



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**ANALISA PERBANDINGAN DESAIN DAN SIMULASI  
GENERATOR FLUKS AKSIAL MAGNET PERMANEN 3  
FASA UNTUK APLIKASI GENERATOR ANGIN  
KECEPATAN RENDAH**

**SKRIPSI**

**BUBI MAURA NILENDRA**

**0806330743**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO  
DEPOK  
JUNI 2012**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**ANALISA PERBANDINGAN DESAIN DAN SIMULASI  
GENERATOR FLUKS AKSIAL MAGNET PERMANEN 3  
FASA UNTUK APLIKASI GENERATOR ANGIN  
KECEPATAN RENDAH**

**SKRIPSI**

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

**BUBI MAURA NILENDRA**

**0806330743**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO  
TEKNIK TENAGA LISTRIK  
DEPOK  
JUNI 2012**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Bubi Maura Nilendra

NPM : 0806330743

Tanda tangan :



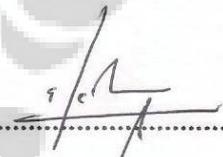
Tanggal : Juni 2012

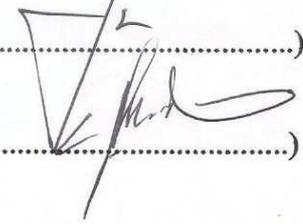
## HALAMAN PENGESAHAN

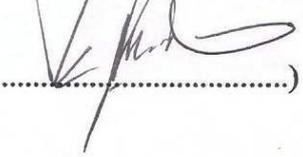
Skripsi ini diajukan oleh :  
Nama : Bubi Maura Nilendra  
NPM : 0806330743  
Program Studi : Teknik Elektro  
Judul Skripsi : Analisa Perbandingan Desain dan Simulasi  
Generator AFPM Fluks Aksial Magnet Permanen 3  
Fasa untuk Aplikasi Generator Angin Kecepatan  
Rendah.

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

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr.-Ing Eko Adhi Setiawan S.T., M.T. (  )

Penguji : Prof. Dr. Ir. Iwa Garniwa M. K., M.T. (  )

Penguji : Ir. I Made Ardita M.T. (  )

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 9 Juli 2012

## KATA PENGANTAR

Segala Puji dan Syukur penulis panjatkan kepada Allah subhanahu wata'ala, karena hanya atas ridho-Nya lah skripsi ini dapat penulis selesaikan. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mendapatkan gelar Sarjana Teknik pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Dalam proses penulisan Seminar ini, tentunya penulis mendapatkan nasihat dan arahan dari berbagai pihak. Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan dan bimbingan dari pihak-pihak tersebut, penulis tidak akan dapat menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

- (1) Dr.-Ing Eko Adhi Setiawan S.T., M.T. selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dana, pikiran dan ide untuk mengarahkan Penulis dalam penyusunan Seminar ini serta terus memberikan semangat dan dorongan agar Penulis dapat terus maju;
- (2) Bapak Malik, ST. yang membantu penulis dalam hal mediasi dengan pihak LAPAN Indonesia, dan proses pendalaman teori dan pengambilan data percobaan;
- (3) Rekan-rekan peneliti LAPAN Indonesia yang telah menyediakan waktu, tenaga dan kemampuannya untuk dapat membantu penulis memproduksi alat generator dan melakukan proses pengambilan data di laboratorium aerodinamik LAPAN Indonesia;
- (4) Kedua orang tua penulis, H. Zulfitri Nilzon & Hj. Endang Trisnanie, Kedua kakak kandung penulis, Esmeiralda Anggraeni S.E.Ak.& Edutivia Mardetini S.Pd., M.Ak. serta adik kandung penulis, Frizon Akbar Putra, untuk selalu menemani penulis dalam setiap waktu dan terus memberikan segala bantuan, baik materiil ataupun moriil, serta semangat kepada penulis untuk dapat terus maju;
- (5) Teman-teman serta keluarga penulis dalam Departemen Teknik Elektro angkatan 2008 (elkom08) yang selalu menjadi rekan penulis selama penulis menjalani studi di DTE FTUI;
- (6) Keluarga Laboratorium Konversi Energi Listrik DTE FTUI, Agung Sahputra, Alfian Yusuf Habibie, Fajar Alya Rahman, Indah Marisa Dhanti,

Ahmad Yanuar Hidayat, Galih Ilham M. S., dan Pursito yang telah menemani penulis selama menjalankan tugas sebagai asisten lab LKEL.

- (7) Zesyara Melati Auzriani Ghaniyya yang membantu penulis dalam setiap kondisi keadaan, dan terus memberikan semangat kepada penulis, serta membantu penulis dalam penulisan skripsi ini;
- (8) Sahabat-sahabat dan keluarga penulis, Annisa Nurjannah, Mochammad Ridwan Aldrian, Prastyo Ervian, dan Priyaniza Ayuningtyas yang terus menemani dan memberikan semangat tanpa henti kepada penulis;
- (9) Andre Assy Sahar S.T. yang telah menjadi senior yang baik dan terus memberikan arahan serta nasihat yang dapat membantu penulis untuk maju;
- (10) Rekan-rekan tim futsal, sepak bola, voli, wallclimbing, dan seluruh kontingen atlet DTE FTUI yang telah sama-sama berjuang bersama penulis untuk dapat mengharumkan nama DTE FTUI di Fakultas Teknik.
- (11) Dan pihak-pihak lainnya yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Akhir kata, penulis berharap agar Allah subhanahu wata'ala membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang dapat melengkapi kekurangan yang ada pada skripsi ini. Demikian skripsi ini penulis buat, semoga bermanfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

Depok, 10 Juni 2012

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI  
SKRIPSI UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

---

---

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangandibawah ini:

Nama : Bubi Maura Nilendra  
NPM : 0806330743  
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 Non- Eksklusif (*Non ExclusiveRoyalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

**“Analisa PerbandinganDesain dan Simulasi Generator Fluks Aksial Magnet  
Permanen 3 Fasa untuk Aplikasi Generator Angin Kecepatan Rendah.”**

Dengan Hak Bebas Royalti Non-Eksklusif ini, Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/format-kan, mengelolanya dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat dan memublikasikan tugas akhir saya tanpa meminta izin dari saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok  
Pada tanggal : 10Juni 2012

Yang Menyatakan



( Bubi Maura Nilendra )

## ABSTRAK

Nama : Bubi Maura Nilendra  
Program Studi : Teknik Elektro  
Judul : Analisa Perbandingan Desain dan Simulasi  
Generator Fluks Aksial Magnet Permanen 3 Fasa untuk  
Aplikasi Generator Angin Kecepatan Rendah.

Generator fluks aksial magnet permanen merupakan salah satu jenis pembangkit energi listrik yang dapat digunakan dalam aplikasi pembangkitan energi listrik tenaga angin. Generator fluks aksial magnet permanen sangat cocok untuk digunakan dalam aplikasi pembangkitan energi listrik di Indonesia dikarenakan kecepatan angin yang ada di Indonesia termasuk ke dalam jenis angin dengan kecepatan rendah. Oleh karena itu, perancangan desain model generator fluks aksial magnet permanen perlu untuk dilakukan, sehingga dapat diciptakan pembangkit energi listrik tenaga angin yang efisien dan cocok dengan kondisi angin yang ada di Indonesia.

Kata Kunci :

Generator, fluks aksial, magnet permanen, tenaga angin, kecepatan rendah

## ABSTRACT

Name : Bubi Maura Nilendra  
Program Studi : Teknik Elektro  
Judul : Design and Simulation Comparison Analysis of Axial Flux Permanent Magnet Generator for Low Speed WindGenerator Application

Axial Flux Permanent Magnet Generator is a kind of electrical energy generator that can be used in the wind energy electrical power generation. Axial Flux Permanent Magnet is very suitable in the application of wind energy electrical power generation in Indonesia because Indonesia has winds which speed is low classified. So, axial flux permanent magnet design and modelling is required to be realized in order to produce an efficient and suitable for wind energy electrical power generation condition in Indonesia.

Keywords :  
Generator, axial flux, permanent magnet, wind energy , low speed

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL .....	i
LEMBAR PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
LEMBAR PENGESAHAN .....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH .....	vi
ABSTRAK .....	vii
ABSTRACT .....	viii
DAFTAR ISI .....	ix
DAFTAR GAMBAR .....	xii
DAFTAR TABEL .....	xv
DAFTAR LAMPIRAN .....	xvi
<b>1. PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
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.....	5
<b>2. GENERATOR AXIAL FLUX PERMANENT MAGNET (AFPM).....</b>	<b>7</b>
2.1 Generator Sinkron Konvensional .....	7
2.1.1 Konstruksi Generator Sinkron.....	7
2.1.2 Catu DC pada Rotor Generator Sinkron .....	9
2.1.3 Prinsip Kerja Generator Sinkron.....	9
2.2 Generator Axial Flux Permanent Magnet (AFPM).....	10
2.2.1 Konstruksi Generator AFPM.....	10
2.2.2 Rotor pada Generator AFPM.....	13
2.2.3 Stator pada Generator AFPM .....	14
2.2.4 Celah Udara pada Generator AFPM .....	16
2.3 Desain Konstruksi/Rangkaian Dasar Mesin AFPM.....	17
2.3.1. Mesin AFPM dengan Konstruksi Sisi Tunggal ( <i>single sided</i> ) .....	17
2.3.2. Mesin AFPM dengan Konstruksi Sisi Ganda ( <i>double sided</i> ).....	17

2.3.3.	Mesin AFPM dengan Konstruksi <i>Multidisc</i> .....	21
2.4	Prinsip Kerja Generator AFPM .....	22
2.4.1.	Generator AFPM Tanpa Beban .....	23
2.4.2.	Kerapatan Medan Magnet Magnet Permanen pada Celah Udara .	24
2.4.3.	Medan Magnet Reaksi Jangkar .....	25
2.4.4.	Parameter Generator AFPM.....	26
<b>3.</b>	<b>DESAIN, PEMODELAN, DAN SIMULASI.....</b>	<b>28</b>
3.1	Desain Model Generator Fluks Aksial Magnet Permanen 9 Pasang Kutub Magnet Permanen dan Stator 9 Kumbaran 3 Fasa Berseling .....	28
3.2.1	Desain Model Rotor 9 Pasang Magnet Permanen .....	28
3.2.2	Desain Model Stator 9 Kumbaran Tiga Fasa Seri .....	29
3.2	Desain Model Generator Fluks Aksial Magnet Permanen 8 Pasang Kutub Magnet Permanen dan Stator 9 Kumbaran 3 Fasa Berseling .....	30
3.2.1	Desain Rotor .....	32
3.2.2	Desain Stator .....	34
3.2.3	Desain Celah Udara .....	35
3.3	Simulasi dan Pengambilan Data.....	36
<b>4.</b>	<b>PENGOLAHAN DATA DAN ANALISA.....</b>	<b>39</b>
4.1	Data Hasil Simulasi .....	40
4.1.1	Data Hasil Simulasi Generator dengan Konfigurasi 9 Pasang Kutub Magnet Permanen dan 9 Kumbaran 3 Fasa Seri.....	41
4.1.2	Data Hasil Simulasi Generator dengan Konfigurasi 8 Pasang Kutub Magnet Permanen dan 9 Kumbaran 3 Fasa Berseling.....	43
4.2	Analisa Data Hasil Simulasi Generator .....	51
4.2.1	Analisa Data Hasil Simulasi Generator Fluks Aksial Magnet Permanen dengan Konfigurasi 9 Pasang Kutub Magnet Permanen dan 9 Kumbaran 3 Fasa Seri.....	52
4.2.2	Analisa Data Hasil Simulasi Generator Fluks Aksial Magnet Permanen dengan Konfigurasi 8 Pasang Kutub Magnet Permanen dan 9 Kumbaran 3 Fasa Berseling .....	52
4.2.3	Perbandingan Data Hasil Simulasi Kedua Desain Generator Fluks Aksial Magnet Permanen.....	53

4.2.3.1	Kesalahan Parameter Konfigurasi Lilitan Kumparan Stator	55
4.2.3.2	Kesalahan Parameter Jumlah Pasangan Magnet Permanen pada Rotor	56
<b>5.</b>	<b>KESIMPULAN</b>	<b>58</b>
	DAFTAR ACUAN	59
	DAFTAR PUSTAKA	60
	LAMPIRAN	61



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Kecepatan Angin Rata-Rata Tahunan pada Ketinggian 50 m Berdasarkan Perhitungan Data Satelit GEOS-1 NASA .....	2
Gambar 2.1	Generator Sinkron Konvensional .....	7
Gambar 2.2	<i>Salient dan Nonsalient Rotor</i> .....	8
Gambar 2.3	Rangkaian Brushless Exciter pada Generator Sinkron.....	8
Gambar 2.4	Rangkaian Ganti Ekuivalen dari Generator Sinkron Konvensional .	9
Gambar 2.5	Topologi dari Mesin RFPM, Mesin AFPM.....	11
Gambar 2.6	Perbedaan Arah Garis Medan Magnet Mesin AFPM dan RFPM .	12
Gambar 2.7	Perbandingan Dimensi Mesin AFPM dan RFPM dengan Daya yang Sama .....	13
Gambar 2.8	Cara Pemasangan PM pada Rotor Mesin AFPM. ....	14
Gambar 2.9	Stator kutub salient untuk mesin AFPM sisi tunggal kecil.....	15
Gambar 2.10	Susunan Kumputan Stator <i>Overlapping</i> , Skematik Kumputan Stator <i>Overlapping</i> .....	16
Gambar 2.11	Susunan Kumputan Stator <i>nonOverlapping</i> , Skematik Kumputan Stator <i>nonOverlapping</i> .....	16
Gambar 2.12	Konstruksi dasar mesin AFPM.....	18
Gambar 2.13	Mesin AFPM sisi ganda dengan stator kutub menonjol internal dan dua rotor eksternal . ....	19
Gambar 2.14	Mesin AFPM brushless sisi ganda tiga fasa dengan stator kutub salient eksternal 9 lilitan dan rotor internal 8 kutub.. ....	19
Gambar 2.15	Aliran fluks magnetik pada konstruksi mesin AFPM dengan stator internal tipe TORUS.....	20
Gambar 2.16	Mesin AFPM multidisc dengan tiga stator tanpa inti dan empat buah rotor PM.....	21
Gambar 2.17	Rangkaian Ekuivalen Generator AFPM .....	24
Gambar 2.18	Model dan Sistem Koordinat untuk Distribusi Kerapatan Fluks ..	25
Gambar 2.19	Model dan Sistem Koordinat untuk Jangkar.....	26
Gambar 3.1	Desain Rotor dengan 9 pasang Magnet Permanen. ....	28
Gambar 3.2	Desain Stator 9 Kumputan 3 Fasa Seri.....	30

Gambar 3.3	Model Generator dalam simulasi.....	31
Gambar 3.4	Desain Magnet Permanen dan Piringan Besi Penyangga Salah Satu Rotor pada Simulasi.....	32
Gambar 3.5	Pengaturan Letak dan Kutub Magnet Permanen pada Salah Satu Rotor. ....	33
Gambar 3.6	Desain Model Stator 9 Kumputan. ....	34
Gambar 3.7	Desain Model Stator 9 Kumputan 3 Fasa Berseling.....	35
Gambar 3.8	Air Gap pada Desain Generator.....	36
Gambar 3.9	Meshing pada Desain Model Generator . ....	37
Gambar 4.1	Simulasi Generator Fluks Aksial Magnet Permanen 9 Pasang Magnet Permanen dan Stator Tunggal 9 Kumputan 3 Fasa Seri .	39
Gambar 4.2	Simulasi Generator Fluks Aksial Magnet Permanen 8 Pasang Magnet Permanen dan Stator Tunggal 9 Kumputan 3 Fasa Berseling.....	40
Gambar 4.3	Distribusi Medan Magnet Dua Desain Generator .....	40
Gambar 4.4	Grafik Hubungan Flux Terhadap Waktu pada Kecepatan Putar 144.623 rpm.....	41
Gambar 4.5	Grafik Hubungan Tegangan Terhadap Waktu pada Kecepatan Putar 144.623 rpm.....	41
Gambar 4.6	Grafik Hubungan Flux Terhadap Waktu pada Kecepatan Putar 450,247 rpm .....	42
Gambar 4.7	Grafik Hubungan Tegangan Terhadap Waktu pada Kecepatan Putar 450,247 rpm.....	42
Gambar 4.8	Grafik Kecepatan Putar terhadap Tegangan Hasil Percobaan Alat	43
Gambar 4.9	Grafik Waktu vs Fluks Medan Magnet yang Diterima oleh Stator pada 150 rpm .....	43
Gambar 4.10	Grafik Waktu vs Tegangan Keluaran 3 Fasa pada 150 rpm.....	44
Gambar 4.11	Grafik Waktu vs Fluks Medan Magnet yang Diterima oleh Stator pada 200 rpm .....	44
Gambar 4.12	Grafik Waktu vs Tegangan Keluaran 3 Fasa pada 200 rpm.....	45
Gambar 4.13	Grafik Waktu vs Fluks Medan Magnet yang Diterima oleh Stator pada 250 rpm .....	45

Gambar 4.14	Grafik Waktu vs Tegangan Keluaran 3 Fasa pada 250 rpm .....	46
Gambar 4.15	Grafik Waktu vs Fluks Medan Magnet yang Diterima oleh Stator pada 300 rpm .....	46
Gambar 4.16	Grafik Waktu vs Tegangan Keluaran 3 Fasa pada 300 rpm .....	47
Gambar 4.17	Grafik Waktu vs Fluks Medan Magnet yang Diterima oleh Stator pada 350 rpm .....	47
Gambar 4.18	Grafik Waktu vs Tegangan Keluaran 3 Fasa pada 350 rpm .....	48
Gambar 4.19	Grafik Waktu vs Fluks Medan Magnet yang Diterima oleh Stator pada 400 rpm .....	48
Gambar 4.20	Grafik Waktu vs Tegangan Keluaran 3 Fasa pada 400 rpm .....	49
Gambar 4.21	Grafik Waktu vs Fluks Medan Magnet yang Diterima oleh Stator pada 450 rpm .....	49
Gambar 4.22	Grafik Waktu vs Tegangan Keluaran 3 Fasa pada 450 rpm .....	50
Gambar 4.23	Grafik Hasil Simulasi Kecepatan Putar Rotor vs Magnitude Tegangan pada Fasa a .....	50
Gambar 4.24	Grafik Hasil Simulasi Kecepatan Putar Rotor vs Magnitude Tegangan pada Fasa b .....	51
Gambar 4.25	Grafik Hasil Simulasi Kecepatan Putar Rotor vs Magnitude Tegangan pada Fasa c .....	51
Gambar 4.26	Urutan Fasa dan Arah Gulungan Kumparan pada Stator 9 Kumparan 3 Fasa Berseling.....	55
Gambar 4.27	Konfigurasi Lilitan Kumparan 9 Kumparan 3 Fasa Berseling .....	56

## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Ukuran Geometri Rotor 9 Pasang Magnet Permanen. ....	29
Tabel 3.2	Ukuran Geometri Desain Stator 9 Kumparan 3 Fasa Seri.....	30
Tabel 3.3	Ukuran Geometri Rotor 8 Pasang Magnet Permanen. ....	33
Tabel 3.4	Ukuran Geometri Desain Stator 9 Kumparan 3 Fasa Berseling.....	35



## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran1	Data Hasil Simulasi dengan Kecepatan Putar Rotor 150 rpm. ....	61
Lampiran2	Data Hasil Simulasi dengan Kecepatan Putar Rotor200 rpm .....	62
Lampiran 3	Data Hasil Simulasi dengan Kecepatan Putar Rotor250 rpm .....	63
Lampiran4	Data Hasil Simulasi dengan Kecepatan Putar Rotor300 rpm .....	64
Lampiran 5	Data Hasil Simulasi dengan Kecepatan Putar Rotor350 rpm .....	65
Lampiran6	Data Hasil Simulasi dengan Kecepatan Putar Rotor400 rpm .....	66
Lampiran 7	Data Hasil Simulasi dengan Kecepatan Putar Rotor450 rpm. ....	67



# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

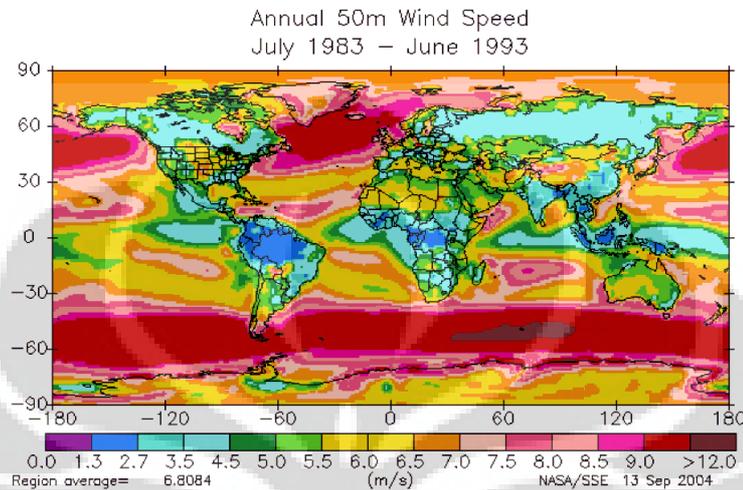
Pembangkitan energi listrik merupakan proses konversi energi primer menjadi energi mekanik penggerak generator yang selanjutnya energi mekanik ini diubah menjadi energi listrik oleh generator<sup>[1]</sup>. Sumber energi primer yang ada dapat dikelompokkan menjadi dua macam, yaitu sumber energi tidak terbarukan (*nonrenewable energy*) dan sumber energi yang terbarukan (*renewable energy*). Seiring dengan jumlah sumber energi tidak terbarukan yang semakin berkurang dan banyaknya dampak negatif yang ditimbulkan dari penggunaannya, penghematan dan pemilihan sumber energi alternatif mutlak dilakukan.

Energi angin adalah salah satu sumber energi yang terbarukan dan teknologi hasil pemanfaatannya hingga kini semakin matang dan berkembang pesat sehingga menjadi fokus utama pengembangan sumber energi alternatif pada beberapa negara. Sejak tahun 1996, kapasitas instalasi kumulatif global dari pemanfaatan energi angin meningkat lebih dari 20% per tahun dan tingkat kenaikan tahunan rata-ratanya mencapai 28,33%. Berdasarkan hasil laporan *Global Wind Energy Council* (GWEC) pada tahun 2006<sup>[2]</sup>, kapasitas instalasi global dari pemanfaatan energi angin mencapai 4.800 MW pada tahun 1995 dan pada tahun 2005 jumlahnya mencapai 59.000 MW.

Perkembangan dari pemanfaatan energi angin secara umum telah diterima sebagai bagian yang penting dalam kemasyarakatan, lingkungan dan merupakan kesempatan sekaligus tantangan dalam bidang ekonomi yang akan menjawab permasalahan dari isu perubahan iklim dan pemanasan global. Sebuah teknologi yang memanfaatkan energi angin telah dikembangkan untuk dapat mengurangi dan menekan penyebaran gas karbon di atmosfer bumi berupa Turbin Angin.

Letak geografis Indonesia yang berada di daerah khatulistiwa menyebabkan kecepatan anginnya tidak terlalu tinggi. Hal ini ditunjukkan oleh Peta Angin Global (Gambar.1) yang merupakan hasil analisis data satelit oleh NASA/SSE pada tanggal 13 September 2004. Secara umum kecepatan angin rata-rata tahunan pada ketinggian 50 m di daerah daratan yang terletak sepanjang

khatulistiwa umumnya berkisar 2 m/det sampai 5,5 m/det. Sementara itu, daerah sub-tropis baik disebelah utara maupun selatan khatulistiwa umumnya mempunyai kecepatan angin rata-rata yang cukup tinggi berkisar 7 m/det.



Gambar 1.1. Kecepatan Angin Rata-Rata Tahunan pada Ketinggian 50 m Berdasarkan Perhitungan Data Satelit GEOS-1 NASA.

Berdasarkan beberapa pengukuran langsung, beberapa lokasi di Indonesia mempunyai kecepatan angin rata-rata tahunan cukup tinggi pada ketinggian 50 m, yaitu diatas 5,6 m/det hingga 7 m/det. Lokasi-lokasi tersebut antara lain terdapat di pantai selatan Pulau Jawa, pesisir Nusa Tenggara Timur, Sulawesi Selatan, Sulawesi Utara, dan Maluku<sup>[3]</sup>. Data persebaran kecepatan angin rata-rata inilah yang akan digunakan sebagai acuan untuk menentukan desain pembangkit energi listrik yang sesuai, khususnya dalam hal pemodelan generator yang akan digunakan.

Kecepatan angin di Indonesia yang relatif kecil membutuhkan generator yang dapat bekerja dengan baik pada kecepatan rendah, generator magnet permanen fluks aksial merupakan salah alternatif terbaik yang dapat dikopling atau bahkan dihubungkan langsung dengan turbin angin tersebut. Karakter generator fluks aksial yang memiliki jumlah kutub magnet yang tinggi, densitas daya listrik yang tinggi, masa yang ringan, pendinginan yang baik, peratawan dan

konstruksi yang sederhana, serta mudah dalam meningkatkan kapasitas daya menjadi keunggulan tersendiri jika dibandingkan dengan generator radial.

Generator magnet permanen fluks aksial atau AFPM (*Axial Flux Permanent Magnet*) adalah mesin listrik yang dapat membangkitkan energi listrik dengan arah aliran fluks secara aksial. Terdapat dua topologi AFPM secara umum, yaitu mesin AFPM sisi tunggal dan mesin AFPM sisi ganda. Generator magnet permanen fluks aksial dengan topologi sisi ganda, memiliki rotor ganda dan stator tunggal tanpa inti besi, adalah salah satu jenis generator yang secara umum digunakan untuk pembangkit listrik tenaga angin untuk putaran rendah.

