



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**STUDI DESAIN STATOR GENERATOR SINKRON MAGNET  
PERMANEN FLUKS AKSIAL JENIS CAKRAM**

**SKRIPSI**

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

**IRWINSYAH FUADI  
0906602742**

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

**PERNYATAAN ORISINALITAS**

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

**Nama : Irwinskyah Fuadi**

**NPM : 0906602742**

**Tanda Tangan : **

**Tanggal : 11 Januari 2012**

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :  
Nama : Irwinsyah Fuadi  
NPM : 0906602742  
Program Studi : Teknik Elektro  
Judul Skripsi : **Studi Desain Stator Generator Sinkron Magnet  
Permanen Fluks Aksial Jenis Cakram**

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. Amien Rahardjo, MT**

Penguji : **Dr. Ir. Ridwan Gunawan, MT**



Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 11 Januari 2012

## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT, karena atas berkah dan rahmat-Nya penulis dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik Jurusan Teknik Elektro pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

Penulis menyadari bahwa tanpa bimbingan dan bantuan dari berbagai pihak, dimulai dari masa perkuliahan sampai dengan penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi penulis untuk menyelesaikan skripsi tepat pada waktunya.

Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Ir. Agus R. Utomo, MT selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini.
2. Orang tua dan keluarga yang telah banyak memberikan bantuan dukungan baik secara moral maupun material.
3. Sahabat, baik di lingkungan kampus maupun lingkungan kerja yang telah memberikan dukungan dan bantuan dalam menyelesaikan skripsi

Akhir kata, penulis berharap Allah SWT. berkenan membalas setiap kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat untuk pengembangan ilmu kedepannya.

Depok, 11 Januari 2012

Penulis

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

---

---

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

Nama : Irwinsyah Fuadi  
NPM : 0906602742  
Program Studi : Teknik Elektro  
Departemen : Teknik Elektro  
Fakultas : Teknik  
Jenis karya : Skripsi

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

**“STUDI DESAIN STATOR GENERATOR SINKRON MAGNET  
PERMANEN FLUKS AKSIAL JENIS CAKRAM”**

beserta 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 : 11 Januari 2012

Yang menyatakan



( Irwinsyah Fuadi )

## ABSTRAK

Nama : Irwinsyah Fuadi  
Program Studi : Teknik Elektro  
Judul : **STUDI DESAIN STATOR GENERATOR SINKRON  
MAGNET PERMANEN FLUKS AKSIAL JENIS  
CAKRAM**

Stator sebagai bagian dari mesin listrik generator sinkron magnet permanen fluks aksial (MPFA) jenis cakram memiliki desain terutama bentuknya tergantung dari bentuk rotor. Dalam studi desain ini, rotor dan stator berbentuk lingkaran. Bentuk yang serupa tersebut, membuat fluks medan magnet yang dihasilkan oleh magnet permanen tercakup optimal.

Adapun parameter yang mempengaruhi desain stator yaitu bentuk stator, jarak antar kutub magnet permanen pada rotor, dan lebar celah udara antara stator terhadap rotor. Ketiga hal tersebut akan menentukan jumlah lilitan yang digunakan sehingga mempengaruhi tegangan yang dibangkitkan.

Kata Kunci :

Stator, generator sinkron magnet permanen fluks aksial, jarak antar kutub magnet permanen, lebar celah udara, jumlah lilitan

## ABSTRACT

Name : Irwinsyah Fuadi  
Study Program : Electrical Engineering  
Title : **DESIGN STUDY OF STATOR ON AXIAL FLUX  
PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS  
GENERATOR DISC TYPE**

*Stator as a part of axial flux permanent magnet (AFPM) synchronous generator disc type has design especially its form depend on rotor form. on this study design, the rotor and stator's form were circular. With same form like that, it will makes the magnetic flux line produced by permanent magnet cover the entire stator's coil more optimal.*

*There is some parameter that will affect the stator's design, which is stator's form, distance between permanent magnet polarity and air gap between rotor and stator. Those three parameter will define number of turn in a coil thus it will affect induced voltage.*

