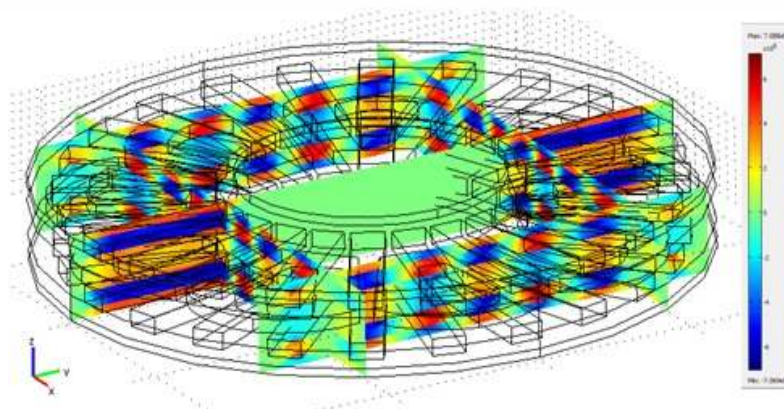
Bagian ini akan menunjukkan hasil seluruh simulasi, yaitu *plotting* medan magnet dan data fluks magnet hasil simulasi pada ketiga model generator yang dibandingkan. Besar tegangan keluaran pada tiap fasa adalah hasil perhitungan dari perubahan data fluks magnet per satuan waktu. Selanjutnya, terdapat pula pemaparan berupa analisis mengenai hasil simulasi dan pengolahan data di atas.

#### 4.1. HASIL SIMULASI DAN PENGOLAHAN DATA

##### 4.1.1. Medan Magnet

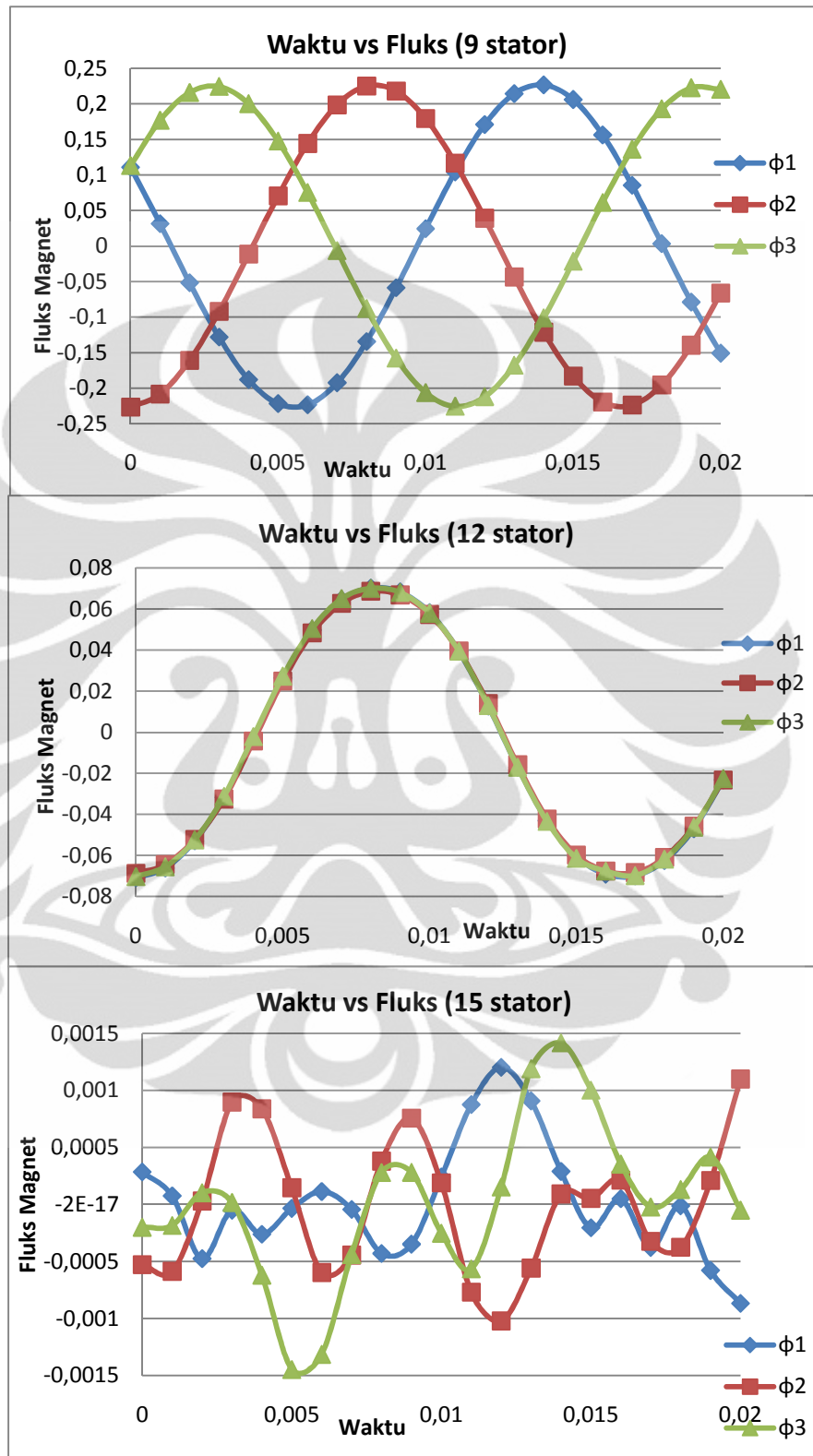


Gambar 4. 1 *Plotting* Medan Magnet secara Horizontal



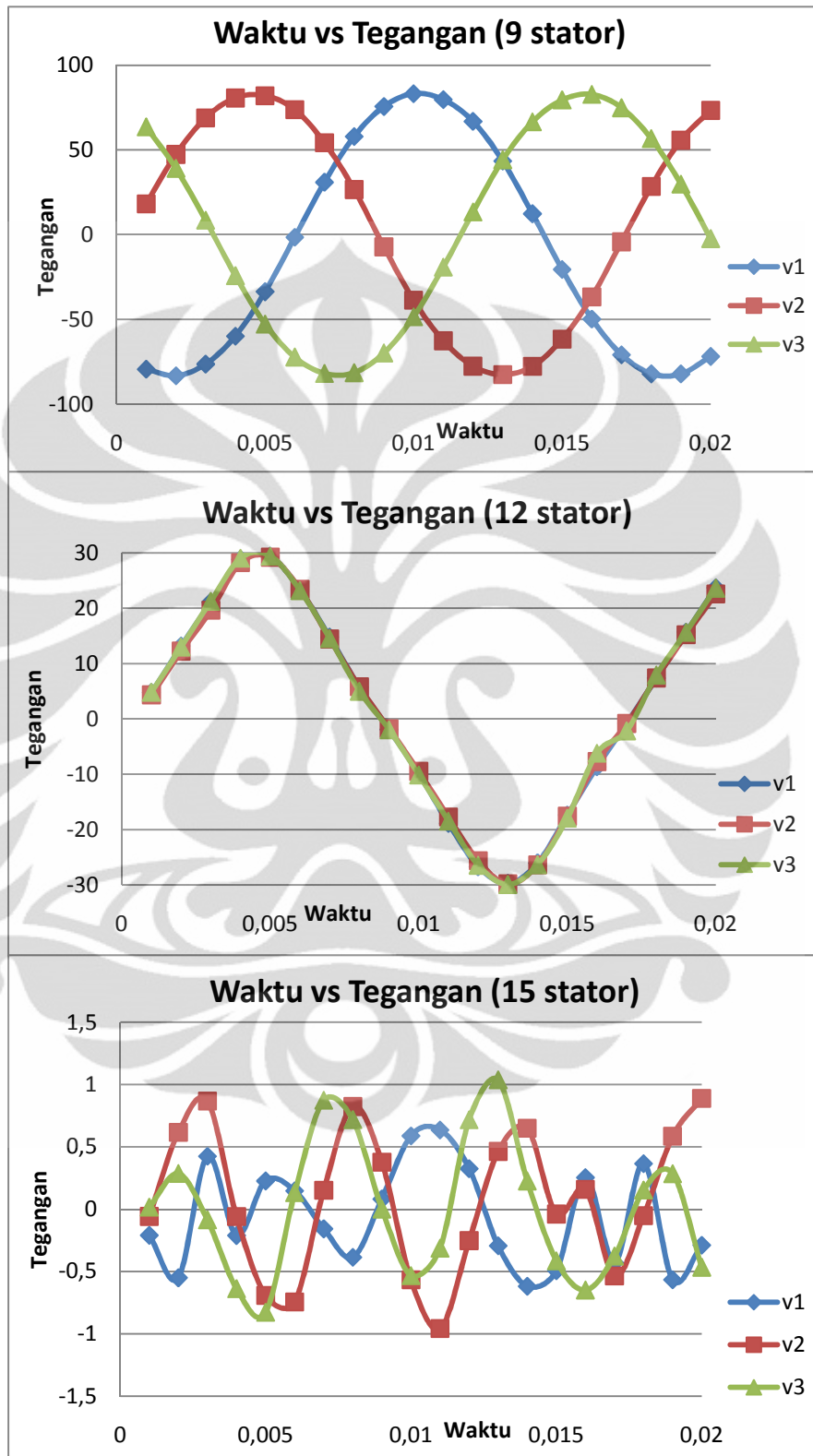
Gambar 4. 2 *Plotting* Medan Magnet secara Vertikal

## 4.1.2. Data Fluks Magnet



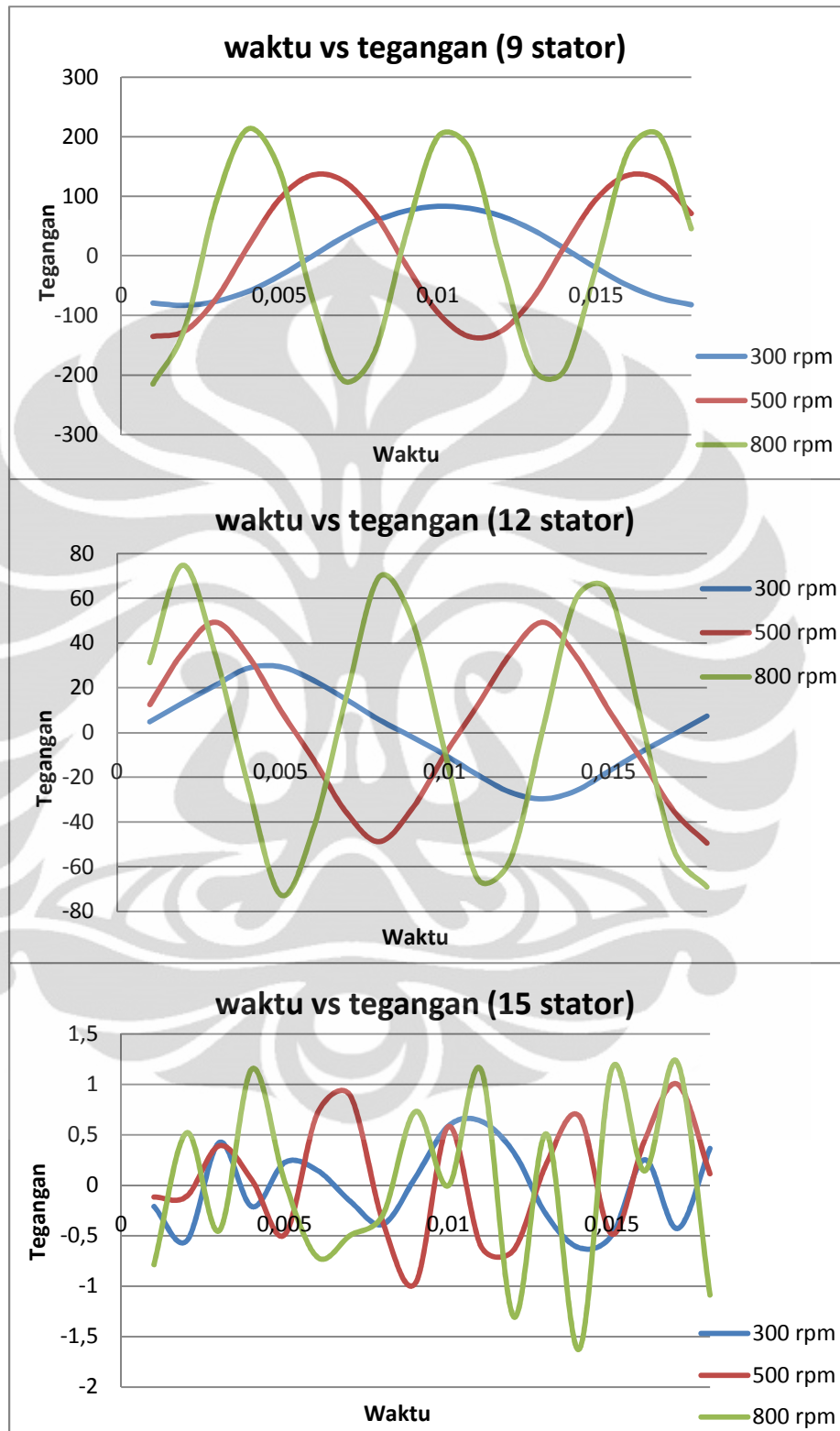
Gambar 4. 3 Grafik Waktu vs Fluks untuk Tiap Jumlah Stator

