



UNIVERSITAS INDONESIA



**OPTIMASI JARAK CELAH UDARA GENERATOR SINKRON  
MAGNET PERMANEN FLUKS AKSIAL ROTOR CAKRAM  
GANDA DENGAN STATOR TANPA INTI**

**SKRIPSI**

**RAJA TINJO  
06 06 07 4256**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO  
DEPOK  
JUNI 2010**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**OPTIMASI JARAK CELAH UDARA GENERATOR SINKRON  
MAGNET PERMANEN FLUKS AKSIAL ROTOR CAKRAM  
GANDA DENGAN STATOR TANPA INTI**

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik**

**RAJA TINJO  
06 06 07 4256**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO  
DEPOK  
JUNI 2010**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Raja Tinjo  
NPM : 0606074256  
Tanda Tangan :  
Tanggal : 15 Juni 2010

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :  
Nama : Raja Tinjo  
NPM : 0606074256  
Program Studi : Teknik Elektro  
Judul Skripsi : Optimasi Jarak Celah Udara Generator Sinkron  
Magnet Permanen Fluks Aksial Rotor Cakram  
Ganda Dengan Stator Tanpa Inti

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

### DEWAN PENGUJI

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

Penguji : Ir. I Made Ardita, MT ( )

Penguji : Dr. Ir. Uno Bintang S., MSc.,PhD. ( )

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 15 Juni 2010

## KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada ALLAH SWT, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Departemen Teknik Elektro pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

- (1) Ir. Agus R. Utomo, M.T. selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
- (2) Ayah dan ibu penulis yang telah memberikan semangat dan motivasi serta dukungan baik moral maupun material;
- (3) M. Arief Y dan M. Kahlil Firdausi atas kerjasama dan bantuannya dalam penyusunan skripsi ini;
- (4) Eki Ludfiyanti yang telah memberikan semangat dan dukungan dalam penyelesaian skripsi ini;
- (5) Orang tua M. Arief Y dan M. Kahlil Firdausi yang telah memberikan dukungan moral dan material;
- (6) Faishal Abdul Hakim dan teman-teman dari Departemen Teknik Fisika ITB yang telah membantu dalam penyusunan skripsi ini;
- (6) Rekan-rekan mahasiswa Departemen Teknik Elektro yang tidak bisa disebut satu persatu khususnya angkatan 2006 yang telah banyak mendukung saya dalam menyelesaikan skripsi ini.

Akhir kata, saya berharap ALLAH SWT berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan .

Depok, 15 Juni 2010

Penulis

Raja Tinjo

NPM. 060704256



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

---

---

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

Nama : Raja Tinjo  
NPM : 0606074256  
Program Studi : Teknik Elektro  
Departemen : Teknik Elektro  
Fakultas : Teknik  
Jenis Karya : Skripsi

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

**OPTIMASI JARAK CELAH UDARA GENERATOR SINKRON MAGNET  
PERMANEN FLUKS AKSIAL ROTOR CAKRAM GANDA DENGAN  
STATOR TANPA INTI**

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada Tanggal : 15 Juni 2010

Yang Menyatakan

(Raja Tinjo)

vi

## **ABSTRAK**

Nama : Raja Tinjo  
Program Studi : Teknik Elektro  
Judul : Optimasi Jarak Celah Udara Generator Sinkron Magnet Permanen  
Fluks Aksial Rotor Cakram Ganda Dengan Stator Tanpa Inti

Perkembangan generator sinkron magnet permanen fluks (GSMP FA) aksial sangat pesat. Konstruksi generator magnet permanen tersebut berbentuk cakram dimana generator ini digunakan untuk tenaga angin. Kecepatan angin berubah-ubah namun untuk mendapatkan tegangan tetap dilakukan pengaturan lebar celah udara. Variasi lebar celah udara akan mempengaruhi keluaran gelombang tegangan induksi pada stator. Pada putaran tetap dengan lebar celah udara yang berubah-ubah akan mempengaruhi tegangan riak dan perubahan nilai tegangan. Penelitian ini membahas hubungan antara gelombang tegangan dengan lebar celah udara dengan stator tanpa inti dan putaran tetap serta pengaruhnya.

Kata kunci : GSMP FA, tipe cakram, stator tanpa inti, variasi celah udara

## ABSTRACT

Name : Raja Tinjo

Study Program: Teknik Elektro

Title : Optimization of the air gap width in axial flux permanent magnet generator with cakram type double rotor and coreless stator

Axial flux permanent magnet synchronous generator (AF PMSG) still develop rapidly. Construction of permanent magnet generator is a disc type where the purpose used in wind turbine. The speed of wind is not constant but if we want to get constant voltage the air gap must be change. Variation of air gap width will influence induction voltage wave in stator. In constant speed of wind with air gap width variation will influence ripple voltage and voltage value. This paper study about the relation and influence between voltage wave and air gap width with coreless stator and constant speed.

Keyword : AF PMSG, Disc Type, Coreless Stator, Air Gap Variation

## DAFTAR ISI

|   |      |
|---|------|
| HALAMAN JUDUL.....  | i    |
| HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....                                | ii   |
| HALAMAN PENGESAHAN.....   | iii  |
| KATA PENGANTAR .....  | iv   |
| HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI SKRIPSI.....                          | vi   |
| ABSTRAK.....  | vii  |
| ABSTRACT.....   | viii |
| DAFTAR ISI.....   | ix   |
| DAFTAR GAMBAR .....   | xi   |
| DAFTAR TABEL.....   | xii  |
| DAFTAR PERSAMAAN .....  | xiii |
| <br>  |      |
| 1. PENDAHULUAN .....  | 1    |
| 1.1 Latar Belakang .....  | 1    |
| 1.2 Perumusan Masalah .....   | 1    |
| 1.3 Tujuan Penelitian .....   | 2    |
| 1.4 Batasan Masalah.....  | 2    |
| 1.5 Metode Penelitian.....  | 2    |
| 1.6 Sistematika Penulisan .....                                     | 2    |
| <br>  |      |
| 2. DASAR TEORI .....  | 4    |
| 2.1 Generator Sinkron Magnet Permanen.....                          | 4    |
| ..... 2.1.1 Jenis-jenis.....  | 4    |
| 2.1.2 Prinsip Kerja .....   | 5    |
| 2.2 Generator Sinkron Magnet Permanen Fluks Aksial Tipe Cakram..... | 6    |
| 2.2.1 Tipe Generator Berdasarkan Banyaknya Tingkatan (Stage).....   | 7    |
| 2.2.1.1 Satu Tingkat ( <i>Single Stage</i> ).....                   | 7    |
| 2.2.1.2 Dua Tingkat ( <i>Double Stage</i> ).....                    | 7    |
| 2.2.1.3 Banyak Tingkat ( <i>Multi Stage</i> ).....                  | 8    |
| 2.2.2 Berdasarkan arah Fluks.....                                   | 8    |
| ..... 2.2.2.1 Tipe N-N .....  | 9    |
| ..... 2.2.2.2 Tipe N-S .....  | 9    |
| 2.2.3 Penempatan dan Tipe Magnet.....                               | 10   |
| 2.3 Tipe Stator.....  | 11   |
| 2.3.1 Torus .....   | 11   |
| 2.3.2 Tanpa Inti ( <i>Coreless</i> ).....                           | 13   |

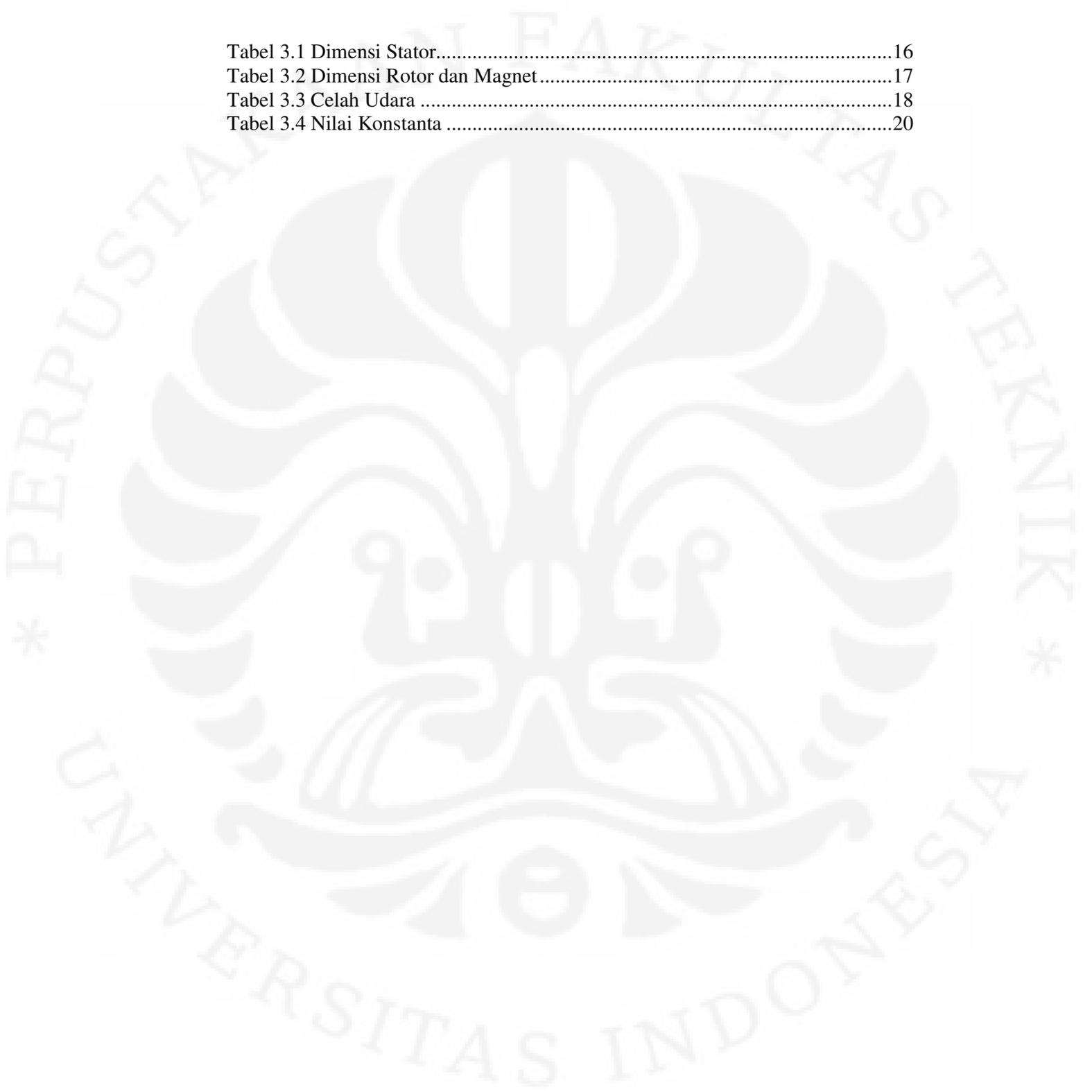
|  |    |
|--|----|
| 3. PERMODELAN DAN SIMULASI .....                             | 15 |
| 3.1 Model .....  | 15 |
| ..... 3.1.1 Stator .....                                     | 15 |
| ..... 3.1.2 Rotor.....                                       | 16 |
| ..... 3.1.3 Celah Udara.....                                 | 17 |
| 3.2 Persamaan yang Digunakan Dalam Model.....                | 18 |
| ..... 3.2.1 Persamaan Fluks Pada Permukaan Stator .....      | 18 |
| ..... 3.2.2 Persamaan Kerapatan Fluks Pada Celah Udara ..... | 19 |
| 3.2.3 Persamaan Tegangan Induksi Stator .....                | 19 |
| 3.3 Simulasi.....  | 20 |
| <br>   |    |
| 4. HASIL SIMULASI DAN ANALISA.....                           | 22 |
| 4.1 Data Permodelan Simulasi .....                           | 22 |
| 4.2 Hasil Simulasi .....                                     | 22 |
| ..... 4.2.1 Simulasi Dengan Celah Udara 0,005 m .....        | 22 |
| 4.2.2 Simulasi Dengan Celah Udara 0,006 m .....              | 23 |
| 4.2.3 Simulasi Dengan Celah Udara 0,007 m .....              | 24 |
| 4.2.4 Simulasi Dengan Celah Udara 0,008 m .....              | 24 |
| 4.2.5 Simulasi Dengan Celah Udara 0,009 m .....              | 25 |
| 4.2.6 Hubungan Fluks dengan Celah Udara .....                | 26 |
| 4.2.7 Hubungan Tegangan Puncak dengan Celah Udara .....      | 26 |
| 4.2.8 Hubungan Tegangan Riak dengan Celah Udara .....        | 26 |
| 4.3 Analisa Hasil Simulasi .....                             | 27 |
| ..... 4.3.1 Simulasi Dengan Celah Udara 0,005 m .....        | 27 |
| 4.3.2 Simulasi Dengan Celah Udara 0,006 m .....              | 28 |
| 4.3.3 Simulasi Dengan Celah Udara 0,007 m .....              | 28 |
| 4.3.4 Simulasi Dengan Celah Udara 0,008 m .....              | 29 |
| 4.3.5 Simulasi Dengan Celah Udara 0,009 m .....              | 29 |
| 4.3.6 Hubungan Fluks dengan Celah Udara .....                | 30 |
| 4.3.7 Hubungan Tegangan Puncak dengan Celah Udara .....      | 30 |
| 4.3.8 Hubungan Tegangan Riak dengan Celah Udara .....        | 30 |
| <br>   |    |
| 5. KESIMPULAN.....   | 31 |
| <br>   |    |
| DAFTAR ACUAN .....   | 32 |
| DAFTAR PUSTAKA .....   | 33 |