## **1.2 Tujuan Penulisan**

Adapun tujuan dari penulisan skripsi ini adalah:

1. Merancang dan mensimulasikan desain generator fluks aksial rotor ganda stator tunggal tanpa inti dengan konfigurasi pasang kutub magnet-jumlah lilitan 8-9, dimana lilitan stator diatur dengan konfigurasi RSTRSTRST.
2. Membandingkan data hasil simulasi generator yang telah didesain dengan hasil simulasi desain generator fluks aksial dengan konfigurasi 9 pasang kutub magnet permanen dan 9 kumparan seri.
3. Mendapatkan desain generator dengan hasil yang lebih baik dibandingkan dengan desain generator fluks aksial dengan konfigurasi 9 pasang kutub magnet permanen dan 9 kumparan seri.

## **1.3 Ruang Lingkup Permasalahan**

Ruang lingkup permasalahan ini dimaksudkan agar penulisan skripsi ini dapat lebih terarah dan terfokus, sehingga penelitian yang dilakukan agar penelitian yang dilakukan dapat sesuai dengan rencana yang telah dirancang. Berikut adalah ruang lingkup permasalahan skripsi ini:

1. Desain pemodelan dan simulasi hanya terbatas pada generator fluks aksial rotor ganda stator tunggal tanpa inti.
2. Desain rotor yang digunakan pada desain generator yang baru hanya memiliki delapan pasang kutub dengan tipe TORUS NS.

3. Desain stator yang digunakan pada desain generator yang baru hanya memiliki jumlah lilitan sebanyak sembilan buah, tiga fasa, dan dengan lilitan fasa yang berseling (RSTRSTRST).
4. Dimensi ukuran generator menggunakan dimensi ukuran cetakan generator Lembaga Penelitian LAPAN.
5. Reaksi jangkar dan rugi-rugi mekanis serta elektris tidak diikutsertakan di dalam simulasi.

#### 1.4 Metodologi Penulisan

Metodologi penulisan yang digunakan memiliki lima tahap dengan penjabaran sebagai berikut:

1. Pemilihan Topik Penelitian

Tahap pertama dalam melakukan penelitian ini adalah pemilihan dan penentuan topik penelitian yang akan dilakukan. Tahap pemilihan topik penelitian ini dilakukan melalui proses diskusi dengan dosen pembimbing. Topik penelitian yang dipilih adalah desain generator fluks aksial rotor ganda stator tunggal. Spesifikasi generator yang digunakan adalah dengan menggunakan delapan pasang magnet permanen dan sembilan lilitan tiga fasa berseling.

2. Pengumpulan Dasar Teori

Tahap berikutnya dalam melakukan penelitian adalah pengumpulan dasar-dasar teori yang akan menjadi landasan ataupun acuan dalam melaksanakan penelitian ini. Sumber dasar teori yang dapat digunakan dapat berupa buku penunjang, artikel, jurnal, maupun hasil-hasil penelitian sebelumnya yang dapat berupa skripsi ataupun tesis.

3. Simulasi dan Pengambilan Data

Tahap berikutnya adalah proses pengerjaan desain generator dengan menggunakan peranti lunak COMSOL 3.5. dan pengambilan data keluaran generator seperti tegangan dan daya keluaran dari generator. Simulasi dilakukan untuk kedua buah desain baik desain generator dengan konfigurasi 9 pasang kutub magnet permanen dan 9 kumparan 3 fasa seri

maupun desain generator dengan konfigurasi 8 pasang kutub magnet permanen dan 9 kumparan 3 fasa berseling.

#### 4. Pengolahan Data dan Analisa Hasil Simulasi

Setelah data keluaran generator didapat, data tersebut dibandingkan dengan data hasil simulasi desain generator fluks aksial dengan konfigurasi 9 pasang kutub magnet permanen dan 9 kumparan 3 fasa seri..

#### 5. Penarikan Kesimpulan dan Saran

Tahap ini merupakan tahapan terakhir dari proses penelitian ini. Pada tahap ini, penulis menarik kesimpulan berdasarkan tahap-tahap sebelumnya yang telah dilakukan, data-data keluaran yang telah didapat, dan analisa yang telah dibuat. Setelah itu, terdapat saran yang dapat digunakan untuk memperbaiki atau menyempurnakan hal-hal yang berkaitan dengan penelitian ini.

### 1.5 Sistematika Penulisan

Dalam penulisan skripsi ini, terdapat lima bagian yang akan memberikan gambaran sistematis sejak awal penelitian hingga tercapainya tujuan dari penelitian ini, di antaranya adalah sebagai berikut:

#### **Bab 1           Pendahuluan**

Bagian ini merupakan bagian awal dari penulisan skripsi ini. Dalam bab ini, diuraikan latar belakang dilakukannya penelitian, tujuan penelitian, ruang lingkup permasalahan, metodologi penelitian, serta sistematika penulisan.

#### **Bab 2           Tinjauan Pustaka**

Bagian ini berisikan tentang landasan-landasan teori yang digunakan dalam seluruh proses penelitian. Secara umum, bab ini berisikan tentang dasar-dasar teori mengenai penjelasan mengenai generator listrik pada umumnya, konstruksi, jenis, dan prinsip kerja dari generator fluks aksial, serta parameter-parameter desain.

#### **Bab 3           Pemodelan, Simulasi, dan Produksi**

Bagian ini memaparkan tentang proses perancangan dari generator fluks aksial yang telah ada dan yang akan dibuat. Bab ini berisi

tentang desain dan simulasi dari konstruksi rotor, stator, dan celah udara, disertai dengan parameter-parameter bahan serta parameter-parameter yang mempengaruhi kerja generator.

#### **Bab 4 Pengolahan Data dan Analisa**

Bagian ini berisi tentang proses pengambilan data, data hasil simulasi, dan analisis berkaitan dengan data hasil simulasi yang didapat. Pada bab ini, terdapat dua macam data yaitu data hasil simulasi generator dengan konfigurasi 9 pasang kutub magnet permanen dan 9 kumparan 3 fasa seri dan data hasil simulasi generator dengan konfigurasi 8 pasang kutub magnet permanen dan 9 kumparan 3 fasa berseling.

#### **Bab 5 Kesimpulan dan Saran**

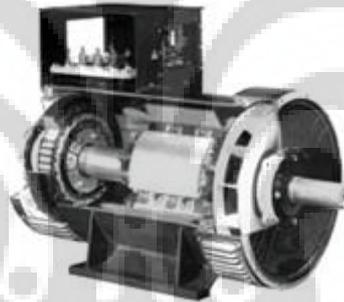
Bagian ini merupakan bagian terakhir dari penulisan dan berisi tentang penarikan kesimpulan berdasarkan data dan analisa yang telah dilakukan. Pada bagian ini juga terdapat saran yang dapat digunakan untuk memperbaiki atau menyempurnakan hal-hal yang berkaitan dengan penelitian ini.

## BAB 2

### GENERATOR AXIAL FLUX PERMANENT MAGNET (AFPM)

#### 2.1 Generator Sinkron Konvensional

Generator merupakan suatu jenis mesin listrik yang mengkonversi energi gerak menjadi energi listrik. Generator sinkron konvensional merupakan jenis generator yang sering kita temui pada pembangkit-pembangkit listrik di sekitar kita. Generator sinkron yang dimaksud biasa digunakan sebagai pembangkit listrik pada pusat-pusat listrik seperti PLTA, PLTG, PLTU, dan PLTGU. Generator sinkron konvensional ini termasuk ke dalam mesin yang menggunakan konsep *radial flux*, dan apabila mesin tersebut menggunakan magnet permanen, mesin tersebut disebut sebagai mesin RFPM (*Radial Flux Permanent Magnet*). Akan tetapi, pada umumnya, generator sinkron yang digunakan sebagai pembangkit menggunakan suatu sumber DC dalam pengoperasiannya.



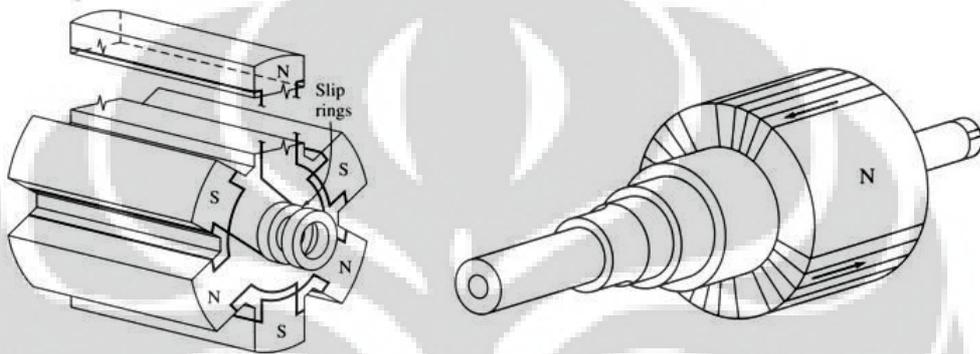
Gambar 2.1. Generator Sinkron Konvensional

##### 2.1.1 Konstruksi Generator Sinkron

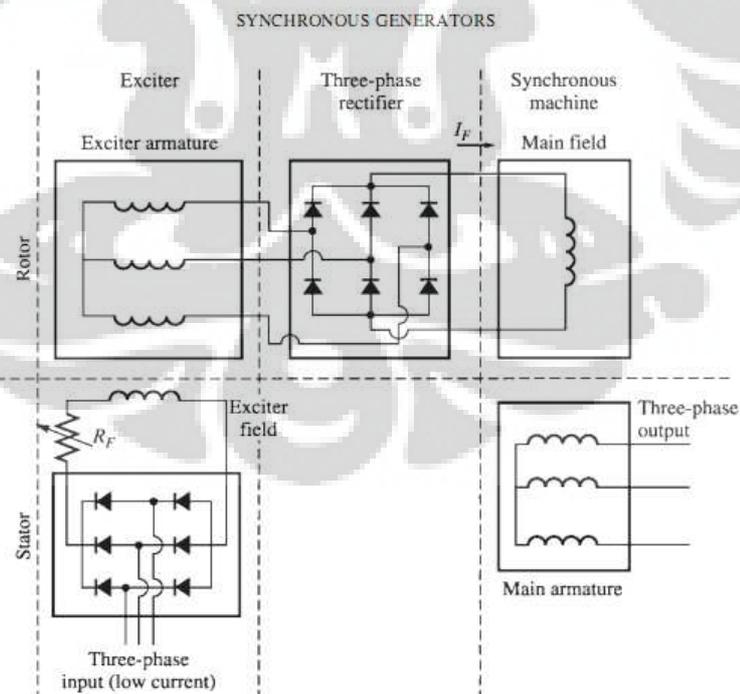
Seperti mesin-mesin listrik lainnya, generator sinkron memiliki dua bagian utama, yaitu stator dan rotor. Stator adalah bagian dari generator yang diam sedangkan rotor adalah bagian mesin yang berputar. Pada kedua bagian ini, terdapat lilitan yang memiliki fungsinya masing-masing. Lilitan pada stator atau biasa disebut lilitan jangkar (*armature*) adalah lilitan dimana tegangan induksi dihasilkan. Sedangkan untuk lilitan pada rotor atau lilitan medan (*field*) berfungsi untuk menghasilkan medan magnet utama.

Rotor pada generator sinkron dapat berbentuk *salient* atau *nonsalient*. Rotor dengan jenis *salient* memiliki bentuk menonjol sesuai dengan banyaknya

kutub magnetis yang dimilikinya. Rotor jenis *salient* memiliki jumlah kutub sebanyak empat atau lebih. Sedangkan untuk rotor dengan jenis *nonsalient* memiliki bentuk silinder sempurna dan kutub magnetisnya dibentuk rata dengan permukaan rotor. Jumlah kutub magnetis yang dimiliki oleh rotor jenis *nonsalient* adalah dua atau empat buah kutub. Dikarenakan oleh faktor bentuk konstruksi dan jumlah kutub magnetisnya, rotor jenis *salient* digunakan untuk aplikasi pembangkit dengan kecepatan mekanis yang rendah dan rotor jenis *nonsalient* digunakan untuk pembangkit dengan kecepatan mekanis yang tinggi.



Gambar 2.2. *Salient dan Nonsalient Rotor* [5]



Gambar 2.3. Rangkaian Brushless Exciter pada Generator Sinkron [5]

### 2.1.2 Catu DC pada Rotor Generator Sinkron

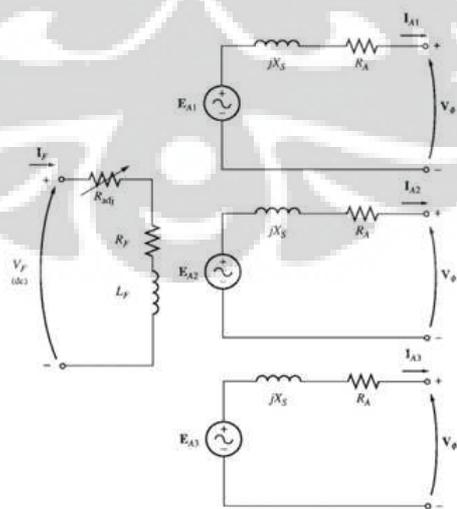
Seperti yang telah disebutkan sebelumnya, sumber DC eksternal dibutuhkan dalam pengoperasian generator sinkron dan diberikan pada bagian lilitan rotor dari mesin sinkron, yang dapat menghasilkan medan magnet rotor. Dikarenakan rotor yang berputar, terdapat perlakuan khusus untuk dapat memberikan catu DC tersebut pada rotor. Terdapat dua cara yang dapat digunakan untuk memberikan catu DC pada rotor generator sinkron, yaitu:

1. Memberikan catu DC dari sumber DC eksternal ke rotor menggunakan *slip rings* dan *brushes*.
2. Menggunakan sumber DC khusus yang dipasang langsung pada bagian poros dari generator sinkron (*brushless exciter* dan *pilot exciter*).

### 2.1.3 Prinsip Kerja Generator Sinkron

Pada umumnya, proses pembangkitan energi listrik pada generator sinkron dapat dijelaskan dengan langkah-langkah sebagai berikut:

1. Catu DC diberikan pada rangkaian/kumparan medan dengan menggunakan cara yang telah dijelaskan sebelumnya. Karena rangkaian medan merupakan rangkaian tertutup, maka terdapat arus searah yang mengalir pada kumparan medan sehingga, seperti yang dijelaskan pada hukum Oersted, akan terdapat medan magnet ( $B_f$ ) yang timbul pada rotor dan bernilai tetap terhadap waktu.



Gambar 2.4. Rangkaian Ganti Ekuivalen dari Generator Sinkron Konvensional [5]

2. Rotor pada generator diputar oleh *prime mover* yang terkopel pada poros, yang menghasilkan medan magnet putar di dalam generator dengan suatu kecepatan sudut ( $\omega$ ) tertentu.
3. Medan magnet putar tersebut akan menyebabkan perubahan besar fluks yang menembus kumparan stator. Perubahan fluks terhadap waktu ini akan menghasilkan tegangan tiga fasa pada tiga kumparan yang ada pada stator.

## 2.2 Generator Axial Flux Permanent Magnet (AFPM)

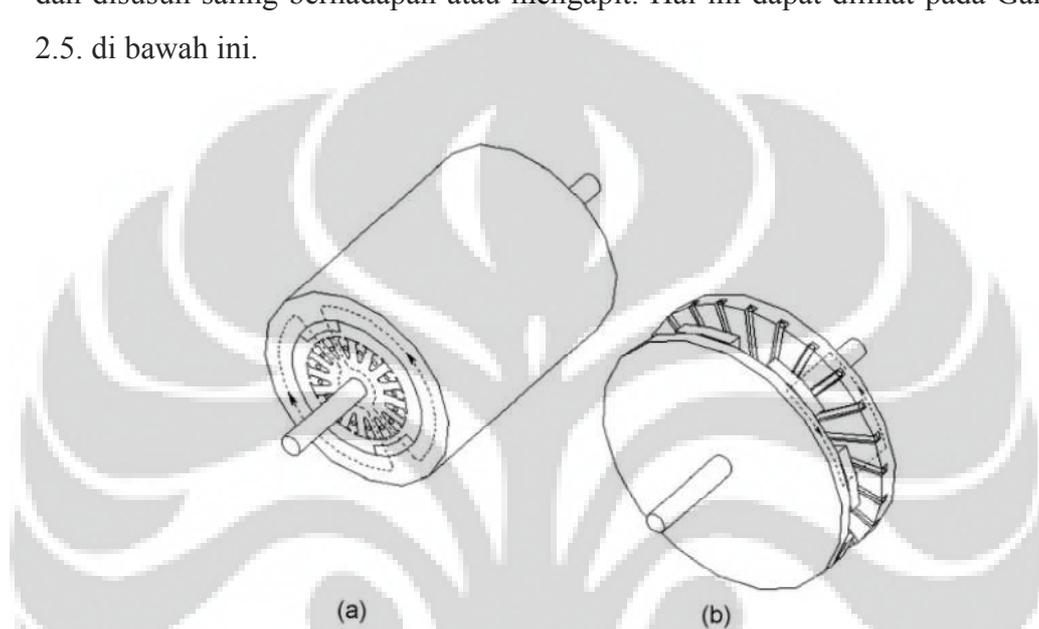
Mesin AFPM (*Axial Flux Permanent Magnet*), atau biasa disebut mesin *disc-type*, merupakan mesin dengan bentuk seperti kue panekuk (*pancake*) dan konstruksi yang rapi, serta memiliki densitas daya yang tinggi. Seperti mesin pada umumnya, AFPM juga dapat berupa motor atau generator. Pada penulisan skripsi ini, akan dibahas mengenai AFPM sebagai generator atau pembangkit listrik. Sebagai generator, mesin AFPM dapat dimasukkan ke dalam kelas generator kecil atau medium. Dengan kelebihan dapat memiliki kutub-kutub yang banyak, mesin ini sangat sesuai untuk aplikasi generator kecepatan rendah seperti generator tenaga angin.

Keunikan bentuk rotor dan stator tipe disk yang dimiliki oleh mesin AFPM ini memungkinkan untuk dapat menghasilkan desain mesin yang berbeda-beda dan dapat diubah-ubah. Mesin AFPM dapat didesain dengan sela udara tunggal maupun sela banyak, dengan menggunakan inti ataupun tidak, bahkan dengan menggunakan rangkaian jangkar tanpa logam. Mesin AFPM dengan daya rendah seringkali didesain dengan kumparan tanpa inti dan *Permanent Magnet* (PM) permukaan. Mesin-mesin AFPM memiliki bentuk-bentuk konstruksi yang berbeda-beda yang akan dijelaskan pada sub-bab berikutnya.

### 2.2.1 Konstruksi Generator AFPM

Seperti halnya mesin-mesin listrik lainnya, mesin AFPM memiliki dua buah bagian yang sangat penting, yaitu stator dan rotor. Stator merupakan bagian dari mesin yang diam. Pada generator, stator merupakan bagian dimana tegangan keluaran dihasilkan, sehingga disebut juga sebagai rangkaian *armature* atau jangkar. Sedangkan untuk rotor merupakan bagian dari mesin yang bergerak atau

berputar dikarenakan rotor terhubung dengan *prime mover* (penggerak utama) melalui poros (*shaft*). Perbedaannya dengan mesin-mesin listrik lainnya adalah bentuk dari rotor dan statornya. Berbeda dengan mesin listrik lain yang merupakan mesin yang menggunakan konsep *radial flux* (apabila mesin tersebut menggunakan *permanent magnet* maka disebut sebagai *radial flux permanent magnet / RFPM*), bentuk rotor dan stator pada generator AFPM berbentuk disk dan disusun saling berhadapan atau menggapit. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 2.5. di bawah ini.



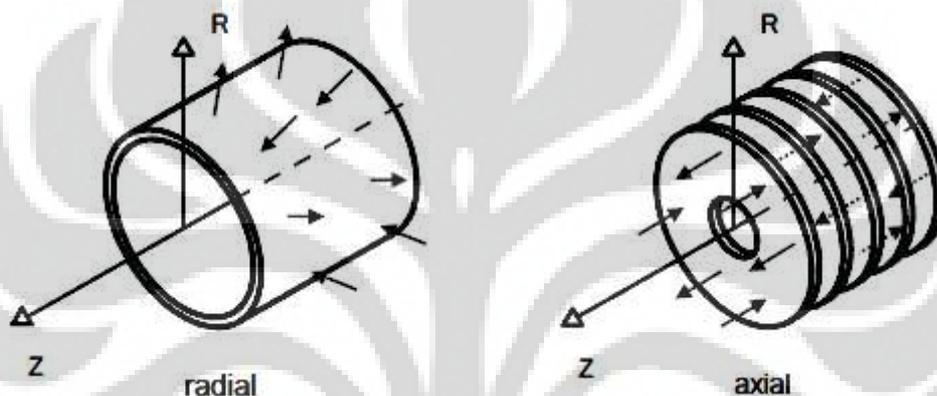
Gambar 2.5. Topologi dari (a) Mesin RFPM, (b) Mesin AFPM. [1]

Pada gambar diatas, mesin RFPM (*Radial Flux Permanent Magnet*) memiliki struktur rotor internal dikarenakan letak rotor yang ada di dalam kumparan stator, magnet permanen terletak di bagian luar lingkaran rotor yang dikopling langsung dengan poros. Fluks magnet yang dihasilkan oleh generator RFPM mengarah secara radial (menyebar) dan tegak lurus terhadap poros (*shaft*) sehingga fluks-fluks yang dihasilkan akan memotong kumparan stator yang disusun di sisi luar rotor.

Mesin AFPM pada gambar di atas adalah mesin AFPM sisi tunggal, satu buah rotor yang berbentuk disk dikopling langsung dengan poros dan permanen magnet diletakkan di sisi dalam rotor yang digunakan untuk menghasilkan fluks magnetik yang arahnya melewati bagian stator. Arah fluks magnet yang dihasilkan tidak menyebar, melainkan mengarah secara aksial atau sejajar dengan

poros. Oleh karena itu, generator AFPM yang memiliki arah fluks magnet aksial memberikan efisiensi yang lebih besar dibandingkan generator RFPM karena fluks magnet yang terbuang tidak banyak dan memungkinkan fluks magnet memotong kumparan stator dengan lebih baik sehingga rugi-rugi dayanya pun menjadi berkurang.

Disamping perbedaan arah fluks magnet yang dihasilkan, arah garis medan magnet dari kedua jenis generator ini pun berbeda. Gambar yang menunjukkan perbedaan arah garis medan magnet pada generator RFPM dan AFPM, yaitu :



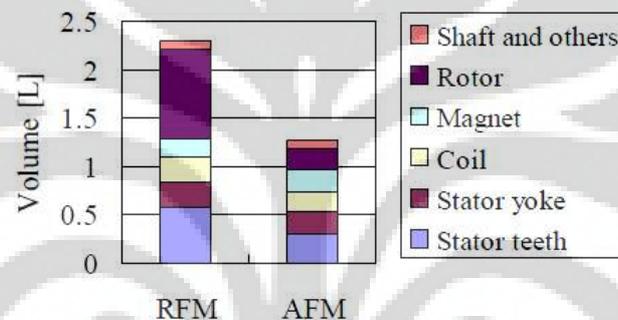
Gambar 2.6. Perbedaan Arah Garis Medan Magnet Mesin AFPM dan RFPM

Garis-garis medan magnet pada generator RFPM 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, pelapisan sisi stator dengan baja silikon berlapis ini dapat mengakibatkan penurunan keluaran mesin saat starting dikarenakan adanya gaya tarik menarik antara magnet dengan lapisan stator. Efisiensi yang dimiliki mesin juga dapat menurun disebabkan karena adanya rugi-rugi inti pada sisi stator.

Di sisi lain, generator AFPM yang garis-garis medan magnetnya berada di antara dua sisi stator dapat meningkatkan daya keluarannya dengan membuat dimensi rotor yang setipis mungkin secara aksial, namun tetap menjaga luas permukaan medan magnet yang dimiliki oleh rotor. Oleh sebab itu, generator AFPM dapat menghasilkan daya dengan besar yang sama untuk volume mesin yang lebih kecil daripada generator RFPM. Hal tersebut dapat terlihat pada

Gambar 2.7. di bawah yang menggambarkan perbandingan dimensi generator AFPM dan RFPM yang menghasilkan daya yang sama. Posisi dua buah rotor yang berada pada kedua sisi stator dapat menghasilkan efisiensi yang lebih tinggi karena fluks-fluks magnet pada kedua sisi magnet dapat dimanfaatkan seluruhnya untuk menghasilkan GGL induksi.

Selain itu, dengan memperlebar permukaan rotor, generator AFPM akan memiliki diameter inti yang lebih lebar pula. Semakin besar diameter luar dari inti akan memungkinkan mesin AFPM untuk dapat memiliki jumlah kutub yang semakin banyak, membuat mesin AFPM tepat untuk digunakan dalam pengoperasian dengan frekuensi tinggi atau kecepatan rendah.