## 4.1.3. Data Tegangan Induksi



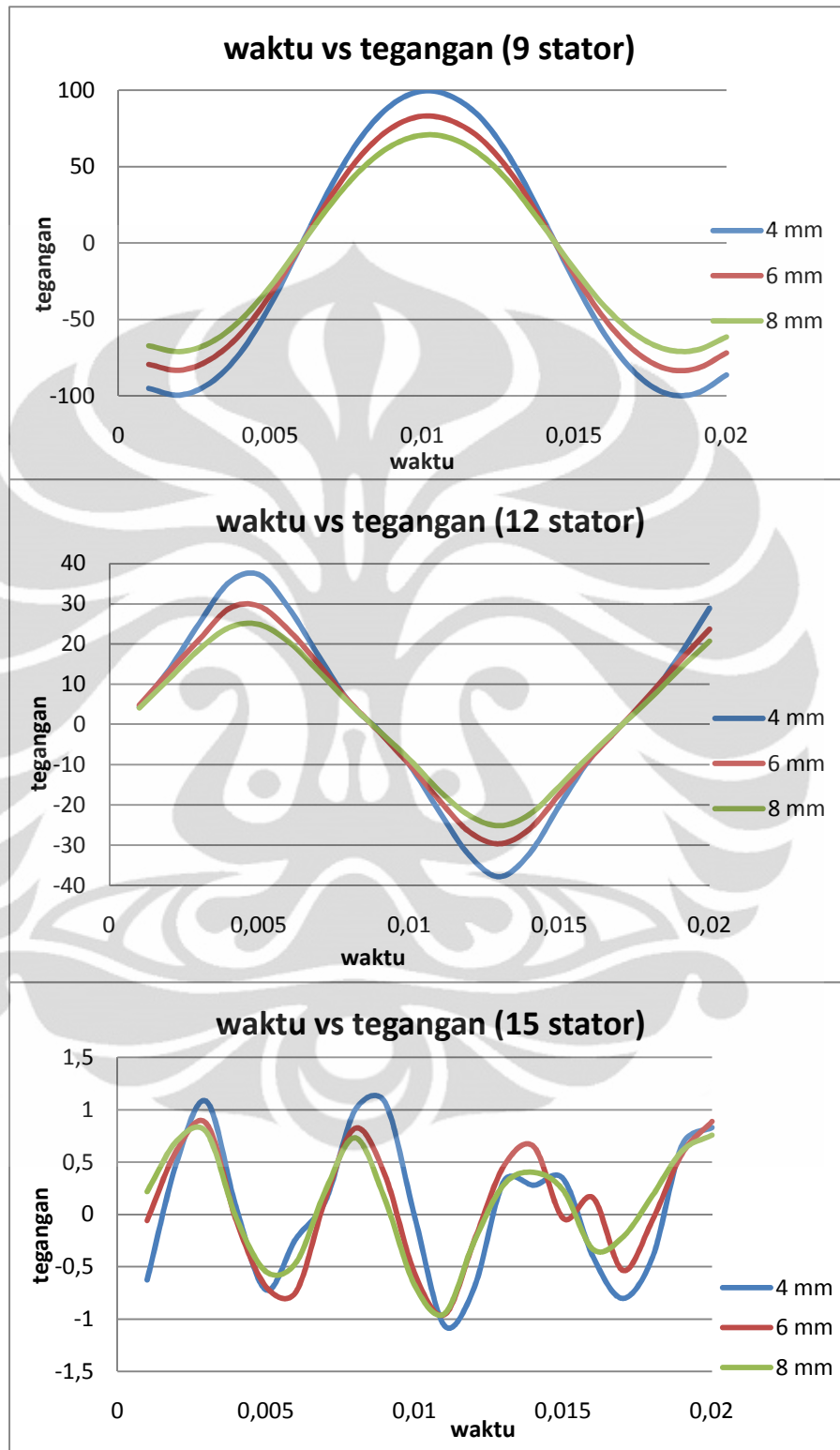
Gambar 4. 4 Grafik Waktu vs Tegangan untuk Tiap Jumlah Stator

## 4.1.4. Data Perbandingan Kecepatan Putar Rotor



Gambar 4. 5 Grafik Waktu vs Tegangan terhadap Variasi Kecepatan Putar

## 4.1.5. Data Perbandingan Jarak Celah Udara



Gambar 4. 6 Grafik waktu vs Tegangan untuk Variasi Jarak Celah Udara

## 4.2. ANALISA HASIL SIMULASI DAN PENGOLAHAN DATA

### 4.2.1. Analisa Medan Magnet

Plotting medan magnet digunakan untuk menganalisa penyebaran medan magnet pada generator fluks aksial. *Software* yang digunakan dapat menunjukkan plotting ini setelah selesai melakukan penyelesaian simulasi. Gambar 4.1 dan 4.2 menunjukkan plotting medan magnet yang dihasilkan oleh magnet permanen pada rotor. Penulis hanya menunjukkan plotting pada generator desain 9 stator karena pada penelitian ini desain keseluruhan rotor tidak berbeda sehingga penyebaran medan magnet pun sama untuk ketiga desain penelitian.

Gambar 4.1 ini merupakan plotting berupa potongan (*slice*) yang dipotong secara vertikal memotong sumbu z. Pada gambar ini terlihat bahwa medan magnet pada setiap kutub magnet di tunjukkan oleh perbedaan warna, yaitu biru muda dan oranye. Warna hijau menunjukkan bahwa daerah tersebut tidak menghasilkan medan magnet. Hal ini disebabkan karena pengaturan kutub magnet adalah saling berlawanan pada kutub yang berdekatan.

Sedangkan gambar 4.2 menunjukkan plotting berupa potongan beberapa potongan (*slice*) yang dipotong secara horizontal memotong sumbu x sebanyak 3 potong, dan sumbu y sebanyak 2 potong. Pada gambar ini terlihat bahwa pada kumparan stator, yang berada di tengah, terdapat medan magnet yang nilainya lebih kecil daripada medan magnet pada magnet permanen itu sendiri. Perbedaan nilai medan magnet ini disebabkan karena kerapatan garis medan magnet akan berkurang pada jarak dan sudut tertentu, sesuai dengan persamaan:

$$B = B_M \cos(\omega t - \alpha) \quad (4.1)$$

Keterangan:  $B$  = medan magnet pada titik tertentu

$B_M$  = medan magnet maksimum

$\omega$  = kecepatan angular rotor

$\alpha$  = sudut garis-garis medan magnet



#### 4.2.2. Analisa Fluks Magnet Hasil Simulasi

Pada penelitian ini, ketiga model generator dengan jumlah stator yang berbeda-beda disimulasikan pada kecepatan konstan 300 rpm dimana generator dapat membangkitkan tegangan dengan frekuensi 60 Hz. Seluruh besar garis-garis medan magnet yang ditangkap per satuan luas permukaan kumparan stator pada setiap waktu cuplik (0-0,017s) digabung menjadi sebuah grafik. Gambar 4.3 menunjukkan grafik fluks magnet yang dihasilkan oleh ketiga desain penelitian.

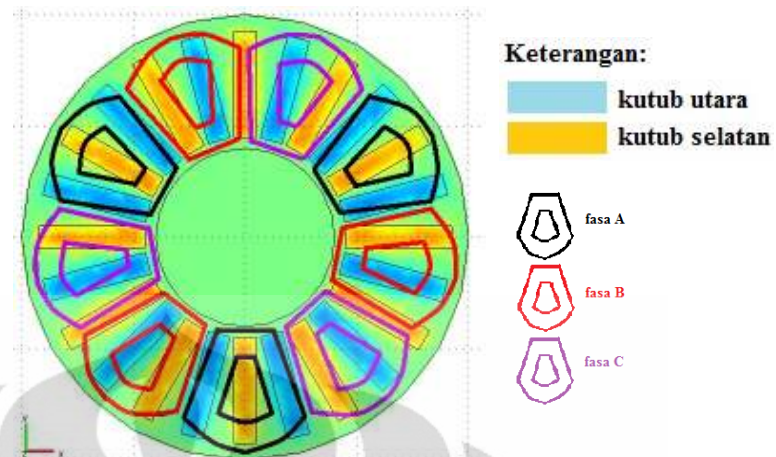
Berdasarkan pada gambar tersebut, terlihat bahwa nilai fluks magnet tertinggi didapatkan oleh desain generator dengan 9 stator, lalu desain 12 stator, dan yang terkecil adalah desain 15 stator.

Hal yang menarik dari hasil simulasi ini adalah pada perbedaan bentuk ketiga grafik fluks magnet. Merujuk pada gambar 4.3, grafik sinusoidal yang paling sempurna terdapat pada grafik 9 stator dan 12 stator. Namun pada grafik 12 stator terlihat seolah-olah tidak ada perbedaan fasa karena pada setiap waktu cuplik, ketiga fasa (fasa A, B, dan C) menangkap nilai fluks magnet yang sama per satuan luas permukaan stator. Sedangkan pada grafik desain 15 stator menunjukkan bentuk sinusoidal yang tidak sempurna dengan nilai amplitudo yang tidak sama pada setiap gelombangnya.

Analisa grafik fluks magnet di atas akan dijabarkan masing-masing untuk setiap desain generator yang berbeda dalam penelitian ini, yaitu sebagai berikut:

##### a. Analisa grafik fluks magnet pada Desain 9 stator

Desain 9 stator memiliki konfigurasi tiga fasa seperti gambar 4.7 Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, bentuk lingkaran adalah penyangga rotor, dan bentuk persegi panjang (*rectangular*) adalah magnet permanen yang ditempelkan pada penyangga rotor. Terdapat dua perbedaan warna pada magnet permanen yaitu warna biru muda dan oranye yang menunjukkan nilai medan magnet ataupun polaritas kutub tersebut. Bentuk trapezoidal adalah kumparan stator. Setiap fasa terdiri atas tiga kumparan stator yang tersebar dan terhubung secara seri.



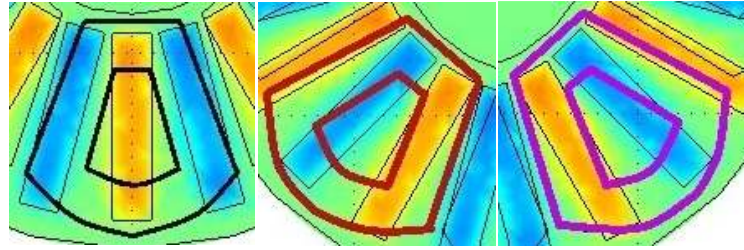
Gambar 4. 7 Penampang Melintang Hasil Simulasi Desain 9 Stator

Nilai fluks magnet pada desain 9 stator adalah yang paling tinggi. Hal ini disebabkan karena tiap kumparan stator lebih luas permukaannya sehingga lebih banyak menangkap garis-garis medan magnet. Selain itu, untuk fasa yang sama besar nilai fluks magnet yang ditangkap adalah sama, sehingga konfigurasi hubung seri antara tiga kumparan stator akan membuat nilai fluks menjadi jauh lebih tinggi daripada desain 12 dan 15 stator.