## DAFTAR GAMBAR

|   |    |
|---|----|
| Gambar 2.1 Jenis Generator (a) Radial (b) Aksial.....   | 5  |
| Gambar 2.2 Bentuk Generator Single Stage .....  | 7  |
| Gambar 2.3 Bentuk Generator Double Stage dengan Duan Rotor .....  | 8  |
| Gambar 2.4 Bentuk Konstruksi Generator Multi Stage .....  | 8  |
| Gambar 2.5 Arah Fluks pada Tipe N-N .....   | 9  |
| Gambar 2.6 Arah Fluks pada Tipe N-S .....   | 9  |
| Gambar 2.7 Peletakan Magnet Permanen .....  | 10 |
| Gambar 2.8 Generator dengan Tipe Torus .....  | 11 |
| Gambar 2.9 Stator Tipe Slot dengan Generator Eksternal Rotor .....  | 12 |
| Gambar 2.10 Arah Fluks pada Tipe Bentuk Slot .....  | 12 |
| Gambar 2.11 Bentuk Stator Tipe Non-slot Rotor Generator Eksternal .....                                       | 12 |
| Gambar 2.12 Arah Fluks pada Non Slot Stator .....   | 12 |
| Gambar 2.13 Stator Tanpa Inti .....   | 13 |
| Gambar 2.14 Overlapping Stator .....  | 13 |
| Gambar 2.15 Non Overlapping Stator .....  | 14 |
| Gambar 3.1 GSMP FA Rotor Ganda Stator Tunggal .....   | 15 |
| Gambar 3.2 Konstruksi Model Stator .....  | 16 |
| Gambar 3.3 Konstruksi Rotor .....   | 17 |
| Gambar 3.4 Celah Udara.....   | 18 |
| Gambar 3.5 Model dan Sistem Koordinat Distribusi Kerapatan Fluks .....  | 19 |
| Gambar 3.6 Diagram Alir Simulasi .....  | 21 |
| Gambar 4.1 Grafik Fluks dengan Waktu pada Celah Udara 0,005m .....  | 22 |
| Gambar 4.2 Grafik Tegangan dengan Waktu pada Celah Udara 0.005m .....   | 23 |
| Gambar 4.3 Grafik Fluks dengan Waktu pada Celah Udara 0,006m .....  | 23 |
| Gambar 4.4 Grafik Tegangan dengan Waktu pada Celah Udara 0.006m .....   | 23 |
| Gambar 4.5 Grafik Fluks dengan Waktu pada Celah Udara 0,007m .....  | 24 |
| Gambar 4.6 Grafik Tegangan dengan Waktu pada Celah Udara 0.007m .....   | 24 |
| Gambar 4.7 Grafik Fluks dengan Waktu pada Celah Udara 0,008m .....  | 24 |
| Gambar 4.8 Grafik Tegangan dengan Waktu pada Celah Udara 0.008m .....   | 25 |
| Gambar 4.9 Grafik Fluks dengan Waktu pada Celah Udara 0,009m .....  | 25 |
| Gambar 4.10 Grafik Tegangan dengan Waktu pada Celah Udara 0.009m .....  | 25 |
| Gambar 4.11 Grafik Fluks dengan Celah Udara .....   | 26 |
| Gambar 4.12 Grafik Tegangan Puncak, Tegangan Rata-rata dengan Celah Udara Serta Tegangan yang Diinginkan..... | 26 |
| Gambar 4.13 Grafik Tegangan Riak dengan Celah Udara .....   | 26 |

## DAFTAR TABEL

|   |    |
|---|----|
| Tabel 3.1 Dimensi Stator.....           | 16 |
| Tabel 3.2 Dimensi Rotor dan Magnet..... | 17 |
| Tabel 3.3 Celah Udara .....             | 18 |
| Tabel 3.4 Nilai Konstanta .....         | 20 |



## DAFTAR PERSAMAAN

|               |    |
|---------------|----|
| Persamaan 3.1 | 18 |
| Persamaan 3.2 | 19 |
| Persamaan 3.3 | 19 |
| Persamaan 3.4 | 19 |
| Persamaan 3.5 | 20 |

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Generator sinkron magnet permanen fluks aksial tipe cakram adalah generator dimana arah fluksnya secara aksial dan memiliki bentuk cakram. Generator ini memiliki dua tipe menurut arah aliran fluksnya yaitu generator tipe N-N dan tipe N-S. Sedangkan jika dilihat dari tipe statornya maka generator ini dibagi menjadi tipe stator dengan inti dan stator tanpa inti. Generator tersebut ditujukan untuk pembangkit tenaga angin baik untuk kecepatan rendah maupun kecepatan tinggi.

Generator ini memiliki bentuk seperti cakram. Celah udara dalam generator ini mengidentifikasi ketebalan dari generator ini. Celah udara dalam generator ini dapat dijadikan variabel bebas. Untuk menghasilkan tegangan yang diinginkan dengan kecepatan yang berubah-ubah maka lebar celah udara juga harus diubah. Oleh karena itu celah udara dapat mempengaruhi keluaran dari generator ini.

Perubahan celah udara antara rotor dengan stator akan mempengaruhi gelombang keluaran dalam generator[1]. Selain itu juga akan mempengaruhi fluks yang ada. Sehingga untuk memperoleh tegangan yang diinginkan maka perlu diketahui celah udara yang optimal dengan kecepatan tetap.

### 1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijelaskan diatas, maka ditemukan beberapa permasalahan-permasalahan yang dibahas dalam skripsi ini. Permasalahannya adalah sebagai berikut :

1. Berapa nilai celah udara yang optimal dengan tegangan rata-rata (rms) yang diinginkan adalah 50 volt?
2. Apa pengaruh lebar celah udara dengan keluaran tegangan?
3. Apa pengaruh lebar celah udara terhadap tegangan riak?

### 1.3 Tujuan Penulisan

Tujuan dari penulisan skripsi ini secara umum adalah untuk membahas optimasi lebar celah udara pada generator sinkron magnet permanen fluks aksial

dengan rotor ganda tipe cakram dengan stator tanpa inti. Selain itu melihat pengaruh lebar celah udara dengan gelombang tegangan yang dihasilkan.

#### **1.4 Batasan Masalah**

Untuk lebih memperjelas tujuan dari penelitian ini maka skripsi ini memiliki batasan masalah :

1. Generator sinkron magnet permanen fluks aksial tipe cakram yang dibuat dalam model ini dengan menggunakan rotor ganda stator tunggal.
2. Generator ini menggunakan stator tipe tanpa inti.
3. Nilai optimasi lebar celah udara yang diinginkan hanya pada interval 0,005 sampai 0,009 m.
4. Kecepatan putar generator yang digunakan dibuat 600 rotasi per menit (rpm).

#### **1.5 Metodologi Penulisan**

Metode penulisan skripsi ini adalah komputasi namun diawali dengan studi literatur mengenai generator sinkron magnet permanen fluks aksial untuk merancang model generator pada perangkat lunak. Kemudian tahap selanjutnya adalah perancangan model generator magnet permanen fluks aksial pada perangkat lunak *COMSOL Multiphysics*. Perangkat lunak tersebut berbasiskan FEM (*Finite Element Method*). Setelah model dibuat dilakukan simulasi terhadap model. Didapatkan hasil simulasi yang dilakukan terhadap model generator sinkron magnet permanen fluks aksial yang kemudian penulis menganalisis hasil simulasi tersebut .

#### **1.6 Sistematika Penulisan**

Untuk mempermudah dalam memahami isi seminar ini, penulis menggunakan sistematika sebagai berikut :

Bab 1 : Pendahuluan

Bab ini berisi tentang latar belakang, tujuan penulisan, batasan masalah, metodologi penulisan, dan sistematika penulisan.

Bab 2 : Dasar Teori

Bab ini menjelaskan mengenai generator sinkron, penggunaan magnet permanen, generator sinkron magnet permanen fluks aksial, GSMP FA tipe N-S dengan stator tanpa inti.

#### Bab 3 : Permodelan dan Simulasi

Bab ini menjelaskan mengenai model stator dan rotor pada GSMP FA, proses simulasi dengan menggunakan perangkat lunak COMSOL Multiphysics 3.5.

#### Bab 4 : Hasil Simulasi dan Analisa

Bab ini menjelaskan tentang hasil dari simulasi yang dilakukan terhadap model yang telah dibuat dan dijelaskan pula analisa dari hasil simulasi.

#### Bab 5 : Kesimpulan

Pada bab ini dipaparkan hasil simpulan dari analisa yang dilakukan pada bab 4.

## **BAB 2**

### **DASAR TEORI**

Generator Sinkron adalah suatu mesin yang dapat mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Generator sinkron memiliki nilai medan stator dan medan rotor yang sama dan bergerak berputar bersama dengan kecepatan putar dan arah yang sama.

#### **2.1 Generator Sinkron Magnet Permanen**

Pada umumnya rotor pada sebuah generator sinkron dicatu DC dengan tujuan arus yang melewati kumparan rotor akan menghasilkan medan magnet rotor. Saat ini teknologi sudah mulai berkembang sehingga kita dapat mengganti rotor tersebut dengan permanen magnet dimana medannya ( $B$ ) nya sudah kita ketahui dan besarnya adalah tetap.