Gambar 2.7. Perbandingan Dimensi Mesin AFPM dan RFPM dengan Daya yang Sama

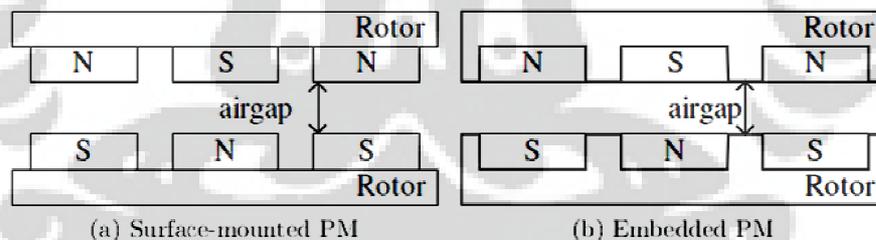
### 2.2.2 Rotor pada Generator AFPM

Seperti yang telah dikatakan sebelumnya, rotor pada mesin AFPM berbentuk cakram/disk dan berfungsi sebagai rangkaian medan magnet utama dari mesin. Medan magnet utama yang dimiliki oleh rotor pada mesin AFPM berasal dari *permanent magnet* yang diletakkan pada bagian cakram rotor. Rotor dapat dibuat dengan menggunakan bahan komposit yang didalamnya diletakkan material besi sebagai tempat diletakkannya magnet permanen. Material besi ini juga dapat memperkuat medan magnet yang dimiliki oleh rotor. Dengan digunakannya magnet permanen, generator AFPM tidak membutuhkan catu dari luar untuk dapat bekerja dan tidak memiliki disipasi daya listrik. Magnet permanen juga disebut sebagai *hard magnetic materials*, yang berarti material ferromagnetik dengan *loop hysteresis* yang lebar. Jenis magnet permanen yang

sering digunakan adalah *Alnicos* (Al, Ni, Co, Fe), *Ferrites*, *Samarium Cobalt* (SmCo) dan *Neodymium-iron-boron* (NdFeB). *Samarium Cobalt* (SmCo) dan *Neodymium-iron-boron* (NdFeB) yang merupakan material-material Bumi yang langka.

Pemasangan PM pada rotor dapat dilakukan dengan dua cara, yaitu dengan cara *surface-mounted* PM dan *embedded* PM. Pada cara *surface-mounted* PM, magnet-magnet permanen diletakkan di atas permukaan rotor dengan pengaturan kutub yang diinginkan sehingga terdapat celah udara diantara dua buah PM yang berdekatan. Sedangkan pada cara *embedded* PM, magnet-magnet permanen diletakkan seolah-olah masuk dan menjadi bagian dari rotor. Pemasangan dengan cara *embedded* PM ini dilakukan untuk jenis rotor yang dibuat menggunakan bahan komposit dan terdapat material besi di dalam komposit sehingga penyebaran fluks magnet tetap merata dan magnet permanen menjadi tidak mudah lepas dari rotor.

Cara pemasangan PM pada rotor yang umum digunakan adalah *surface-mounted* PM. Hal ini dikarenakan proses manufaktur/pembuatan cakram pada rotor jenis ini lebih mudah dibandingkan cara *embedded* PM, sehingga biaya produksi mesin lebih murah.



Gambar 2.8. Cara Pemasangan PM pada Rotor Mesin AFPM

### 2.2.3 Stator pada Generator AFPM

Stator pada generator AFPM memiliki berbagai macam variasi bentuk, yang diantaranya adalah stator dengan inti besi berbentuk torus dan stator tanpa inti besi. Untuk berbagai bentuk magnet dan ukuran cakram rotor, setiap bentuk kumparan stator dapat dimodifikasi berdasarkan parameter-parameter tertentu, seperti jari-jari, kelengkungan (inklinasi) sisi aktif kumparan, panjang ujung sambungan, dan sebagainya.

Stator dengan inti besi dibuat dari besi berbentuk cakram dengan kutub menonjol atau sela-sela dengan lubang di tengahnya yang kemudian dililit oleh kumparan. Contohnya dapat dilihat pada Gambar 2.9. Stator dengan bentuk torus biasanya digunakan pada penggerak dengan kecepatan putar yang cukup tinggi. Berbeda dengan stator berinti besi, stator tanpa inti besi tidak memiliki cakram besi, dan hanya terdiri dari lilitan kumparan. Untuk membuat stator memiliki bentuk yang tetap dapat digunakan bahan komposit atau dengan menempatkan kumparan pada bahan lain yang dapat ditembus oleh medan magnet. Stator tanpa inti besi ini biasanya digunakan untuk kecepatan putar rendah dan torsi beban yang rendah.

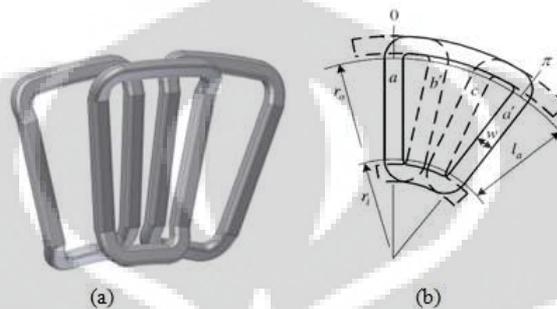


Gambar 2.9. Stator kutub salient untuk mesin AFPM sisi tunggal kecil. [1]

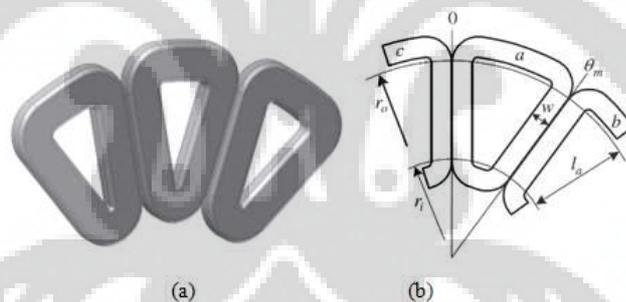
Lilitan/kumparan stator biasanya terbuat dari konduktor tembaga terinsulasi. Pada stator tanpa inti besi susunan kumparannya terbagi menjadi dua macam, ada yang tersusun secara *overlapping* dan *non-overlapping*. Bentuk kumparan stator tanpa inti dapat divariasikan sesuai dengan kebutuhan, akan tetapi biasanya bentuk yang digunakan disesuaikan dengan bentuk magnet yang digunakan agar fluks yang dihasilkan menembus kumparan stator dengan efektif.

Stator yang susunan kumparannya secara *overlapping*, susunan kumparannya berada tumpang tindih dengan kumparan yang lainnya. Tentunya dengan susunan fasa yang berbeda pada tiap fasanya.

Stator dengan susunan kumparan secara *non-overlapping*, susunan kumparannya berada sejajar dan berimpit disamping kumparan lainnya. Sedangkan susunan fasa akan saling berurutan sesuai dengan jumlah kumparan pada stator tersebut.



Gambar 2.10. (a) Susunan Kumparan Stator *Overlapping*, (b) Skematik Kumparan Stator *Overlapping* [8]



Gambar 2.11. (a) Susunan Kumparan Stator *nonOverlapping*, (b) Skematik Kumparan Stator *nonOverlapping* [8]

#### 2.2.4 Celah Udara pada Generator AFPM

Celah udara pada generator AFPM merupakan area diantara rotor dan stator yang menjadi medium berpindahnya fluks magnet pada magnet permanen yang ada pada rotor yang menginduksi kumparan pada stator. Besar atau lebarnya celah udara memiliki pengaruh yang cukup besar terhadap penginduksian tegangan ke kumparan stator. Celah udara yang ada pada generator AFPM

jumlahnya dapat lebih dari satu tergantung banyaknya stator dan rotor yang digunakan pada generator tersebut.

### 2.3 Desain Konstruksi/Rangkaian Dasar Mesin AFPM

Dari segi konstruksi, mesin AFPM dapat didesain sebagai mesin dengan sisi tunggal (*single sided*), sisi ganda (*double sided*), ataupun dengan desain *multidisc*. Berikut adalah konstruksi-konstruksi dasar yang dapat didesain pada mesin AFPM.

#### 2.3.1 Mesin AFPM dengan Konstruksi Sisi Tunggal (*single sided*)

Konstruksi mesin AFPM sisi tunggal merupakan konstruksi mesin AFPM yang paling sederhana dengan sebuah rotor dan sebuah stator. Meskipun sederhana, mesin AFPM sisi tunggal ini hanya menghasilkan torsi yang sangat rendah. Berikut adalah jenis-jenis konstruksi mesin AFPM sisi tunggal yang ada:

- dengan stator bersela (*slotted rotor*)
- dengan stator tanpa sela (*slotless stator*)
- dengan stator kutub menonjol (*salient-pole stator*)

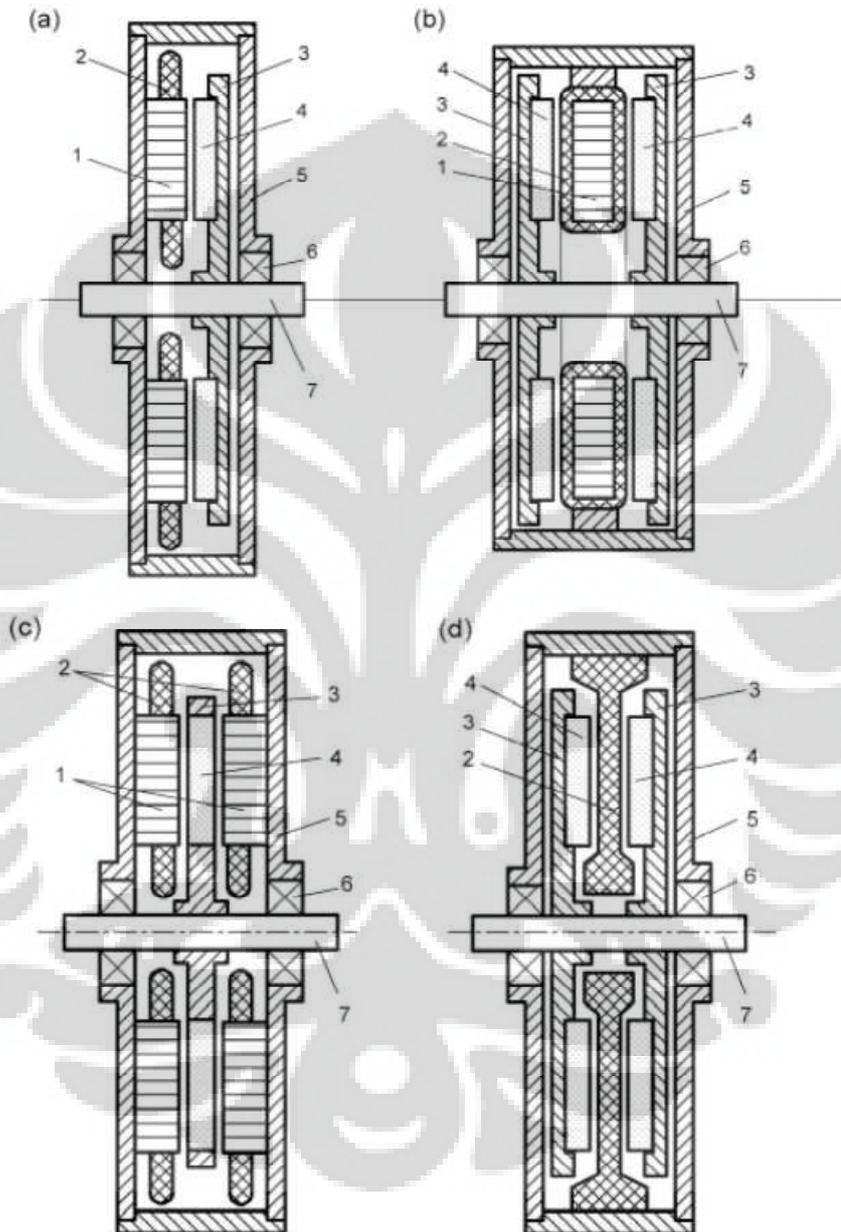
Gambar 2.12a. di bawah menggambarkan konstruksi mesin AFPM dengan stator bersela (*slotted rotor*).

#### 2.3.2 Mesin AFPM dengan Konstruksi Sisi Ganda (*double sided*)

Sama seperti mesin AFPM dengan konstruksi sisi tunggal, bentuk konstruksi mesin AFPM sisi ganda juga terdiri dari stator dan rotor akan tetapi, terdapat perbedaan pada jumlahnya. Mesin AFPM dengan konstruksi sisi ganda dapat memiliki dua buah stator dan sebuah rotor, ataupun sebaliknya, sebuah stator dan sebuah rotor. Pada umumnya, perbedaan konstruksi tersebut dibedakan oleh letak dari stator maupun rotor (rotor internal atau stator internal). Berikut adalah jenis-jenis konstruksi mesin AFPM sisi ganda:

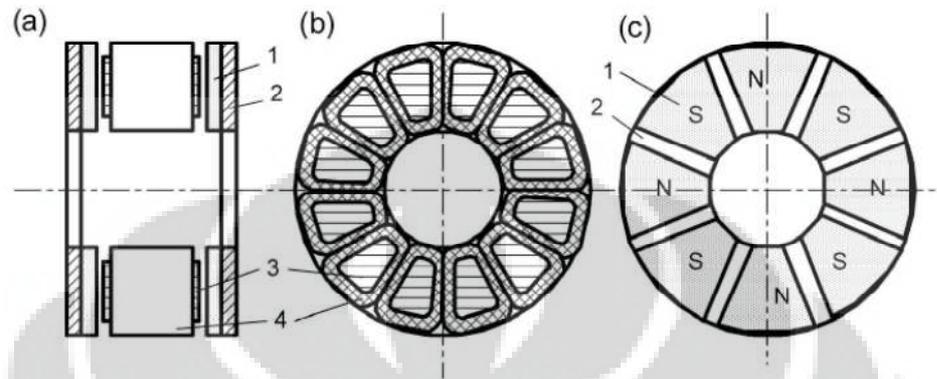
- dengan stator internal (Gambar 2.12b)
  - dengan stator bersela (*slotted stator*)
  - dengan stator tanpa sela (*slotless stator*)
    - dengan stator inti besi

- dengan stator tanpa inti (Gambar 2.12d)
- tanpa inti rotor maupun stator
- o dengan stator kutub menonjol (*salient*) (Gambar 2.13)

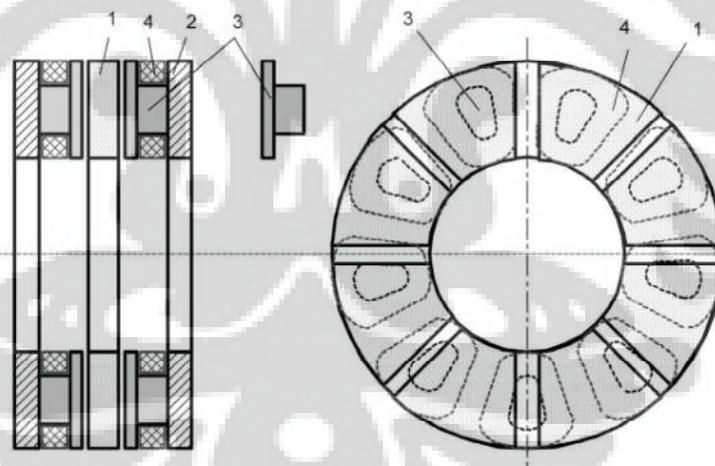


Gambar 2.12. Konstruksi dasar mesin AFPM: (a) single sided slotted machine; (b) double sided slotless machines with internal stator and twin PM rotor; (c) double sided machine slotted stator and internal PM stator; (d) double sided coreless stator [1]. 1 – inti stator. 2 – lilitan stator, 3 – rotor, 4 – PM, 5 – bingkai. 6 – bearing, 7 – shaft.

- dengan rotor internal (Gambar 2.12c)
  - dengan stator bersela (*slotted stator*)
  - dengan stator tanpa sela (*slotless stator*)
  - dengan stator kutub menonjol (*salient*) (Gambar 2.14)



Gambar 2.13. Mesin AFPM sisi ganda dengan stator kutub menonjol internal dan dua rotor eksternal [1]: (a) konstruksi; (b) stator; (c) rotor. 1 – PM, 2 – rotor backing steel disc, 3 – kutub stator, 4 – lilitan stator.



Gambar 2.14. Mesin AFPM brushless sisi ganda tiga fasa dengan stator kutub salient eksternal 9 lilitan dan rotor internal 8 kutub [1]. 1 – PM. 2 – stator backing ferromagnetic disc, 3 – kutub stator, 4 – lilitan stator.

#### Konstruksi mesin AFPM dengan rotor internal

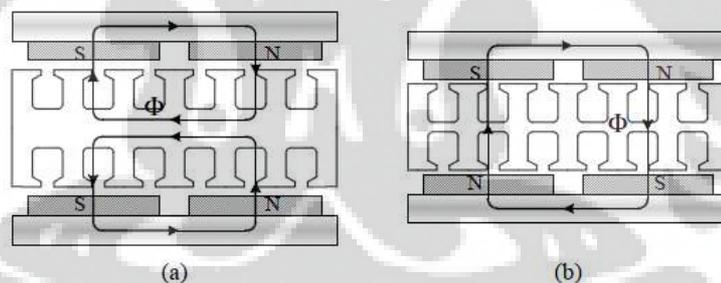
Mesin AFPM dengan konstruksi ini memiliki sebuah rotor dan dua stator, dimana kumparan jangkarnya terletak pada dua stator, serta terdapat disk rotor dengan magnet permanen terletak di antara kedua stator tersebut. Konstruksi ini

sering disebut juga 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.

Celah udara yang dimiliki mesin AFPM dengan konstruksi ini lebih besar daripada jenis konstruksi sisi tunggal, yaitu terdiri atas dua celah mekanis antara stator dan rotor ditambah dengan jarak aksial antara magnet permanen. Konstruksi sisi ganda 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.

#### Konstruksi mesin AFPM dengan stator internal

Mesin AFPM dengan konstruksi ini memiliki sebuah stator dan dua buah rotor dimana dua buah disk rotor dengan permanen magnet mengapit kumparan stator yang berada di tengah. Konstruksi ini disebut juga 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 2.15. dibawah ini.



Gambar 2.15. Aliran fluks magnetik pada konstruksi mesin AFPM dengan stator internal tipe TORUS [7]. (a) Aliran fluks magnetik pada TORUS tipe NN, (b) Aliran fluks magnetik pada TORUS tipe NS.

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 magnetik mengalir dari kutub utara (N) melewati *air gap* dan stator lalu ditangkap oleh kutub selatan (S), yang berhadapan dengan kutub utara (N),

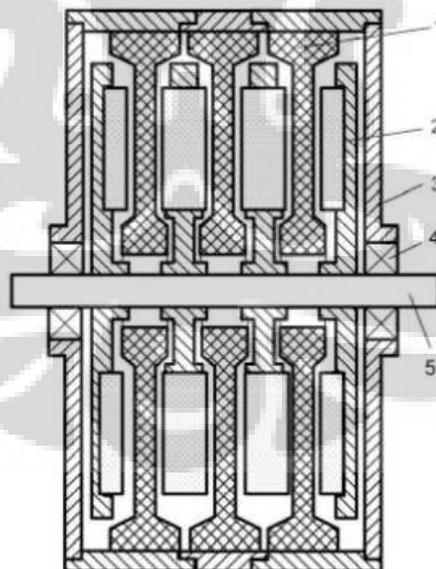
pada rotor yang berbeda. Dengan kondisi seperti ini, tipe TORUS N-S membutuhkan diameter stator yang lebih besar bila dibandingkan dengan tipe N-N, sehingga rugi-rugi tembaga pada kumparan meningkat dan efisiensi akan berkurang. Namun, tipe N-S tidak membutuhkan inti pada stator dikarenakan aliran fluks yang tegak lurus secara aksial sehingga rugi-rugi inti stator dapat dihilangkan dan efisiensi kembali naik.

### 2.3.3 Mesin AFPM dengan Konstruksi *Multidisc*

Pada desain konstruksi disk tunggal, terdapat keterbatasan dalam menaikkan torsi yang dihasilkan dengan cara memperlebar diameter dari mesin AFPM. Faktor-faktor keterbatasan tersebut adalah:

- a) Tekanan aksial yang diterima oleh *bearings*;
- b) Kekuatan sambungan mekanis antara disk dan poros *shaft*;
- c) Kekakuan disk.

Untuk mengatasi batasan-batasan di atas, digunakan mesin dengan disk ganda atau lebih. Konstruksi mesin AFPM dengan disk banyak (*multidisc*) terlihat pada Gambar 2.16.



Gambar 2.16. Mesin AFPM multidisc dengan tiga stator tanpa inti dan empat buah rotor PM [1]: 1 – lilitan stator, 2 – unit rotor, 3 – bingkai, 4 – *bearing*, 5 – *shaft*

## 2.4 Prinsip Kerja Generator AFPM

Prinsip kerja generator AFPM sama dengan prinsip kerja generator pada umumnya, dimana bagian rotor pada generator berfungsi sebagai penghasil medan magnet utama dan bagian stator berfungsi sebagai rangkaian jangkar dimana tegangan dibangkitkan. Generator bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik yang mengubah energi mekanik menjadi energi listrik.

Pada generator yang bagian rotornya berupa kumparan dan bukan magnet permanen, kumparan rotor akan diberikan catu tegangan arus searah sehingga arus searah akan mengalir karena rangkaian rotor merupakan suatu rangkaian tertutup. Berdasarkan Hukum Oersted, ketika arus listrik mengalir pada suatu kumparan, maka akan timbul suatu medan magnet. Pada generator AFPM, bagian rotor terdiri dari magnet-magnet permanen yang telah memiliki nilai medan magnet sendiri tanpa harus adanya catu dari luar. Besarnya nilai medan magnet pada rotor tergantung dari jenis magnet permanen yang digunakan.

Setelah itu, rotor akan diputar oleh suatu penggerak utama (*prime mover*) yang terhubung melalui poros (*shaft*) sehingga garis gaya magnet yang dihasilkan pada rotor akan memotong permukaan kumparan stator. Perpotongan garis gaya medan magnet rotor dengan permukaan kumparan stator akan menghasilkan fluks magnet yang melingkupi kumparan kawat stator sesuai dengan persamaan berikut:

$$\phi = B_r A \cos\theta \quad (2.1)$$

dimana:

- $\phi$  = fluks magnet
- $B_r$  = medan magnet rotor
- $A$  = luas permukaan bidang penampang kumparan stator
- $\theta$  = sudut antara garis gaya medan magnet rotor dengan garis normal bidang penampang kumparan stator

Pada generator AFPM, sumber medan magnet utama pada rotor adalah magnet permanen sehingga medan magnet yang dihasilkan rotor konstan terhadap fungsi waktu. Oleh karena itu, dengan menggunakan persamaan di atas, nilai fluks magnet yang timbul pada kumparan stator juga akan bernilai konstan untuk setiap periode waktu. Namun, pada saat rotor diputar oleh suatu penggerak utama (*prime*

*mover*), akan terjadi perubahan besar sudut perpotongan antara garis gaya magnet rotor dengan bidang normal penampang kumparan stator. Hal tersebut akan menyebabkan adanya perubahan nilai fluks terhadap waktu. Perubahan nilai fluks terhadap waktu akan membangkitkan tegangan induksi pada kumparan stator yang besarnya ditentukan oleh persamaan di bawah ini:

$$e_{ind} = -N_s \frac{d\phi}{dt} \quad (2.2)$$

dimana:

$e_{ind}$	=	GGL induksi yang dibangkitkan di stator
$N_s$	=	jumlah lilitan kawat stator
$\phi$	=	fluks magnet
$t$	=	waktu

#### 2.4.1 Generator AFPM Tanpa Beban

Dengan adanya perputaran rotor oleh *prime mover*, akan dihasilkan tegangan jangkar ( $E_a$ ) pada kumparan stator. Tegangan jangkar ini merupakan tegangan keluaran murni yang dihasilkan oleh generator (tegangan keluaran maksimum). Besarnya nilai  $E_a$  ini dinyatakan oleh persamaan:

$$E_a = \sqrt{2} \pi f N \phi \quad (2.3)$$

dimana:

$E_a$	=	tegangan yang dibangkitkan
$f$	=	frekuensi listrik yang dihasilkan
$N$	=	jumlah lilitan kawat stator
$\Phi$	=	fluks magnet

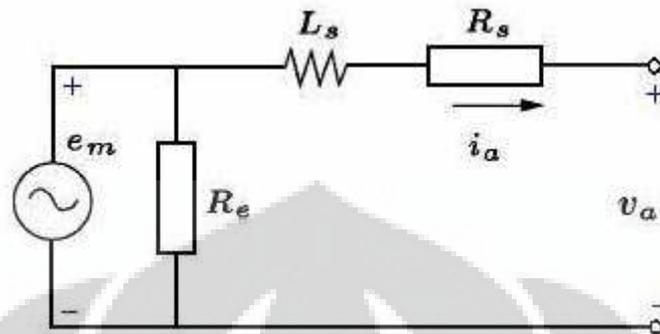
Sedangkan untuk nilai frekuensi yang dihasilkan, dinyatakan dengan persamaan:

$$f = \frac{n_m P}{120} \quad (2.4)$$

dimana:

$f$	=	frekuensi listrik yang dihasilkan
$n_m$	=	kecepatan putar rotor (rpm)
$P$	=	jumlah kutub rotor

Dikarenakan tidak terhubungnya generator terhadap beban, maka tidak ada arus yang mengalir pada kumparan stator. Di bawah ini merupakan gambar rangkaian ekivalen dari generator AFPM:



Gambar 2.17. Rangkaian Ekivalen Generator AFPM. [6]

dimana:

$e_m$	=	tegangan terinduksi pada stator
$R_e$	=	resistansi akibat rugi <i>Eddy-Current</i>
$L_s$	=	induktansi stator
$R_s$	=	resistansi stator
$i_a$	=	arus fasa
$v_a$	=	tegangan fasa