Bentuk grafik fluks magnet pada desain 9 stator memiliki hasil sinusoidal yang paling baik daripada desain-desain lainnya. Hal ini dipengaruhi oleh dua fenomena yang dapat dilihat melalui gambar diatas dan akan dijelaskan pemaparannya berikut ini.

Pertama, setiap kumparan stator untuk fasa yang sama memiliki jumlah fluks magnet yang sama pula. Jika kita memperhatikan gambar 4.7, maka terlihat bahwa seluruh kumparan stator berwarna hitam (fasa A) terletak di atas kutub magnet dengan polaritas yang sama, sehingga garis-garis medan magnet yang ditangkap oleh setiap stator fasa A pun bernilai sama besar. Bila merujuk kembali pada gambar 4.7, maka ternyata fenomena ini pun terjadi sama persis untuk fasa B (warna merah) dan fasa C (warna ungu).





Gambar 4. 8 Kumparan Stator Fasa A1, B1, dan C1 Desain 9 Stator

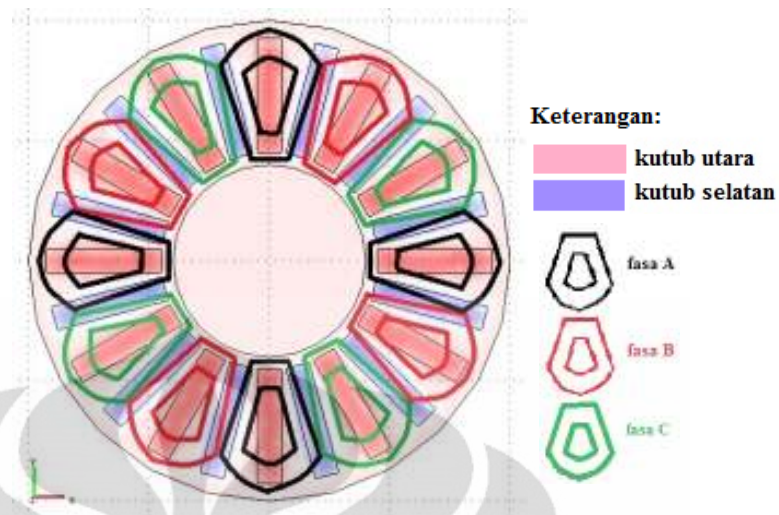
Kedua, jumlah fluks magnet pada tiap kumparan stator berbeda-beda antar fasa satu dan fasa yang lainnya. Gambar 4.8 adalah potongan dari generator utuh, dimana pada gambar ini hanya terdapat satu kumparan stator untuk setiap fasa sehingga lebih mudah untuk dianalisis. Berdasarkan pada gambar 4.8 terlihat bahwa setiap garis-garis medan magnet yang diterima oleh kumparan fasa A, fasa B, dan fasa C adalah saling berbeda-beda. Hal ini dapat diketahui dari letak kumparan stator atas kutub-kutub magnet di bawahnya. Oleh sebab itu, pada setiap waktu cuplik simulasi, nilai fluks magnet pada fasa A, fasa B, dan fasa C adalah berbeda-beda (data fluks magnet dilampirkan).

Hal ini disebabkan karena desain 9 stator membagi luas permukaan rotor 24 kutub dengan simetris, dimana tiap kumparan stator pada fasa yang sama ditembus oleh besar fluks magnet yang sama besar. Namun untuk fasa yang berbeda, maka fluks magnetnya berbeda pula.

Ketika generator bergerak, kedua fenomena di atas selalu terjadi pada setiap waktu cuplik. Dengan demikian, maka setiap fasa memiliki grafik fluks magnet yang sama, akan tetapi terdapat perbedaan sudut fasa yang dipengaruhi oleh fenomena kedua.

b. Analisa grafik fluks magnet pada Desain 12 stator

Desain 12 stator memiliki konfigurasi tiga fasa seperti gambar berikut ini. Sesuai dengan keterangan pada gambar tersebut, Desain ini memiliki 12 stator berbentuk trapezoidal dengan konfigurasi 4 stator tersebar dan terhubung secara seri untuk setiap fasa. Terdapat rotor dengan jumlah dan susunan kutub magnet yang persis sama dengan desain sebelumnya.

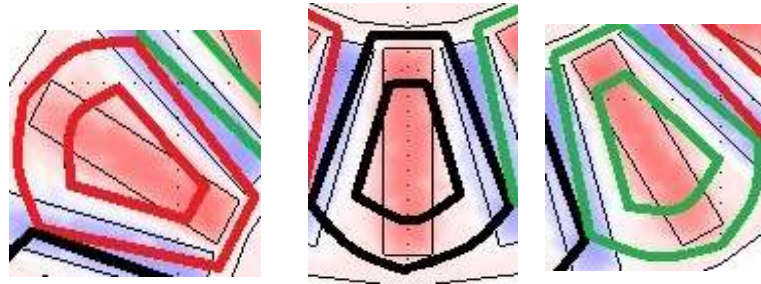


Gambar 4. 9 Penampang Melintang Hasil Simulasi Desain 12 Stator

Bentuk grafik fluks magnet pada desain 12 stator menunjukkan hasil yang menarik, dimana hasil grafik ketiga fasa tersebut berhimpit pada satu garis yang membentuk sinusoidal sempurna, sehingga terlihat seolah tidak ada perbedaan sudut fasa antara ketiga fasa ini. Hal ini pun dipengaruhi oleh dua fenomena, apabila kita menganalisis gambar 4.9 secara logis.

Fenomena pertama yaitu sama dengan yang terjadi pada desain 9 stator, yaitu setiap kumparan stator untuk fasa yang sama, menghasilkan fluks magnet yang sama. Berdasarkan pada gambar, maka terlihat bahwa empat kumparan stator hitam, sebagai fasa A, terletak di atas kutub-kutub magnet dengan konfigurasi polaritas yang sama. Hal ini pun berlaku pada kumparan stator untuk fasa B (merah) dan fasa C (hijau). Fenomena ini mengakibatkan hasil grafik membentuk sinusoidal yang sempurna.

Akan tetapi, fenomena di atas ternyata tidak hanya terjadi pada kumparan stator untuk fasa yang sama saja, melainkan terjadi pada seluruh kumparan stator. Seluruh kumparan stator, baik fasa A, B, maupun fasa C terletak di atas kutub magnet dengan konfigurasi polaritas yang sama sehingga seluruh stator menangkap garis-garis medan magnet dalam jumlah yang sama. Hal ini disebabkan karena susunan 12 stator secara simetris akan membagi lingkaran (rotor) secara sama besar sehingga fluks magnet yang menembus tiap kumparan stator memiliki besar skalar dan arah fluks magnet yang sama

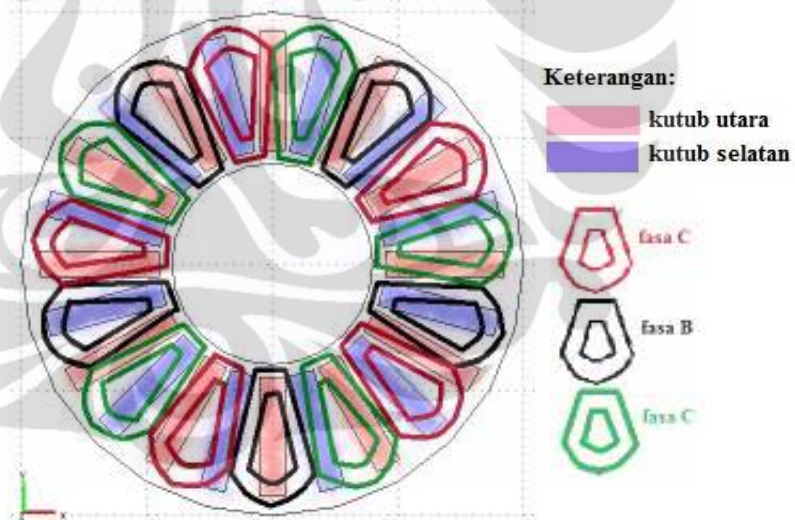


Gambar 4. 10 Kumparan Stator Fasa A1, B1, dan C1 Desain 12 Stator

Oleh karena luas permukaan seluruh stator adalah sama, maka nilai fluks magnet pada seluruh stator akan sama besar saat waktu pencuplikan. Dengan demikian ketika generator berputar, maka ketiga fasa akan membentuk grafik sinusoidal sempurna secara bersamaan dan berhimpit.

c. Analisa grafik fluks magnet pada Desain 15 stator

Desain 15 stator memiliki konfigurasi tiga fasa seperti gambar berikut ini.



Gambar 4. 11 Penampang Melintang Hasil Simulasi Desain 15 Stator

Sesuai dengan keterangan pada gambar 4.11, desain ini memiliki 15 stator berbentuk trapezoidal dengan konfigurasi 5 stator terhubung secara seri pada setiap fasa. Bentuk lingkaran merupakan rotor dengan jumlah dan susunan kutub magnet yang persis sama dengan desain sebelumnya, yaitu 24 kutub.

Pada grafik fluks desain 15 stator, terlihat bentuk sinusoidal yang tidak sempurna, dimana nilai amplitudo gelombang tidak sama, memiliki banyak

riak, dan seolah frekuensi generator meningkat. Hal ini dipengaruhi karena kumparan stator terlalu banyak sehingga nilai fluks magnet pada tiap fasa menjadi tidak beraturan. Ketika generator berputar, maka sedikit pergeseran rotor akan mengakibatkan nilai fluks magnet pada tiap fasa menjadi berubah secara signifikan dan tak menentu. Dengan demikian, gelombang pada grafik pun membentuk gelombang sinusoidal yang tidak sempurna dan tak beraturan.

#### 4.2.3. Analisa Tegangan Hasil Pengolahan Data

Nilai tegangan diperoleh dari pengolahan data fluks magnet pada tiap fasa per satuan perubahan waktu. Pada konfigurasi tiga fasa, nilai tegangan tiap fasa memiliki magnitudo yang sama namun ada perbedaan fasa sebesar 120 derajat.

$$e_{fasa\ A} = N_C \varphi \omega \sin(\omega t) \text{ Volt}$$

$$e_{fasa\ B} = N_C \varphi \omega \sin(\omega t - 120^\circ) \text{ Volt}$$

$$e_{fasa\ C} = N_C \varphi \omega \sin(\omega t - 240^\circ) \text{ Volt}$$

Data tersebut kemudian digabung dan menjadi grafik yang ditampilkan pada gambar 4.4 sehingga terlihat perbandingan nilai dan bentuk grafik tegangan antara ketiga Desain penelitian.

Pada kecepatan putar generator sebesar 300 rpm, desain yang menghasilkan tegangan tertinggi adalah desain 9 stator, yaitu sekitar 82 volt, lalu diikuti oleh desain 12 stator yang mendekati nilai 30 volt. Sedangkan generator dengan 15 stator menghasilkan tegangan yang jauh lebih kecil yaitu sekitar 1 volt.

$$E_A = \sqrt{2} \pi N_C \varphi f \cos \omega t$$

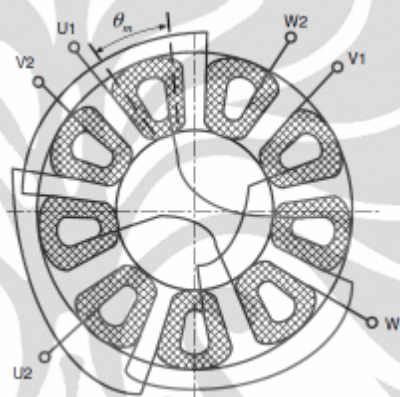
Berdasarkan pada persamaan diatas, tegangan yang dihasilkan pada stator pada generator AC adalah berbentuk sinusoidal dengan amplitudo yang dipengaruhi oleh tiga hal, yaitu fluks magnet ( $\varphi$ ), kecepatan angular rotor ( $\omega$ ), dan sebuah konstanta yang bergantung pada konstruksi mesin, seperti jumlah lilitan stator ( $N_C$ ). Oleh karena kecepatan angular rotor selalu sama pada setiap simulasi, dan konstruksi mesin juga dibuat sama pada ketiga desain, maka satu-satunya variabel yang dapat mempengaruhi hasil tegangan induksi adalah fluks



magnet pada stator. Oleh sebab itu perbandingan nilai fluks magnet pada gambar 4.3 berbanding lurus dengan hasil tegangan pada gambar 4.4

a. Analisa grafik tegangan pada desain 9 stator

Bentuk grafik tegangan pada desain 9 stator menunjukkan gelombang sinusoidal sempurna dengan perbedaan sudut fasa antara fasa satu dan fasa lainnya. Sama seperti pada grafik fluks magnet, tegangan yang dihasilkan tiap fasa memiliki gelombang sinusoidal yang sama, dan terpisah sudut fasa antara satu sama lain sebesar 120 derajat.