Magnet permanen ini digunakan untuk mesin-mesin berkapasitas kecil. Hal tersebut dikarenakan kurang efisien penggunaan permanen magnet jika di gunakan pada mesin berkapasitas besar. Magnet permanen ini digunakan untuk mesin-mesin dengan torsi rendah. Apabila digunakan pada generator, biasanya digunakan untuk penggerak dengan putaran rendah. Tidak hanya itu, magnet permanen sangat efisien dalam penggunaan ruang. Sehingga kita tidak terlalu menggunakan ruang yang besar jika dibandingkan dengan generator konvensional dengan kapasitas yang sama jika menggunakan magnet permanen.

Penggunaan magnet permanen pada generator memiliki kekurangan antara lain mahalnya harga untuk penyediaan magnet tersebut. Disamping itu, penggunaan magnet permanen menyebabkan medan utama pada rotor konstan, hal tersebut mengakibatkan tegangan yang dibangkitkan tidak dapat diatur. Sifat utama magnet yang semakin lama kuat medan magnetnya semakin berkurang juga menjadi suatu kelemahan dari penggunaan magnet permanen.

Karena medan utama rotor dihasilkan oleh magnet permanen, generator tidak memerlukan arus DC, sehingga dalam proses pembangkitan energi listrik menjadi lebih mudah dan tidak membutuhkan ruang yang sangat besar.

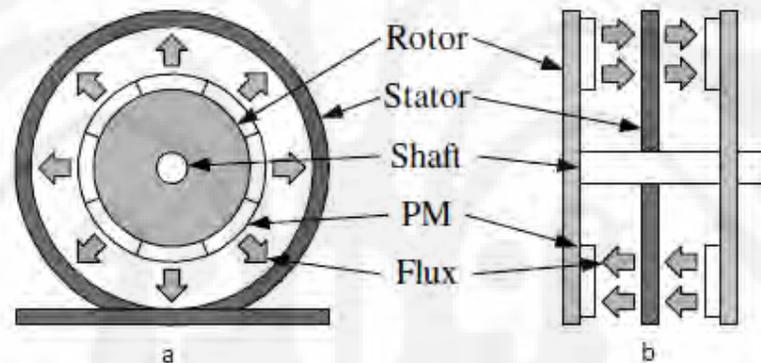
##### **2.1.1 Jenis-jenis**

Generator sinkron yang ada umumnya masih menggunakan fluks radial. Pada generator tipe ini, fluks yang keluar dari rotor berbentuk menyebar atau kesegala

arah. Fluks-fluks yang terbentuk oleh rotor, baik oleh permanen magnet maupun oleh pencatutan arus DC di rotor diarahkan agar memotong kumparan stator, sehingga terjadi GGL induksi.

Bentuk fluks radial yang disebutkan diatas tidak semuanya tertangkap oleh stator. Sebagian fluks yang terbentuk terbuang dan menjadi bagian dari rugi-rugi yang ada pada generator sinkron.

Berbagai cara dilakukan agar fluks yang terbuang dapat dikurangi, Salah satunya dengan mengubah disain dari bentuk fluks yang muncul. Fluks radial di rubah menjadi fluks aksial. Bentuk fluks ini tidak menyebar, dan hanya terarah pada arah aksial. Ini memungkinkan fluks memotong stator lebih baik dari pada fluks generator radial, sehingga efisiensi dari generator dapat lebih ditingkatkan.



**Gambar 2.1** Jenis Generator (a) Radial, (b) Aksial[4]

Penggunaan fluks radial mengharuskan konstruksi generator menjadi lebih besar dan generator menjadi lebih berat[4]. Sehingga untuk beberapa sektor pembangkit fluks ini dianggap kurang efektif.

Dengan berkembangnya teknologi tentang Generator sinkron fluks aksial, memungkinkan dimensi dan berat dari generator menjadi jauh lebih berkurang untuk daya yang sama. Disain fluks aksial juga memiliki efisiensi generator lebih tinggi.

### 2.1.2 Prinsip Kerja

Prinsip kerja generator dengan menggunakan magnet permanen dengan konvensional adalah sama dimana yang membedakan adalah hanya magnet permanen dan besarnya tidak dapat diubah-ubah. Medan magnet permanen ( $B$ )

dari rotor akan menebus bidang kumparan stator sehingga menghasilkan fluks pada stator dengan persamaan

$$\Phi_a = B \cdot A \cos \Theta \quad (2.1)$$

Keterangan:

A = Luas bidang yang ditembus oleh medan magnet

Cos  $\Theta$  = sudut antara B dengan bidang normal

$\Phi_a$  = Fluks pada stator

Flux ( $\Phi_a$ ) akan berubah-ubah karena perubahan  $\Theta$ . Sudut  $\Theta$  berubah karena medan magnet rotor (B) yang bergerak menembus stator dan menghasilkan sudut tembus terhadap bidang normal stator yang berbeda-beda. Perubahan flux terhadap waktu akan menghasilkan ggl induksi dengan persamaan.

$$E_a = -N \frac{d\Phi_a}{dt} \quad (2.2)$$

Tanda negatif pada persamaan 2.2 menunjukkan bahwa arah gaya gerak listrik berlawanan dengan tegangan sumber. Dari persamaan 2.2 terlihat bahwa nilai ggl yang dihasilkan sangat tergantung dari nilai perubahan fluks terhadap waktu.

Penempatan kumparan pada stator sangat menentukan tegangan output dari generator. Tiap pasang kumparan pada stator akan memiliki fasa (sudut) tertentu sehingga jika kita menempatkan 1 pasang kumparan saja, kita akan mendapatkan tegangan output dengan 1 fasa saja.

Namun jika menempatkan 3 pasang kumparan pada stator dengan beda sudut 120 derajat, maka kita akan memperoleh tegangan keluaran dengan fasa yang berbeda 120 derajat juga.

## 2.2 Generator Sinkron Magnet Permanen Fluks Aksial Tipe Cakram

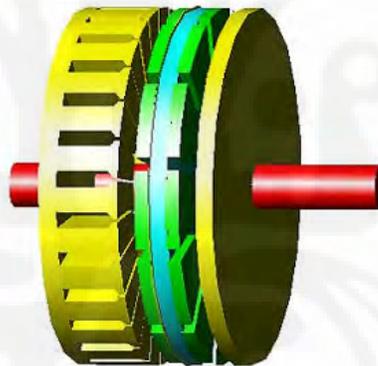
Generator dengan fluks aksial adalah suatu generator dimana arah aliran fluksnya hanya pada salah satu arah aksial saja dengan tujuan mengoptimalkan fluks yang dihasilkan rotor agar dapat digunakan oleh stator. Untuk itu desain dari model generator ini adalah tipe cakram atau disk. Dalam GSMP fluks aksial tipe cakram ini dibagi menjadi beberapa tipe. Tipe tersebut berdasarkan jumlah tingkatan (*stage*), arah fluks, penempatan magnet permanen pada rotor, tipe stator dari generator ini.

### 2.2.1 Tipe Generator Berdasarkan Banyaknya Tingkatan (*stage*)

Generator dengan permanen magnet fluks aksial memiliki banyak tipe dan bentuk sesuai dengan efisiensi dari aplikasi dan kegunaannya. Tentu saja hal ini berkaitan juga mengenai pengembangan dari study tentang generator magnet permanen fluks aksial. Dengan melihat dari berbagai sudut pandang kegunaan dan efisiensi, generator ini dapat dibagi menjadi beberapa tipe yang diantaranya adalah meninjau dari banyaknya stage (banyaknya side dari fluks aksial), dapat juga ditinjau dari bentuk magnet pada rotornya, dan juga dapat ditinjau dari bentuk stator yang dapat dilihat dari ada tidaknya slot pada stator.

#### 2.2.1.1 Satu Tingkat (*Single Stage*)

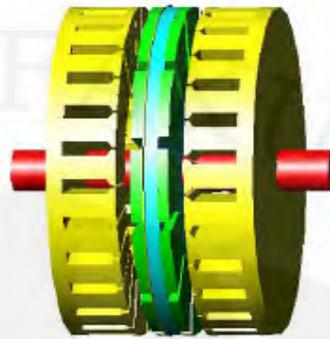
Generator ini terdiri dari sebuah stator dan sebuah rotor. Dengan alasan itulah, generator ini disebut sebagai satu tingkat (*single stage*). Generator ini biasa digunakan pada torsi kecil. Sehingga sangat efektif, bila digunakan pada generator angin dengan kapasitas penggerak yang kecil.



**Gambar 2.2** Bentuk Generator Single Stage[6]

#### 2.2.1.2 Dua Tingkat (*Double Stage*)

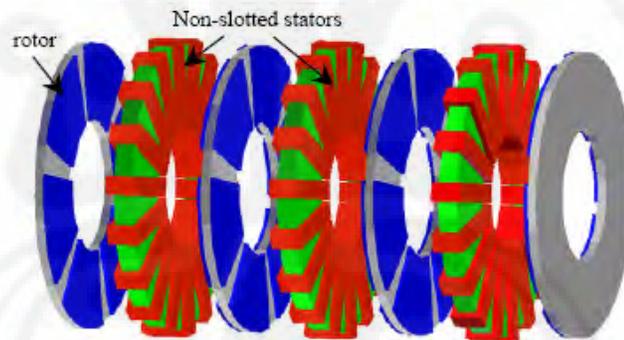
Pada tipe generator ini, dapat dibedakan menjadi dua bagian yaitu generator ini dapat memiliki 2 rotor 1 stator atau memiliki 2 stator 1 buah rotor. Pada aplikasi generator dengan double stage ini biasanya digunakan pada torsi tinggi, sehingga dapat digunakan dengan tenaga berkapasitas besar.



**Gambar 2.3** Bentuk Generator Double Stage dengan Dua Stator[6]

### 2.2.1.3 Banyak Tingkat (*Multi Stage*)

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



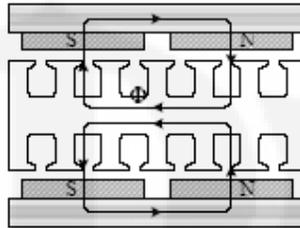
**Gambar 2.4** Bentuk Konstruksi Generator Multi Stage

### 2.2.2 Berdasarkan Arah Fluks

Pada generator dengan tipe yang memiliki 2 rotor dan 1 stator ini dibedakan menjadi dua tipe berdasarkan arah fluksnya yaitu tipe N-N dan tipe N-S. arti dari tipe N-N adalah kutub magnet bagian rotor bawah dan atas adalah sama polaritasnya yaitu utara (*North*) sedangkan untuk tipe N-S polaritas magnet untuk rotor atas dan bawah berbeda yaitu yang bawah utara (*North*) dan yang atas selatan (*South*) atau sebaliknya.

### 2.2.2.1 Tipe N-N

Pada GSMP fluks aksial tipe N-N ini memiliki konstruksi polaritas dari magnet permanen rotor bawah dan atas sama. Aliran fluks dari generator tipe N-N dijelaskan oleh gambar dibawah ini.



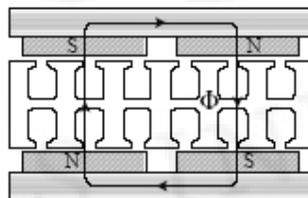
**Gambar 2.5** Arah Fluks pada Tipe N-N[5]

Pada gambar diatas terlihat jelas aliran fluks yang mengalir dari magnet permanen hingga menuju stator. Fluks keluar dari magnet utara bagian bawah menuju stator namun sampai ditengah-tengah stator fluks tersebut berbelok dikarenakan adanya fluks utara yang sama pada rotor bagian atas dan fluks bagian atas ikut berbelok dan melewati arah horizontal stator.