*Key Word :*

*Stator, axial flux permanent magnet synchronous generator, distance between permanent magnet polarity, air gap width, number of coil turn*



3.6.1 Rugi-Rugi Lilitan Pada Stator.....	31
3.6.2 Rugi-Rugi Arus Eddy.....	32
3.6.3 Efisiensi.....	32
3.7 Karakteristik Performa Generator Sinkron MPFA.....	32
<b>BAB IV SIMULASI DESAIN STATOR GENERATOR SINKRON</b>	
<b>MPFA JENIS CAKRAM.....</b>	<b>35</b>
4.1 Prototipe Generator Sinkron MPFA.....	35
4.1.1 Bentuk dan Material Rotor.....	36
4.1.2 Bentuk dan Material Stator.....	37
4.2 Pengujian Generator MPFA.....	37
4.2.1 Metodologi Pengujian.....	37
4.2.2 Lokasi Pengujian.....	38
4.2.3 Blok Diagram Pengujian.....	38
4.2.4 Bahan dan Alat Bantu Yang Digunakan.....	38
4.2.5 Langkah-Langkah Pengujian.....	39
4.2.6 Data Hasil Pengujian.....	39
4.3 Analisa Data Hasil Pengujian.....	40
4.4 Studi Desain Stator Generator Sinkron MPFA Jenis Cakram.....	45
4.4.1 Studi Bentuk Stator.....	46
4.4.2 Pengaruh Sudut Elevasi $\theta$ terhadap Parameter Kumparan Stator.....	48
4.4.3 Pengaruh Lebar Celah Udara terhadap Jumlah Lilitan dan Tegangan Terinduksi.....	51
4.4.4 Pengaruh Jarak antar Magnet Permanen terhadap Jumlah Lilitan dan Tegangan Terinduksi.....	55
<b>BAB V KESIMPULAN.....</b>	<b>59</b>
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>60</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Konstruksi dasar mesin sinkron.....	6
Gambar 2.2.(a) Laminasi stator, (b) Beberapa kumparan dalam slot.....	7
Gambar 2.3. Rangka stator beserta kumparan jangkarnya.....	8
Gambar 2.4. Rotor kutub sepatu/kutub menonjol ( <i>salient pole</i> ).....	10
Gambar 2.5. Rotor kutub sepatu pada generator 4 kutub.....	10
Gambar 2.6. Rotor kutub silinder ( <i>non-salient pole/cylindrical rotor</i> ).....	11
Gambar 2.7. Rotor kutub silinder pada generator 4 kutub.....	12
Gambar 2.8. Kurva karakteristik dan rangkaian ekivalen generator tanpa Beban.....	17
Gambar 2.9. Rangkaian ekivalen dan diagram vektor generator berbeban....	17
Gambar 2.10. Pengaruh reaksi jangkar untuk berbagai macam jenis beban..	18
Gambar 2.11. Kurva pengujian tanpa beban dan hubung singkat generator Sinkron.....	20
Gambar 3.1. Topologi dasar generator MPFA (a) generator sisi tunggal dengan slot (b) generator dua sisi tanpa slot dengan stator internal diapit dua rotor magnet permanen (c) generator dua sisi dengan slot stator dan rotor magnet permanen internal (d) generator dua sisi dengan stator internal tanpa inti. 1-inti stator, 2-lilitan stator, 3-rotor, 4-magnet permanen, 5-bingkai, 6- bearing, 7-poros.....	23
Gambar 3.2. Bagian-bagian generator sinkron MPFA tanpa sikat dengan kumparan film sebagai stator tanpa inti dan sistem eksitasi rotor magnet permanen satu sisi.....	24
Gambar 3.3. Perbedaan kurva histerisis antara magnet permanen (magnet bahan keras) dengan magnet induksi (magnet bahan lunak)..	25
Gambar 3.4. Kurva karakteristik histerisis magnetik beberapa material magnet permanen.....	27
Gambar 3.5. Diagram koneksi lilitan sembilan kumparan dengan tipe tiga fasa dari sebuah generator MPFA.....	28
Gambar 3.6. Lilitan tiga fasa, polaritas magnet permanen dan jalur fluks magnet dari generator MPFA dua sisi dengan stator tanpa inti.....	28
Gambar 3.7. Lilitan tanpa inti dari sebuah generator MPFA tiga fasa dengan delapan kutub dan dua rotor eksternal.....	29
Gambar 3.8. Karakteristik generator sinkron MPFA tunggal untuk beban induktif.....	34
Gambar 4.1. Prototipe generator sinkron MPFA.....	36
Gambar 4.2. Prototipe rotor.....	36
Gambar 4.3. Prototipe stator.....	37
Gambar 4.4. Blok diagram pengujian generator sinkron MPFA.....	38
Gambar 4.5. Kurva hubungan tegangan tanpa beban terhadap kecepatan mekanik generator (jarak rotor-stator 2,5 mm).....	42
Gambar 4.7. Kurva hubungan arus hubung singkat terhadap kecepatan mekanik generator (jarak rotor-stator 2,5 mm).....	43
Gambar 4.8. Kurva hubungan tegangan tanpa beban terhadap kecepatan	