Gambar 4. 12 Konfigurasi Kumbaran Stator Tiga Fasa

Oleh sebab itu, generator desain 9 stator merupakan desain yang paling baik untuk membangkitkan tegangan tiga fasa karena penyusunan fisik kumparan statornya yang sangat sesuai dengan rotor 24 kutub. Desain 9 stator juga sesuai untuk jenis rotor lainnya karena susunan 9 kumparan stator secara simetris pada fisik generator fluks aksial (*disk*) akan memunculkan dua fenomena yang telah dijelaskan pada bagian 4.2.2 sehingga tiap fasa menghasilkan tegangan dengan gelombang sinusoidal sempurna yang sudut fasanya tergeser sejauh 120 derajat.

b. Analisa grafik tegangan pada desain 12 stator

Bentuk grafik tegangan pada desain 12 stator menunjukkan gelombang sinusoidal sempurna dengan tidak ada perbedaan sudut fasa sehingga terlihat seolah generator ini membangkitkan tegangan satu fasa. Hal ini disebabkan karena pada setiap waktu cuplik, fluks magnet pada tiap kumparan stator (baik

fasa A, fasa B, maupun fasa C) adalah sama, sehingga nilai tegangan pun sama karena perubahan fluks magnet per satuan waktu bernilai sama.

$$e_{ind} = \frac{d\varphi_A}{dt} = \frac{d\varphi_B}{dt} = \frac{d\varphi_C}{dt}$$

Oleh sebab itu, desain 12 stator lebih sesuai dirancang untuk generator satu fasa karena karakteristik susunan 12 stator yang akan membagi luas rotor secara sama besar, dimana setiap stator terpisah sejauh 30 derajat.

Tegangan pada desain 12 stator konfigurasi keluaran tiga fasa adalah:

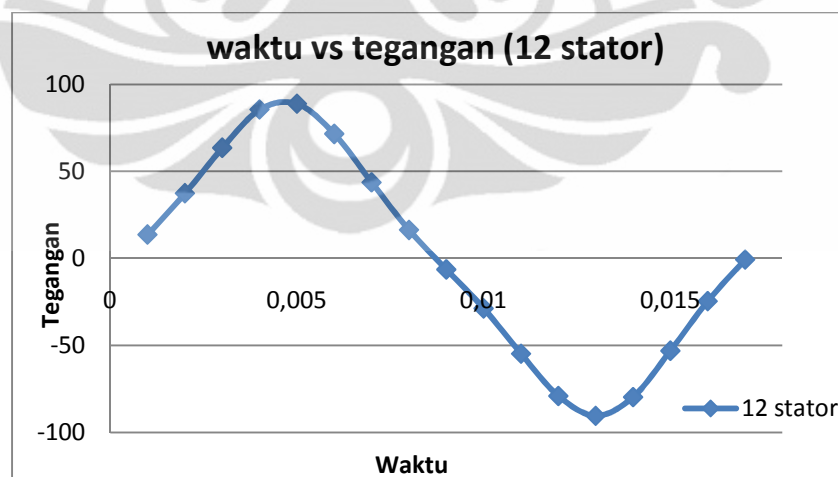
$$e_{ph.A} = E_{max} \sin(\omega t) \text{ V}$$

$$e_{ph.B} = E_{max} \sin(\omega t - 0^\circ) \text{ V}$$

$$e_{ph.C} = E_{max} \sin(\omega t - 0^\circ) \text{ V} \quad +$$

$$e_{total} = 3 E_{max} = 3 \times 29,676 = \mathbf{89,03 \text{ V}}$$

Berdasarkan pada kondisi di atas, maka dilakukan penelitian khusus untuk menguji kebenaran analisis. Pada penelitian ini, penulis membuat tiga desain generator fluks aksial magnet permanen rotor ganda stator tanpa inti dengan perbedaan jumlah kumparan stator, yaitu 9 stator, 12 stator, dan 15 stator. Namun, seluruh desain memiliki konfigurasi stator keluaran satu fasa.



Gambar 4. 13 Grafik Waktu vs Tegangan untuk desain 12 Stator Satu Fasa

Berdasarkan grafik di atas, terbukti bahwa desain 12 stator merupakan desain yang lebih sesuai untuk konfigurasi keluaran satu fasa dimana hanya terdapat satu gelombang sinusoidal sempurna. Tegangan maksimum yang

dihasilkan pada desain satu fasa ini adalah 90,45 Volt. Nilai ini sesuai dengan hasil perhitungan tegangan satu fasa dari konfigurasi sebelumnya yang menghasilkan tegangan keluaran satu fasa sebesar 89,03 Volt.

c. Analisa grafik tegangan pada desain 15 stator

Bentuk grafik tegangan pada desain 15 stator menunjukkan gelombang sinusoidal tidak sempurna dengan nilai amplitudo yang berubah-ubah dan seolah frekuensi generator meningkat. Hal ini dipengaruhi oleh perubahan fluks magnet yang signifikan dan tak menentu (data fluks magnet terlampir).

Dengan demikian desain 15 stator tidak sesuai dengan desain rotor yang digunakan dalam penelitian karena nilai tegangan yang sangat kecil dan frekuensi tegangan yang tak menentu sehingga perlu alat tambahan untuk memperbaiki tegangan keluaran ini sebelum digunakan pada beban listrik.

#### 4.2.4. Analisa Pengaruh Kecepatan Putar Rotor

Pada penelitian ini, ketiga desain disimulasikan dalam beberapa kecepatan putar yang berbeda sehingga frekuensi kerja generator pun akan berubah. Hasil simulasi akan menunjukkan bagaimana pengaruh kecepatan putar rotor terhadap fluks dan tegangan yang dihasilkan. Terlebih lagi, kita dapat mengatur dan mengontrol kecepatan putar rotor untuk mendapatkan tegangan yang diinginkan.

Untuk mempermudah analisa, penulis hanya menampilkan grafik fasa A saja. Hal ini tidak akan mempengaruhi analisa karena data untuk fasa A, B, dan C pada ketiga desain mengalami fenomena yang sama. Gambar 4.5 menunjukkan grafik tegangan pada setiap kecepatan putar yang berbeda, yaitu 300 rpm, 500 rpm, dan 800 rpm. Nilai fluks magnet pada stator tidak berubah, namun frekuensi gelombang yang dihasilkan meningkat sesuai dengan kenaikan putaran tersebut. Kecepatan terendah yaitu 300 rpm, membutuhkan waktu paling lama untuk mencapai satu gelombang penuh. Bila merujuk kembali pada tabel 3.3 terlihat bahwa semakin tinggi kecepatan putar rotor [rpm], maka frekuensi generator [Hz] juga akan meningkat, sesuai dengan persamaan 3.1.

Sedangkan fenomena berbeda ditunjukkan pada gambar 4.5 menunjukkan grafik tegangan pada setiap kecepatan putar yang berbeda. Pada grafik terlihat

bahwa frekuensi gelombang tegangan meningkat. Selain itu, nilai tegangan rms yang dihasilkan pun juga meningkat ketika kecepatan dinaikkan. Hal ini dapat dijelaskan oleh persamaan di bawah ini, dimana semakin tinggi frekuensi, maka semakin tinggi pula tegangan yang dihasilkan.

$$E_A = \sqrt{2}\pi N_C \phi f$$

Berikut ini adalah perhitungan secara matematis mengenai pengaruh seberapa besar kenaikan tegangan apabila kecepatan putar rotor ditingkatkan. Penulis mengambil desain 9 stator pada perhitungan matematis ini, dimana hasil tegangan pada 300 rpm menjadi referensi terhadap simulasi 500 rpm dan 800 rpm.

$$E_A(300rpm) = \sqrt{2}\pi N_C \phi(60 Hz) = \mathbf{83,245 V}$$

$$E_A(500rpm) = \sqrt{2}\pi N_C \phi(1,6 \times 60 Hz) = 1,6 \times 83,245 = \mathbf{138,74 V}$$

$$E_A(800rpm) = \sqrt{2}\pi N_C \phi(2,6 \times 60 Hz) = 2,6 \times 83,245 = \mathbf{221,98 V}$$

Sedangkan bila merujuk pada data hasil simulasi, maka nilai tegangan rms hasil simulasi adalah sebagai berikut, disertai dengan % error perbedaan antara hasil perhitungan matematis dan hasil simulasi.

$$E_A(300rpm) = \mathbf{83,245 V}$$

$$E_A(500rpm) = \mathbf{135,485 V} \quad \% \text{ error (500 rpm)} = 2,34 \%$$

$$E_A(800rpm) = \mathbf{216,28 V} \quad \% \text{ error (800 rpm)} = 2,56 \%$$

Tabel 4. 1 Perbandingan Tegangan Tiap Desain terhadap Perubahan Kecepatan

Desain Stator	300 rpm	500 rpm		800 rpm	
	tegangan maks (V)	tegangan maks (V)	% kenaikan	tegangan maks (V)	% kenaikan
<b>9 stator</b>	83.245	135.485	62.75	216.28	159.81
<b>12 stator</b>	29.676	49.419	66.52	74.82	152.12
<b>15 stator</b>	1.03	1.725	66.40	2.227	114.74

Pada tabel di atas dapat terlihat bahwa % kenaikan tegangan maksimum generator pada setiap desain adalah sama. Asumsi referensi yang di ambil adalah Desain pada kecepatan 300 rpm. Pada 500 rpm, seluruh desain mengalami kenaikan sebesar rata-rata 65 % sedangkan pada 800 rpm, seluruh desain mengalami kenaikan tegangan hingga 142,23 %. Dengan demikian, perubahan



kecepatan putar rotor akan memberikan pengaruh kenaikan nilai tegangan yang hampir sama besar.

#### 4.2.5. Analisa Pengaruh Jarak Celah Udara Antar Rotor

Pada penelitian ini setiap desain generator dilakukan penelitian terhadap perubahan jarak celah udara antara kedua rotor. Variasi jarak celah udara adalah sebesar 4 mm, 6 mm, dan 8 mm. Parameter lain dibuat sama yaitu bergerak pada kecepatan putar rotor yang konstan 300 rpm. Data fluks yang didapat langsung diolah menjadi data tegangan keluaran pada tiap fasa generator yang dirangkum pada gambar 4.6 di atas. Seluruh gelombang yang ditampilkan pada grafik adalah gelombang fasa A sehingga lebih mudah dianalisis secara grafis.

Berdasarkan pada gambar 4.6 dapat dilihat bahwa frekuensi dan bentuk gelombang tidak mengalami perubahan pada hasil desain 9 stator dan 12 stator. Namun pada desain 15 stator terdapat sedikit perbedaan bentuk gelombang dimana terdapat riak pada beberapa titik tertentu yang dipengaruhi oleh ketidaksimetrisan susunan 15 stator membagi rotor dengan jumlah 24 kutub

Pada ketiga grafik tegangan tersebut, menunjukkan hal yang sama yaitu nilai tegangan meningkat (dilihat pada tegangan maksimum pada tiap desain). Hal ini disebabkan karena semakin jauh jarak antara magnet dan stator, maka garis-garis medan magnet yang ditangkap oleh stator akan semakin kecil sehingga fluks magnet tiap stator pun semakin berkurang.