#### 2.4.2 Kerapatan Medan Magnet Magnet Permanen pada Celah Udara

Pada sub-bab ini, akan dibahas mengenai kerapatan medan magnet yang dihasilkan oleh magnet permanen pada rotor yang ada pada celah udara. Perhitungan dari kerapatan medan magnet tersebut ditentukan dengan menggunakan sistem koordinat yang ditunjukkan oleh gambar ? di bawah. Koordinat  $x$  dan  $y$  pada gambar tersebut menggambarkan arah melintang dan arah aksial dari generator dengan dua rotor. Kerapatan fluks pada posisi  $y$  yang diakibatkan oleh magnet-magnet pada rotor 1 dan 2 dapat ditentukan sebagai berikut [2]:

$$B_{yn1}(x) = \left( \frac{J_n \mu_0 \sinh(u_n l_m)}{u_n \sinh(u_n Y_2)} \cosh(u_n (Y_2 - y)) \right) \cos(u_n x) \quad (2.5)$$

$$B_{yn2}(x) = \left( \frac{J_n \mu_0 \sinh(u_n l_m)}{u_n \sinh(u_n Y_2)} \cosh(u_n (y)) \right) \cos(u_n x) \quad (2.6)$$

dimana:

$$Y_2 = l_g + 2l_m \quad (2.7)$$

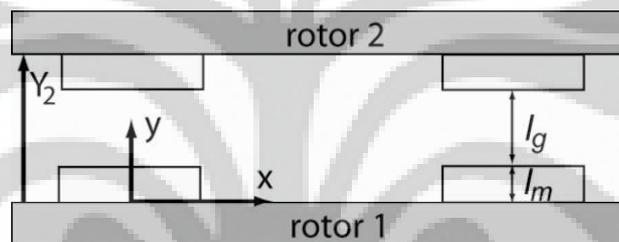
$$u_n = 2\pi n/\lambda; \lambda = 2\pi R_m/p \quad (2.8)$$

Dan,  $p$  menunjukkan jumlah pasang kutub,  $R_m$  menunjukkan jari-jari inti, dan  $\mathcal{J}_n$  menunjukkan *equivalent current sheet* yang diakibatkan oleh magnet 1 dan 2.

$$\mathcal{J}_n = \frac{4B_r}{\tau_p \mu_0 \mu_{rec}} \sin\left(\frac{n\pi\tau_m}{2\tau_p}\right) \quad (2.9)$$

dimana:

- $\tau_m$  = magnet pitch
- $\tau_p$  = poles pitch
- $B_r$  = remanent flux density
- $\mu_{rec}$  = remanent flux permeability



Gambar 2.18. Model dan Sistem Koordinat untuk Distribusi Kerapatan Fluks [2]

Kerapatan fluks total yang diakibatkan oleh magnet-magnet pada rotor 1 dan 2 untuk sebuah potongan radial tunggal dapat ditentukan dengan persamaan di bawah [2]:

$$B_{y1}(x) = \sum_{n=1} B_{yn1}(x); B_{y2}(x) = \sum_{n=1} B_{yn2}(x) \quad (2.10)$$

#### 2.4.3 Medan Magnet Reaksi Jangkar

Pada sub-sub bab ini akan dibahas mengenai besar medan magnet yang diakibatkan oleh reaksi jangkar yang tidak termasuk pengaruh magnet permanen dari rotor. Model dan sistem koordinat yang digunakan untuk menganalisa medan magnet reaksi jangkar ditunjukkan oleh gambar 2.19 di bawah. Pada perhitungan medan magnet reaksi jangkar, konduktor yang digunakan pada stator (lilitan

jangkar) direpresentasikan dengan nilai puncak  $|K_n|$  yang diletakkan pada posisi aksial  $y_c = \frac{Y_2}{2}$ . Kerapatan fluks pada posisi aksial tersebut adalah [2]:

$$B_{n-arm}(x) = |K_n| \mu_0 \left( \frac{\cosh(u_n Y_c)}{\sinh(u_n Y_2)} \cosh(u_n (Y_2 - y)) \right) \cos(u_n x) \quad (2.11)$$

dimana persamaan kerapatan arus linearnya adalah:

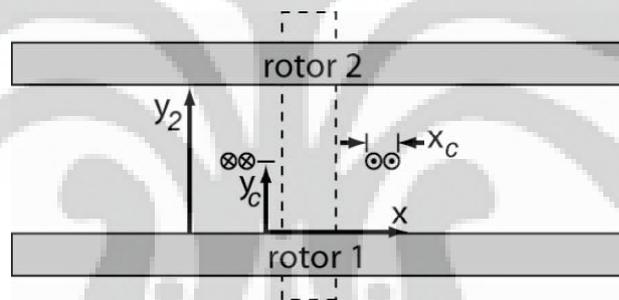
$$K(x) = \sum |K_n| \sin(u_n x) \quad (2.12)$$

Nilai kerapatan arus puncak adalah:

$$|K_n| = \frac{Ni}{x_c} \frac{4}{n\pi} \sin\left(\frac{n\alpha_c}{2}\right) \sin\left(\frac{nx_c p}{4R_m}\right) \quad (2.13)$$

dimana:

- $N$  = jumlah lilitan tiap kumparan
- $i$  = besar nilai arus yang mengalir tiap konduktor
- $x_c$  = lebar tumpukan kumparan pada arah *circumferential*
- $\alpha_c$  = rentang rata-rata kumparan dalam radian elektris



Gambar 2.19. Model dan Sistem Koordinat untuk Jangkar [2]

Untuk dapat menghitung nilai jumlah total kerapatan fluks akibat reaksi jangkar, dapat digunakan persamaan:

$$B_{arm}(x) = \sum_{n=1} B_{n-arm}(x) \quad (2.14)$$

#### 2.4.4 Parameter Generator AFPM

Apabila telah didapatkan besar nilai medan pada generator (akibat magnet permanen rotor dan reaksi jangkar), besar nilai *back emf* (tegangan akibat medan magnet rotor ditambah tegangan *mutual and self-induced* antar lilitan). Untuk menentukan nilai dari *back emf* dapat menggunakan nilai *flux linking* antar lilitan.

Besar nilai *flux linking* dari suatu mesin dalam fungsi sudut rotor dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan:

$$\lambda_{slice}(\theta) = N \iint_S B \cdot dS \quad (2.15)$$

dimana S merupakan luas permukaan di dalam kumparan yang dihitung. Besar total *flux linking* dari seluruh kumparan dapat ditentukan dengan persamaan [2]:

$$\lambda_{coil}(\theta) = \sum_1^{slices} \lambda_{slices}(\theta) \quad (2.16)$$

Dengan memperhitungkan perhitungan medan magnet dalam sebuah tren perubahan waktu dan perubahan sudut rotor  $\theta$ , nilai *flux linking* setiap kumparan dapat ditentukan setiap step waktu. Besar nilai emf yang terinduksi pada kumparan dapat ditentukan dengan menggunakan hukum Faraday [2]:

$$e_{coil}(t) = \frac{\Delta \lambda_{coil}}{\Delta t} \quad (2.17)$$

Karena sebuah lilitan fasa dapat terdiri dari sebuah kombinasi kumparan-kumparan series ataupun paralel, total emf yang terinduksi per fasa ( $e_{phase}$ ) dapat ditentukan dengan persamaan [2]:

$$e_{phase}(\theta) = \sum_1^{series\ coils} e_{coil}(t) \quad (2.18)$$

## BAB 3

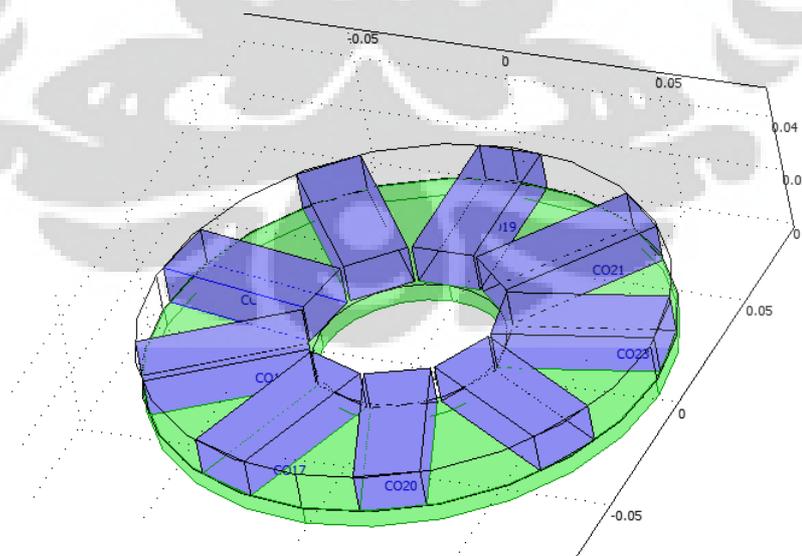
### DESAIN, PEMODELAN, DAN SIMULASI

#### 3.1 Desain Model Generator Fluks Aksial Magnet Permanen 9 Pasang Kutub Magnet Permanen dan Stator 9 Kumputan 3 Fasa Seri

Desain generator yang dipakai pada bagian ini merupakan desain generator yang telah didesain pada acuan [9]. Desain generator yang digunakan merupakan desain generator fluks aksial magnet permanen dengan stator ganda dan stator tunggal tanpa inti.

##### 3.1.1 Desain Model Rotor 9 Pasang Magnet Permanen

Generator yang didesain memiliki rotor eksternal ganda yang saling berhadapan. Jumlah Magnet permanen yang digunakan pada desain ini sebanyak sembilan pasang dan dipasang dengan cara *embedded PM*. Pemasangan magnet permanen dilakukan di atas sebuah material penyangga besi dan kutub magnet permanen yang saling berdekatan diatur berseling sehingga pada salah satu ujungnya memiliki kutub magnet yang sama. Jenis rotor yang digunakan merupakan jenis rotor TORUS NS. Desain rotor tersebut dapat dilihat pada gambar 3.1. di bawah ini:



Gambar 3.1 Desain Rotor dengan 9 pasang Magnet Permanen (Salah Satu Rotornya) [9]

Tabel berikut menunjukkan ukuran geometri dari desain rotor sembilan pasang magnet tersebut:

Tabel 3.1 Ukuran Geometri Rotor 9 Pasang Magnet Permanen

Dimensi	Keterangan	Satuan (m)
$r_i$	Jari-jari yoke rotor	0.083
$r_x$	Jarak magnet ke pusat	0.029
$p$	Panjang magnet	0.049
$l$	Lebar Magnet	0.019
$t$	Tebal magnet	0.0128
$t_p$	Tebal dudukan magnet	0.0058
$r_p$	Jari-jari dudukan magnet	0.083
$\theta$	Sudut antar magnet permanen yang saling berdekatan	$40^\circ$

Pada acuan [9], desain generator juga terdapat celah udara (*air gap*) yang terdapat di antara permukaan magnet permanen rotor atas dan permukaan magnet permanen rotor bawah. Pada desain ini, celah udara didesain sebesar 0,0118 m.

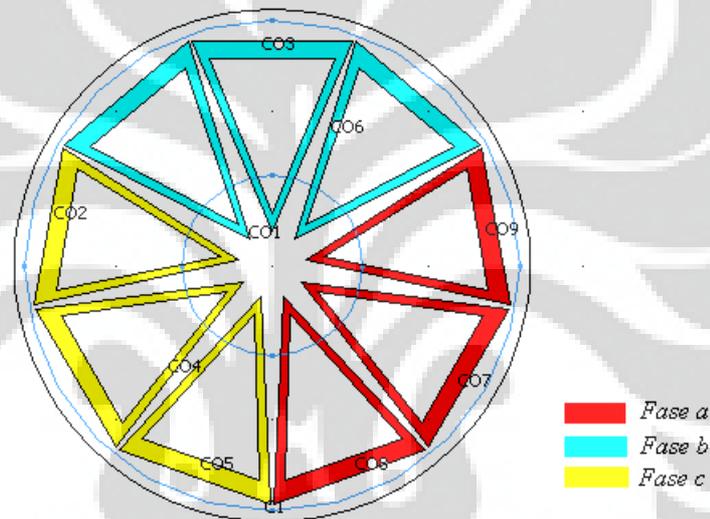
### 3.1.2 Desain Model Stator 9 Kumputan Tiga Fasa Seri

Stator yang didesain merupakan stator tunggal tanpa inti (*coreless*) dimana stator hanya berupa kumputan konduktor yang dilapisi oleh komposit. Pada desain yang dibuat, stator akan diletakkan di antara dua buah rotor. Stator yang didesain memiliki kumputan sebanyak sembilan buah dan didesain untuk menghasilkan keluaran tiga fasa. Masing-masing fasa memiliki kumputan sebanyak tiga buah dan dipasang secara seri (Gambar 3.2) RRRSSSTTT. Kumputan stator yang didesain disusun dengan susunan *non-overlapping* dan fasa yang terdistribusi (*distributed design*). Pada desain, stator didesain berbentuk segitiga.

Tebal stator didesain agar sesuai dengan celah udara yang ada pada desain generator agar stator tidak bergesekan dengan rotor ketika rotor berputar. Tabel di bawah menunjukkan ukuran geometri desain stator sembilan kumputan tiga fasa tersebut:

Tabel 3.2 Ukuran Geometri Stator 9 Kumbaran 3 Fasa

Dimensi	Keterangan	Jumlah	Satuan (m)
$t_s$	Tinggi stator		0.05
$a_s$	Alas stator		0.04
$d_s$	Ketebalan stator		0.006
$D_s$	Diameter yoke stator		0.166
N	Jumlah lilitan	60	
Ns	Jumlah kumbaran	9	
Nph	Jumlah phasa	3	

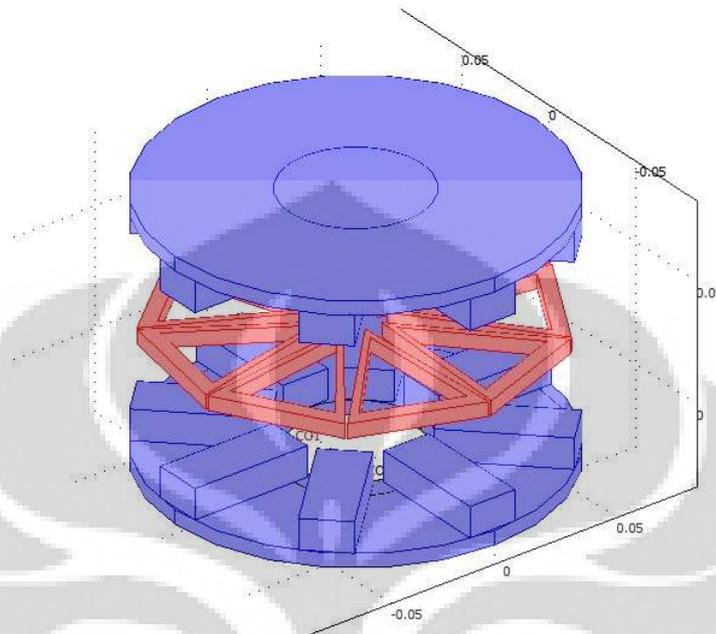


Gambar 3.2 Desain Stator 9 Kumbaran 3 Fasa [9]

### 3.2 Desain Model Generator Fluks Aksial Magnet Permanen 8 Pasang Kutub Magnet Permanen dan Stator 9 Kumbaran 3 Fasa Berseling

Desain model generator yang dibuat dalam skripsi ini adalah generator fluks aksial dengan menggunakan rotor ganda eksternal dan stator tunggal internal tanpa inti. Jenis generator yang digunakan merupakan generator jenis *disc* (cakram) yang berbentuk seperti piringan berlapis dimana sebuah stator tunggal tanpa inti diapit oleh dua buah rotor. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 3.3. di bawah. Desain model generator yang dibuat dalam skripsi ini adalah generator fluks aksial dengan menggunakan rotor ganda eksternal dan stator tunggal internal tanpa inti. Jenis generator yang digunakan merupakan generator jenis

*disc*(cakram) yang berbentuk seperti piringan berlapis dimana sebuah stator tunggal tanpa inti diapit oleh dua buah rotor. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 3.3. di bawah.



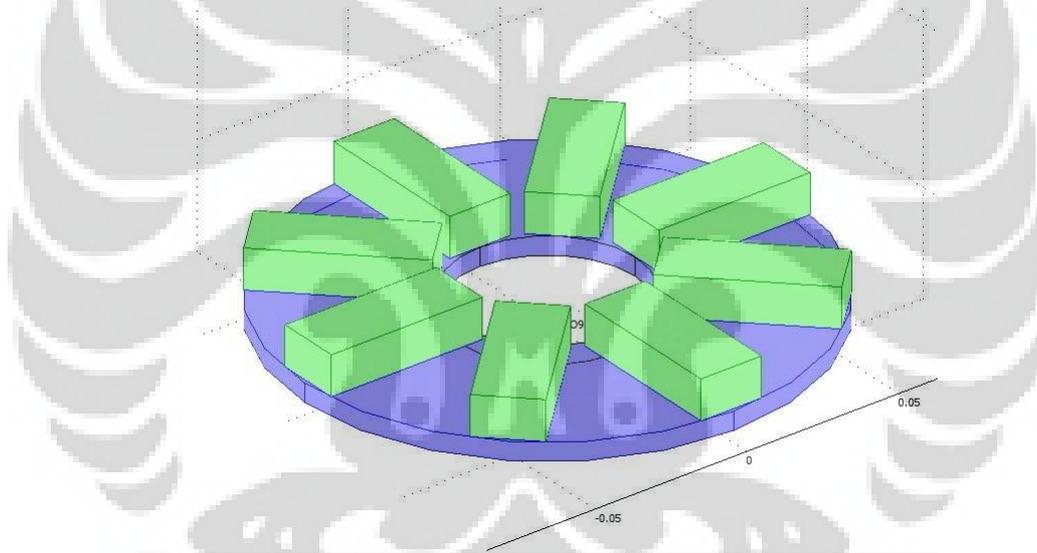
Gambar 3.3. Model Generator dalam simulasi

Generator yang didesain menggunakan ukuran yang sama dengan generator yang telah dibuat oleh LAPAN. Hal ini dikarenakan, desain generator yang dibuat akan diproduksi di LAPAN dengan menggunakan cetakan yang telah ada. Penjelasan karakteristik tiap-tiap bagian dari generator yang didesain selanjutnya akan dijabarkan pada sub-bab di bawah.

Desain yang telah dibuat kemudian akan dijalankan dengan besar kecepatan putar yang berubah untuk kemudian didapatkan nilai keluaran yang berbeda dan kemudian akan dapat dianalisis. Desain model generator kemudian akan di pabrikan menjadi benda yang riil sehingga memungkinkan untuk dapat membandingkan data keluaran hasil simulasi dengan data keluaran yang sebenarnya. Dari hasil perbandingan dan analisa ini, diharapkan diperoleh suatu kesimpulan mengenai perbandingan hasil desain generator fluks aksial 8 pasang kutub magnet permanen dan stator 9 kumparan 3 fasa berseling dengan hasil generator yang telah diproduksi sesuai dengan dengan desain tersebut.

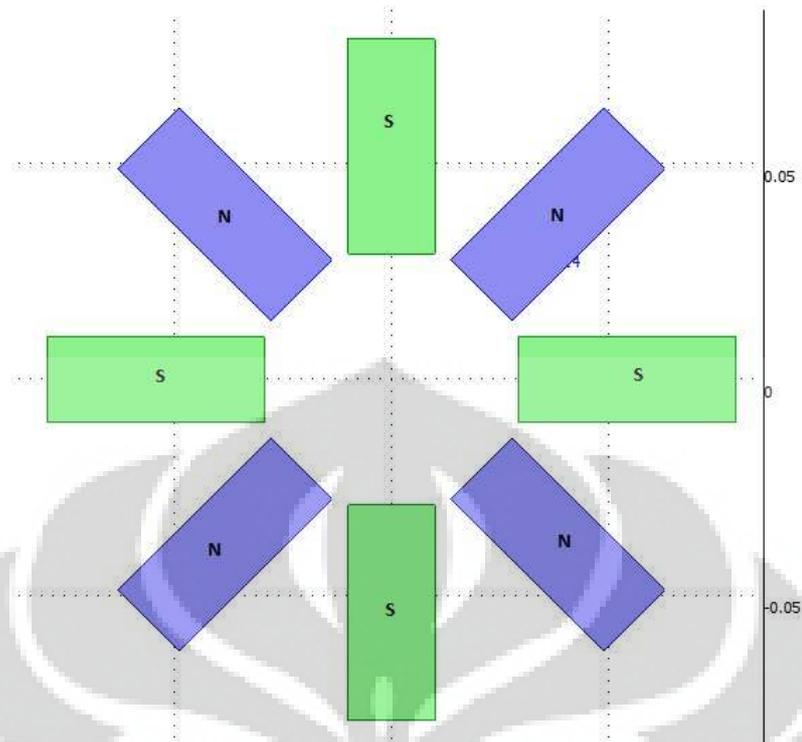
### 3.2.1 Desain Rotor

Generator yang didesain memiliki dua buah rotor identik yang berhadapan satu sama lain atau rotor ganda. Jenis rotor yang digunakan merupakan jenis rotor TORUS NS. Jenis rotor ini digunakan karena mengacu pada [7], rotor dengan jenis ini memiliki keuntungan lebih besarnya kerapatan fluks dan efisiensi. Sedangkan untuk cara pemasangan magnet permanen pada rotor, didesain dengan menggunakan cara *embedded PM*. Pada cara pemasangan magnet permanen dengan menggunakan cara *embedded*, magnet permanen diletakkan pada sebuah piringan besi dan dibenamkan di dalam komposit rotor sehingga hanya salah satu permukaan saja yang terlihat pada sisi rotor yang menghadap ke arah stator. Cara pemasangan magnet permanen ini dipilih dikarenakan akan menyebabkan penyebaran fluks magnet tetap merata dan magnet permanen tidak mudah lepas.



Gambar 3.4 Desain Magnet Permanen dan Piringan Besi Penyangga Salah Satu Rotor pada Simulasi

Pengaturan magnet permanen pada jenis rotor TORUS NS dilakukan dengan cara berseling sehingga magnet permanen yang saling bersebelahan ataupun berhadapan memiliki kutub magnet yang berbeda. Magnet yang digunakan merupakan magnet permanen jenis *strontium ferrite* dengan kekuatan medan magnet 0,8 T.



Gambar 3.5 Pengaturan Letak dan Kutub Magnet Permanen pada Salah Satu Rotor

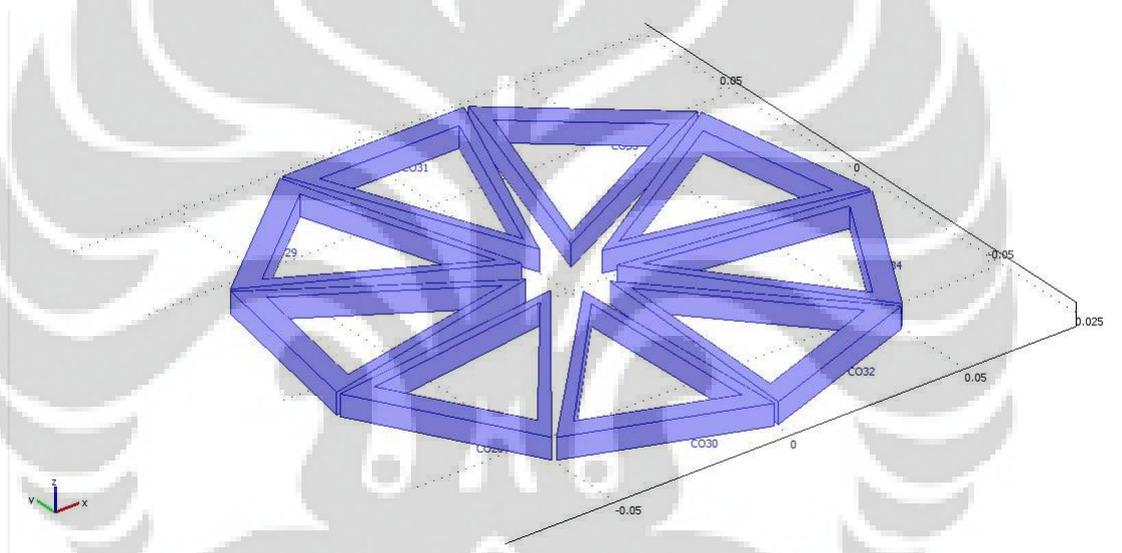
Berikut adalah tabel yang menunjukkan ukuran geometri dari desain generator yang dibuat:

Tabel 3.3. Ukuran Geometri Desain Rotor 8 Pasang Magnet Permanen

Dimensi	Keterangan	Panjang(m)
$r_i$	Jari-jari yoke rotor	0.083
$r_x$	Jarak magnet ke pusat	0.029
$p$	Panjang magnet	0.049
$l$	Lebar Magnet	0.019
$t$	Tebal magnet	0.0128
$tp$	Tebal dudukan magnet	0.0058
$rp$	Jari-jari dudukan magnet	0.083
$\theta$	Sudut antar magnet permanen yang saling berdekatan	$45^0$

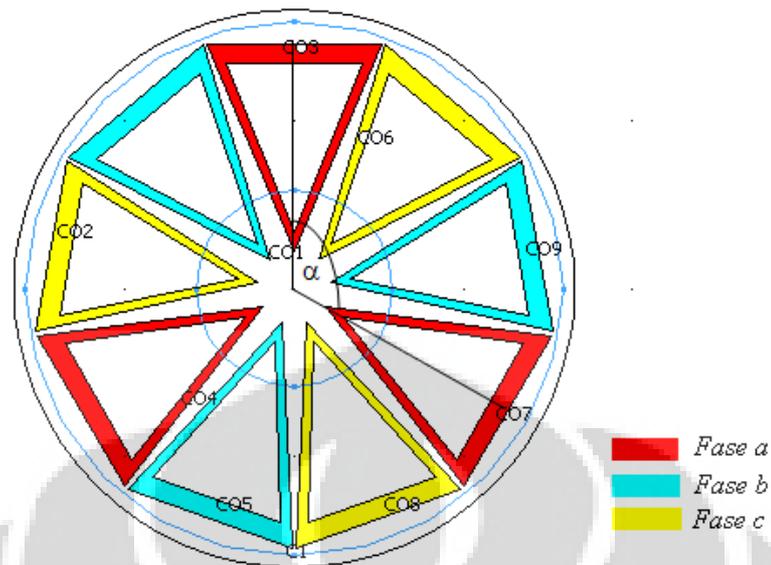
### 3.2.2 Desain Stator

Stator yang didesain merupakan jenis stator tunggal tanpa inti (*coreless*) dimana stator hanya berupa kumparan konduktor yang dilapisi oleh komposit. Pada desain generator yang dibuat, stator diletakkan di antara dua buah rotor. Stator didesain untuk menghasilkan keluaran berupa tegangan tiga fasa dimana jumlah seluruh kumparan berjumlah sembilan kumparan (masing-masing fasa memiliki tiga buah kumparan). Kumparan masing-masing fasa didesain berseling RSTRSTRST dan terhubung secara seri untuk fasa yang sama. Kumparan stator dengan fasa yang sama terpisah dengan perbedaan sudut konstruksi sebesar  $120^{\circ}$ . Kumparan stator disusun dengan susunan *non-overlapping* dan fasa yang terdistribusi (*distributed design*).