mekanik generator (jarak rotor-stator 1,5 mm).....	44
Gambar 4.9. Kurva hubungan frekuensi terhadap kecepatan mekanik generator (jarak rotor-stator 1,5 mm).....	44
Gambar 4.10. Kurva hubungan arus hubung singkat terhadap kecepatan mekanik generator (jarak rotor-stator 1,5 mm).....	45
Gambar 4.11. Algoritma studi desain stator.....	47
Gambar 4.12. Simulasi Sudut Elevasi 45° dari Fluks Magnet dengan Jarak antar Magnet Permanen 3 mm, Lebar Celah Udara 2 mm dan Tebal Stator 1 mm.....	49
Gambar 4.13. Simulasi Sudut Elevasi 60° dari Fluks Magnet dengan Jarak antar Magnet Permanen 1,73 mm, Lebar Celah Udara 2 mm dan Tebal Stator 1 mm.....	49
Gambar 4.14. Hubungan antara Lebar Celah Udara $A_g$ terhadap Jumlah Lilitan N sebagai Fungsi $N = f(A_g)$ .....	54
Gambar 4.15. Hubungan antara Lebar Celah Udara $A_g$ terhadap Tegangan Terinduksi sebagai Fungsi $V = f(A_g)$ .....	54
Gambar 4.16. Hubungan antara Jarak antar Magnet Permanen $X_{mp}$ terhadap Jumlah Lilitan N sebagai Fungsi $N = f(X_{mp})$ .....	57
Gambar 4.17. Hubungan antara Jarak antar Magnet Permanen $X_{mp}$ terhadap Tegangan Terinduksi sebagai Fungsi $V = f(X_{mp})$ .....	58

## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1. Spesifikasi Beberapa Material Magnet Permanen.....	26
Tabel 4.1. Hasil Pengukuran Karakteristik Generator Sinkron MPFA Jenis Cakram dengan Jarak Rotor dan Stator $\pm 2,5$ mm.....	39
Tabel 4.2. Hasil Pengukuran Karakteristik Generator Sinkron MPFA Jenis Cakram dengan Jarak Rotor dan Stator $\pm 1,5$ mm.....	40
Tabel 4.3. Hasil Perhitungan Karakteristik Generator Sinkron MPFA Jenis Cakram dengan Jarak Rotor dan Stator $\pm 2,5$ mm.....	41
Tabel 4.4. Hasil Perhitungan Karakteristik Generator Sinkron MPFA Jenis Cakram dengan Jarak Rotor dan Stator $\pm 1,5$ mm.....	41
Tabel 4.5. Hasil Perhitungan Parameter Tinggi Stator, Jumlah Lilitan/Kumparan dan Tegangan Terinduksi untuk Lebar Celah Udara Bervariasi.....	53
Tabel 4.6. Hasil Perhitungan Parameter Tinggi Stator, Jumlah Lilitan/Kumparan dan Tegangan Terinduksi untuk Jarak antar Magnet Permanen Bervariasi.....	57