Karena aliran fluks pada tipe N-N tidak menembus seluruh stator dan hanya sampai sebagian lalu bergerak kearah horizontal maka pada stator ini dipasang sebuah inti besi sebagai penyangga stator. Hal ini dikarenakan untuk mengoptimalkan fluks yang bergerak horizontal agar dapat dimanfaatkan oleh stator. Karena menggunakan penyangga stator dengan tujuan mengoptimalkan fluks maka ini membuat ketebalan dari generator ini semakin besar dan lilitan dari tipe ini semakin sedikit.

### 2.2.2.2 Tipe N-S

Pada GSMP fluks aksial tipe N-S ini memiliki konstruksi polaritas dari magnet permanen rotor bawah dan atas yang berlawanan. Aliran fluks dari generator tipe N-S dijelaskan oleh gambar dibawah ini.



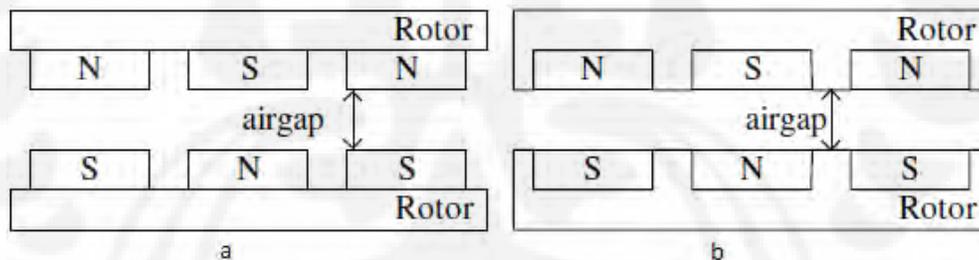
**Gambar 2.6** Arah Fluks pada Tipe N-S[5]

Pada gambar diatas terlihat jelas aliran fluks yang mengalir dari magnet permanen hingga menuju stator. Fluks keluar dari magnet utara bagian bawah menuju stator dan menembus stator hingga menuju magnet permanen pada rotor bagian atas kemudian menuju horizontal dikarenakan beda polaritas antara magnet yang disampingnya.

Karena aliran fluks pada tipe N-S menembus seluruh stator lalu bergerak kearah horizontal ketika fluks sudah sampai pada rotor yang atas maka pada stator ini tidak terlalu dibutuhkan inti besi sebagai penyangga stator. Hal ini dikarenakan fluks sudah dapat dimanfaatkan optimal oleh stator. Karena tidak menggunakan penyangga stator dengan tujuan fluks yang didapatkan oleh stator sudah optimal maka ini membuat ketebalan dari generator ini lebih tipis dan lilitan dari tipe ini semakin banyak.

### 2.2.3 Penempatan dan Tipe Magnet

Ada dua macam cara yang mungkin bisa dilakukan dalam memasang magnet permanen dalam sebuah GSMP FA tipe cakram. Pertama, permanen magnet bisa ditempatkan pada permukaan penyangga rotor dan yang kedua magnet permanen ditanamkan pada penyangga rotor.



**Gambar 2.7** Peletakan Magnet Permanen, (a) Permukaan rotor (b) ditanamkan pada rotor[4]

Pada tipe magnet permanen yang diletakan pada permukaan penyangga rotor akan lebih baik dari pada tipe yang ditanamkan pada rotor karena dengan rotor diletakan dipermukaan penyangga rotor maka ketebalan rotor secara keseluruhan akan lebih kecil dibanding yang kedua sehingga torsi mekanik akan lebih kecil dibandingkan yang kedua. Selain itu untuk tipe yang pertama akan lebih hemat biaya karena proses produksi yang jauh lebih mudah dibandingkan

dengan tipe kedua. Untuk kecepatan tinggi tipe pertama akan dapat mendinginkan stator karena bentuknya yang seperti kipas.

Selain itu magnet pada rotor juga bervariasi bentuk. Bentuk dari magnet :

a. Rektangular

Dengan rotor tipe ini memiliki fungsi untuk generator aatau mesin berkecepatan rendah, aplikasinya untuk turbin angin dengan kecepatan rendah dengan torsi yang dihasilkan rendah pula.

b. Tipe Trapezoidal

Dengan rotor tipe trapezoidal ini memiliki fungsi untuk generator atau mesin berkecepatan rendah dengan torsi yang dihasilkan lebih besar dibandingkan dengan tipe rektangular. Biasanya aplikasinya untuk turbin angin dengan kecepatan angin rendah.

c. Tipe Circular

Dengan rotor tipe ini memiliki fungsi untuk generator atau mesin dengan berkecepatan tinggi.

d. Tipe Semi Circular

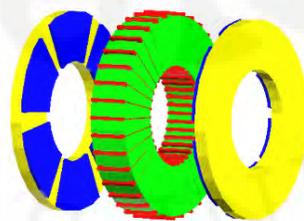
Dengan rotor tipe ini memilki fungsi yang sama dengan circular.

### 2.3 Tipe Stator

Menyesuaikan dari desain pada rotornya dan tipe dari stagenya, generator ini dibedakan menjadi dua jenis yaitu tipe torus dan tipe tanpa inti (*coreless*).

#### 2.3.1 Torus

Pada tipe ini stator pada generator diberikan penyangga yang biasanya berupa inti besi. Hal tersebut dimaksudkan agar inti besi bisa mengoptimalkan fluks yang mengalir dan biasanya torus ini digunakan pada generator dengan tipe N-N.

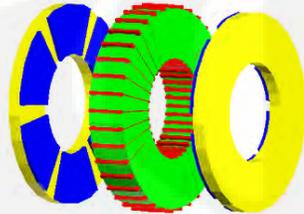


**Gambar 2.8** Generator dengan Tipe Torus[5]

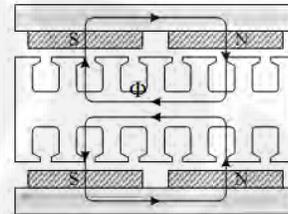
Tipe torus ini juga terdiri dari dua macam yaitu slot dan non slot. Kedua jenis ini hanya dibedakan pada penyangga statornya.

a. Tipe slot

Pada stator tipe slot ini memiliki bentuk stator pada inti besinya terdapat kumparan yang membentuk baris-baris. Selanjutnya dihubungkan dengan di dalam slotnya secara back-to-back.



**Gambar 2.9** Stator Tipe Slot Stator dengan Generator Eksternal Rotor[5]

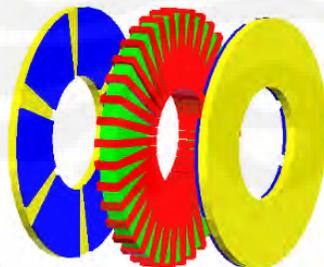


**Gambar 2.10** Arah Fluks pada Tipe Bentuk Slot[5]

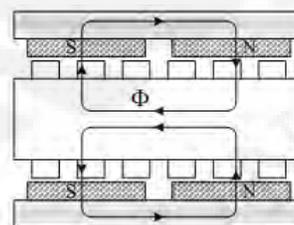
Pada tipe stator dengan slot ini, dapat dilihat bahwa arah fluks mengalir melewati celah antara sisi – sisi pada statornya. Sehingga celah udara yang dilewati oleh fluks ini lebih panjang jika dibandingkan dengan tipe stator dengan non slot. Tentu saja hal ini akan mempengaruhi dari torsi beban yang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

b. Tipe nonslotted

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



**Gambar 2.11** Bentuk stator tipe non slot rotor generator eksternal[5]



**Gambar 2.12** Arah fluks pada non slot stator[5]

Pada stator dengan tipe non slot biasanya antara kumparan diisi dengan resin yang berfungsi sebagai ketahanan dan menghasilkan

transfer panas yang lebih baik. Tidak hanya itu, celah udara antara kumparan digunakan sebagai penghasil torsi.

### 2.3.2 Stator Tanpa Inti (*Coreless*)

Pada stator tanpa inti (*coreless*) biasanya digunakan untuk putaran rendah. Lilitan dari tipe stator ini biasanya jauh lebih banyak dari tipe yang lain dikarenakan tidak adanya inti atau penyangga pada stator. Biasanya stator ini digunakan untuk generator tipe N-S.



**Gambar 2.13** Stator Tanpa Inti

Stator ini dibagi menjadi dua tipe:

1. Menumpuk (Overlapping)

Pada tipe ini susunan statornya menumpuk dan saling tumpang tindih.

Susunan fasa yang bertindihan saling berbeda satu sama lainnya.



**Gambar 2.14** Overlapping Stator[4]

2. Tidak Menumpuk (non-Overlapping)

Pada tipe ini susunan statornya tidak menumpuk dan tidak saling tumpang tindih. Susunan fasa saling berbeda satu sama lainnya.



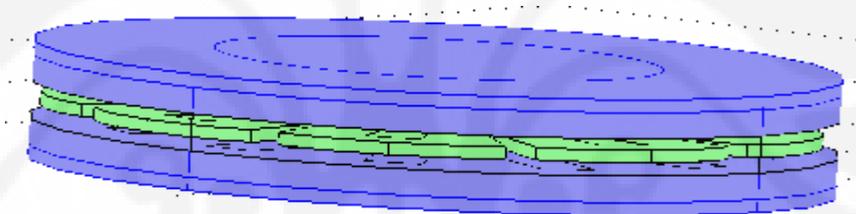
**Gambar 2.15** Non overlapping stator[4]

## BAB 3 PERMODELAN DAN SIMULASI

### 3.1 Model

Model GSMP FA ini berbentuk seperti sebuah cakram. Model ini dibuat dengan menggunakan perangkat lunak “COMSOL Multiphysics 3.5”. Penggunaan perangkat lunak tersebut karena dengan perangkat lunak COMSOL Multiphysics 3.5 model dari GSMP FA ini dapat kita simulasikan dan kita dapatkan fluks serta tegangan yang dihasilkan.

Desain model yang dibuat adalah sebuah generator magnet permanen fluks aksial rotor ganda stator tunggal tanpa menggunakan inti stator.



Gambar 3.1 GSMP FA Rotor Ganda Stator Tunggal

Gambar 3.1 menunjukkan bahwa generator tersebut seperti piringan yang terdiri dari satu stator dimana stator tersebut berada diantara rotor dimana dalam generator ini terdapat dua buah rotor atau rotor ganda. Dalam generator diatas stator tidak menggunakan inti besi sehingga desain ini tidak seperti desain generator tipe torus. Dalam permodelan ada beberapa dimensi yang mengacu pada jurnal[2].