Gambar 3.6 Desain Model Stator 9 Kumparan

Desain stator yang dibuat dapat terlihat pada Gambar 3.6. di atas. Seperti terlihat pada gambar, desain kumparan stator berbentuk segitiga. Tebal stator didesain agar sesuai dengan celah udara yang ada pada desain generator agar stator tidak bergesekan dengan rotor ketika rotor berputar.



Gambar 3.7 Desain Model Stator 9 Kumbaran 3 Fasa Berseling

Berikut adalah tabel yang menunjukkan ukuran geometri dari desain stator yang dibuat:

Tabel 3.4. Ukuran Geometri Desain Stator

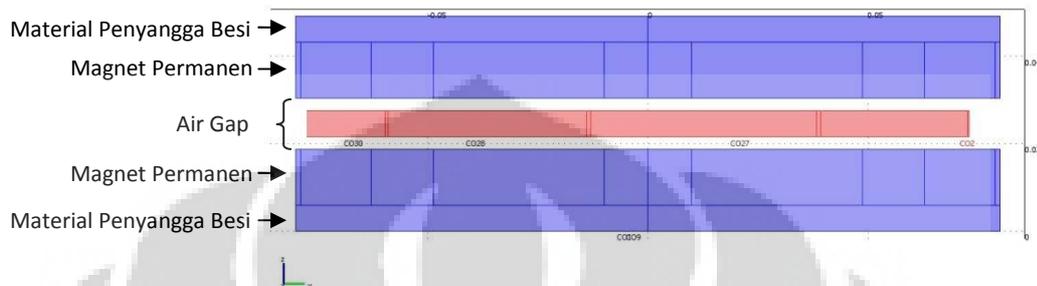
Dimensi	Keterangan	Jumlah	Satuan (m)
$t_s$	Tinggi stator		0.05
$a_s$	Alas stator		0.04
$d_s$	Ketebalan stator		0.006
$D_s$	Diameter yoke stator		0.166
$N$	Jumlah lilitan	60	
$N_s$	Jumlah kumbaran	9	
$N_{ph}$	Jumlah phasa	3	

### 3.2.3 Desain Celah Udara

Pada generator aksial, celah udara merupakan salah satu komponen terpenting. Hal ini dikarenakan, melewati celah udara inilah magnet permanen rotor dapat menginduksikan tegangan ke dalam kumbaran stator. Oleh karena itu, celah udara harus didesain dengan baik agar karakteristik celah udara tidak akan berubah ketika generator beroperasi atau ketika rotor berputar. Apabila

karakteristik celah udara berubah ketika generator beroperasi, maka karakteristik generator pun akan berubah.

Merujuk pada [2], celah udara merupakan jarak antara permukaan magnet permanen pada rotor bagian atas dan permukaan magnet permanen bagian bawah. Hal inilah yang akan diterapkan pada desain generator yang akan dibuat.



Gambar 3.8 Air Gap pada Desain Generator

### 3.3 Simulasi dan Pengambilan Data

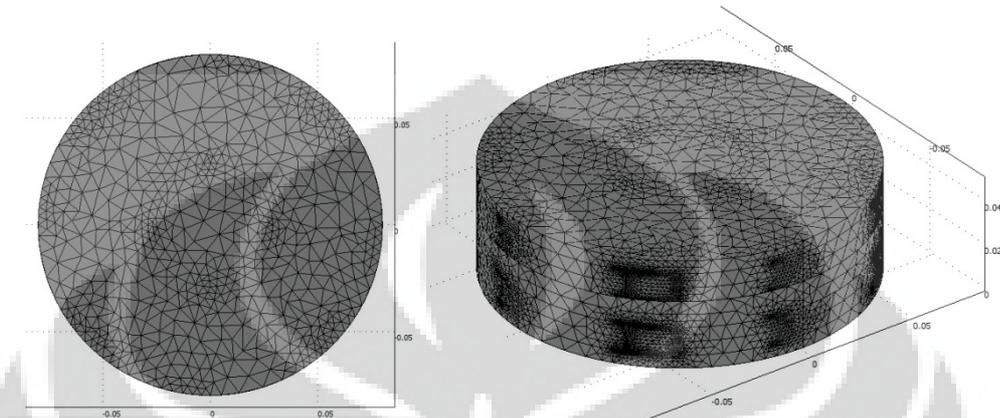
Pada sub-bab ini, akan dijelaskan mengenai proses simulasi dari generator yang telah didesain dan juga proses pengambilan data yang dilakukan. Proses pengambilan data keluaran desain model generator dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak berbasis FEM (*Finite Element Method*). Simulasi dilakukan untuk kedua jenis desain generator yang telah dibuat dan dilakukan dengan variabel-variabel yang sama, yaitu variasi kecepatan putar dari rotor. Berikut akan dijelaskan mengenai proses simulasi dan pengambilan data dari desain generator.

Proses simulasi dan pengambilan data desain model generator

Setelah membuat desain model generator yang dibutuhkan, langkah selanjutnya adalah melakukan simulasi model tersebut. Simulasi dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak berbasis FEM (*Finite Element Method*), dimana desain model akan dibuat menjadi bagian-bagian limas segitiga kecil berhingga (*mesh*). Pada simulasi, akan dicari nilai keluaran generator yang didesain berupa fluks dan tegangan dengan variabel berubah. Variabel yang berubah-ubah ini berupa kecepatan putar rotor dan juga waktu.

Sebelum simulasi dijalankan, hal yang pertama dilakukan adalah memasukkan nilai-nilai konstanta/variabel dan persamaan-persamaan matematis

yang dibutuhkan untuk mendapatkan nilai keluaran yang diinginkan. Nilai-nilai konstanta/variabel ini berupa kekuatan jumlah lilitan, medan magnet dari magnet permanen, kecepatan putar rotor, dan arah putaran rotor. Sedangkan untuk persamaan-persamaan yang dibutuhkan, berupa persamaan fluks medan magnet yang diinduksikan ke bagian stator.



Gambar 3.9 Meshing pada Desain Model Generator

Desain model generator akan diberikan kecepatan putar rotor yang berbeda mulai dari 150 rpm hingga 450 rpm dengan selang sebesar 50 rpm. Proses pengambilan data dilakukan secara diskrit (pencuplikan) dikarenakan proses pengambilan data ini tidak dapat dilakukan secara kontinu. Untuk dapat menghasilkan suatu gelombang sinusoidal dari data, proses pencuplikan dilakukan sebanyak 20 kali (20 data) dengan perubahan terhadap waktu. Pengambilan rentang waktu ( $t_1, t_2, t_3, \dots, t_{20}$ ) dilakukan dengan cara membagi nilai perioda gelombang dari generator yang telah didesain. Dengan menggunakan rumus 2.4 pada Bab 2, didapatkan nilai frekuensi kerja dari generator. Nilai frekuensi tersebut dimasukkan kembali ke dalam persamaan 3.1 di bawah untuk mendapatkan nilai perioda satu gelombang dari hasil keluaran generator.

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

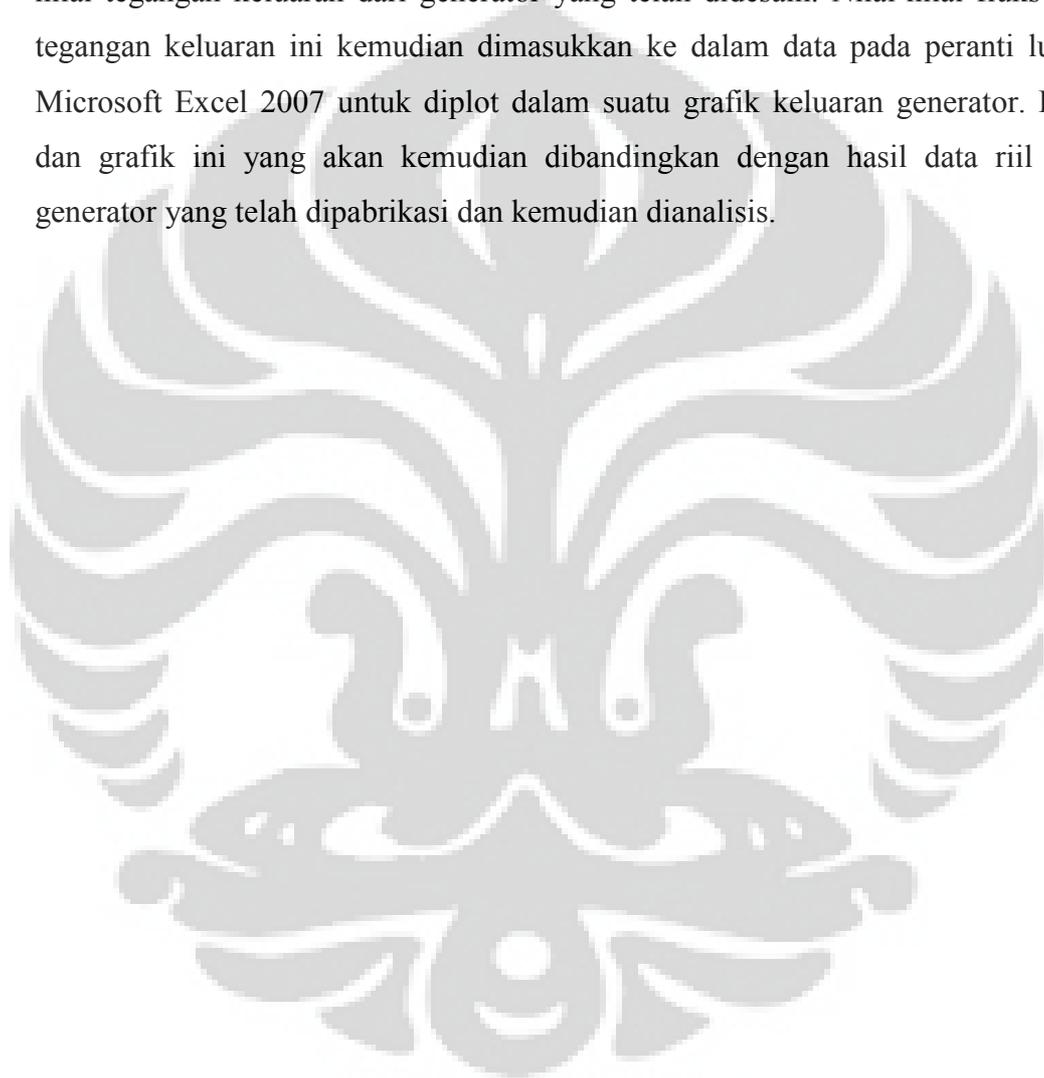
dimana:

$T$  = perioda satu gelombang (s)

$F$  = frekuensi kerja dari generator (Hz)

Sebagai contoh, apabila kita memiliki suatu frekuensi generator adalah 50 Hz, maka dari persamaan 3.1 di atas, kita akan mendapatkan nilai perioda satu

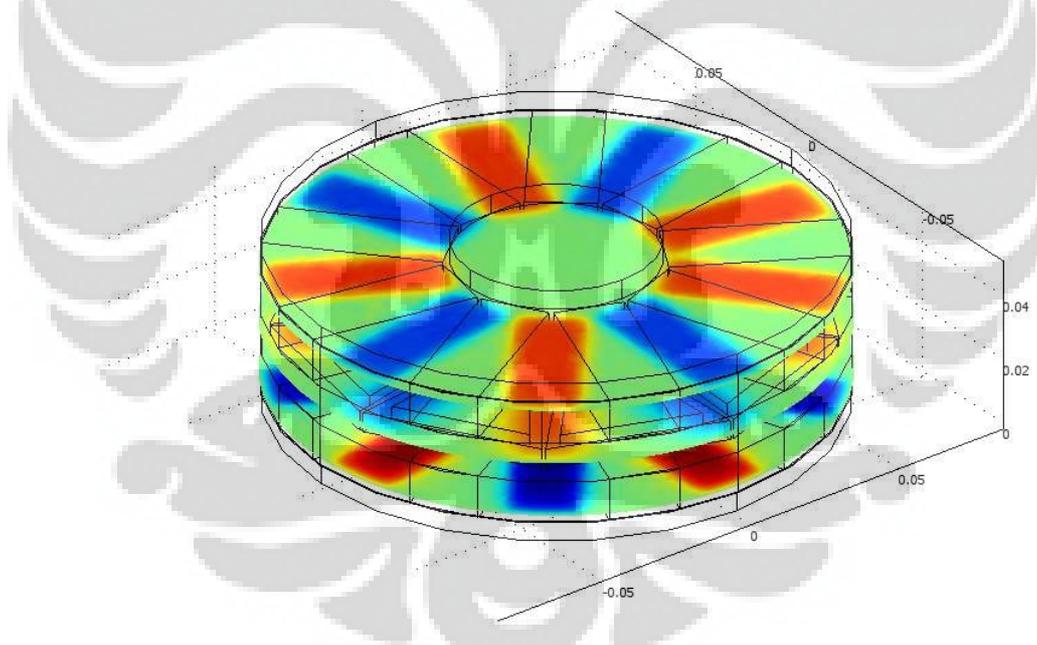
gelombang sebesar 0.02 s. Dengan membagi nilai perioda tersebut dengan 20, didapatkan nilai waktu ( $t$ ) yang digunakan dalam pencuplikan. Apabila kita memiliki nilai perioda sebesar 0.02, didapatkan nilai waktu pencuplikan sebesar 0.001 s. Dengan memasukkan nilai perioda untuk setiap waktu pencuplikan, akan didapatkan nilai fluks yang diterima oleh masing-masing fasa. Nilai fasa ini kemudian akan dihitung dengan persamaan 2.2 pada Bab 2 untuk mendapatkan nilai tegangan keluaran dari generator yang telah didesain. Nilai-nilai fluks dan tegangan keluaran ini kemudian dimasukkan ke dalam data pada peranti lunak Microsoft Excel 2007 untuk diplot dalam suatu grafik keluaran generator. Data dan grafik ini yang akan kemudian dibandingkan dengan hasil data riil dari generator yang telah dipabrikasi dan kemudian dianalisis.



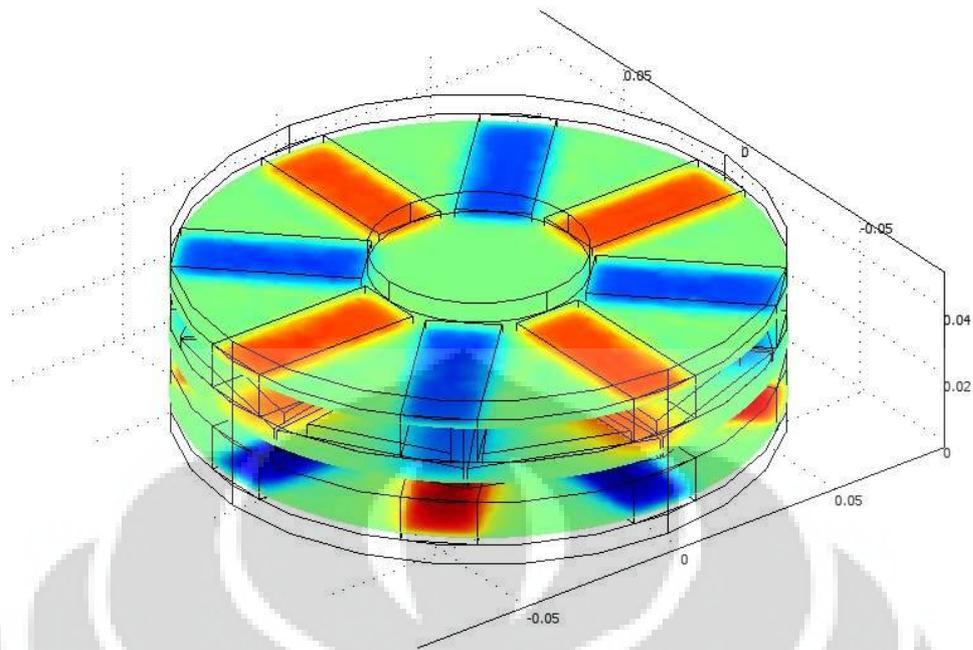
## BAB 4

### PENGOLAHAN DATA DAN ANALISA

Pada Bab ini, akan dibahas mengenai hasil data simulasi dari kedua desain model generator fluks aksial magnet permanen yang telah disimulasikan. Setelah mendapatkan semua data hasil simulasi yang dibutuhkan, akan dilakukan analisa mengenai perbandingan nilai dari hasil keluaran dua desain generator tersebut. Berikut merupakan gambar model generator fluks aksial yang digunakan dalam simulasi dan telah dibuat benda nyatanya. Gambar 4.1. menggambarkan model generator fluks aksial dengan konfigurasi 9 pasang kutub magnet dan 9 kumparan 3 fasa seri. Sedangkan untuk Gambar 4.2. menggambarkan model generator fluks aksial dengan konfigurasi 8 pasang kutub magnet dan 9 kumparan 3 fasa berseling.



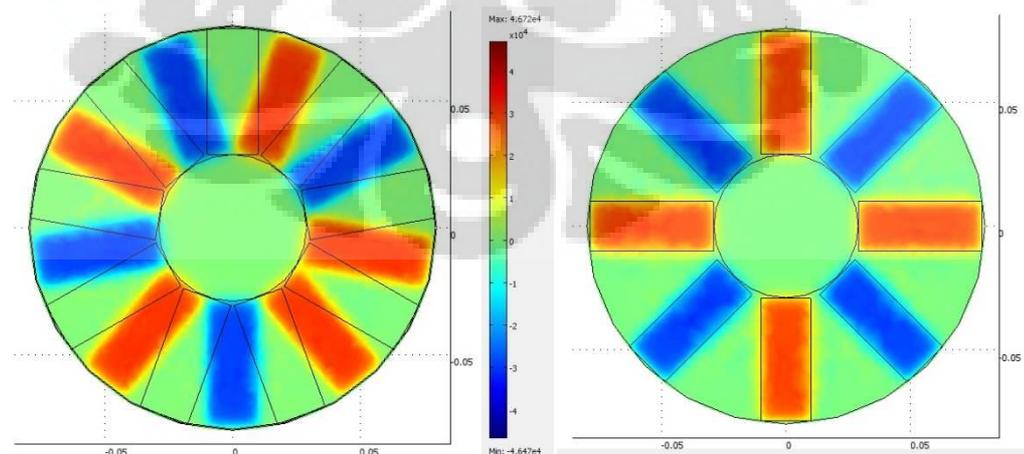
Gambar 4.1 Simulasi Generator Fluks Aksial Magnet Permanen 9 Pasang Kutub Magnet Permanen dan Stator Tunggal 9 Kumparan 3 Fasa Seri



Gambar 4.2 Simulasi Generator Fluks Aksial Magnet Permanen 8 Pasang Magnet Permanen dan Stator Tunggal 9 Kumbaran 3 Fasa Berseling

#### 4.1 Data Hasil Simulasi

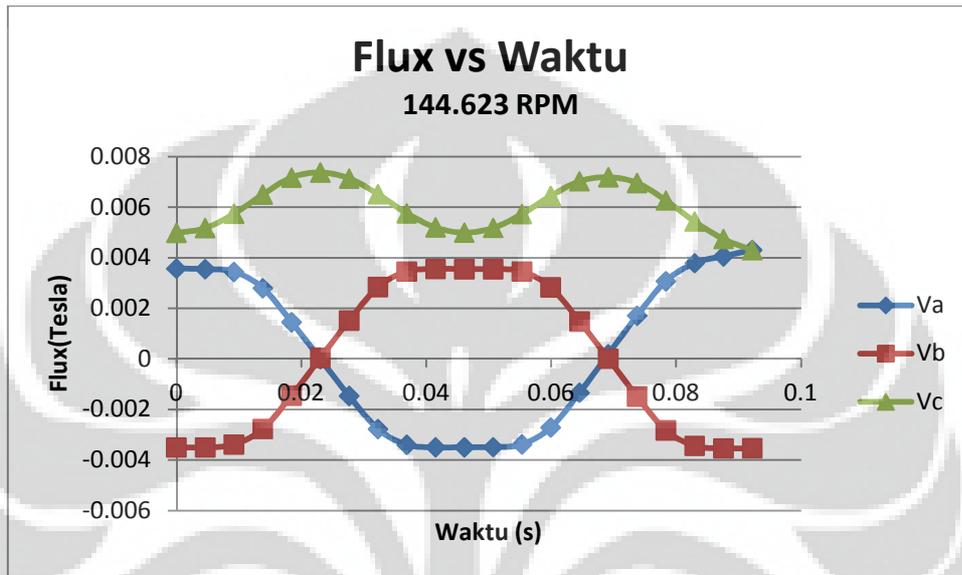
Simulasi desain model generator dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak yang berbasis FEM (*Finite Element Method*). Data hasil simulasi berupa fluks medan magnet yang diterima oleh stator dan tegangan keluaran dari generator pada kecepatan putar rotor yang berbeda. Berikut merupakan gambar yang menunjukkan distribusi medan magnet pada saat dilakukannya simulasi:



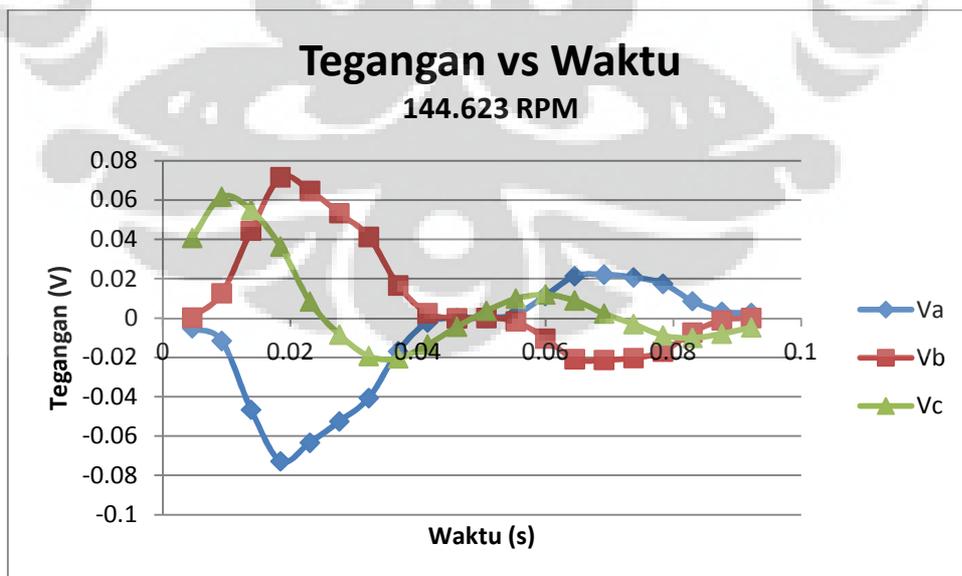
Gambar 4.3 Distribusi Medan Magnet Generator Dua Desain Generator

#### 4.1.1. Data Hasil Simulasi Generator dengan Konfigurasi 9 Pasang Kutub Magnet Permanen dan 9 Kumaran 3 Fasa Seri

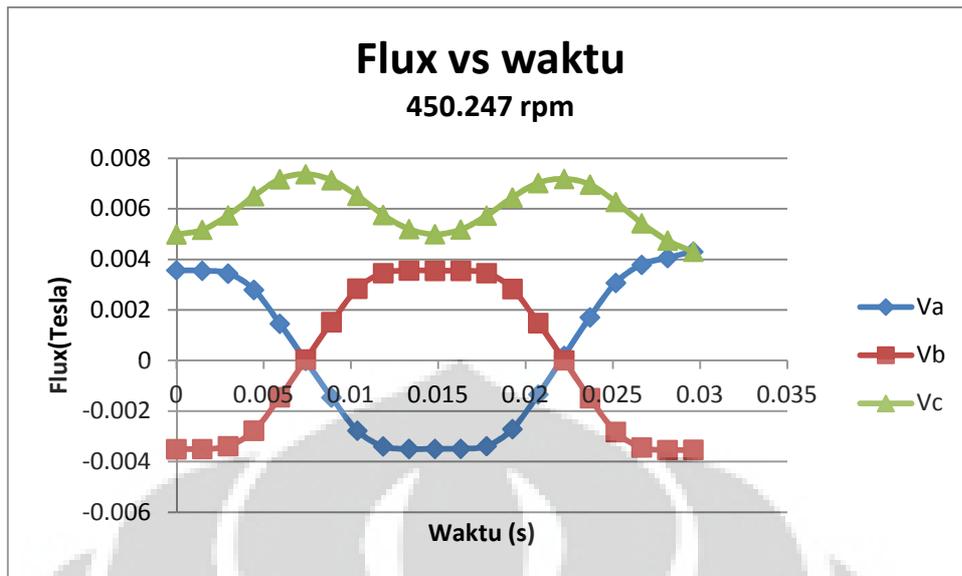
Berikut akan ditampilkan beberapa data hasil simulasi yang dilakukan pada desain generator fluks aksial dengan konfigurasi 9 pasang kutub magnet dan 9 kumaran 3 fasa seri [9]. Simulasi yang dilakukan pada [9] menggunakan perangkat lunak yang berbasis FEM.