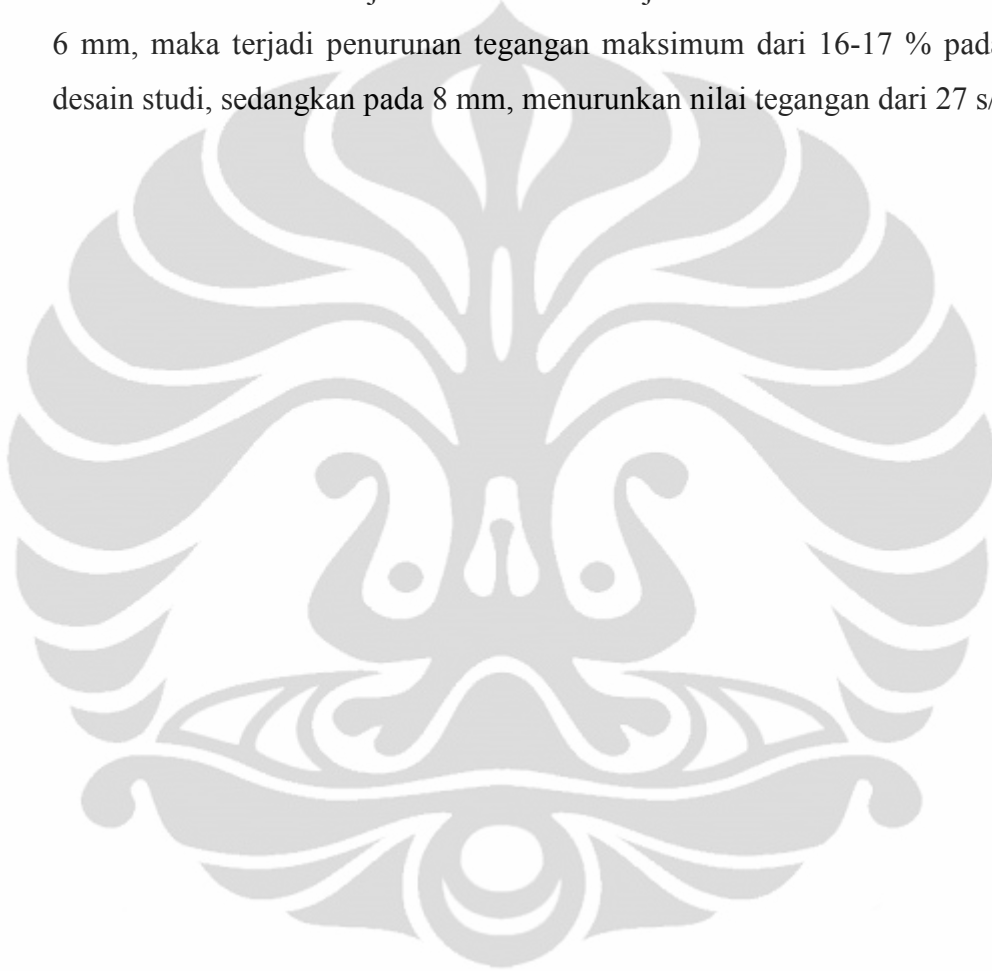
Tabel 4. 2 Perbandingan Tegangan Tiap Desain terhadap Perubahan Jarak Celah Udara

Desain Stator	4 mm	6 mm		8 mm	
	tegangan maks (V)	tegangan maks (V)	% penurunan	tegangan maks (V)	% penurunan
9 stator	99.496	83.245	16.33	71.015	28.625
12 stator	35.396	29.676	16.16	25.204	28.79
15 stator	1.079	0.888	17.61	0.784	27.35

Hal ini sesuai dengan persamaan medan magnet pada persamaan 2.5 dan gambar 2.6. Apabila jarak celah udara ditingkatkan ( $l_g$ ), maka jarak antara kedua cakram penyangga rotor ( $Y_2$ ) pun akan semakin jauh. Sehingga nilai medan

magnet pada tinggi  $y$  tertentu akan mengecil yang mengakibatkan nilai fluks magnet tertangkap di stator menjadi semakin berkurang.

Tabel di atas adalah rangkuman dari penurunan nilai tegangan maksimum ketika jarak celah udara antara stator dan rotor ditingkatkan pada setiap desain. Asumsi referensi yang di ambil adalah desain dengan jarak celah udara sebesar 4mm. Hasil studi menunjukkan bahwa ketika jarak celah udara dinaikkan menjadi 6 mm, maka terjadi penurunan tegangan maksimum dari 16-17 % pada seluruh desain studi, sedangkan pada 8 mm, menurunkan nilai tegangan dari 27 s/d 29 %.



## BAB 5

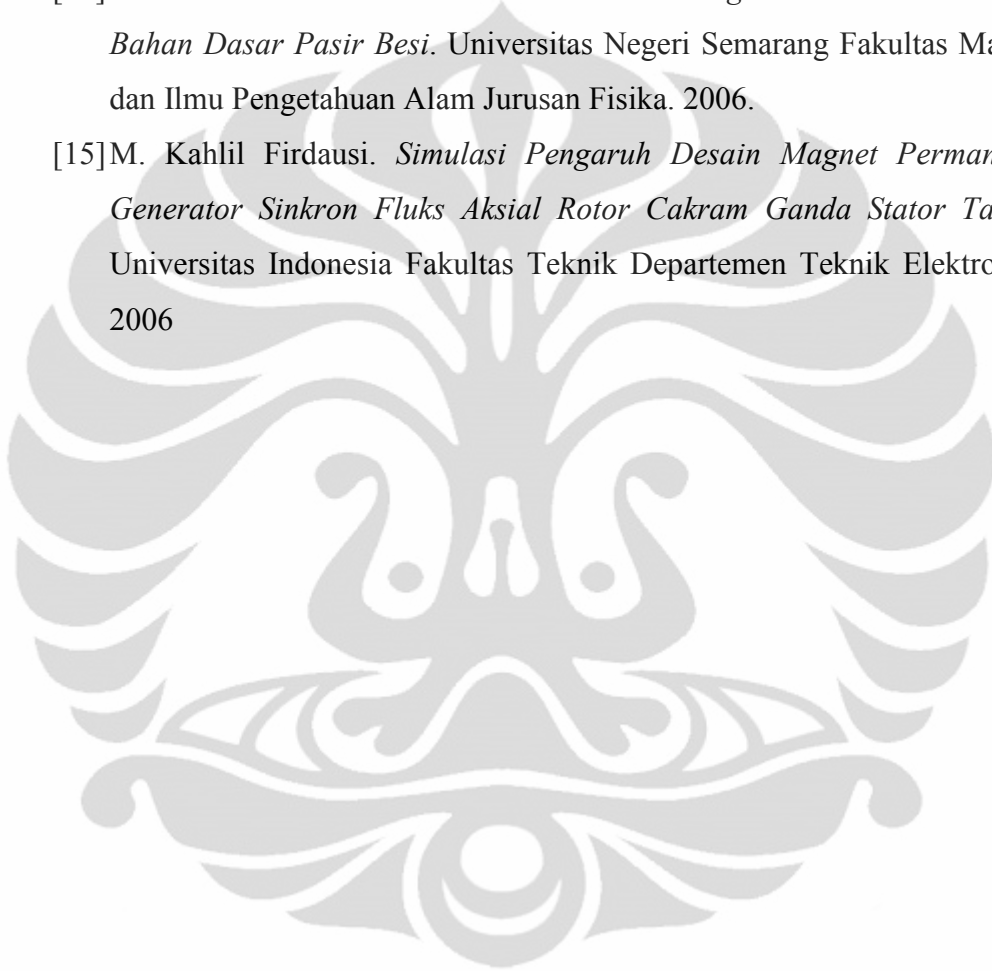
### KESIMPULAN

1. Perbedaan jumlah dan susunan kumparan stator akan mempengaruhi seberapa besar garis-garis medan magnet yang ditangkap oleh stator dan tegangan keluaran tiap fasa.
2. Desain 9 kumparan stator selaras dengan generator fluks aksial berjumlah 24 kutub magnet untuk konfigurasi tiga fasa sehingga gelombang tegangan keluaran membentuk sinusoidal sempurna dengan perbedaan sudut fasa 120 derajat. Hal ini disebabkan karena kumparan 9 stator membagi permukaan rotor secara simetris dimana tiap kumparan stator pada fasa yang sama memiliki fluks magnet yang sama, namun berbeda dengan fasa yang lain.
3. Pada kecepatan rendah antara 300-800 rpm, generator fluks aksial dengan desain 9 stator dan 24 pole rotor dapat diaplikasikan untuk membangkitkan tegangan keluaran tiga fasa sebesar 83 V – 214 V.
4. Desain 12 kumparan stator selaras dengan generator fluks aksial berjumlah 24 kutub magnet untuk konfigurasi satu fasa sehingga gelombang tegangan keluaran tidak memiliki perbedaan sudut fasa. Hal ini disebabkan karena kumparan 12 stator membagi permukaan rotor secara simetris dimana setiap kumparan stator menangkap fluks magnet dengan besar dan arah yang sama.
5. Pada kecepatan rendah antara 300-800 rpm, generator fluks aksial dengan desain 12 stator dan 24 pole rotor dapat diaplikasikan untuk membangkitkan tegangan keluaran satu fasa sebesar 29 V – 74 V.
6. Desain 15 stator tidak selaras dengan generator fluks aksial berjumlah 24 kutub magnet untuk konfigurasi tiga fasa. Desain ini tidak membagi rotor dengan simetris baik untuk fasa yang sama atau dengan fasa yang berbeda.
7. Kesimetrisan antara stator dan rotor akan mempengaruhi gelombang tegangan keluaran generator.

## DAFTAR ACUAN

- [1] T.F. Chan. *An Axial-Flux Permanent-Magnet Synchronous Generator for a Direct-Coupled Wind-Turbine System*. IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol.22 No. 1. 2004.
- [2] Werner Jara, et al. *Axial Flux PM Machine for Low Wind Power Generation*. XIX International Conference on Electrical Machines. 2010.
- [3] T.F. Chan. *Performance of an Axial-Flux Permanent Magnet Synchronous Generator From 3-D Finite-Element Analysis*. IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 25 No. 3. 2010.
- [4] Jacek F. Gieras, Rong-Jie Wang, Maarten J. Kamper. *Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machine*. Kluwer Academic Publisher. New York. 2004.
- [5] M. Sadeghirad, et al. *Design Considerations of High Speed Axial Flux Permanent Magnet Generator with Coreless Stator*. 2007. IPEC. 2007.
- [6] Chapman, Stephen J., "Electric Machinery and Power System Fundamentals", McGraw-Hill, New York, 2002.
- [7] Garrison F. Price, Todd D. Batzel dkk. *Design and Testing of a Permanent Magnet Axial Flux Wind Power Generator*. 2008.
- [8] Luca Del Ferraro, Roberto Terrigi, Fabio Giulli Capponi. *Coil and Magnet Shape Optimization of an Ironless AFPM Machine by Means of 3D FEA*. 2007. IEEE. 2007.
- [9] 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.
- [10] 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/
- [11] 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.

- [12]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.
- [13]Haliday, Resnick. *Fisika Jilid 2 Terjemahan Pantur Silaban dan Erwin Sucipto*. Jakarta: Erlangga. 1992.
- [14]Arif Billah. *Pembuatan dan Karakterisasi Magnet Stronsium Ferit dengan Bahan Dasar Pasir Besi*. Universitas Negeri Semarang Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Jurusan Fisika. 2006.
- [15]M. Kahlil Firdausi. *Simulasi Pengaruh Desain Magnet Permanen pada Generator Sinkron Fluks Aksial Rotor Cakram Ganda Stator Tanpa Inti*. Universitas Indonesia Fakultas Teknik Departemen Teknik Elektro. Depok. 2006



**DAFTAR PUSTAKA**

- Jacek F. Gieras, Rong-Jie Wang, Maarten J. Kamper. *Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machine*. Kluwer Academic Publisher. New York. 2004.
- Garrison F. Price, Todd D. Batzel dkk. *Design and Testing of a Permanent Magnet Axial Flux Wind Power Generator*. 2008.
- Chapman, Stephen J. *Electric Machinery and Power System Fundamentals*. McGraw-Hill, New York, 2002.
- Zuhal, *Dasar Tenaga Listrik dan Elektronika Daya*. Gramedia. Jakarta. 1995.