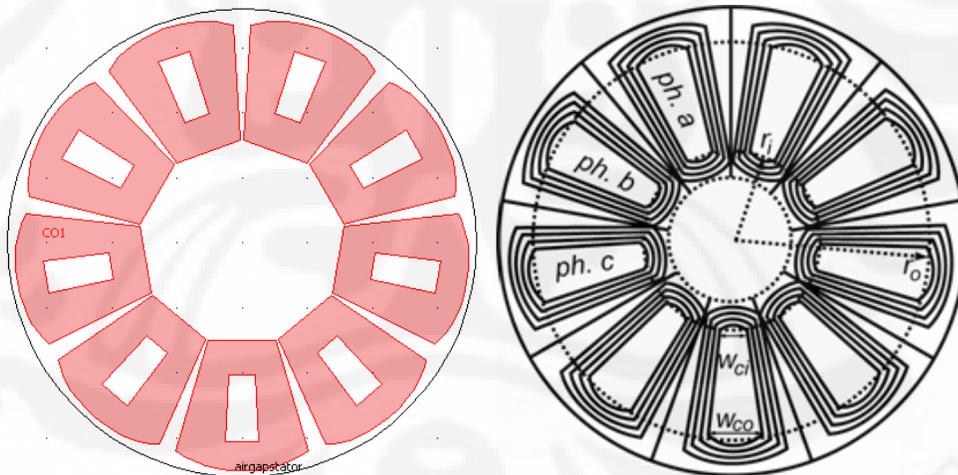
#### 3.1.1 Stator

Desain Stator dalam jurnal[2] adalah stator yang tidak menggunakan inti besi seperti generator tipe torus. Model stator pada generator ini hanya sebuah lilitan kawat yang tengahnya adalah suatu udara. Jumlah stator pada desain ini adalah 9 stator. Dimensi stator pada jurnal[2] tidak didefinisikan sehingga dimensi desain stator dari permodelan dari skripsi ini tidak mengikuti jurnal tersebut.

Stator dalam permodelan dalam skripsi ini berbentuk trapezoid dengan tembaga (Cu) sebagai bahan stator. Untuk penyusunan statornya dalam permodelan ini dibuat *non-overlapping* atau tidak menumpuk dengan tidak menggunakan inti stator (*coreless*). Desain stator yang dibuat adalah sebagai berikut:

Tabel 3.1 Dimensi Stator

| Dimensi | Jumlah | Satuan  | Keterangan                | Bidang |
|---------|--------|---------|---------------------------|--------|
| ts      |        | 0.006   | Ketebalan stator          | xy     |
| ro      |        | 0.1524  | Jari-jari stator luar     | xy     |
| ri      |        | 0.1016  | Jari-jari stator dalam    | xy     |
| wco     |        | 0.0254  | Lebar stator luar         | xy     |
| wci     |        | 0.02032 | Lebar stator dalam        | xy     |
| N       |        | 100     | Jumlah lilitan stator     |        |
| Ns      | 9      |         | Banyaknya Kumparan Stator |        |
| Nph     | 3      |         | Jumlah fasa pada stator   |        |



Gambar 3.2 Konstruksi Model Stator[2]

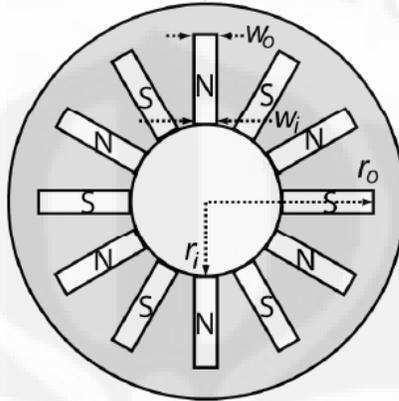
### 3.1.2. Rotor

Desain rotor dalam permodelan generator magnet permanen fluks aksial ini berbentuk rektanguler atau persegi. Magnet permanen yang digunakan adalah NdFeB (Neodymium Iron Boron) dengan  $B_r$  1,27 T dan  $H_c = 905$  kA/m . Dalam permodelan

ini rotor didesain untuk berada dipermukaan penyangga rotor seperti pada gambar 2.7

a. Dimensi rotor pada model ini mengacu pada jurnal yang diterbitkan oleh Price [1].

Dimensi Stator dari permodelan Generator adalah:



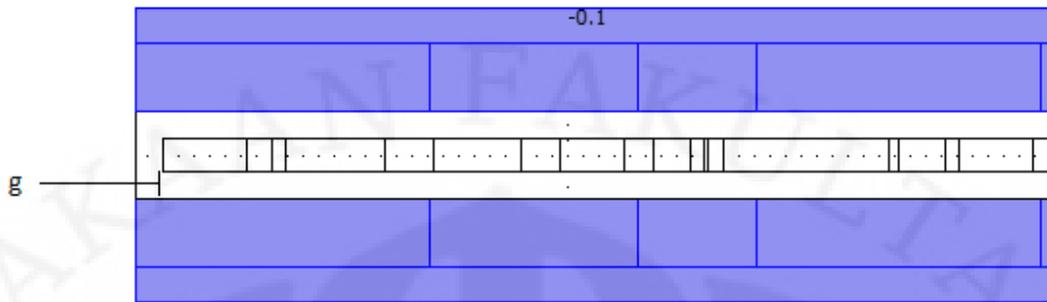
Gambar 3.3 Konstruksi Rotor [2]

Table 3.2 Dimensi rotor dan magnet

| Rotor 12 Pole |         |  |        |
|---------------|---------|--|--------|
| Dimensi       | meter   | Keterangan                             | Bidang |
| $r_{yo}$      | 0.18    | Jari-jari penyangga rotor bagian luar  | xy     |
| $r_{yi}$      | 0.1     | Jari-jari penyangga rotor bagian dalam | xy     |
| $t_y$         | 0.00635 | Tebal penyangga                        | z      |
| Magnet Rotor  |         |  |        |
| Dimensi       | meter   | Keterangan                             | Bidang |
| $r_o$         | 0.1524  | Jari-jari magnet bagian luar           | xy     |
| $r_{in}$      | 0.1016  | Jari-jari magnet bagian dalam          | xy     |
| $w_o$         | 0.0254  | Lebar magnet bagian luar               | xy     |
| $w_i$         | 0.0254  | Lebar magnet bagian dalam              | xy     |
| $t_m$         | 0.0127  | Tebal magnet                           | z      |

### 3.1.3 Celah udara

Dalam model GSMP FA pada jurnal [2] celah udara yang dimaksud adalah jarak antara rotor atas dengan rotor bawah. Pada model tersebut celah udara yang digunakan adalah 0,018 m. Namun dalam permodelan skripsi ini celah udara yang dimaksud adalah jarak antara permukaan rotor dengan permukaan stator seperti yang ditunjukkan gambar dibawah ini.



Gambar 3.4 Celah udara

Data Celah Udara

Tabel 3.3 Celah udara

| Celah udara (g) | Meter (m) |
|-----------------|-----------|
| $g_1$           | 0,005     |
| $g_2$           | 0,006     |
| $g_3$           | 0,007     |
| $g_3$           | 0,008     |
| $g_3$           | 0,009     |

### 3.2 Persamaan yang Digunakan Dalam Model

Dalam model generator sinkron magnet permanen fluks aksial ini menggunakan persamaan-persamaan untuk mendapatkan bilai keluaran berupa fluks dan tegangan. Persamaan tersebut akan diuraikan seperti dibawah ini.

#### 3.2.1 Persamaan Fluks Pada Permukaan Stator

Dalam Model ini digunakan suatu magnet permanen dengan bahan *Neodymium Iron Boron* (NdFeB) dengan intensitas medan magnet tetap. Medan Magnet ini akan memotong kumparan dari stator.

Persamaan kerapatan fluks magnet pada rotor model ini adalah:

$$B = \mu_0 \mu_r H + B_r \quad (3.1)$$

Dimana:

B = Kerapatan fluks magnet (T)

$B_r$  = Kerapatan fluks sisa pada magnet (T)

H = Intensitas medan magnet (A/m)

$\mu_0$  = Permeabilitas ruang hampa ( $4\pi \times 10^{-7}$  H/m)

$\mu$  = Permeabilitas relatif suatu bahan

Dengan Permen magnet NdFeB maka nilai Br dan H adalah tetap. Nilai Br dan H yang digunakan diambil dari salah satu jurnal yaitu dengan Br 1,27 T dan H 905 kA/m.

### 3.2.2 Persamaan Kerapatan Fluks Pada Celah Udara

Sedangkan untuk mengetahui besar medan magnet dengan tinggi celah udara tertentu adalah sesuai dengan persamaan yang didapat dari jurnal [2]:

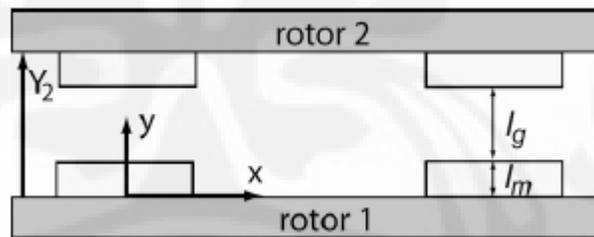
$$B_{y1}(x) = \left( \frac{J_n \mu_0 \sinh(u_n l_m)}{u_n \sinh(u_n Y_2)} \cosh(u_n (Y_2 - y)) \right) \cos(u_n x) \quad (3.2)$$

$$B_{y2}(x) = \left( \frac{J_n \mu_0 \sinh(u_n l_m)}{u_n \sinh(u_n Y_2)} \cosh(u_n (y)) \right) \cos(u_n x) \quad (3.3)$$

Dimana

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

P adalah jumlah pasangan kutub,  $R_m$  adalah jari-jari inti.  $B_{y1}$  adalah kerapatan fluks pada titik y karena pengaruh pada rotor 1 dan  $B_{y2}$  adalah kerapatan fluks pada titik y karena pengaruh rotor 2. Hal ini akan diperjelas dengan gambar dibawah ini.



Gambar 3.5 Model dan sistem koordinat distribusi kerapatan fluks

### 3.2.3 Persamaan Tegangan Induksi Stator

Tegangan yang menginduksi stator didapatkan oleh suatu perubahan medan magnet yang menembus suatu luasan bidang pada stator dalam satuan waktu.

$$E = -NN. \frac{\delta\Phi}{\delta t} \quad (3.4)$$

$$E = -NN.A. \frac{\delta B}{\delta t} \quad (3.5)$$

E = Tegangan Induksi Stator

NN = Jumlah lilitan

B = Kerapatan Fluks Magnet

A = Luas Daerah yang ditembus medan magnet

Pada model ini fluks yang didapat dari medan magnet yang menembus stator dengan perubahan waktu akan mendapatkan suatu tegangan induksi. Perangkat lunak tersebut akan menyelesaikan besarnya fluks yang ada untuk waktu tertentu. Selanjutnya digunakan penghitungan manual dengan menggunakan persamaan diatas.

### 3.3 Simulasi

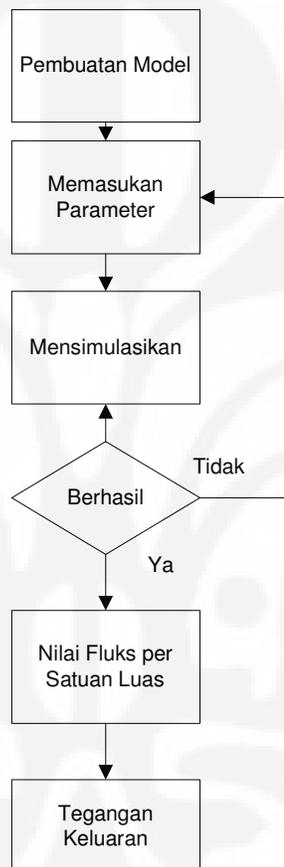
Model ini disimulasikan dengan menggunakan perangkat lunak “COMSOL Multiphysics 3.5”. Dengan menggunakan perangkat lunak ini kita dapat mengetahui flux yang menembus bidang stator dengan perubahan waktu 0,001 detik hingga detik ke 0,019 detik.