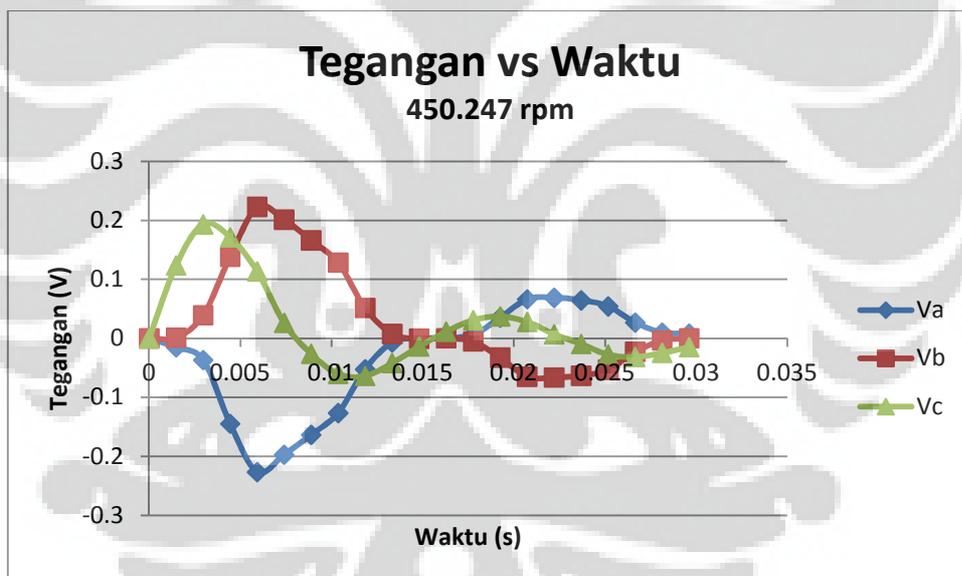
Gambar 4.4 Grafik Hubungan Flux Terhadap Waktu pada Kecepatan Putar 144.623 rpm [9]



Gambar 4.5 Grafik Hubungan Tegangan Terhadap Waktu pada Kecepatan Putar 144.623 rpm [9]

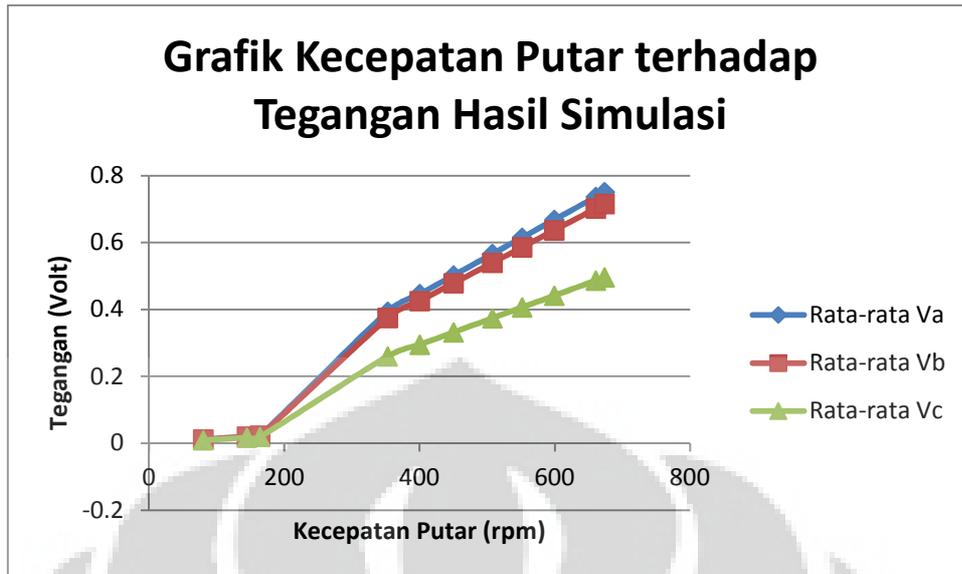


Gambar 4.6 Grafik Hubungan Flux Terhadap Waktu pada Kecepatan Putar 450,247 rpm [9]



Gambar 4.7 Grafik Hubungan Tegangan Terhadap Waktu pada Kecepatan Putar 450,247 rpm [9]

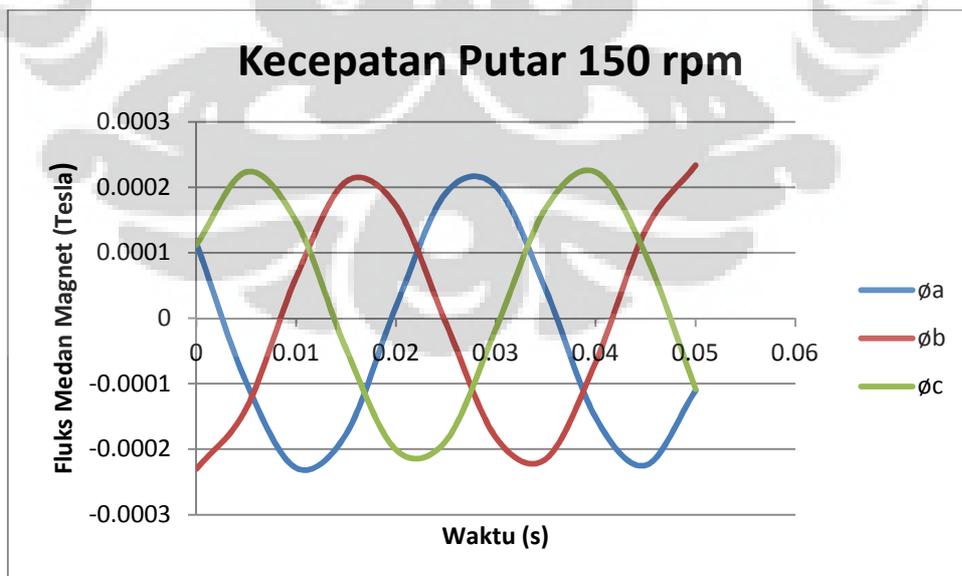
Dari data hasil simulasi generator fluks aksial dengan konfigurasi 9 pasang kutub magnet permanen dan 9 kumparan 3 fasa seri yang dilakukan pada [9], didapatkan pula besar nilai variasi tegangan yang dihasilkan oleh desain generator tersebut dengan variasi kecepatan yang berbeda-beda.



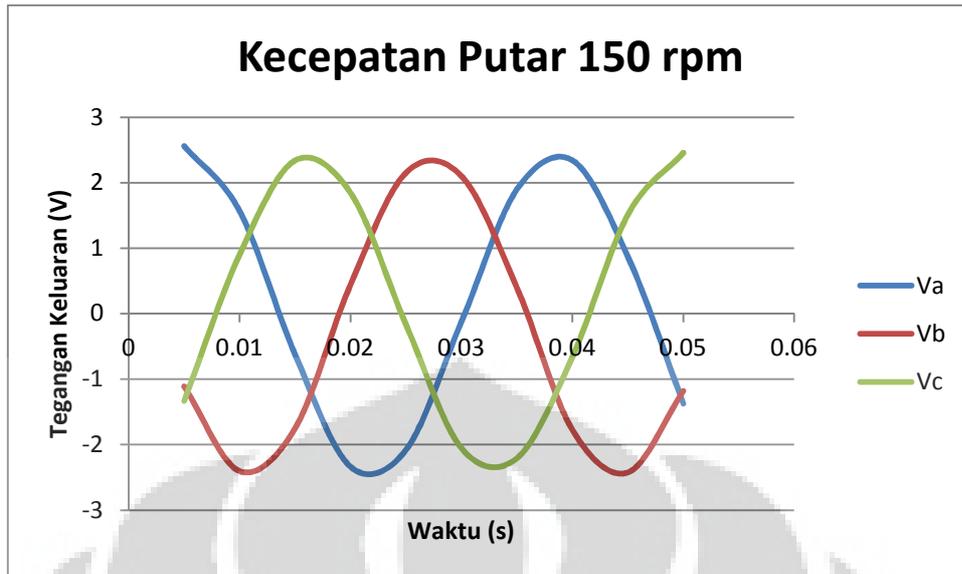
Gambar 4.8 Grafik Kecepatan Putar terhadap Tegangan Hasil Percobaan Alat [9]

#### 4.1.2. Data Hasil Simulasi Generator dengan Konfigurasi 8 Pasang Kutub Magnet Permanen dan 9 Kumaran 3 Fasa Berseling

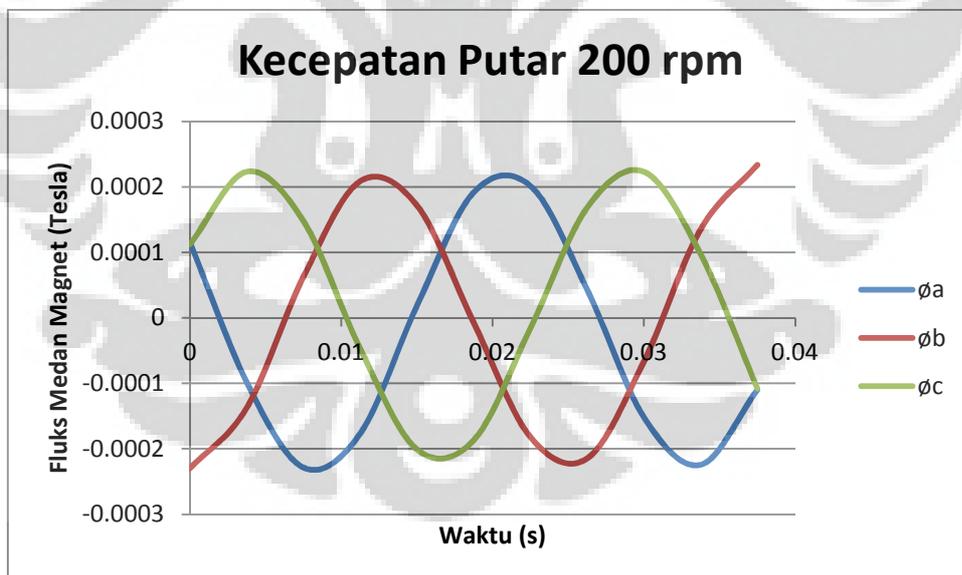
Berikut akan ditunjukkan data hasil simulasi generator fluks aksial 8 pasang magnet permanen dan stator 9 kumaran 3 fasa berseling. Pengambilan data hasil simulasi dilakukan dengan peranti lunak berbasis FEM (*Finite Element Method*) dan data tersebut diplot pada grafik dengan menggunakan peranti lunak Microsoft Excel. Dengan peranti lunak Microsoft Excel ini pula data hasil simulasi diolah.



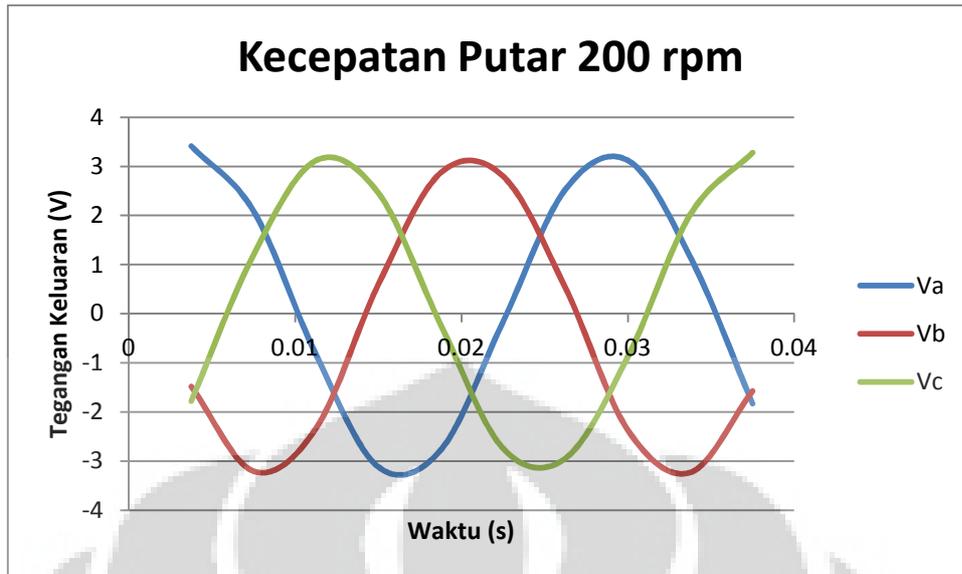
Gambar 4.9 Grafik Waktu vs Fluks Medan Magnet yang Diterima oleh Stator pada 150 rpm



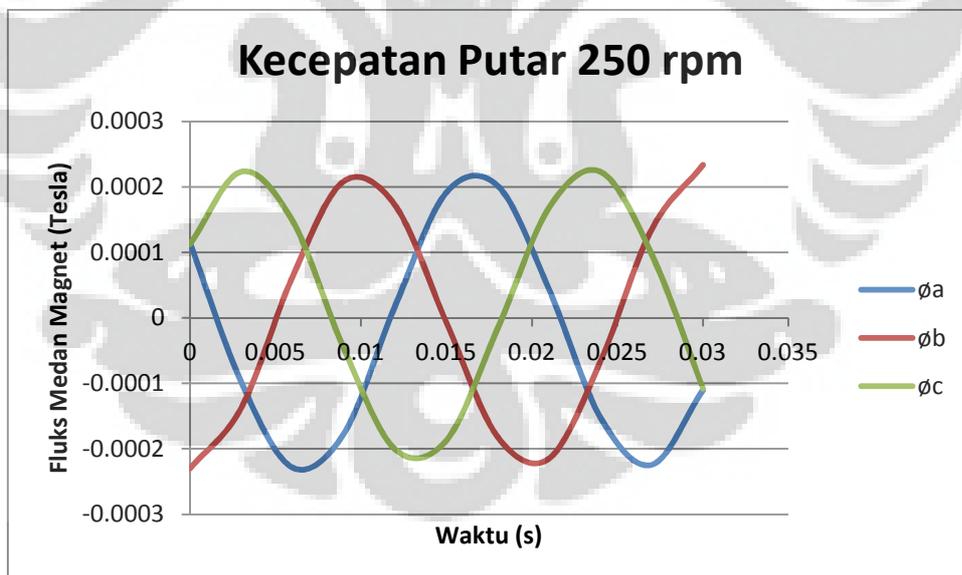
Gambar 4.10 Grafik Waktu vs Tegangan Keluaran 3 Fasa pada 150 rpm



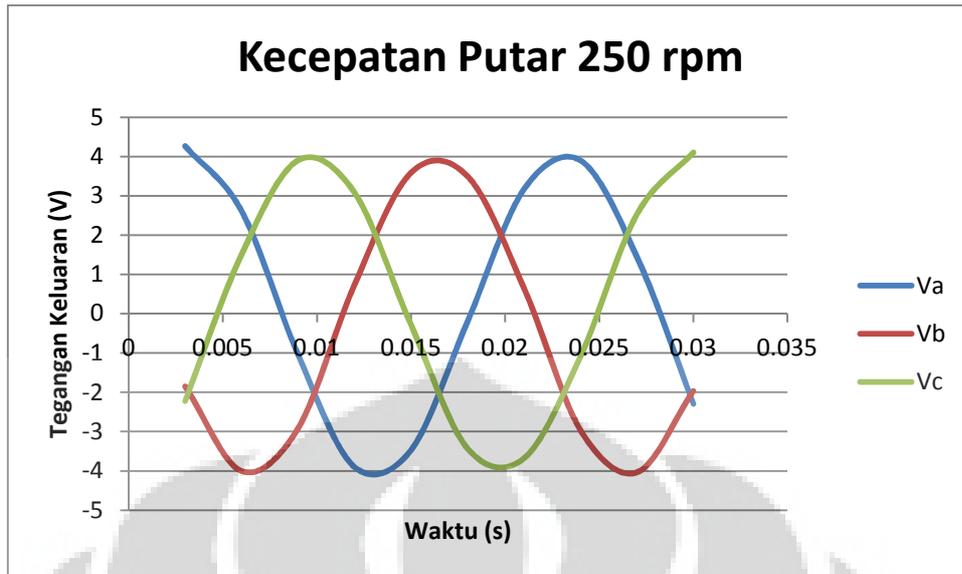
Gambar 4.11 Grafik Waktu vs Fluks Medan Magnet yang Diterima oleh Stator pada 200 rpm



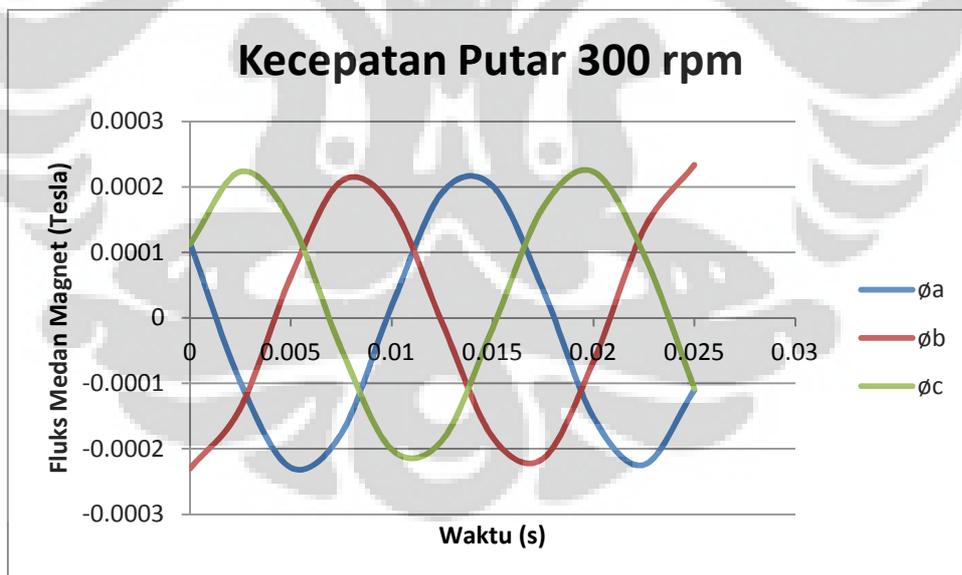
Gambar 4.12 Grafik Waktu vs Tegangan Keluaran 3 Fasa pada 200 rpm



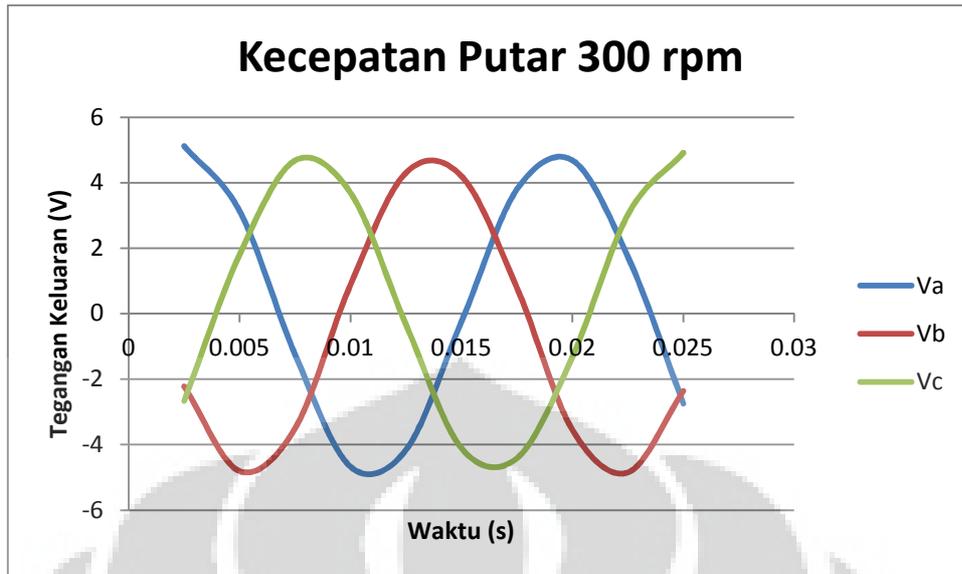
Gambar 4.13 Grafik Waktu vs Fluks Medan Magnet yang Diterima oleh Stator pada 250 rpm



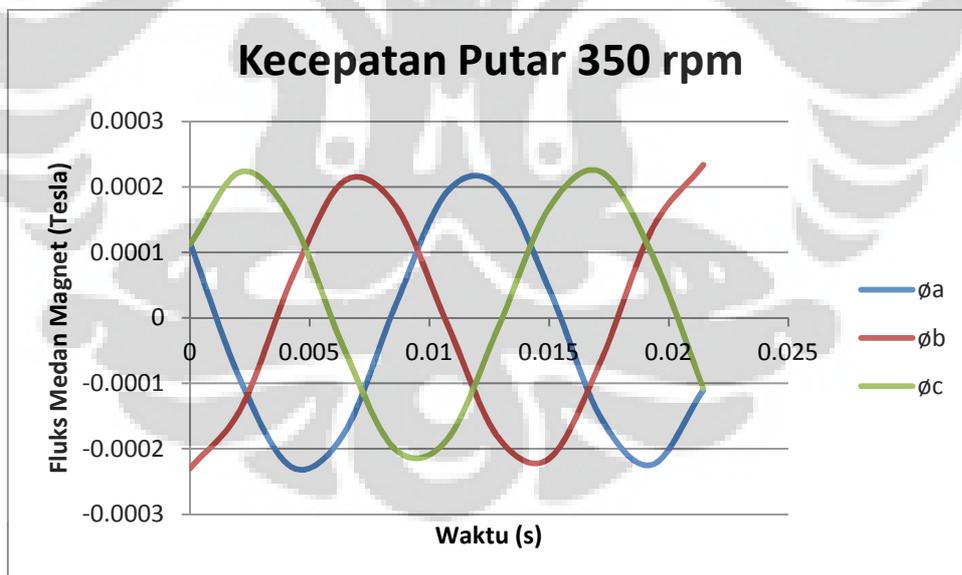
Gambar 4.14 Grafik Waktu vs Tegangan Keluaran 3 Fasa pada 250 rpm



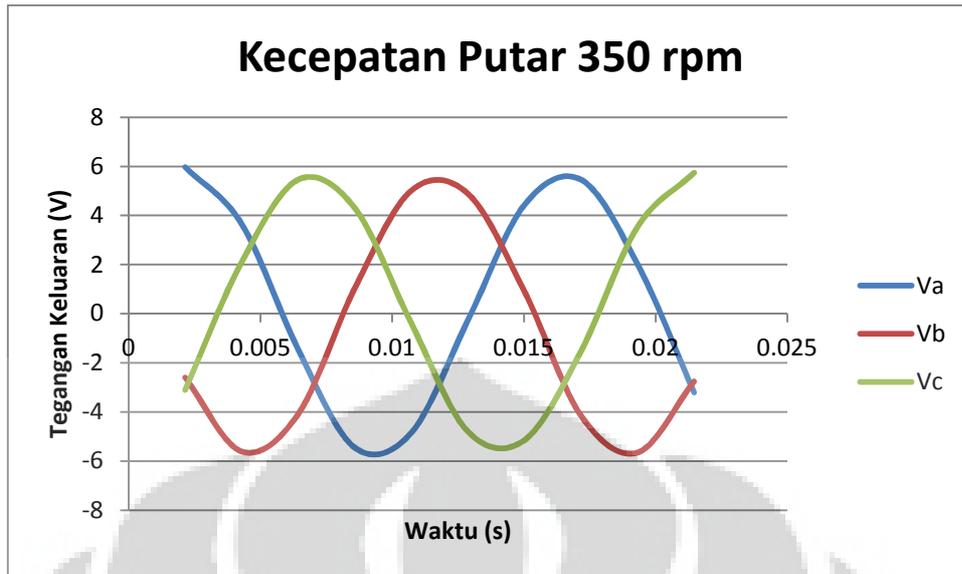
Gambar 4.15 Grafik Waktu vs Fluks Medan Magnet yang Diterima oleh Stator pada 300 rpm