## LAMPIRAN

Data Hasil Simulasi Desain 9 Kumparan Stator

<b>rpm</b>	<b>300</b>	<b>air gap</b>	<b>4 mm</b>
<b><math>\Phi_a</math> max</b>	0,271819	<b>Va max</b>	99,479
<b><math>\Phi_b</math> max</b>	0,272297	<b>Vb max</b>	99,699
<b><math>\Phi_c</math> max</b>	0,270579	<b>Vc max</b>	99,765

<b>t</b>	<b><math>\Phi_a</math></b>	<b><math>\Phi_b</math></b>	<b><math>\Phi_c</math></b>	<b>Va</b>	<b>Vb</b>	<b>Vc</b>
0	0,132469	-0,2741	0,136861	0	0	0
0,001	0,037406	-0,25318	0,213396	-95,063	20,921	76,535
0,002	-0,06209	-0,19574	0,260309	-99,496	57,443	46,913
0,003	-0,15385	-0,11191	0,270579	-91,755	83,829	10,27
0,004	-0,226	-0,01442	0,24161	-72,155	97,489	-28,969
0,005	-0,26641	0,084489	0,177977	-40,406	98,908	-63,633
0,006	-0,26787	0,172886	0,090519	-1,461	88,397	-87,458
0,007	-0,23044	0,239003	-0,00843	37,43	66,117	-98,953
0,008	-0,16067	0,272297	-0,10655	69,764	33,294	-98,12
0,009	-0,06995	0,264829	-0,19061	90,721	-7,468	-84,051
0,01	0,029527	0,218191	-0,24875	99,479	-46,638	-58,145
0,011	0,125055	0,142017	-0,27169	95,528	-76,174	-22,938
0,012	0,205262	0,04778	-0,25562	80,207	-94,237	16,072
0,013	0,257235	-0,05192	-0,20238	51,973	-99,699	53,238
0,014	0,271819	-0,14526	-0,12161	14,584	-93,34	80,772
0,015	0,246933	-0,21999	-0,02563	-24,886	-74,731	95,978
0,016	0,187014	-0,26516	0,074137	-59,919	-45,17	99,765
0,017	0,101973	-0,27149	0,164302	-85,041	-6,33	90,165
0,018	0,003675	-0,23755	0,232475	-98,298	33,941	68,173
0,019	-0,09468	-0,17007	0,268278	-98,356	67,479	35,803
0,02	-0,18099	-0,08027	0,265579	-86,304	89,802	-2,699

## Data Hasil Simulasi Desain 9 Kumparan Stator

<b>rpm</b>	<b>300</b>	<b>air gap</b>	<b>6 mm</b>
<b><math>\Phi_a</math> max</b>	0,226668	<b>Va max</b>	83,245
<b><math>\Phi_b</math> max</b>	0,22644	<b>Vb max</b>	82,599
<b><math>\Phi_c</math> max</b>	0,224494	<b>Vc max</b>	82,826

<b>t</b>	<b><math>\Phi_a</math></b>	<b><math>\Phi_b</math></b>	<b><math>\Phi_c</math></b>	<b>Va</b>	<b>Vb</b>	<b>Vc</b>
0	0,110903	-0,22644	0,113138	0	0	0
0,001	0,031502	-0,20825	0,176795	-79,401	18,195	63,657
0,002	-0,05174	-0,16091	0,215952	-83,245	47,341	39,157
0,003	-0,12813	-0,09204	0,224494	-76,386	68,866	8,542
0,004	-0,18803	-0,01138	0,200309	-59,898	80,661	-24,185
0,005	-0,22169	0,070592	0,147542	-33,665	81,97	-52,767
0,006	-0,22323	0,144364	0,075287	-1,534	73,772	-72,255
0,007	-0,19229	0,198572	-0,00659	30,932	54,208	-81,878
0,008	-0,13438	0,225202	-0,08805	57,914	26,63	-81,458
0,009	-0,05875	0,21799	-0,15786	75,632	-7,212	-69,811
0,01	0,024396	0,179361	-0,20631	83,144	-38,629	-48,454
0,011	0,104115	0,116742	-0,22547	79,719	-62,619	-19,151
0,012	0,170953	0,039128	-0,21202	66,838	-77,614	13,445
0,013	0,21436	-0,04347	-0,16779	43,407	-82,599	44,23
0,014	0,226668	-0,1212	-0,10118	12,308	-77,73	66,615
0,015	0,206105	-0,18284	-0,0216	-20,563	-61,634	79,573
0,016	0,156291	-0,21953	0,061224	-49,814	-36,695	82,826
0,017	0,085414	-0,22378	0,136167	-70,877	-4,251	74,943
0,018	0,003288	-0,1953	0,192872	-82,126	28,477	56,705
0,019	-0,07889	-0,13955	0,222685	-82,181	55,75	29,813
0,02	-0,15076	-0,06622	0,220369	-71,87	73,337	-2,316



## Data Hasil simulasi Desain 9 Kumparan Stator

<b>rpm</b>	<b>300</b>	<b>air gap</b>	<b>8 mm</b>
<b><math>\Phi_a</math> max</b>	0,191689	<b>Va max</b>	69,524
<b><math>\Phi_b</math> max</b>	0,192026	<b>Vb max</b>	68,584
<b><math>\Phi_c</math> max</b>	0,191103	<b>Vc max</b>	69,758

t	$\Phi_a$	$\Phi_b$	$\Phi_c$	Va	Vb	Vc
0	0,094722	-0,19336	0,095274	0	0	0
0,001	0,027478	-0,17892	0,149666	-67,244	14,441	54,392
0,002	-0,04354	-0,1388	0,183133	-71,015	40,115	33,467
0,003	-0,10896	-0,08037	0,191103	-65,42	58,432	7,97
0,004	-0,15969	-0,01179	0,171881	-50,733	68,584	-19,222
0,005	-0,18796	0,058539	0,128058	-28,268	70,326	-43,823
0,006	-0,18909	0,121355	0,066355	-1,129	62,816	-61,703
0,007	-0,16323	0,168404	-0,00415	25,856	47,049	-70,508
0,008	-0,11465	0,192026	-0,07391	48,584	23,622	-69,758
0,009	-0,05069	0,187066	-0,13345	63,954	-4,96	-59,535
0,01	0,020061	0,154747	-0,17448	70,754	-32,319	-41,031
0,011	0,088278	0,101494	-0,19133	68,217	-53,253	-16,857
0,012	0,144865	0,035293	-0,18114	56,587	-66,201	10,192
0,013	0,181328	-0,03556	-0,1449	36,463	-70,855	36,245
0,014	0,191689	-0,10187	-0,08807	10,361	-66,31	56,831
0,015	0,174642	-0,15499	-0,01956	-17,047	-53,115	68,511
0,016	0,132981	-0,1871	0,051556	-41,661	-32,111	71,111
0,017	0,073324	-0,19188	0,11553	-59,657	-4,782	63,974
0,018	0,0038	-0,1682	0,163421	-69,524	23,68	47,891
0,019	-0,06634	-0,12125	0,188763	-70,136	46,951	25,342
0,02	-0,12777	-0,05846	0,187624	-61,431	62,792	-1,139

## Data Hasil Simulasi Desain 9 Kumparan Stator

<b>rpm</b>	<b>500</b>	<b>air gap</b>	<b>6 mm</b>
<b><math>\Phi_a</math> max</b>	0,22204	<b>Va max</b>	135,266
<b><math>\Phi_b</math> max</b>	0,22644	<b>Vb max</b>	136,584
<b><math>\Phi_c</math> max</b>	0,220082	<b>Vc max</b>	134,386

t	$\Phi_a$	$\Phi_b$	$\Phi_c$	Va	Vb	Vc
0	0,110903	-0,226441	0,113138	0	0	0
0,001	-0,02426	-0,179468	0,206142	-135,163	46,973	93,004
0,002	-0,15042	-0,065886	0,220082	-126,168	113,582	13,94
0,003	-0,22169	0,070592	0,147542	-71,264	136,478	-72,54
0,004	-0,20612	0,183275	0,021218	15,572	112,683	-126,324
0,005	-0,11064	0,226631	-0,11379	95,479	43,356	-134,397
0,006	0,024396	0,179361	-0,20634	135,037	-47,27	-93,135
0,007	0,150768	0,066074	-0,22022	126,372	-113,287	-13,808
0,008	0,222098	-0,070318	-0,14737	71,33	-136,392	72,485
0,009	0,206105	-0,182835	-0,02162	-15,993	-112,517	126,035
0,01	0,11079	-0,226197	0,112784	-95,315	-43,362	134,386
0,011	-0,02469	-0,179445	0,206176	-135,485	46,752	93,392
0,012	-0,15076	-0,066217	0,220369	-126,068	113,228	14,193
0,013	-0,22162	0,070367	0,147736	-70,866	136,584	-72,633
0,014	-0,20589	0,182987	0,021415	15,732	112,62	-126,321
0,015	-0,11049	0,226452	-0,11204	95,404	43,465	-134,119
0,016	0,024773	0,179514	-0,20614	135,266	-46,938	-93,436
0,017	0,150932	0,066171	-0,22009	126,159	-113,343	-13,869
0,018	0,22204	-0,07049	-0,14744	71,108	-136,661	72,561
0,019	0,205889	-0,183216	-0,02118	-16,151	-112,726	126,26
0,02	0,110458	-0,226735	0,113035	-95,431	-43,519	134,223

## Data Hasil Simulasi Desain 9 Kumparan Stator

<b>rpm</b>	<b>800</b>	<b>air gap</b>	<b>6 mm</b>
<b><math>\Phi_a</math> max</b>	0,222098	<b>Va max</b>	214,811
<b><math>\Phi_b</math> max</b>	0,208607	<b>Vb max</b>	213,436
<b><math>\Phi_c</math> max</b>	0,225315	<b>Vc max</b>	213,149

<b>t</b>	<b><math>\Phi_a</math></b>	<b><math>\Phi_b</math></b>	<b><math>\Phi_c</math></b>	<b>Va</b>	<b>Vb</b>	<b>Vc</b>
0	0,110903	-0,22641	0,113138	0	0	0
0,001	-0,10308	-0,11676	0,225315	-214,811	109,681	112,177
0,002	-0,22591	0,096676	0,1251	-122,002	213,436	-100,215
0,003	-0,13438	0,2252	-0,08809	91,53	128,524	-213,149
0,004	0,078501	0,001762	-0,22257	212,881	212,881	-134,548
0,005	0,222098	-0,07018	-0,14737	143,597	139,762	74,96
0,006	0,156291	-0,21953	0,061224	-65,807	-149,212	208,861
0,007	-0,05225	-0,16093	0,2161	-208,541	58,537	154,876
0,008	-0,21394	0,04348	0,167977	-161,674	204,473	-48,123
0,009	-0,17542	0,210798	-0,03385	38,482	167,318	-201,852
0,01	0,02477	0,179514	-0,20614	200,212	-31,284	-172,265
0,011	0,203011	-0,01654	-0,18539	178,241	-195,568	20,831
0,012	0,192087	-0,19862	0,006549	-10,924	-182,598	191,858
0,013	0,003314	-0,19558	0,193058	-188,773	3,064	186,509
0,014	-0,18797	-0,01192	0,200464	-191,293	183,626	7,406
0,015	-0,20566	0,18284	0,021017	-17,717	194,802	-179,447
0,016	-0,03121	0,208607	-0,17671	174,465	25,767	-197,727
0,017	0,170806	0,039572	-0,2118	202,037	-169,035	-35,09
0,018	0,216279	-0,16476	-0,04826	45,473	-204,318	163,544
0,019	0,19768	-0,1975	0,0378	-26,279	4,746	-8,256
0,02	0,00573	-0,0423	0,2473	-201,283	172,282	-134,92