Ada banyak faktor yang mempengaruhi keluaran gelombang tegangan dan fluks namun semua faktor tetap kecuali celah udara. Simulasi ini mengambil celah udara sebagai faktor tidak tetap dengan kecepatan generator 600 rpm dan kecepatan tersebut dianggap kecepatan maksimum. Selain itu ada beberapa konstanta yang dimasukkan dalam simulasi ini seperti yang ada pada tabel 3.4.

Tabel 3.4 Nilai konstanta

| Konstanta  | Nilai     | Satuan  | Keterangan      |
|------------|-----------|---------|-----------------|
| rpm        | 600       | [1/min] | Putaran         |
| t          | 0 - 0,019 | [s]     | Waktu           |
| $\Delta t$ | 0.001     | [s]     | Perubahan waktu |
| L          | 0,006     | [m]     | Tebal stator    |
| NN         | 100       |         | lilitan         |

Diagram alir untuk proses simulasi sampai mendapatkan nilai tegangan yang dihasilkan dari model generator ini ditunjukkan pada gambar dibawah ini.



Gambar 3.6 Diagram Alir Simulasi

## BAB 4

### HASIL SIMULASI DAN ANALISA

#### 4.1 Data Permodelan Simulasi

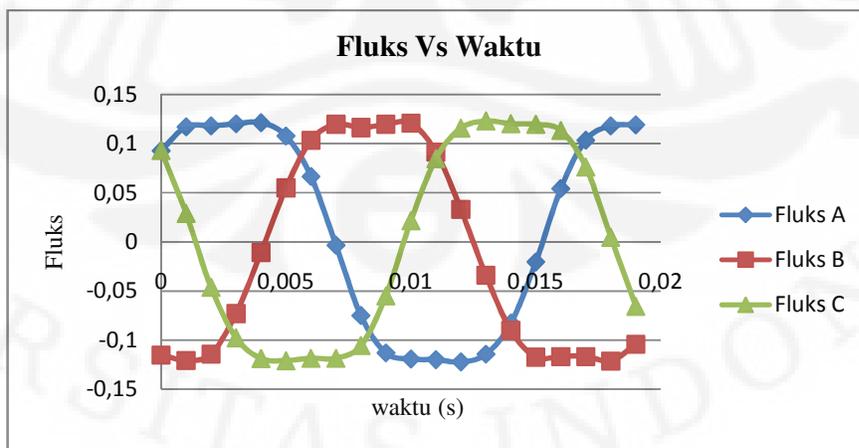
Simulasi dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak COMSOL Multiphysics versi 3.5 dimana perangkat lunak tersebut berbasis metode FEM (*Finite Element Methods*). Data yang digunakan untuk mensimulasikan model dalam skripsi ini dalam beberapa hal mengacu pada jurnal[1] seperti diameter generator dan rotor seperti yang dijelaskan pada bab sebelumnya. Namun untuk sikripsi ini dilakukan suatu perubahan dalam bentuk stator dan celah udara.

Simulasi ini dilakukan dengan putaran generator tetap 600 rotasi per menit (rpm) dan jumlah lilitan 100 setiap kumparan stator. Simulasi ini juga menggunakan 12 kutub magnet permanen pada rotor dan memiliki 9 buah kumparan stator. Waktu pengambilan data mulai dari detik ke 0 sampai detik ke 0,019 karena sampai detik ke 0,019 hasil gelombang tegangan sudah terbentuk 1 gelombang penuh. Selain itu tegangan 50 volt dijadikan tegangan tetap dimana dengan acuan 50 volt dan dengan kecepatan 600 rpm maka didapatkan air gap yang tepat dan optimal.

#### 4.2 Hasil Simulasi

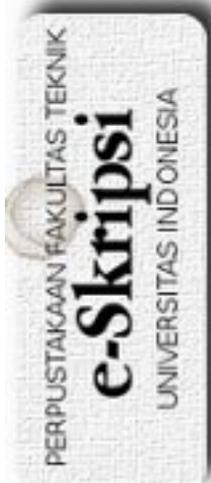
##### 4.2.1 Simulasi dengan celah udara 0.005 m

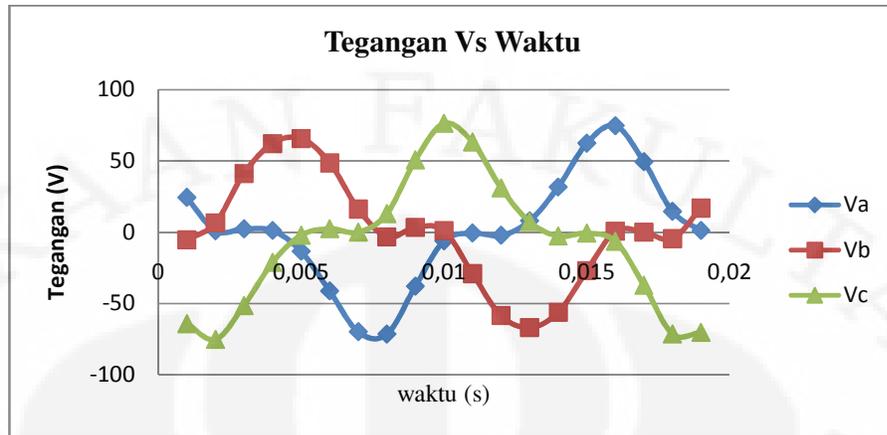
###### a. Keluaran Fluks



Gambar 4.1 Grafik Fluks dengan waktu pada celah udara 0,005m

###### b. Keluaran Tegangan

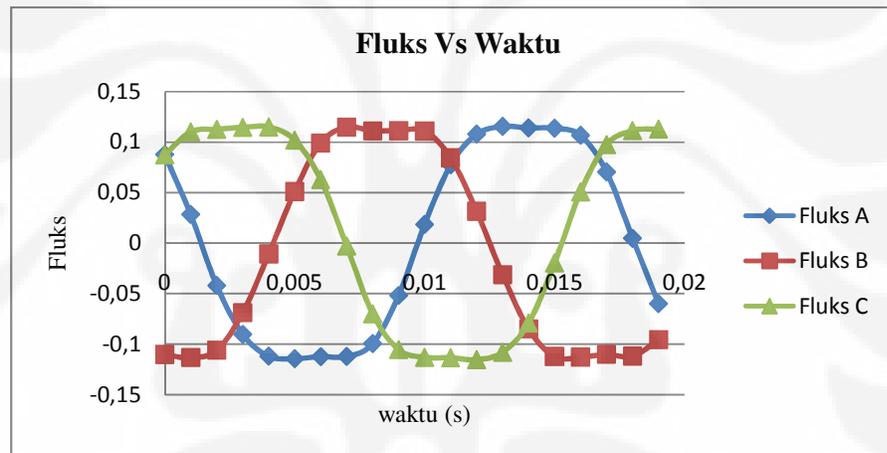




Gambar 4.2 Grafik tegangan dengan waktu pada celah udara 0.005m

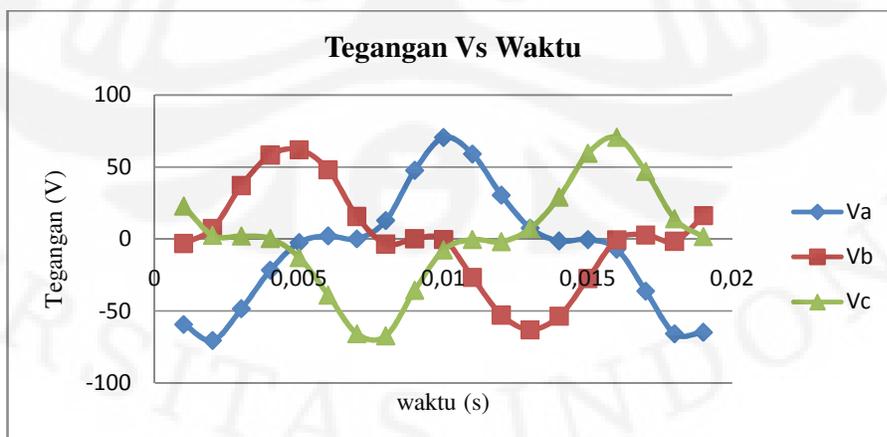
4.2.2 Simulasi dengan celah udara 0.006 m

a. Keluaran Fluks



Gambar 4.3 Grafik Fluks dengan waktu pada celah udara 0.006 m

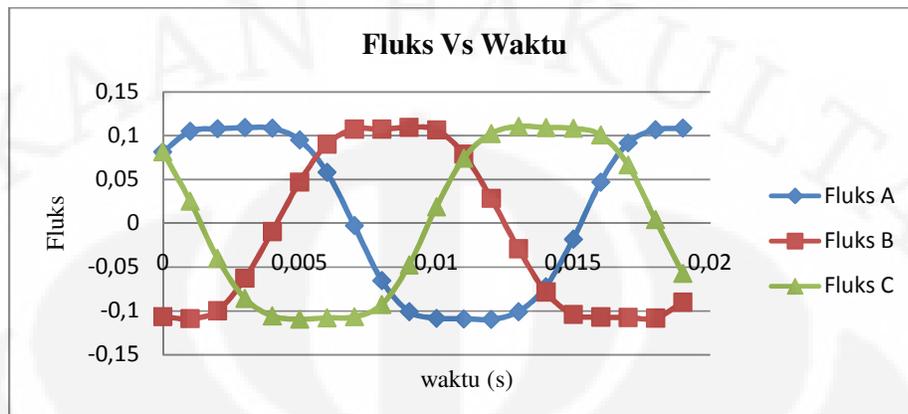
b. Keluaran Tegangan



Gambar 4.4 Grafik tegangan dengan waktu pada celah udara 0.006 m

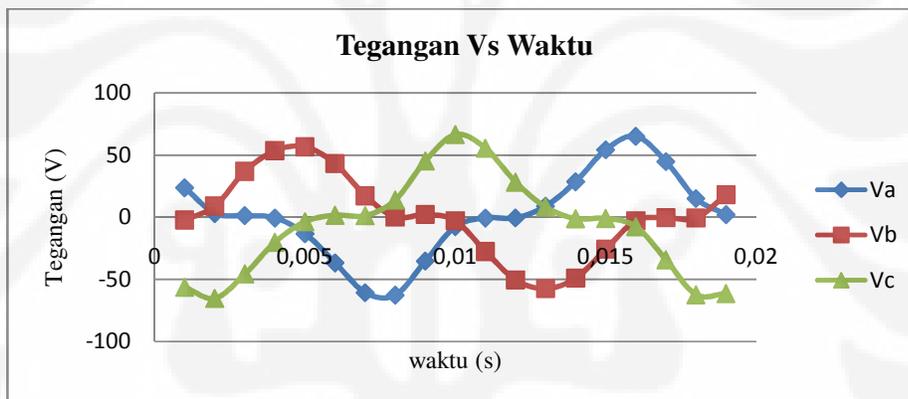
#### 4.2.3 Simulasi dengan celah udara 0.007 m