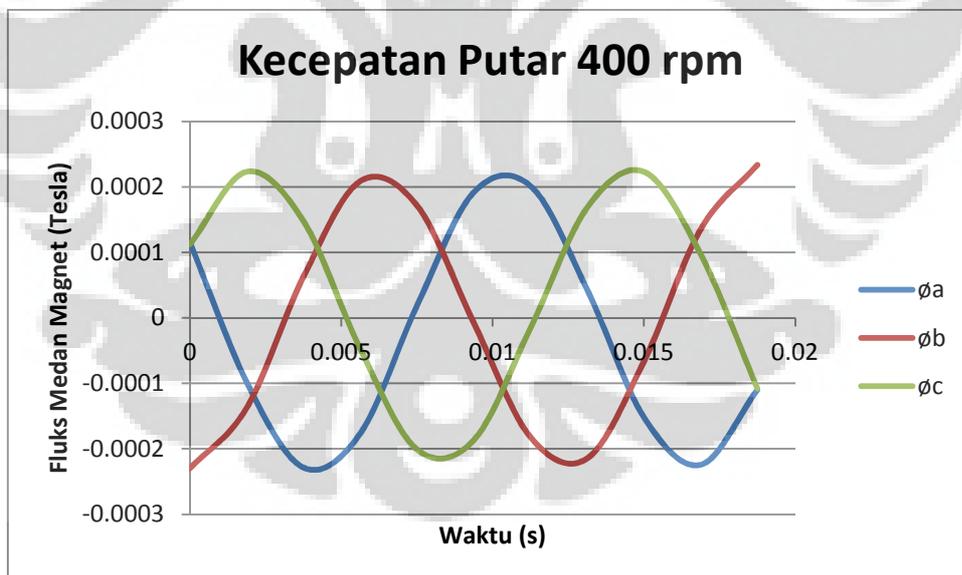
Gambar 4.16 Grafik Waktu vs Tegangan Keluaran 3 Fasa pada 300 rpm



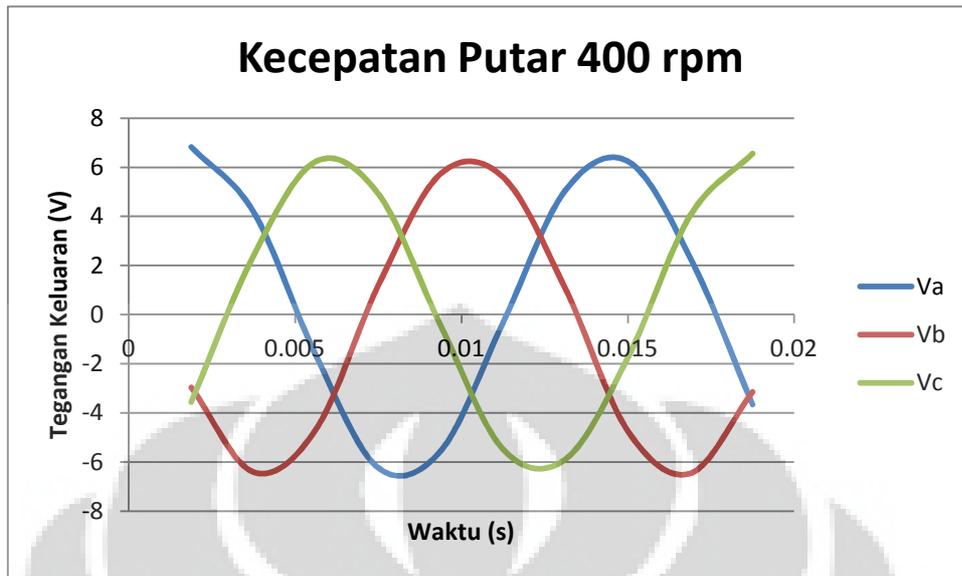
Gambar 4.17 Grafik Waktu vs Fluks Medan Magnet yang Diterima oleh Stator pada 350 rpm



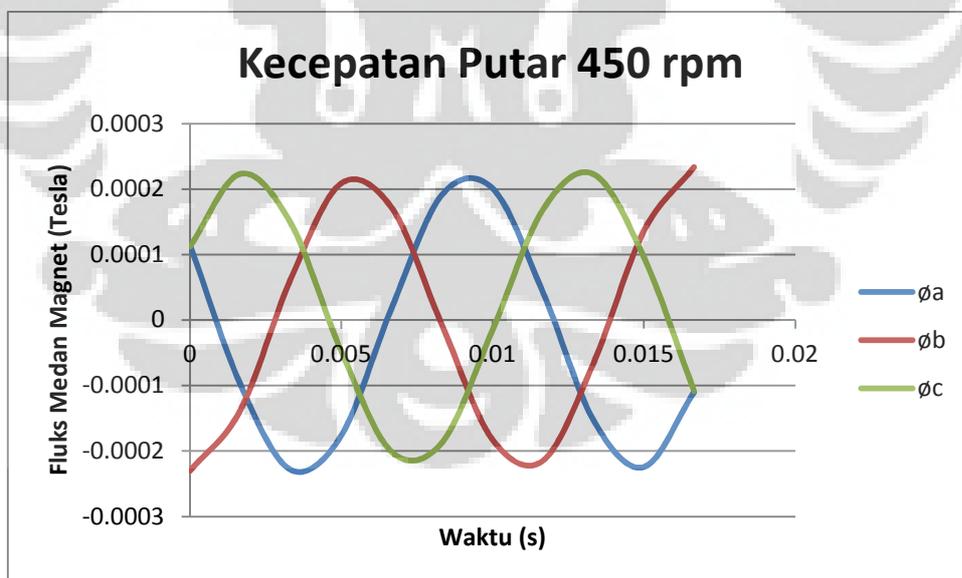
Gambar 4.18 Grafik Waktu vs Tegangan Keluaran 3 Fasa pada 350 rpm



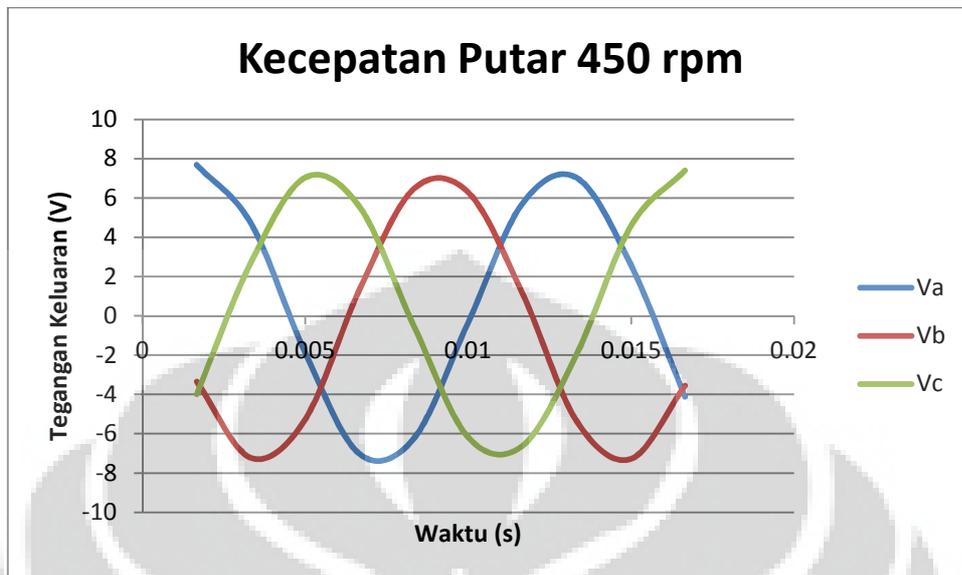
Gambar 4.19 Grafik Waktu vs Fluks Medan Magnet yang Diterima oleh Stator pada 400 rpm



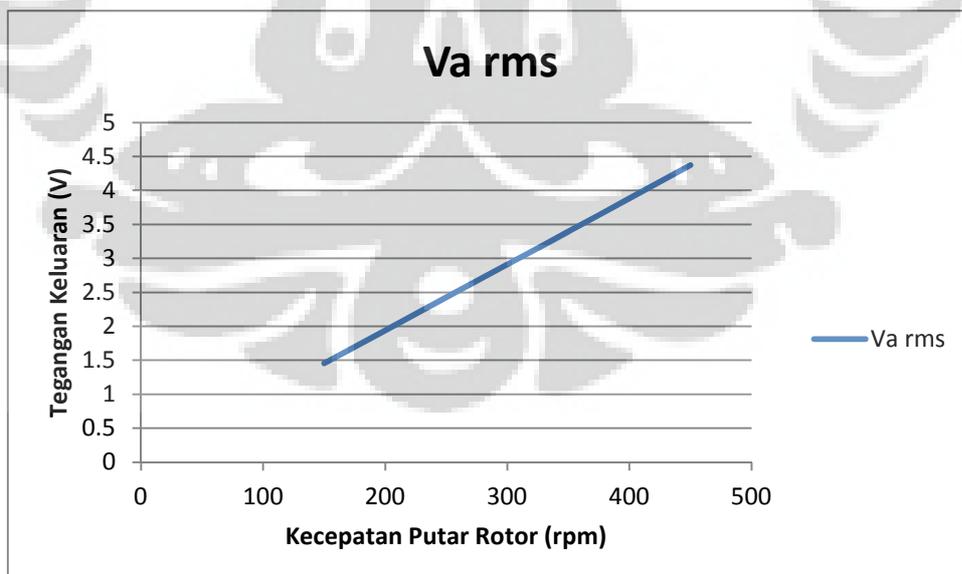
Gambar 4.20 Grafik Waktu vs Tegangan Keluaran 3 Fasa pada 400 rpm



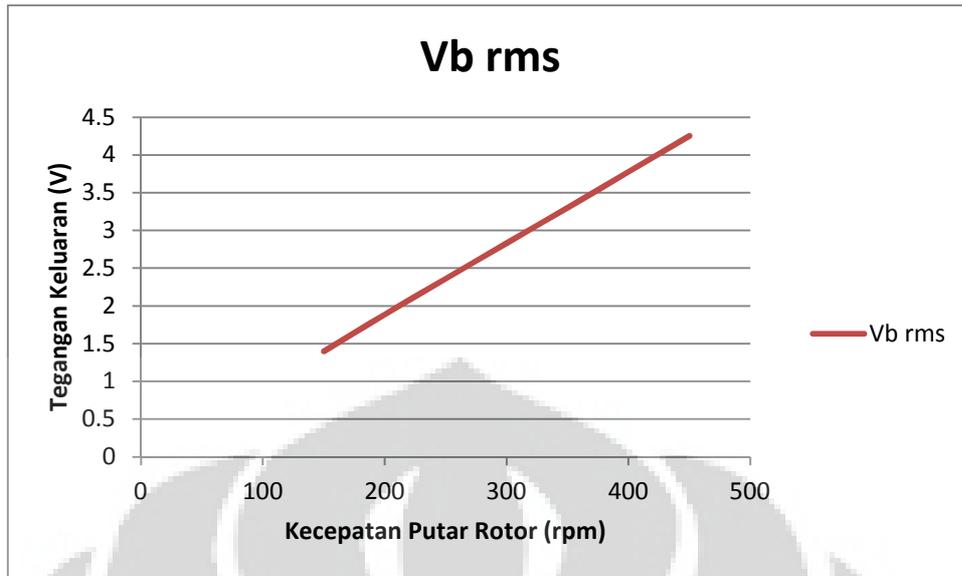
Gambar 4.21 Grafik Waktu vs Fluks Medan Magnet yang Diterima oleh Stator pada 450 rpm



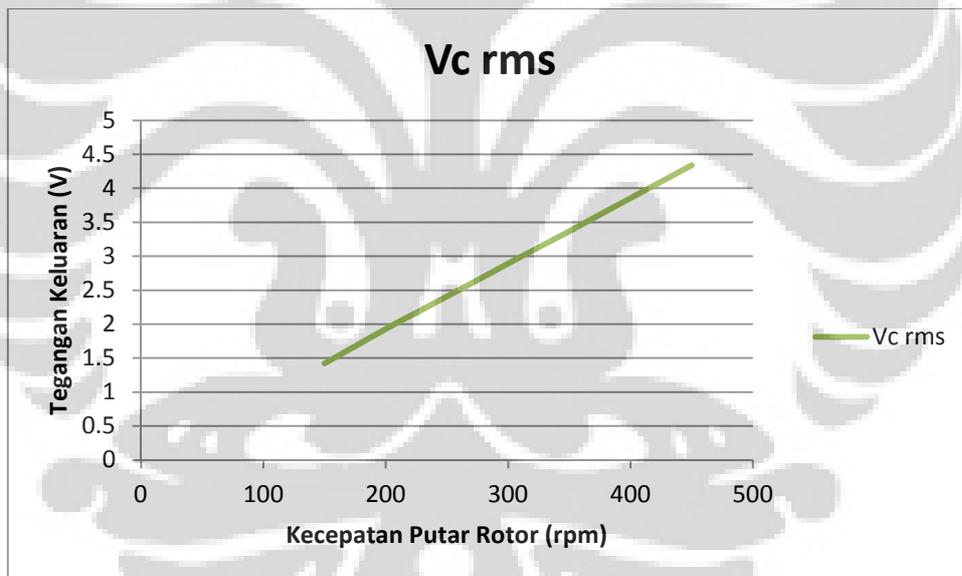
Gambar 4.22 Grafik Waktu vs Tegangan Keluaran 3 Fasa pada 450 rpm



Gambar 4.23 Grafik Hasil Simulasi Kecepatan Putar Rotor vs Magnitude Tegangan pada Fasa a



Gambar 4.24 Grafik Hasil Simulasi Kecepatan Putar Rotor vs Magnitude Tegangan pada Fasa b



Gambar 4.25 Grafik Hasil Simulasi Kecepatan Putar Rotor vs Magnitude Tegangan pada Fasa c

#### 4.2 Analisa Data Hasil Simulasi Generator

Pada sub-bab ini akan dibahas mengenai pengolahan data dan analisa dari data hasil simulasi kedua desain generator fluks aksial magnet permanen yang telah didapat serta analisa perbandingan dari keduanya.

#### 4.2.1 Analisa Data Hasil Simulasi Generator Fluks Aksial Magnet Permanen dengan Konfigurasi 9 Pasang Kutub Magnet Permanen dan 9 Kumparan 3 Fasa Seri

Data yang ditunjukkan pada subbab di atas mengenai hasil simulasi desain generator fluks aksial magnet permanen dengan konfigurasi 9 pasang kutub magnet permanen dan 9 kumparan 3 fasa seri dilakukan oleh [9] dengan menggunakan peranti lunak berbasis FEM (*Finite Element Method*), COMSOL 3.5, dan kemudian akan diolah dengan menggunakan peranti lunak Microsoft Excel. Data yang didapat masih dalam bentuk keluaran fluks medan magnet yang diterima oleh kumparan pada masing-masing fasa pada kumparan stator. Oleh karena itu, data hasil simulasi yang berupa fluks medan magnet tersebut diolah kembali dengan menggunakan persamaan 2.2 pada Bab 2 di atas. Contoh perhitungan dapat dilihat pada sub-bab berikut.

Data fluks magnet yang diterima oleh stator pada desain generator fluks aksial dengan konfigurasi ini bernilai sama pada tiap pencuplikan dengan variasi kecepatan putar rotor yang berbeda. Bentuk grafik data hasil simulasi yang dibentuk oleh hasil simulasi ini menunjukkan nilai yang tidak stabil pada masing-masing fasa. Oleh karena itu, nilai tegangan yang dihasilkan juga tidak stabil.

#### 4.2.2 Analisa Data Hasil Simulasi Generator Fluks Aksial Magnet Permanen dengan Konfigurasi 8 Pasang Kutub Magnet Permanen dan 9 Kumparan 3 Fasa Berseling

Seperti yang telah dijelaskan pada Bab 3 sebelumnya, proses pengambilan data hasil simulasi menggunakan peranti lunak berbasis FEM (*Finite Element Method*) dan kemudian akan diolah dengan menggunakan peranti lunak Microsoft Excel.

Data simulasi yang didapatkan dengan menggunakan COMSOL 3.5 merupakan keluaran berupa fluks medan magnet yang diterima oleh kumparan 3 fasa pada stator. Oleh karena itu, untuk mendapatkan nilai tegangan keluaran generator, data hasil simulasi yang berupa fluks medan magnet diolah dengan menggunakan persamaan tegangan induksi 2.2 pada Bab 2 di atas. Dengan menggunakan persamaan ini, akan didapatkan nilai tegangan keluaran tiap fasa

dengan memperhitungkan nilai fluks yang berbeda pada satuan waktu. Sebagai contoh perhitungan, pada data hasil simulasi dengan kecepatan putar rotor sebesar 200 rpm, nilai fluks medan magnet yang diterima stator fasa a pada saat  $t=0,015$  adalah sebesar 0,0000183 dan pada saat  $t=0,016875$  nilai fluks medan magnet yang diterima stator adalah sebesar 0,0001194. Dengan data tersebut, didapatkan nilai tegangan keluaran sebesar:

$$V_a = -N \frac{\phi_2 - \phi_1}{t_2 - t_1} = -60 \times \frac{0,0001194 - 0,0000183}{0,016875 - 0,015} = -3,2352 \text{ Volt}$$

Pengolahan data ini berlaku untuk pencuplikan pada waktu yang lain dan untuk data hasil simulasi dengan kecepatan putar rotor yang berbeda.

Apabila melihat data hasil simulasi yang diberikan pada bagian Lampiran, terlihat bahwa besarnya nilai fluks medan magnet yang diberikan ke kumparan stator bernilai sama untuk setiap pencuplikan. Hal ini dikarenakan, untuk setiap putaran rotor, nilai fluks medan magnet yang diberikan akan selalu sama dengan nilai fluks medan yang dapat diberikan oleh medan magnet permanen (nilai medan magnet yang dimiliki magnet permanen selalu sama). Oleh karena itu, besarnya nilai tegangan keluaran generator yang bernilai berbeda pada tiap kecepatan putar rotor disebabkan oleh besarnya selisih waktu dari pencuplikan ( $\Delta t = t_2 - t_1$ ).

Setelah mendapatkan data hasil simulasi dengan variabel kecepatan putar rotor yang berbeda (150-450 rpm), akan ditentukan nilai magnitudo tegangannya dengan cara membagi nilai tegangan puncaknya dengan  $\sqrt{3}$  untuk setiap nilai variabel kecepatan putarnya. Setelah mendapatkan besarnya nilai tegangan magnitudo tiap fasa pada tiap nilai variabel kecepatan, data tersebut diplot pada peranti lunak Microsoft Excel untuk dibuat gambar grafik perbandingan kecepatan putar rotor dengan tegangan keluaran tiap fasa generator.

#### 4.2.3 Perbandingan Data Hasil Simulasi Kedua Desain Generator Fluks Aksial Magnet Permanen

Dari kedua data hasil simulasi yang telah didapat, terlihat bahwa terdapat perbedaan yang cukup signifikan antara data hasil simulasi kedua generator.

Generator fluks aksial magnet permanen dengan konfigurasi 9 pasang kutub magnet permanen dan 9 kumparan 3 fasa seri, seperti yang telah disebutkan sebelumnya, memiliki nilai data fluks medan magnet yang tidak seimbang pada setiap fasanya. Hal ini menyebabkan nilai tegangan keluaran yang dihasilkan oleh desain generator tersebut juga menjadi tidak seimbang. Hasil tersebut tentu tidak sesuai yang diharapkan, dimana seharusnya nilai tegangan keluaran dari generator yang diinginkan adalah seimbang dengan beda fasa sebesar  $120^\circ$  dan memiliki besar yang sama.

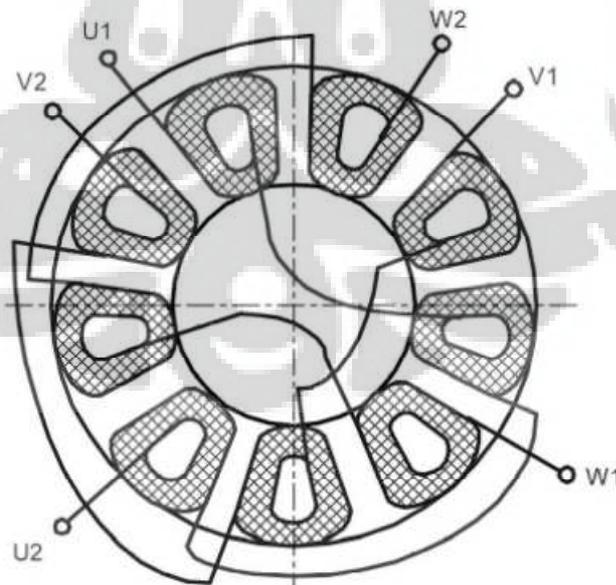
Sedangkan untuk data hasil simulasi generator fluks aksial magnet permanen dengan konfigurasi 8 pasang kutub magnet permanen dan 9 kumparan 3 fasa berseling menunjukkan hasil keluaran yang seimbang baik pada data fluks medan magnet yang diterima kumparan maupun pada data tegangan keluaran dari masing-masing fasa pada kumparan stator. Nilai fluks dan tegangan keluaran yang dihasilkan membentuk grafik yang seimbang dengan nilai yang sama dan beda  $120^\circ$  antar fasanya.

Perbedaan ini dapat disebabkan oleh beberapa parameter-parameter desain yang terdapat pada desain generator fluks aksial magnet permanen dengan konfigurasi 9 pasang kutub magnet permanen dan 9 kumparan 3 fasa seri. Seperti digunakannya jumlah pasangan magnet permanen yang ganjil dan juga konfigurasi lilitan pada kumparan stator. Hal-hal tersebut telah dapat diatasi dengan menggunakan parameter-parameter desain pada desain generator fluks aksial magnet permanen dengan konfigurasi 8 pasang kutub magnet permanen dan 9 kumparan 3 fasa berseling dengan tujuan dapat membentuk nilai hasil keluaran yang seimbang dan sesuai dengan yang diharapkan. Berikut akan dibahas mengenai kesalahan-kesalahan parameter yang disebutkan di atas dan parameter yang seharusnya dimasukkan dan telah dimasukkan ke dalam desain generator yang baru.

#### 4.2.3.1 Kesalahan Parameter Konfigurasi Lilitan Kumputan Stator

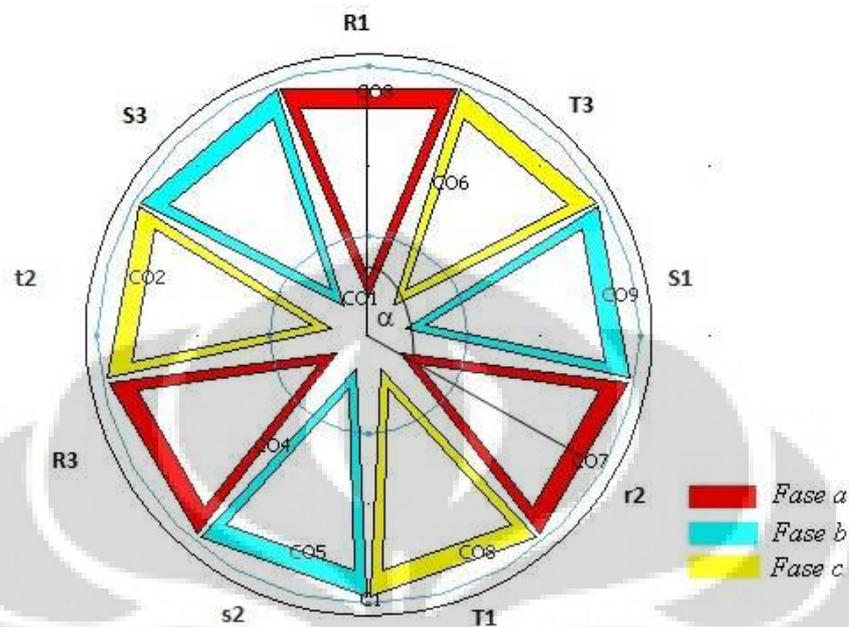
Kesalahan pertama yang dapat menyebabkan tidak sesuainya hasil keluaran simulasi pada desain generator fluks aksial magnet permanen dengan konfigurasi 9 pasang kutub magnet permanen dan 9 kumparan 3 fasa seri adalah konfigurasi lilitan kumparan masing-masing fasa pada stator. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, konfigurasi lilitan pada kumparan stator pada desain generator tersebut dibentuk seri atau RRRSSSTTT.

Hal ini tidak sesuai dengan dasar teori mengenai urutan fasa yang seharusnya dilakukan pada untuk desain konfigurasi lilitan kumparan pada stator. Urutan fasa dan arah gulungan kumparan stator seharusnya adalah R-S-t-R-s-T-r-S-T yang ditunjukkan oleh Gambar 4.26 di bawah dengan mengasumsikan bahwa apabila lilitan masuk dari sisi luar kumparan dan keluar dari sisi dalam kumparan, arah gulungan kumparan fasa bertanda positif (huruf kapital). Dengan konfigurasi ini, ketika rotor berputar, salah satu pasang magnet permanen pada rotor akan menginduksi kumparan dengan fasa yang berbeda dengan kumparan yang telah diinduksikan oleh pasangan magnet tersebut, sehingga distribusi medan magnet dapat dilakukan lebih merata pada masing-masing fasa.