## Data Hasil Simulasi Desain 12 Kumparan Stator

<b>rpm</b>	<b>300</b>	<b>air gap</b>	<b>4 mm</b>
<b><math>\Phi_a</math> max</b>	0,083314	<b>Va max</b>	37,228
<b><math>\Phi_b</math> max</b>	0,081697	<b>Vb max</b>	37,538
<b><math>\Phi_c</math> max</b>	0,081666	<b>Vc max</b>	37,253

t	$\Phi_a$	$\Phi_b$	$\Phi_c$	Va	Vb	Vc
0	-0,083634	-0,081685	-0,08424	0	0	0
0,001	-0,079334	-0,077377	-0,07899	4,3	4,308	5,254
0,002	-0,065595	-0,064056	-0,06464	13,739	13,321	14,349
0,003	-0,040389	-0,039005	-0,03928	25,206	25,051	25,355
0,004	-0,004993	-0,003809	-0,00364	35,396	35,196	35,681
0,005	0,032235	0,032515	0,033649	37,228	36,324	37,253
0,006	0,060991	0,060055	0,06253	28,756	27,54	28,881
0,007	0,077755	0,076043	0,078996	16,7643	15,988	16,466
0,008	0,083314	0,081697	0,084438	5,5587	5,654	5,442
0,009	0,081624	0,07975	0,081666	-1,69	-1,947	-2,772
0,01	0,071561	0,069728	0,070802	-10,063	-10,022	-10,864
0,011	0,049851	0,048591	0,049503	-21,71	-21,137	-21,299
0,012	0,017242	0,016062	0,016948	-32,609	-32,529	-32,555
0,013	-0,02065	-0,021476	-0,02116	-37,892	-37,538	-38,064
0,014	-0,052841	-0,053084	-0,05414	-32,191	-31,608	-33,023
0,015	-0,073006	-0,072518	-0,07478	-20,165	-19,434	-20,65
0,016	-0,081777	-0,080975	-0,08388	-8,771	-8,457	-9,079
0,017	-0,082522	-0,081276	-0,08339	-0,745	-0,301	0,479
0,018	-0,075802	-0,073959	-0,07548	6,72	7,317	7,909
0,019	-0,058649	-0,056462	-0,05768	17,153	17,497	17,802
0,02	-0,029739	-0,027497	-0,02866	28,91	28,965	29,012

## Data Hasil Simulasi Desain 12 Kumparan Stator

<b>rpm</b>	<b>300</b>	<b>air gap</b>	<b>6 mm</b>
<b><math>\Phi_a</math> max</b>	0,07085	<b>Va max</b>	29,393
<b><math>\Phi_b</math> max</b>	0,06443	<b>Vb max</b>	29,216
<b><math>\Phi_c</math> max</b>	0,07026	<b>Vc max</b>	29,41

t	$\Phi_a$	$\Phi_b$	$\Phi_c$	Va	Vb	Vc
0	-0,07085	-0,06874	-0,07026	0	0	0
0,001	-0,06604	-0,06443	-0,06543	4,772	4,334	4,803
0,002	-0,05282	-0,05214	-0,05242	13,171	12,236	12,991
0,003	-0,0317	-0,03253	-0,03164	21,102	19,641	21,258
0,004	-0,00294	-0,00431	-0,00212	28,826	28,222	29,04
0,005	0,026449	0,024885	0,027286	29,393	29,216	29,41
0,006	0,049736	0,048328	0,050472	23,287	23,443	23,186
0,007	0,064504	0,06276	0,065011	14,768	14,432	14,539
0,008	0,070205	0,068586	0,07	5,701	5,826	4,989
0,009	0,068264	0,066814	0,068026	-1,941	-1,772	-1,974
0,01	0,058305	0,057327	0,057889	-9,959	-9,487	-10,137
0,011	0,039418	0,039588	0,039393	-18,887	-17,739	-18,496
0,012	0,012695	0,013955	0,012931	-26,723	-25,633	-26,462
0,013	-0,01698	-0,0156	-0,01702	-29,676	-29,815	-29,956
0,014	-0,04305	-0,04221	-0,04338	-26,044	-26,371	-26,361
0,015	-0,06047	-0,05982	-0,06134	-17,382	-17,601	-17,955
0,016	-0,06905	-0,06757	-0,06757	-8,658	-7,715	-6,206
0,017	-0,06987	-0,06838	-0,06972	-0,808	-0,836	-2,175
0,018	-0,06256	-0,06099	-0,06181	7,347	7,393	7,921
0,019	-0,04689	-0,04576	-0,04613	15,657	15,194	15,648
0,02	-0,02312	-0,02325	-0,02254	23,697	22,561	23,619

## Data Hasil Simulasi Desain 12 Kumparan Stator

<b>rpm</b>	<b>300</b>	<b>air gap</b>	<b>8 mm</b>
<b><math>\Phi_a</math> max</b>	0,060685	<b>Va max</b>	24,842
<b><math>\Phi_b</math> max</b>	0,06042	<b>Vb max</b>	25,41
<b><math>\Phi_c</math> max</b>	0,06198	<b>Vc max</b>	25,272

t	$\Phi_a$	$\Phi_b$	$\Phi_c$	Va	Vb	Vc
0	-0,06104	-0,06059	-0,06188	0	0	0
0,001	-0,0569	-0,05674	-0,05751	4,093	3,855	4,277
0,002	-0,0456	-0,04608	-0,04608	11,351	10,726	11,503
0,003	-0,02691	-0,02778	-0,02693	18,669	18,238	19,065
0,004	-0,00283	-0,00349	-0,00207	24,118	24,371	24,894
0,005	0,022029	0,022001	0,023193	24,842	25,41	25,272
0,006	0,042427	0,042601	0,043838	20,398	20,6	20,645
0,007	0,055423	0,055366	0,057003	12,996	12,765	13,165
0,008	0,060685	0,06042	0,06198	5,262	5,054	4,977
0,009	0,05899	0,058735	0,059756	-1,695	-1,685	-2,224
0,01	0,05032	0,050399	0,05084	-8,67	-8,336	-8,916
0,011	0,033814	0,034542	0,0344	-16,506	-15,857	-16,44
0,012	0,011153	0,011811	0,011316	-22,661	-22,731	-23,084
0,013	-0,01405	-0,01415	-0,01444	-25,204	-25,967	-25,81
0,014	-0,03646	-0,03706	-0,03744	-22,411	-22,85	-22,94
0,015	-0,05184	-0,05222	-0,05336	-15,387	-15,246	-15,927
0,016	-0,05961	-0,05958	-0,06106	-7,764	-7,316	-7,707
0,017	-0,06027	-0,0602	-0,06118	-0,674	-0,452	-0,115
0,018	-0,05403	-0,05387	-0,05453	6,204	6,143	6,61
0,019	-0,04046	-0,04027	-0,04086	13,677	13,59	13,987
0,02	-0,01978	-0,01968	-0,01951	20,688	20,619	21,085

## Data Hasil Simulasi Desain 12 Kumparan Stator

<b>rpm</b>	<b>500</b>	<b>air gap</b>	<b>6 mm</b>
<b><math>\Phi_a</math> max</b>	0,070427	<b>Va max</b>	49,272
<b><math>\Phi_b</math> max</b>	0,068787	<b>Vb max</b>	48,777
<b><math>\Phi_c</math> max</b>	0,07045	<b>Vc max</b>	49,581

<b>t</b>	<b><math>\Phi_a</math></b>	<b><math>\Phi_b</math></b>	<b><math>\Phi_c</math></b>	<b>Va</b>	<b>Vb</b>	<b>Vc</b>
0	-0,07085	-0,06874	-0,07026	0	0	0
0,001	-0,05836	-0,05725	-0,05782	12,449	11,469	12,634
0,002	-0,02283	-0,02392	-0,02225	35,543	33,403	35,287
0,003	0,026449	0,024885	0,027286	49,272	48,777	49,581
0,004	0,060668	0,059454	0,061413	34,219	34,569	34,127
0,005	0,070427	0,068787	0,07045	9,759	9,333	9,037
0,006	0,058305	0,057327	0,057889	-12,122	-11,46	-12,561
0,007	0,022531	0,0236	0,022956	-35,774	-33,727	-34,933
0,008	-0,02624	-0,02543	-0,02666	-48,772	-49,093	-49,602
0,009	-0,06047	-0,05982	-0,06134	-34,166	-34,339	-34,695
0,01	-0,07039	-0,06889	-0,07037	-9,932	-9,064	-9,036
0,011	-0,05821	-0,05702	-0,05768	12,088	11,884	12,769
0,012	-0,02312	-0,02323	-0,02253	35,079	33,777	35,074
0,013	0,026071	0,025747	0,026893	49,243	48,982	49,427
0,014	0,06024	0,059934	0,06122	34,169	34,187	34,327
0,015	0,070327	0,069096	0,070323	10,087	9,162	9,103
0,016	0,058223	0,057375	0,057589	-12,104	-11,721	-12,734
0,017	0,022944	0,023787	0,02248	-35,279	-33,588	-35,109
0,018	-0,02645	-0,02524	-0,02663	-49,419	-49,001	-49,163
0,019	-0,06057	-0,05987	-0,06099	-34,097	-34,662	-34,296
0,02	-0,07016	-0,06908	-0,07005	-9,624	-9,192	-9,106



## Data Hasil Simulasi Desain 12 Kumparan Stator

<b>rpm</b>	<b>800</b>	<b>air gap</b>	<b>6 mm</b>
<b><math>\Phi_a</math> max</b>	0,070205	<b>Va max</b>	74,819
<b><math>\Phi_b</math> max</b>	0,068586	<b>Vb max</b>	73,751
<b><math>\Phi_c</math> max</b>	0,070348	<b>Vc max</b>	75,141

<b>t</b>	<b><math>\Phi_a</math></b>	<b><math>\Phi_b</math></b>	<b><math>\Phi_c</math></b>	<b>Va</b>	<b>Vb</b>	<b>Vc</b>
0	-0,07085	-0,06874	-0,07016	0	0	0
0,001	-0,03954	-0,03981	-0,03892	31,281	28,883	31,244
0,002	0,035285	0,03387	0,036169	74,819	73,751	75,141
0,003	0,070205	0,068586	0,070348	34,92	34,716	34,179
0,004	0,046454	0,046167	0,046447	-23,751	-22,419	-23,901
0,005	-0,02624	-0,02543	-0,02666	-72,695	-71,66	-73,093
0,006	-0,06905	-0,06757	-0,06933	-42,824	-42,054	-42,687
0,007	-0,05285	-0,05179	-0,05245	16,17	15,778	16,878
0,008	0,016643	0,016065	0,017341	69,538	67,834	69,796
0,009	0,066811	0,065673	0,067442	50,168	49,608	50,101
0,01	0,058223	0,057375	0,057589	-8,588	-8,298	-9,853
0,011	-0,00723	-0,00586	-0,00789	-65,436	-63,239	-64,978
0,012	-0,06416	-0,0632	-0,06454	-56,951	-57,336	-57,145
0,013	-0,06242	-0,06126	-0,06218	1,762	2,174	2,347
0,014	-0,00268	-0,00403	-0,00307	59,714	56,983	59,109
0,015	0,06076	0,059842	0,060793	63,448	63,885	63,871
0,016	0,06605	0,064243	0,065181	5,29	4,401	4,388
0,017	0,01312	0,013735	0,012442	-52,93	-50,508	-52,739
0,018	-0,05556	-0,05512	-0,05606	-69,076	-68,907	-69,048
0,019	-0,0522	-0,0582	-0,0509	55,956	55,172	56,606
0,02	-0,0023	-0,00221	-0,00241	64,876	62,733	62,324

## Data Hasil Simulasi Desain 12 Kumparan Stator Konfigurasi Satu Fasa

<b>rpm</b>	300	<b>air gap</b>	6 mm
<b><math>\Phi_a</math> max</b>	0,210341	<b>Va max</b>	90,455

<b>t</b>	<b><math>\Phi_a</math></b>	<b>Va</b>
0	-0,210341	0
0,001	-0,19667	13,671
0,002	-0,159274	37,396
0,003	-0,095763	63,511
0,004	-0,010273	85,49
0,005	0,07853	88,803
0,006	0,150009	71,479
0,007	0,19364	43,631
0,008	0,209941	16,301
0,009	0,203542	-6,399
0,01	0,174743	-28,799
0,011	0,119906	-54,837
0,012	0,040792	-79,114
0,013	-0,049663	-90,455
0,014	-0,129391	-79,728
0,015	-0,182478	-53,087
0,016	-0,207084	-24,606
0,017	-0,207855	-0,771
0,018	-0,186879	20,976
0,019	-0,03345	42,904
0,02	0,04578	65,895

## Data Hasil Simulasi Desain 15 Kumbaran Stator

<b>rpm</b>	<b>300</b>	<b>air gap</b>	<b>4 mm</b>
<b><math>\Phi_a</math> max</b>	0,000307	<b>Va max</b>	0,439799
<b><math>\Phi_b</math> max</b>	0,0003746	<b>Vb max</b>	1,071431
<b><math>\Phi_c</math> max</b>	0,000382	<b>Vc max</b>	1,250199