##### a. Keluaran Fluks



Gambar 4.5 Grafik Fluks dengan waktu pada celah udara 0.007 m

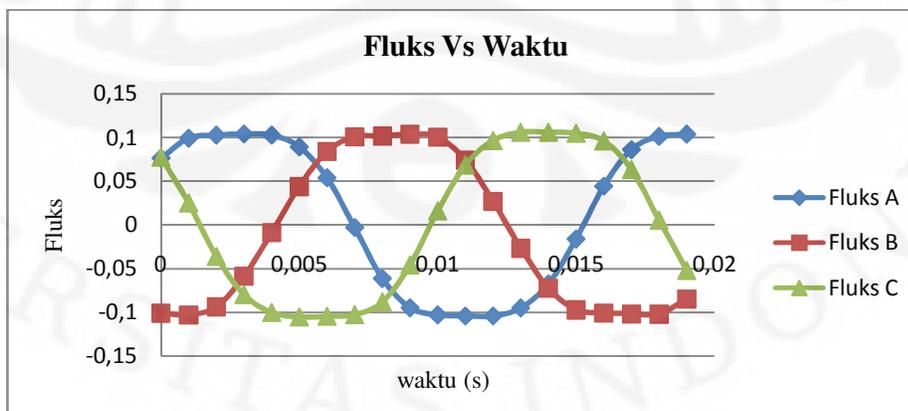
##### b. Keluaran Tegangan



Gambar 4.6 Grafik tegangan dengan waktu pada celah udara 0.007 m

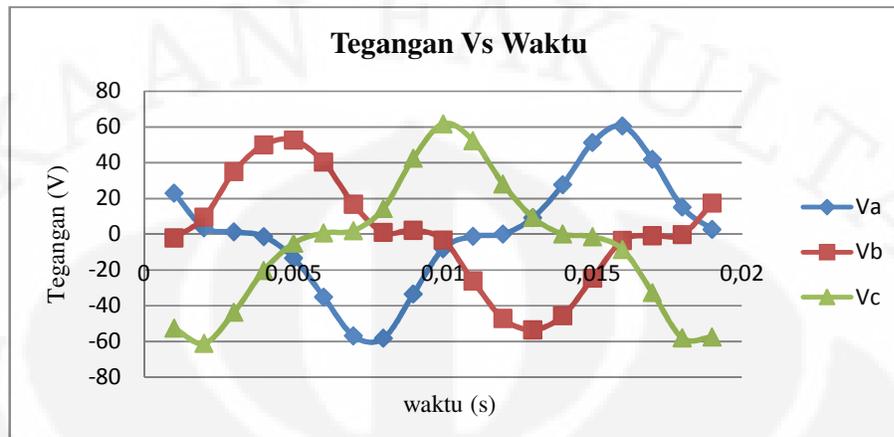
#### 4.2.4 Simulasi dengan celah udara 0.008 m

##### a. Keluaran Fluks



Gambar 4.7 Grafik Fluks dengan waktu pada celah udara 0.008 m

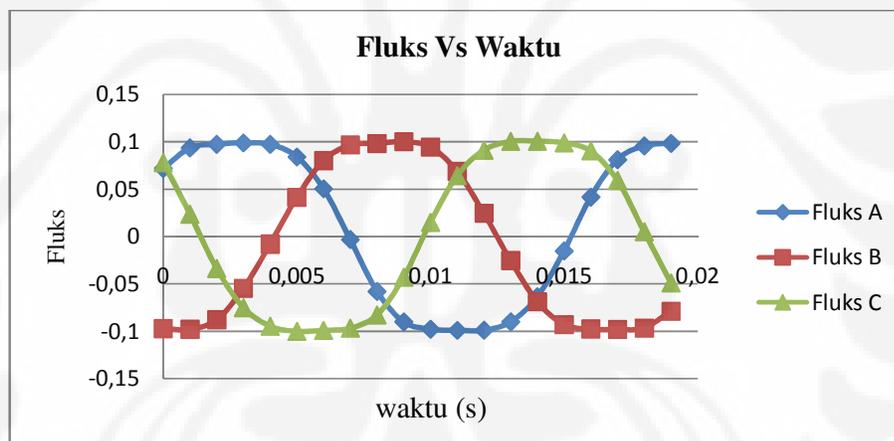
## b. Keluaran Tegangan



Gambar 4.8 Grafik tegangan dengan waktu pada celah udara 0.008 m

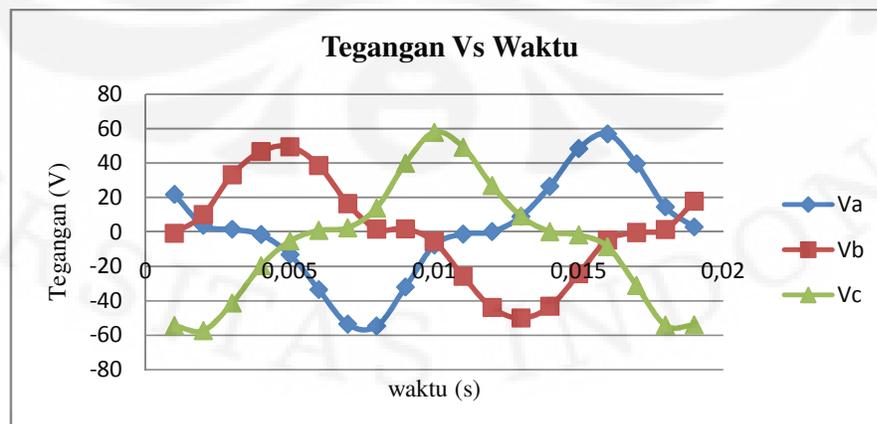
## 4.2.5 Simulasi dengan celah udara 0.009 m

## a. Keluaran Fluks



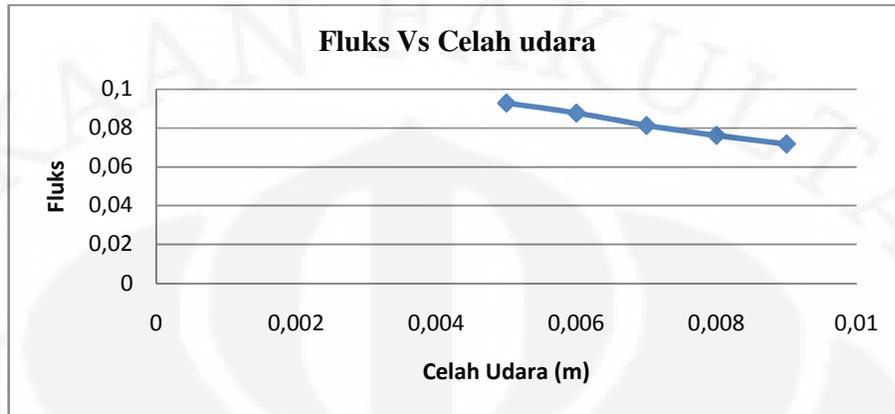
Gambar 4.9 Grafik Fluks dengan waktu pada celah udara 0.009 m

## b. Keluaran Tegangan



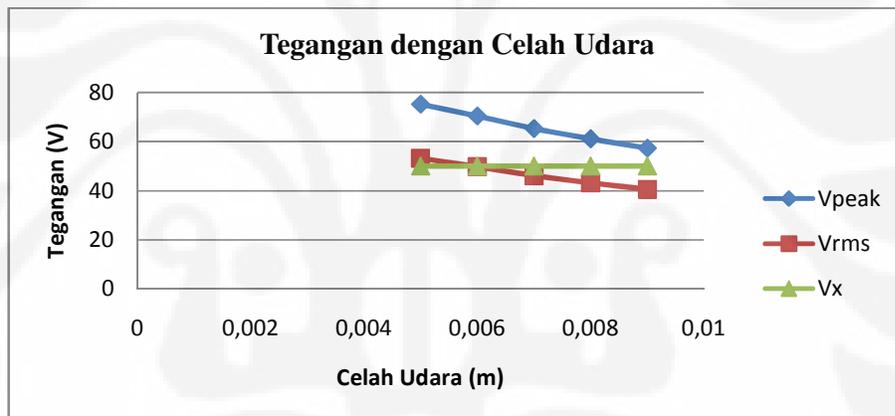
Gambar 4.10 Grafik tegangan dengan waktu pada celah udara 0.009 m

## 4.2.6 Hubungan Fluks Dengan Celah Udara



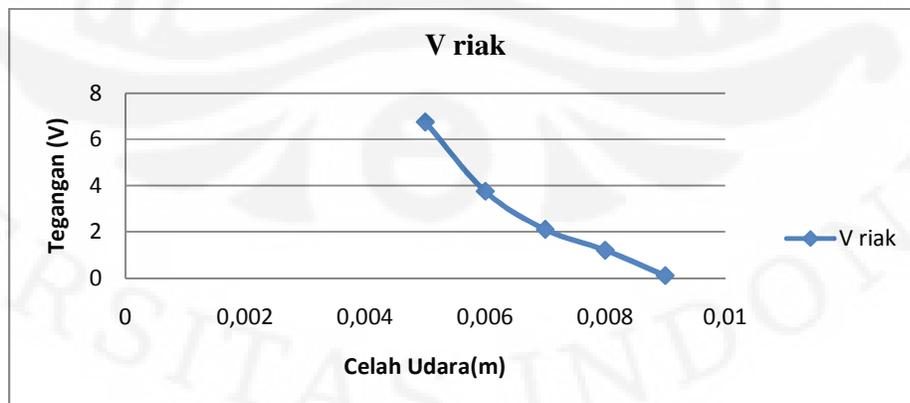
Gambar 4.11 Grafik fluks dengan celah udara

## 4.2.7 Hubungan Tegangan Puncak dengan Celah Udara



Gambar 4.12 Grafik tegangan puncak, tegangan rata-rata dengan celah udara serta tegangan yang diinginkan

## 4.2.8 Hubungan Tegangan Riak dengan Celah Udara



Gambar 4.13 Grafik Tegangan Riak dengan Celah Udara

### 4.3 Analisa Hasil Simulasi

#### 4.3.1 Simulasi dengan celah udara 0.005 m putaran 600 rotasi per menit

##### a. Keluaran Fluks

Hasil simulasi menunjukkan nilai fluks pada tiap fasa dari waktu 0 detik sampai waktu ke 0,019 detik. Jika kita lihat data pertama saat  $t$  sama dengan nol (0) pada fasa A didapatkan nilai fluks dari hasil simulasi adalah 0,0928. Sedangkan jika kita bandingkan data ke 2 yaitu pada saat  $t$  sama dengan 0,001 detik didapatkan nilai fluks yang lebih besar. Hal ini dapat terjadi dikarenakan kumparan stator dengan magnet pada rotor koordinat bidang  $xy$  tidak terlalu dekat sehingga fluks yang melewati permukaan stator akan berkurang. Oleh karena itu nilai fluks yang melewati stator lebih kecil dari  $t$  sama dengan 0,001 detik dimana fluks yang didapat 0,1171. Jika dilihat fasa A maka waktu saat fluks yang melewati permukaan stator paling besar atau pada saat koordinat bidang  $xy$  antara stator dan rotor hampir sama adalah  $t$  sama dengan 0,012 yaitu sebesar -0,1222 dimana tanda minus hanyalah polaritasnya negatif namun nilainya adalah harga mutlak dari nilai tersebut yaitu 0,1222.