Gambar 4.26 Urutan Fasa dan Arah Gulungan Kumparan pada Stator 9 Kumparan 3 Fasa Berseling [1]

Dari Gambar 4.26. di atas, dapat ditentukan desain konfigurasi lilitan kumparan masing-masing fasa pada stator yang baik sebagai berikut:



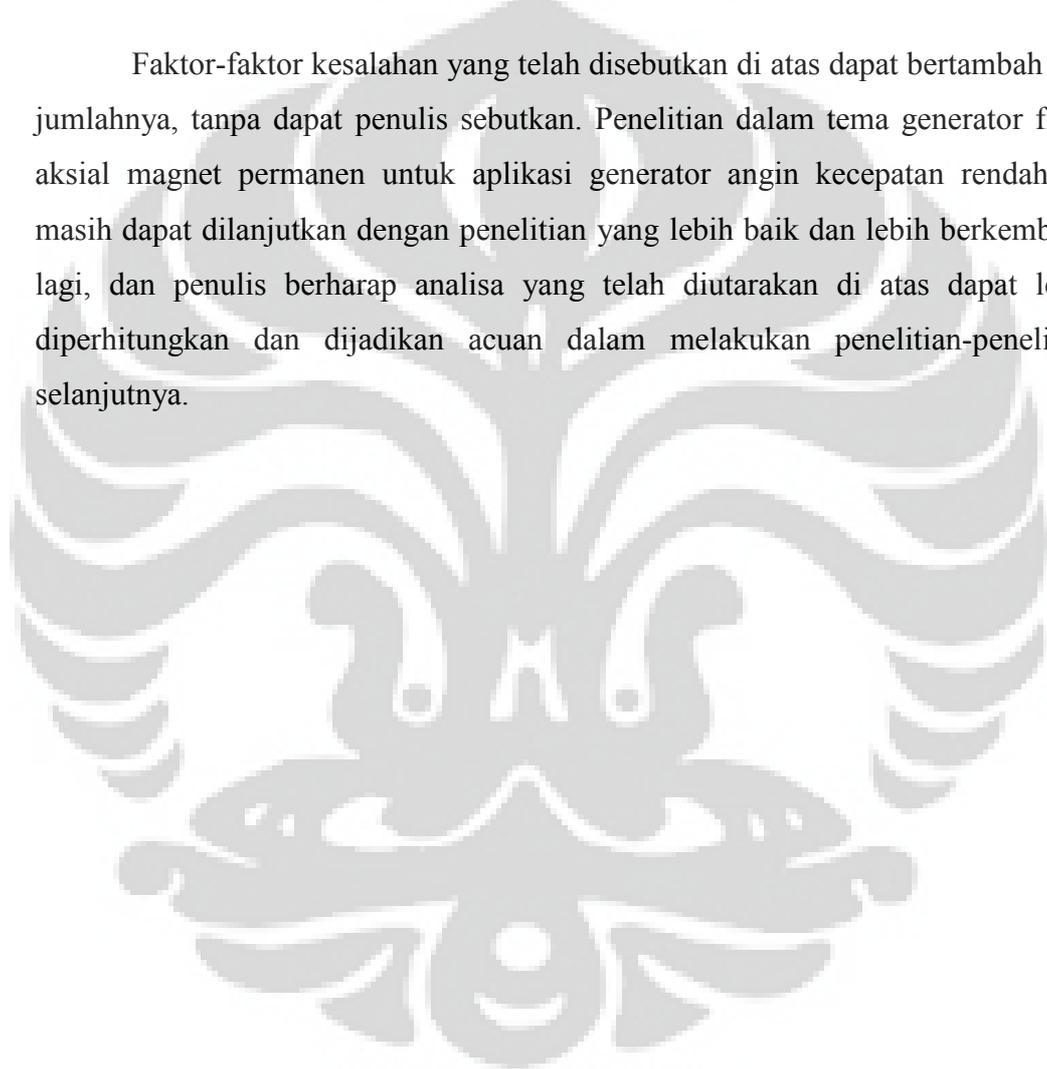
Gambar 4.27 Konfigurasi Lilitan Kumparan 9 Kumparan 3 Fasa Berseling

#### 4.2.3.2 Kesalahan Parameter Jumlah Pasangan Magnet Permanen pada Rotor

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, jumlah pasangan magnet permanen pada desain generator fluks aksial magnet permanen dengan konfigurasi 9 pasang kutub magnet permanen dan 9 kumparan 3 fasa seri adalah sebanyak 9 pasang. Jumlah pasangan magnet permanen yang ganjil tersebut lah yang menyebabkan nilai hasil keluaran generator fluks aksial magnet permanen dengan konfigurasi 9 pasang kutub magnet permanen dan 9 kumparan 3 fasa seri menjadi tidak seimbang. Hal ini dikarenakan pada suatu sisi dari rotor, terdapat dua magnet permanen yang bersebelahan yang memiliki kutub medan magnet yang sama. Hal ini menyebabkan penyebaran fluks yang tidak seimbang pada sisi rotor tersebut karena jumlah medan magnet yang dihasilkan pada sisi tersebut menjadi dua kali dari medan magnet yang seharusnya. Oleh karena itu, nilai fluks medan magnet yang diterima oleh kumparan pada stator akibat sisi tersebut menjadi dua kali dari yang seharusnya.

Pada desain generator fluks aksial magnet permanen dengan konfigurasi 8 pasang kutub magnet permanen dan 9 kumparan 3 fasa berseling, hal tersebut telah diperbaiki dengan menggunakan jumlah pasangan magnet permanen pada rotor dengan jumlah 8 pasang sehingga medan magnet yang dihasilkan oleh rotor dapat tersebar dengan baik. Hal tersebut menyebabkan nilai fluks medan magnet yang diterima oleh kumparan stator dan tegangan keluaran yang dihasilkan bernilai sama untuk masing-masing fasa dan seimbang.

Faktor-faktor kesalahan yang telah disebutkan di atas dapat bertambah lagi jumlahnya, tanpa dapat penulis sebutkan. Penelitian dalam tema generator fluks aksial magnet permanen untuk aplikasi generator angin kecepatan rendah ini masih dapat dilanjutkan dengan penelitian yang lebih baik dan lebih berkembang lagi, dan penulis berharap analisa yang telah diutarakan di atas dapat lebih diperhitungkan dan dijadikan acuan dalam melakukan penelitian-penelitian selanjutnya.



## BAB 5

### KESIMPULAN

1. Generator fluks aksial magnet permanen 9 pasang kutub dan stator 9 kumparan 3 fasa seri dapat menghasilkan nilai keluaran yang tidak seimbang dan tidak memiliki nilai yang sama tiap fasanya.
2. Generator fluks aksial magnet permanen 8 pasang kutub dan stator 9 kumparan 3 fasa berseling menghasilkan nilai keluaran yang lebih seimbang dan memiliki nilai tegangan yang sama apabila dibandingkan dengan generator fluks aksial magnet permanen 9 pasang kutub dan stator 9 kumparan 3 fasa seri.
3. Untuk menghasilkan nilai tegangan keluaran tiga fasa yang seimbang, jumlah pasangan magnet permanen yang digunakan harus bernilai genap.
4. Rotor dengan jumlah pasangan magnet permanen sebanyak 8 pasang menghasilkan nilai keluaran yang lebih baik dibandingkan dengan rotordengan jumlah pasangan magnet permanen sebanyak 9 pasang.
5. Untuk menghasilkan nilai tegangan keluaran tiga fasa yang seimbang, generator dengan 9 kumparan harus memiliki konfigurasi lilitan yang berseling dan arah gulungan kumparannya R-S-t-R-s-T-r-S-T.
6. Stator dengan kumparan fasa yang berseling menghasilkan nilai keluaran yang lebih baik dibandingkan dengan stator dengan kumparan fasa yang seri.
7. Kumparan fasa yang didesain harus berseling dikarenakan agar suatu magnet permanen dapat menginduksikan tegangan pada kumparan dengan fasa yang berbeda ketika diputar secara aksial.
8. Dengan jenis magnet yang sama, besarnya fluks yang diterima oleh kumparan stator juga akan sama. Sehingga, semakin besarnya nilai tegangan keluaran dari generator disebabkan oleh semakin tingginya kecepatan putar stator yang diberikan.

## DAFTAR ACUAN

- [1] Jacek F. Gieras, Rong-Jie Wang, dan Marten J. Kamper. *Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines*. Dordrecht: Kluwer Academic Publisher. 2004
- [2] Garrison F. Price, Todd D, Batzel, et al, ed. *Design and Testing of a Permanent Magnet Axial Flux Wind Power Generator. Proc.The 2008 IAJC-IJME International Conference*. 2008
- [3] Feng, Guoying, Liu, Zhizhang, et al, ed. *Experimental Research on Vertical Axis Wind Turbine*. Hohhot, China: IEEE. 2009
- [4] M. Ragheb. *Optimal Rotor Tip Ratio*. (2011). May 27, 2012. <<http://www.uiuc.edu>>
- [5] Chapman, Stephen J. *Electric Machinery Fundamental*. US:McGraw-Hill College. 2002.
- [6] SM. Hosseini, M. Agha-Mirsalim, M. Mirzaei. *Design, Prototyping, and Analysis of a Low Cost Axial Flux Coreless Permanent Magnet Generator. Iranian Journal of Science and Technology, Transaction B, Engineering, Vol. 32, pp 191-203*. Iran: Shiraz University. 2008.
- [7] Metin Aydin, Thomas A. Lipo, Surong Huang. *Torus Concept Machines: Pre-Prototyping Design Assesment for Two Major Topologies*. USA: Electrical and Computer Engineering Department University of Wisconsin. 2001.
- [8] Rossouw, Francois G. *Analysis and Design of Axial Flux Permanent Magnet Wind Generator System for Direct Battery Charging Application*. Matieland, South Africa: Department of Electrical and Electronic Engineering Stellenbosch University. 2009.
- [9] Panjaitan, Saut Daniel. *Skripsi : Analisa Dua Model Generator Sinkron Magnet Permanen Ffluks Aksial Tanpa Inti Stator*. Depok, Indonesia: Departemen Teknik Elektro FTUI. 2011.

## DAFTAR PUSTAKA

Jacek F. Gieras, Rong-Jie Wang, dan Marten J. Kamper. *Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines*. Dordrecht: Kluwer Academic Publisher. 2004.

Garrison F. Price, Todd D, Batzel, et al, ed. *Design and Testing of a Permanent Magnet Axial Flux Wind Power Generator. Proc.The 2008 IAJC-IJME International Conference*. 2008

Chapman, Stephen J. *Electric Machinery Fundamental*. US:McGraw-Hill College. 2002.

Panjaitan, Saut Daniel. *Skripsi : Analisa Dua Model Generator Sinkron Magnet Permanen Ffluks Aksial Tanpa Inti Stator*. Depok, Indonesia: Departemen Teknik Elektro FTUI. 2011.

Sofian, Edy. *Skripsi :Studi Bentuk Rotor Magnet Permanen pada Generator Sinkron Magnet Permanen Fluks Aksial Tanpa Inti Stator*. Depok, Indonesia: Departemen Teknik Elektro FTUI. 2011.

Prisandi, Chatra Hagusta. *Skripsi :Studi Desain Kumparan Stator pada Generator Sinkron Magnet Permanen Fluks Aksial Tanpa Inti Stator*. Depok, Indonesia: Departemen Teknik Elektro FTUI. 2011.

## LAMPIRAN

Lampiran 1 : Data Hasil Simulasi dengan Kecepatan Putar Rotor 150 rpm

t	$\phi_a$	$\phi_b$	$\phi_c$	Va	Vb	Vc
0	0,0001152	-0,0002301	0,0001123	0	0	0
0,005	-0,0000981	-0,0001374	0,0002233	2,5596	-1,1124	-1,332
0,01	-0,0002287	0,000063	0,0001479	1,5672	-2,4048	0,9048
0,015	-0,0001766	0,0002089	-0,0000472	-0,6252	-1,7508	2,3412
0,02	0,0000183	0,0001718	-0,000201	-2,3388	0,4452	1,8456
0,025	0,0001916	-0,0000074	-0,000187	-2,0796	2,1504	-0,168
0,03	0,0002015	-0,0001822	-0,0000156	-0,1188	2,0976	-2,0568
0,035	0,0000432	-0,0002148	0,0001684	1,8996	0,3912	-2,208
0,04	-0,0001519	-0,0000667	0,0002232	2,3412	-1,7772	-0,6576
0,045	-0,0002244	0,0001353	0,000097	0,87	-2,424	1,5144
0,05	-0,00011	0,0002337	-0,0001081	-1,3728	-1,1808	2,4612
0,055	0,0001002	0,0001448	-0,0002157	-2,5224	1,0668	1,2912
0,06	0,0002387	-0,0000478	-0,0001383	-1,662	2,3112	-0,9288
0,065	0,0001821	-0,0001874	0,000062	0,6792	1,6752	-2,4036
0,07	-0,0000082	-0,0001578	0,0002196	2,2836	-0,3552	-1,8912
0,075	-0,0001834	0,0000176	0,0001956	2,1024	-2,1048	0,288
0,08	-0,0001973	0,0001887	0,0000177	0,1668	-2,0532	2,1348
0,085	-0,0000447	0,0002166	-0,0001723	-1,8312	-0,3348	2,28
0,09	0,0001496	0,0000693	-0,0002245	-2,3316	1,7676	0,6264
0,095	0,0002275	-0,0001352	-0,0000964	-0,9348	2,454	-1,5372
0,1	0,0001133	-0,0002286	0,0001122	1,3704	1,1208	-2,5032

Lampiran 2 : Data Hasil Simulasi dengan Kecepatan Putar Rotor 200 rpm

t	$\phi_a$	$\phi_b$	$\phi_c$	Va	Vb	Vc
0	0,0001152	-0,0002301	0,0001123	0	0	0
0,00375	-0,0000981	-0,0001374	0,0002233	3,4128	-1,4832	-1,776
0,0075	-0,0002287	0,000063	0,0001479	2,0896	-3,2064	1,2064
0,01125	-0,0001766	0,0002089	-0,0000472	-0,8336	-2,3344	3,1216
0,015	0,0000183	0,0001718	-0,000201	-3,1184	0,5936	2,4608
0,01875	0,0001916	-0,0000074	-0,000187	-2,7728	2,8672	-0,224
0,0225	0,0002015	-0,0001822	-0,0000156	-0,1584	2,7968	-2,7424
0,02625	0,0000432	-0,0002148	0,0001684	2,5328	0,5216	-2,944
0,03	-0,0001519	-0,0000667	0,0002232	3,1216	-2,3696	-0,8768
0,03375	-0,0002244	0,0001353	0,000097	1,16	-3,232	2,0192
0,0375	-0,00011	0,0002337	-0,0001081	-1,8304	-1,5744	3,2816
0,04125	0,0001002	0,0001448	-0,0002157	-3,3632	1,4224	1,7216
0,045	0,0002387	-0,0000478	-0,0001383	-2,216	3,0816	-1,2384
0,04875	0,0001821	-0,0001874	0,000062	0,9056	2,2336	-3,2048
0,0525	-0,0000082	-0,0001578	0,0002196	3,0448	-0,4736	-2,5216
0,05625	-0,0001834	0,0000176	0,0001956	2,8032	-2,8064	0,384
0,06	-0,0001973	0,0001887	0,0000177	0,2224	-2,7376	2,8464
0,06375	-0,0000447	0,0002166	-0,0001723	-2,4416	-0,4464	3,04
0,0675	0,0001496	0,0000693	-0,0002245	-3,1088	2,3568	0,8352
0,07125	0,0002275	-0,0001352	-0,0000964	-1,2464	3,272	-2,0496
0,075	0,0001133	-0,0002286	0,0001122	1,8272	1,4944	-3,3376

Lampiran 3 : Data Hasil Simulasi dengan Kecepatan Putar Rotor 250 rpm

t	$\phi_a$	$\phi_b$	$\phi_c$	Va	Vb	Vc
0	0,0001152	-0,0002301	0,0001123	0	0	0
0,003	-0,0000981	-0,0001374	0,0002233	4,266	-1,854	-2,22
0,006	-0,0002287	0,000063	0,0001479	2,612	-4,008	1,508
0,009	-0,0001766	0,0002089	-0,0000472	-1,042	-2,918	3,902
0,012	0,0000183	0,0001718	-0,000201	-3,898	0,742	3,076
0,015	0,0001916	-0,0000074	-0,000187	-3,466	3,584	-0,28
0,018	0,0002015	-0,0001822	-0,0000156	-0,198	3,496	-3,428
0,021	0,0000432	-0,0002148	0,0001684	3,166	0,652	-3,68
0,024	-0,0001519	-0,0000667	0,0002232	3,902	-2,962	-1,096
0,027	-0,0002244	0,0001353	0,000097	1,45	-4,04	2,524
0,03	-0,00011	0,0002337	-0,0001081	-2,288	-1,968	4,102
0,033	0,0001002	0,0001448	-0,0002157	-4,204	1,778	2,152
0,036	0,0002387	-0,0000478	-0,0001383	-2,77	3,852	-1,548
0,039	0,0001821	-0,0001874	0,000062	1,132	2,792	-4,006
0,042	-0,0000082	-0,0001578	0,0002196	3,806	-0,592	-3,152
0,045	-0,0001834	0,0000176	0,0001956	3,504	-3,508	0,48
0,048	-0,0001973	0,0001887	0,0000177	0,278	-3,422	3,558
0,051	-0,0000447	0,0002166	-0,0001723	-3,052	-0,558	3,8
0,054	0,0001496	0,0000693	-0,0002245	-3,886	2,946	1,044
0,057	0,0002275	-0,0001352	-0,0000964	-1,558	4,09	-2,562
0,06	0,0001133	-0,0002286	0,0001122	2,284	1,868	-4,172

Lampiran 4 : Data Hasil Simulasi dengan Kecepatan Putar Rotor 300 rpm

t	$\phi_a$	$\phi_b$	$\phi_c$	Va	Vb	Vc
0	0,0001152	-0,0002301	0,0001123	0	0	0
0,0025	-0,0000981	-0,0001374	0,0002233	5,1192	-2,2248	-2,664
0,005	-0,0002287	0,000063	0,0001479	3,1344	-4,8096	1,8096
0,0075	-0,0001766	0,0002089	-0,0000472	-1,2504	-3,5016	4,6824
0,01	0,0000183	0,0001718	-0,000201	-4,6776	0,8904	3,6912
0,0125	0,0001916	-0,0000074	-0,000187	-4,1592	4,3008	-0,336
0,015	0,0002015	-0,0001822	-0,0000156	-0,2376	4,1952	-4,1136
0,0175	0,0000432	-0,0002148	0,0001684	3,7992	0,7824	-4,416
0,02	-0,0001519	-0,0000667	0,0002232	4,6824	-3,5544	-1,3152
0,0225	-0,0002244	0,0001353	0,000097	1,74	-4,848	3,0288
0,025	-0,00011	0,0002337	-0,0001081	-2,7456	-2,3616	4,9224
0,0275	0,0001002	0,0001448	-0,0002157	-5,0448	2,1336	2,5824
0,03	0,0002387	-0,0000478	-0,0001383	-3,324	4,6224	-1,8576
0,0325	0,0001821	-0,0001874	0,000062	1,3584	3,3504	-4,8072
0,035	-0,0000082	-0,0001578	0,0002196	4,5672	-0,7104	-3,7824
0,0375	-0,0001834	0,0000176	0,0001956	4,2048	-4,2096	0,576
0,04	-0,0001973	0,0001887	0,0000177	0,3336	-4,1064	4,2696
0,0425	-0,0000447	0,0002166	-0,0001723	-3,6624	-0,6696	4,56
0,045	0,0001496	0,0000693	-0,0002245	-4,6632	3,5352	1,2528
0,0475	0,0002275	-0,0001352	-0,0000964	-1,8696	4,908	-3,0744
0,05	0,0001133	-0,0002286	0,0001122	2,7408	2,2416	-5,0064

Lampiran 5 : Data Hasil Simulasi dengan Kecepatan Putar Rotor 350 rpm

t	$\phi_a$	$\phi_b$	$\phi_c$	Va	Vb	Vc
0	0,0001152	-0,0002301	0,0001123	0	0	0
0,002145	-0,0000981	-0,0001374	0,0002233	5,966433566	-2,593006993	-3,104895105
0,00429	-0,0002287	0,000063	0,0001479	3,653146853	-5,605594406	2,109090909
0,006435	-0,0001766	0,0002089	-0,0000472	-1,457342657	-4,081118881	5,457342657
0,00858	0,0000183	0,0001718	-0,000201	-5,451748252	1,037762238	4,302097902
0,010725	0,0001916	-0,0000074	-0,000187	-4,847552448	5,012587413	-0,391608392
0,01287	0,0002015	-0,0001822	-0,0000156	-0,276923077	4,88951049	-4,794405594
0,015015	0,0000432	-0,0002148	0,0001684	4,427972028	0,911888112	-5,146853147
0,01716	-0,0001519	-0,0000667	0,0002232	5,457342657	-4,142657343	-1,532867133
0,019305	-0,0002244	0,0001353	0,000097	2,027972028	-5,65034965	3,53006993
0,02145	-0,000011	0,0002337	-0,0001081	-3,2	-2,752447552	5,737062937
0,023595	0,0001002	0,0001448	-0,0002157	-5,87972028	2,486713287	3,00979021
0,02574	0,0002387	-0,0000478	-0,0001383	-3,874125874	5,387412587	-2,165034965
0,027885	0,0001821	-0,0001874	0,000062	1,583216783	3,904895105	-5,602797203
0,03003	-0,0000082	-0,0001578	0,0002196	5,323076923	-0,827972028	-4,408391608
0,032175	-0,0001834	0,0000176	0,0001956	4,900699301	-4,906293706	0,671328671
0,03432	-0,0001973	0,0001887	0,0000177	0,388811189	-4,786013986	4,976223776
0,036465	-0,0000447	0,0002166	-0,0001723	-4,268531469	-0,78041958	5,314685315
0,03861	0,0001496	0,0000693	-0,0002245	-5,434965035	4,12027972	1,46013986
0,040755	0,0002275	-0,0001352	-0,0000964	-2,179020979	5,72027972	-3,583216783
0,0429	0,0001133	-0,0002286	0,0001122	3,194405594	2,612587413	-5,834965035

Lampiran 6 : Data Hasil Simulasi dengan Kecepatan Putar Rotor 400 rpm

t	$\phi_a$	$\phi_b$	$\phi_c$	Va	Vb	Vc
0	0,0001152	-0,0002301	0,0001123	0	0	0
0,001875	-0,0000981	-0,0001374	0,0002233	6,8256	-2,9664	-3,552
0,00375	-0,0002287	0,000063	0,0001479	4,1792	-6,4128	2,4128
0,005625	-0,0001766	0,0002089	-0,0000472	-1,6672	-4,6688	6,2432
0,0075	0,0000183	0,0001718	-0,000201	-6,2368	1,1872	4,9216
0,009375	0,0001916	-0,0000074	-0,000187	-5,5456	5,7344	-0,448
0,01125	0,0002015	-0,0001822	-0,0000156	-0,3168	5,5936	-5,4848
0,013125	0,0000432	-0,0002148	0,0001684	5,0656	1,0432	-5,888
0,015	-0,0001519	-0,0000667	0,0002232	6,2432	-4,7392	-1,7536
0,016875	-0,0002244	0,0001353	0,000097	2,32	-6,464	4,0384
0,01875	-0,00011	0,0002337	-0,0001081	-3,6608	-3,1488	6,5632
0,020625	0,0001002	0,0001448	-0,0002157	-6,7264	2,8448	3,4432
0,0225	0,0002387	-0,0000478	-0,0001383	-4,432	6,1632	-2,4768
0,024375	0,0001821	-0,0001874	0,000062	1,8112	4,4672	-6,4096
0,02625	-0,0000082	-0,0001578	0,0002196	6,0896	-0,9472	-5,0432
0,028125	-0,0001834	0,0000176	0,0001956	5,6064	-5,6128	0,768
0,03	-0,0001973	0,0001887	0,0000177	0,4448	-5,4752	5,6928
0,031875	-0,0000447	0,0002166	-0,0001723	-4,8832	-0,8928	6,08
0,03375	0,0001496	0,0000693	-0,0002245	-6,2176	4,7136	1,6704
0,035625	0,0002275	-0,0001352	-0,0000964	-2,4928	6,544	-4,0992
0,0375	0,0001133	-0,0002286	0,0001122	3,6544	2,9888	-6,6752

Lampiran 7 : Data Hasil Simulasi dengan Kecepatan Putar Rotor 450 rpm

t	$\phi_a$	$\phi_b$	$\phi_c$	Va	Vb	Vc
0	0,0001152	-0,0002301	0,0001123	0	0	0
0,001665	-0,0000981	-0,0001374	0,0002233	7,686486486	-3,340540541	-4
0,00333	-0,0002287	0,000063	0,0001479	4,706306306	-7,221621622	2,717117117
0,004995	-0,0001766	0,0002089	-0,0000472	-1,877477477	-5,257657658	7,030630631
0,00666	0,0000183	0,0001718	-0,000201	-7,023423423	1,336936937	5,542342342
0,008325	0,0001916	-0,0000074	-0,000187	-6,245045045	6,457657658	-0,504504505
0,00999	0,0002015	-0,0001822	-0,000156	-0,356756757	6,299099099	-6,176576577
0,011655	0,0000432	-0,0002148	0,0001684	5,704504505	1,174774775	-6,630630631
0,01332	-0,0001519	-0,0000667	0,0002232	7,030630631	-5,336936937	-1,974774775
0,014985	-0,0002244	0,0001353	0,000097	2,612612613	-7,279279279	4,547747748
0,01665	-0,00011	0,0002337	-0,0001081	-4,122522523	-3,545945946	7,390990991
0,018315	0,0001002	0,0001448	-0,0002157	-7,574774775	3,203603604	3,877477477
0,01998	0,0002387	-0,0000478	-0,0001383	-4,990990991	6,940540541	-2,789189189
0,021645	0,0001821	-0,0001874	0,000062	2,03963964	5,030630631	-7,218018018
0,02331	-0,0000082	-0,0001578	0,0002196	6,857657658	-1,066666667	-5,679279279
0,024975	-0,0001834	0,0000176	0,0001956	6,313513514	-6,320720721	0,864864865
0,02664	-0,0001973	0,0001887	0,000177	0,500900901	-6,165765766	6,410810811
0,028305	-0,0000447	0,0002166	-0,0001723	-5,499099099	-1,005405405	6,846846847
0,02997	0,0001496	0,0000693	-0,0002245	-7,001801802	5,308108108	1,881081081
0,031635	0,0002275	-0,0001352	-0,0000964	-2,807207207	7,369369369	-4,616216216
0,0333	0,0001133	-0,0002286	0,0001122	4,115315315	3,365765766	-7,517117117