<b>t</b>	<b><math>\Phi_a</math></b>	<b><math>\Phi_b</math></b>	<b><math>\Phi_c</math></b>	<b>Va</b>	<b>Vb</b>	<b>Vc</b>
0	0,000307	-0,000819	-0,000399	0	0	0
0,001	0,000108	-0,001444	0,000153	-0,1988	-0,62512	0,552485
0,002	-0,000074	-0,000941	0,000754	-0,18313	0,502955	0,601463
0,003	0,000323	0,000138	0,000919	0,398065	1,079022	0,164987
0,004	0,0002937	0,0001985	0,000423	-0,02967	0,060543	-0,49665
0,005	0,0000374	-0,000521	-0,000581	-0,25631	-0,71955	-1,00363
0,006	0,000254	-0,000755	-0,000284	0,216956	-0,23424	0,296151
0,007	-0,00041	-0,000624	0,000382	-0,66394	0,130818	0,666408
0,008	-0,000643	0,0003746	0,000557	-0,23298	0,999025	0,175167
0,009	-0,000511	0,001446	-0,000231	0,131438	1,071431	-0,78864
0,01	-0,000071	0,001424	-0,001512	0,439799	-0,022	-1,28056
0,011	0,0000142	0,0003622	-0,001756	0,085525	-1,06182	-0,244
0,012	0,000319	-0,000338	-0,001015	0,304974	-0,70057	0,741
0,013	0,000832	-0,000338	0,000235	0,513157	0,319783	1,250199
0,014	0,000272	0,0002595	0,000458	-0,56034	0,27809	0,223526
0,015	0,0000227	0,000598	0,0004812	-0,24931	0,338509	0,022431
0,016	0,0003715	0,000193	0,0001896	0,348776	-0,405	-0,2916
0,017	0,0006138	-0,000609	0,0003954	0,242332	-0,80156	0,205855
0,018	0,0001432	-0,001016	0,001042	-0,47061	-0,40743	0,64659
0,019	-0,000105	-0,000348	0,001314	-0,24773	0,668204	0,272
0,02	-0,000379	0,0004821	0,001114	-0,27433	0,829903	-0,2

## Data Hasil Simulasi Desain 15 Kumparan Stator

<b>rpm</b>	<b>300</b>	<b>air gap</b>	<b>6 mm</b>
<b><math>\Phi_a</math> max</b>	0,000875	<b>Va max</b>	0,63596
<b><math>\Phi_b</math> max</b>	0,000837	<b>Vb max</b>	0,74329
<b><math>\Phi_c</math> max</b>	0,001447	<b>Vc max</b>	1,03721

<b>t</b>	<b><math>\Phi_a</math></b>	<b><math>\Phi_b</math></b>	<b><math>\Phi_c</math></b>	<b>Va</b>	<b>Vb</b>	<b>Vc</b>
0	0,000283	-0,000525	-0,0002009	0	0	0
0,001	7,426E-05	-0,000566	-0,0001878	-0,2096	-0,05809	0,01621
0,002	-0,000476	2,944E-05	0,00010173	-0,5509	0,616154	0,28622
0,003	-5,14E-05	0,0008968	1,6427E-05	0,42514	0,867362	-0,0850
0,004	-0,000262	0,0008378	-0,0006207	-0,2111	-0,05898	-0,6371
0,005	-0,000035	0,0001462	-0,001447	0,22726	-0,69162	-0,8242
0,006	0,000112	-0,0005903	-0,001314	0,14788	-0,74329	0,133
0,007	-4,41E-05	-0,0004447	-0,00044	-0,1577	0,152265	0,874
0,008	-0,000430	0,0003791	0,00027845	-0,3866	0,823889	0,71854
0,009	-0,000349	0,0007553	0,00027992	0,08175	0,376268	0,00147
0,01	0,000239	0,0001884	-0,0002527	0,58828	-0,56698	-0,5326
0,011	0,000875	-0,0007649	-0,0005654	0,63596	-0,9579	-0,3127
0,012	0,001201	-0,001022	0,00015178	0,32580	-0,2525	0,71726
0,013	0,000907	-0,0005586	0,001189	-0,2933	0,46337	1,03721
0,014	0,000288	9,176E-05	0,001415	-0,6182	0,650138	0,226
0,015	-0,000205	5,2793E-05	0,001001	-0,49372	-0,03871	-0,414
0,016	4,904E-05	0,0002116	0,00035262	0,25410	0,158902	-0,64837
0,017	-0,003793	-0,0003374	-2,324E-05	-0,4283	-0,53544	-0,3758
0,018	-1,38E-05	-0,0003757	0,00013008	0,36602	-0,052	0,15332
0,019	-0,000575	0,00021006	0,00041501	-0,5662	0,585807	0,28492
0,02	-0,000868	0,001099	-5,084E-05	-0,2888	0,888937	-0,4659

## Data Hasil Simulasi Desain 15 Kumparan Stator

<b>rpm</b>	<b>300</b>	<b>air gap</b>	<b>8 mm</b>
<b><math>\Phi_a</math> max</b>	0,000582	<b>Va max</b>	0,31175
<b><math>\Phi_b</math> max</b>	0,000977	<b>Vb max</b>	0,783838
<b><math>\Phi_c</math> max</b>	0,00053	<b>Vc max</b>	0,466483

t	$\Phi_a$	$\Phi_b$	$\Phi_c$	Va	Vb	Vc
0	0,000205	-0,00081	-0,00041	0	0	0
0,001	7,93E-05	-0,00059	-0,00053	-0,1255	0,217652	-0,1278
0,002	-0,00023	0,000113	-0,00046	-0,31175	0,702122	0,069968
0,003	-0,00013	0,000897	-0,00035	0,102705	0,783838	0,115948
0,004	1,74E-05	0,000862	-0,0003	0,147214	-0,03442	0,047298
0,005	0,000308	0,000315	-0,00029	0,290535	-0,54699	0,008227
0,006	0,000318	-0,00015	7,79E-05	0,010196	-0,46424	0,369848
0,007	6,77E-05	7,94E-05	0,000506	-0,25045	0,228313	0,427674
0,008	-0,0003	0,000811	0,000599	-0,36488	0,731273	0,093341
0,009	-0,00034	0,000953	0,000575	-0,04239	0,142388	-0,02409
0,01	0,00014	0,000275	0,000281	0,479906	-0,67773	-0,29353
0,011	0,000473	-0,00067	6,74E-05	0,332171	-0,94894	-0,21392
0,012	0,000582	-0,00093	0,000146	0,109766	-0,25983	0,079059
0,013	0,000449	-0,00065	0,00031	-0,13332	0,285717	0,163176
0,014	0,000161	-0,00025	5,88E-05	-0,28831	0,401125	-0,25082
0,015	-9,6E-05	-1,8E-05	-0,00015	-0,25625	0,228359	-0,20474
0,016	8,05E-05	-0,00035	-0,0002	0,176085	-0,33532	-0,05473
0,017	0,000357	-0,00057	-0,00021	0,276221	-0,21631	-0,01317
0,018	-2,6E-05	-0,00039	0,000253	-0,38253	0,181616	0,466483
0,019	-0,00042	0,00022	-0,00017	-0,39893	0,60841	-0,41797
0,02	-0,00047	0,000977	-0,00022	-0,04874	0,757081	-0,05012

## Data Hasil Simulasi Desain 15 Kumparan Stator

<b>rpm</b>	<b>500</b>	<b>air gap</b>	<b>6 mm</b>
<b><math>\Phi_a</math> max</b>	0,001128	<b>Va max</b>	0,888776
<b><math>\Phi_b</math> max</b>	0,001093	<b>Vb max</b>	1,130431
<b><math>\Phi_c</math> max</b>	0,001001	<b>Vc max</b>	1,36063

t	$\Phi_a$	$\Phi_b$	$\Phi_c$	Va	Vb	Vc
0	-0,000201	-0,000526	0,0002837	0	0	0
0,001	-0,000313	-0,000234	-2,97E-05	-0,11728	0,292162	-0,31338
0,002	-0,000427	0,001002	-8,67E-05	-0,10948	1,238408	-0,05667
0,003	-3,57E-05	0,0001463	-0,001447	0,392369	-0,85575	-1,36063
0,004	1,347E-05	-0,000561	-0,000830	0,048833	-0,70769	0,616709
0,005	-0,000476	0,000569	0,0003786	-0,48959	1,130431	1,208921
0,006	0,0002392	0,0001884	-0,000257	0,715345	-0,38059	-0,63136
0,007	0,001128	-0,001093	-0,000193	0,888776	-1,2814	0,059708
0,008	0,0007623	-0,000328	0,0014	-0,3657	0,772238	1,593019
0,009	-0,000205	0,000528	0,001001	-0,96737	0,848715	-0,399
0,01	0,0003767	-0,000163	3,139E-05	0,581782	-0,69023	-0,96961
0,011	-0,000228	-0,000251	0,0002811	-0,60493	-0,08876	0,249668
0,012	-0,000868	0,001099	-5,09E-05	-0,64023	1,35004	-0,33195
0,013	-0,000654	0,0004546	-0,001618	0,214218	-0,64443	-1,56711
0,014	3,183E-05	-0,000812	-0,00112	0,686059	-1,2675	0,498
0,015	-0,000452	-2,06E-05	0,000606	-0,48464	0,792376	1,725965
0,016	-8,63E-06	-0,000104	0,000559	0,444113	-0,08384	-0,047
0,017	0,0009946	-0,000756	2,832E-05	1,003319	-0,65121	-0,53065
0,018	0,001109	9,472E-05	0,001341	0,114374	0,850333	1,312683
0,019	-5,69E-05	0,0007207	0,001029	-1,16589	0,625926	-0,312
0,02	0,0004826	-8,81E-05	-0,000359	0,539462	-0,80879	-1,38842

## Data Hasil Simulasi Desain 15 Kumparan Stator

<b>rpm</b>	<b>800</b>	<b>air gap</b>	<b>6 mm</b>
<b><math>\Phi_a</math> max</b>	0,001281	<b>Va max</b>	1,155669
<b><math>\Phi_b</math> max</b>	0,00033	<b>Vb max</b>	1,352335
<b><math>\Phi_c</math> max</b>	0,0014	<b>Vc max</b>	1,835454

<b>t</b>	<b><math>\Phi_a</math></b>	<b><math>\Phi_b</math></b>	<b><math>\Phi_c</math></b>	<b>Va</b>	<b>Vb</b>	<b>Vc</b>
0	0,000283	-0,000528	-0,000201	0	0	0
0,001	-0,000503	0,0006587	0,000149	-0,78688	1,187271	0,350644
0,002	1,89E-05	-0,000119	-0,001557	0,521487	-0,8006	-1,70668
0,003	-0,000430	0,0003791	0,000278	-0,4491	0,521014	1,835454
0,004	0,000724	-0,000435	-0,000559	1,155669	-0,81562	-0,83752
0,005	0,000762	-0,000320	0,0014	0,037444	0,115745	1,959066
0,006	4,94E-05	0,0002117	0,000352	-0,71326	0,532459	-1,04737
0,007	-0,000446	-1,07E-05	0,000399	-0,49595	-0,22187	0,046374
0,008	-0,000738	0,0007665	-0,001446	-0,29163	0,776678	-1,845
0,009	-5,02E-06	-0,000645	-0,000707	0,733492	-1,413	1,075267
0,01	-8,93E-06	-0,000144	0,000559	-0,00364	0,542087	0,929695
0,011	0,001138	-0,00033	0,0008046	1,146693	-0,23192	0,245592
0,012	-0,000168	0,0006811	0,0006627	-1,30381	1,017462	-0,1418
0,013	0,0003443	-0,000497	-0,000535	0,510118	-1,17282	-1,20224
0,014	-0,001281	0,0008607	-0,000573	-1,62531	1,352335	-0,03082
0,015	-0,000123	1,97E-05	-0,001438	1,158045	-0,84096	-0,86769
0,016	1,993E-05	0,0002833	0,0007894	0,142885	0,263576	2,227378
0,017	0,001241	-0,000772	0,0004241	1,22107	-1,04045	-0,36529
0,018	0,0001531	0,0001033	0,001528	-1,08788	0,860457	1,103912
0,019	0,000345	0,0001934	0,000554	-0,15312	-0,10328	-1,528
0,02	-0,00023	-0,000493	0,000129	-0,189	-0,1343	-1,032