##### b. Keluaran Tegangan

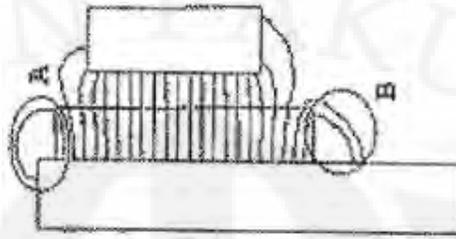
Dengan fluks yang didapat dari gambar 4.2 maka akan didapatkan keluaran tegangan tersebut. Dari data yang didapatkan tegangan puncak pada celah udara 0,005 m adalah 76,3 volt. Tegangan tersebut didapat dengan menggunakan persamaan 3.4 dimana  $\Phi_1$  -0,0548 dan  $\Phi_2$  0,0215 dengan perubahan waktu 0,001 maka

$$ggl = \frac{0,0215 - (-0,054)}{0,001} = 76,3 \text{ volt}$$

Jika kita melihat grafik tegangannya maka akan ada suatu fenomena yaitu gelombang tersebut tidak benar-benar sempurna ada suatu riak pada detik 0,002, 0,003 dan 0,004. Pada  $t$  tersebut nilai tegangannya adalah 0,9 volt, 2,2 volt dan 1,1 volt. Seharusnya suatu gelombang sinusoidal tegangannya akan turun sampai akhirnya ke titik puncak polaritas negatif lalu kemudian naik sampai puncak polaritas positif lalu kembali turun.

Fenomena riak ini dapat terjadi karena fluks bocor antara magnet permanen dan atau fluks bocor untuk satu magnet permanen yang suatu waktu yaitu pada saat  $t$  0,003 detik menjadi lebih kecil dikarenakan posisi rotor dengan

stator yang tepat. Fenomena tersebut seperti gambar 4.15 dibawah ini. Besarnya riak pada grafik berwarna merah adalah 6,75 volt.



Gambar 4.15 Fluks bocor pada rotor[3]

4.3.2 Simulasi dengan celah udara 0.006 m putaran 600 rotasi per menit

a. Keluaran Fluks

Dalam gambar kita mendapatkan nilai fluks tertinggi berada pada saat  $t = 0,013$  detik dimana fluksnya adalah 0,1155. Ini menunjukkan bahwa posisi magnet pada rotor sangat dekat atau hampir sama dengan posisi stator sehingga fluks yang ditangkap adalah yang terbesar. Grafik fluks merupakan grafik sinusoidal namun jika kita mencermati grafik kembali maka akan terlihat ada penurunan disatu titik atau disatu waktu kemudian naik kembali lalu kemudian turun secara sinusoidal. Hal ini juga akibat adanya fluks bocor yang ditentukan oleh posisi antara rotor dan stator.

b. Keluaran Tegangan

Pada gelombang keluaran tegangan kita dapat melihat bahwa nilai paling tinggi adalah 70,5 volt pada  $t$  sama dengan 0,016 detik. Dari data tabel dan masih terdapat riak yang diakibatkan adanya fluks bocor dan menghasilkan tegangan riak untuk grafik berwarna merah adalah 3,75 volt. Nilai riak berkurang sekitar setengah dari tegangan riak pada celah udara 0,005 m. Hal ini karena pengaruh dari celah udara yang semakin menjauh dari stator.

4.3.3 Simulasi dengan celah udara 0.007 m putaran 600 rotasi per menit

a. Keluaran Fluks

Data gambar menunjukkan bahwa pada saat  $t$  sama dengan 0,012 detik dimana nilai fluksnya adalah 0,1097 dengan polaritas negatif. Dari grafik fluks terlihat bahwa untuk fluks A dan C sudah sesuai karena sudah tidak ada riak. Hanya pada fluks B yang memiliki sedikit riak. Hal tersebut dikarenakan dari pengaruh fluks bocor antara magnet permanen dan penempatan desain magnet dan

stator. Dimana ketika ada disuatu titik dan pada waktu tertentu fluks bocor berkurang karena posisi rotor dan stator yang mengakibatkan hal tersebut. Dalam hal ini grafik B masih mengalami hal ini.

b. Keluaran Tegangan

Pada simulasi dengan celah udara 0,007 m didapat tegangan maksimum sebesar 66,4 volt pada detik ke 0,01. Dari grafik diatas terlihat riak kecil pada grafik warna merah sebesar 2,1 volt. Tegangan riak ini menjadi lebih kecil dari tegangan riak pada celah udara 0,006 m.

4.3.4 Simulasi dengan celah udara 0.008 m putaran 600 rotasi per menit

a. Keluaran Fluks

Dari gambar kita dapat mengetahui bahwa nilai dari fluks yang dihasilkan pada detik nol adalah sebesar 0,0762 dimana besar fluks ini lebih kecil dari fluks pada celah udara 0,007 m dimana nilai fluks adalah 0,0813. Pada grafik ini terlihat riak kecil pada saat t sama dengan 0,008 detik.

b. Keluaran Tegangan

Dari grafik didapatkan tegangan puncak adalah 61,7 volt pada t adalah 0,01 detik. Grafik Va dan Vc sudah tidak memiliki riak tegangan. Namun untuk Vb masih terlihat riak kecil pada t sama dengan 0,09 detik. Nilai dari tegangan riak tersebut adalah sebesar 1,2 volt. Nilai tegangan riak ini juga jauh lebih kecil dari sebelumnya.

4.3.5 Simulasi dengan celah udara 0.009 m putaran 600 rotasi per menit

a. Keluaran Fluks

Nilai fluks pada saat t sama dengan nol adalah 0,0718 dimana nilai ini lebih kecil dari data sebelumnya. Dari grafik ini hanya grafik berwarna merah yang terlihat riak kecil pada saat t adalah 0,008 detik. Sedangkan untuk dua grafik lainnya tidak terlihat adanya riak. Hal tersebut karena fenomena fluks bocor antara magnet permanen dengan posisi rotor dan stator dalam model.

b. Keluaran Tegangan

Untuk celah udara 0,009 m tegangan puncak yang dihasilkan adalah 57,9 volt pada saat t sama dengan 0,01 detik. Pada grafik ini hanya pada grafik Vb yang terdapat riak kecil pada detik 0,008 dan 0,009. Besarnya tegangan riak tersebut adalah 0,1 volt.

#### 4.3.6 Hubungan fluks dengan celah udara

Pada gambar 4.11 untuk waktu sama dengan nol kita mengetahui bahwa terdapat suatu hubungan dimana semakin besar celah udara maka nilai fluks yang tertangkap pada stator. Hubungan antara fluks dengan celah udara tidak linear ini bisa dilihat dari grafik terdapat lekukan garis. Jika grafik tersebut diperpanjang akan membuat grafik hiperbola. Hal tersebut sesuai dengan persamaan 3.2 dan 3.3.

#### 4.3.7 Hubungan tegangan puncak dan tegangan rms dengan celah udara

Jika dilihat dari grafik dan tabel maka hubungan antara tegangan puncak dengan celah udara adalah celah udara diperbesar maka tegangan puncak yang dihasilkan akan lebih kecil. Namun hubungan antara tegangan puncak dengan celah udara tidak berupa garis lurus. Jika diperhatikan dari data grafik maka akan terlihat ada lekukan dalam grafik tersebut. Jika dipanjangkan maka akan ada hubungan nonlinear.

Hal ini sesuai dengan teori atau persamaan 3.2 dan persamaan 3.3 dimana disana dijelaskan jika celah udara semakin besar akan berpengaruh pada fluks yang semakin kecil. Selain itu nilai tegangan ini tidak linear dikarenakan persamaan 3.2 dan 3.3 bukan persamaan linear melainkan persamaan hiperbola.

Dari hasil grafik diatas diketahui bahwa nilai celah udara yang paling optimal untuk tegangan tetap 600 rpm adalah 0,006 m dimana tegangan rms yang dihasilkan adalah sesuai dengan nilai yang dicari yaitu 50 volt.

#### 4.3.8 Hubungan tegangan riak dengan celah udara

Dengan data diatas diketahui bahwa semakin besar celah udara maka tegangan riak akan semakin kecil. Hal ini dikarenakan tegangan riak memiliki hubungan yang sama dengan tegangan puncak yaitu jika tegangan puncak berkurang karena pengaruh celah udara maka nilai dari tegangan riak akan berkurang karena memiliki sumber dan pengaruh yang sama seperti tegangan puncak.

## BAB 5

### KESIMPULAN

1. Untuk tegangan yang diinginkan yaitu 50 Volt maka celah udara yang optimal adalah 6 mm karena pada celah udara tersebut tegangan puncak yang dihasilkan adalah 70,5 Volt sehingga dihasilkan tegangan rms menjadi 49,85 Volt dimana hasil ini yang paling mendekati nilai tegangan yang diinginkan.
2. Fluks dan tegangan yang dihasilkan oleh generator sinkron magnet permanen fluks aksial akan berkurang jika celah udara antara rotor dengan stator diperbesar hal ini dikarenakan celah udara menjadi penghambat intensitas medan magnet mengenai stator. Tegangan riak akan berkurang sangat signifikan seiring dengan bertambahnya celah udara karena semakin berkurangnya intensitas medan magnet akibat celah udara.
3. Tegangan puncak yang dihasilkan untuk kecepatan 600 rpm dengan celah udara antara 5 sampai 9 mm adalah 76,3 Volt sampai 57,9 Volt dan ini merupakan tegangan yang cukup besar dengan ukuran generator yang hanya 0,18 m.
4. Tegangan riak yang ditimbulkan untuk celah udara antara 5 mm sampai 9 mm adalah 6.75 V, 3.75 V, 2.1 V, 1.2V, 0.1V.
5. Adanya tegangan riak dalam gelombang tegangan dikarenakan adanya fluks bocor dan *fringing effect*. Tegangan riak ini akan menjadi rugi-rugi dalam generator.



## DAFTAR ACUAN

- [1] Sadeghierad, M., H. Lesani, H. Monsef, dan A. Darabi.( 2009).”*Air Gap Optimization of High-Speed Axial Flux PM Generator.*” Asian Network for Scientific Information.
- [2] Price, Garrison F., Todd D. Batzel, Mihai Comanescu, dan Bruce A. Muller.”*Design and Testing of a Permanent Magnet Axial Flux Wind Power Generation.*” Pennsylvania State University, Altoona College.
- [3] Sadeghierad, M., H. Lesani, H. Monsef, dan A. Darabi.( 2009).”*Detail Modeling of High Speed Axial Flux Pm Generator.*” INSInet Publication.
- [4] Rossouw, Francois Gerhardus.(2009).”*Analysis and Design of axial Flux Permanent Magnet Wind Generator System for Direct Battery Charging Applications.*” Thesis, University of Stellenbosch, Afrika Selatan, hal 22-43.
- [5] Aydin, Metin., Surong Huang, Thomas A. Lipo,”*A New Axial Flux Surface Mounted Permanent Machine Capable of Field Control.*”IEEE.
- [6]Chen, Yicheng., Pragasen., Khan.(2004).”*PM Wind Generato Comparasion of Different Topologies.*”IEEE



## DAFTAR PUSTAKA

- Marignetti, Fabrizio., Vincenzo, dan Yuri.(2008).”*Design of Axial Flux PM Synchronous Machines Through 3-D Coupled Electromagnetic Thermal and Fluid-Dynamical Finite-Element Analysis.*”IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol.55, N0.10.
- Chen, Yicheng., Pragasen, dan Azeem,”*PM Wind Generator Comparison of Different Topologies.*”IEEE.
- Chen, Yicheng dan Pragasen,”*Axial-flux PM Wind Generator with A soft Magnetic Composite Core.*”IEEE.
- Moury, Sanjida.(2009).”*Design of Low Speed Axial Flux Permanent Magnet Generators for Marine Current Application.*”Faculty of Engineering and Applied Science Memorial University of Newfoundland,Canada.
- Chapman, Stephen J.(2002).”*Electrical Machinery and Power System Fundamentals*”.BAE SYSTEM Australia.