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang Masalah

Seiring dengan perkembangan teknologi, kebutuhan manusia akan tersedianya energi listrik semakin besar untuk menjalankan aktifitas sehari-hari, baik dalam skala rumah tangga maupun industri. Namun, distribusi energi listrik yang ada di wilayah Indonesia belum merata sehingga masih banyak daerah yang belum mendapat energi listrik karena tidak dapat dibangun jaringan listrik karena faktor letak geografis maupun keadaan alamnya, terutama pada daerah terpencil dan pulau terluar. Selain itu, krisis energi listrik sering terjadi di kota - kota besar karena kebutuhan akan konsumsi listrik yang terus meningkat.

Saat ini, penelitian-penelitian tentang energi listrik yang terbarukan terus dilakukan, baik untuk mengatasi krisis energi listrik di kota-kota besar maupun untuk memenuhi kebutuhan listrik pada daerah terpencil. Salah satu perangkat yang digunakan adalah generator, yaitu alat yang mengubah energi mekanik menjadi energi listrik.

Generator yang tersedia banyak dipasaran biasanya berjenis *high speed induction generator* dimana pada generator jenis ini membutuhkan putaran tinggi dan juga membutuhkan energi listrik awal untuk membuat medan magnetnya, selain itu instalasinya lebih rumit dan memerlukan biaya besar untuk pembuatan dan perawatannya.

Pada penulisan skripsi ini, penulis melakukan studi desain generator magnet permanen, terutama studi desain untuk bagian statornya sehingga mampu menghasilkan bentuk dan karakteristik stator secara optimal. Desain generator magnet permanen yang dibuat adalah generator sederhana yang dapat digunakan dalam skala rumah tangga, dengan menggunakan material - material yang relatif terjangkau dan mudah dicari. Pengoperasiannya cukup dengan menggunakan tenaga air atau angin yang tersedia di lingkungan rumah/pemukiman.

Dengan adanya studi desain generator ini, diharapkan bisa digunakan sebagai sumber energi listrik alternatif yang dapat digunakan oleh rumah tangga, baik di kota - kota besar maupun di daerah terpencil. Jadi, dapat membantu

pemerintah dalam mengatasi krisis energi listrik dan kesulitan pengadaan jaringan energi listrik pada daerah - daerah terpencil.

## **1.2 Tujuan**

Tujuan dari penulisan skripsi ini adalah untuk mengembangkan desain Generator Sinkron Magnet Permanen Fluks Aksial (MPFA) jenis cakram. Adapun tujuan lainnya adalah sebagai studi desain rekayasa stator dan studi optimasi desain dimensi generator magnet permanen. Selain itu, skripsi ini juga ditulis untuk memenuhi persyaratan kelulusan untuk menjadi sarjana teknik.

## **1.3 Rumusan Masalah**

Dalam Studi Desain Stator Generator Sinkron Magnet Permanen Fluks Aksial Jenis Cakram ini akan dibahas tentang hal-hal sebagai berikut :

1. Definisi dan prinsip kerja generator sinkron magnet permanen fluks aksial
2. Bagaimana karakteristik dan parameter dari generator sinkron magnet permanen fluks aksial jenis cakram ?
3. Apa saja bagian – bagian dan material penyusun generator magnet permanen fluks aksial ?
4. Parameter apa yang harus diperhatikan dalam mendesain stator generator magnet permanen fluks aksial jenis cakram ?
5. Bagaimana cara mendesain stator generator sinkron magnet permanen fluks aksial sehingga menghasilkan tegangan output yang dibutuhkan?

## **1.4 Batasan Masalah**

Dalam Studi Desain Stator Generator Sinkron Magnet Permanen Fluks Aksial Jenis Cakram ini penulis hanya membahas tentang hal-hal sebagai berikut :

1. Tipe generator yang didesain adalah generator sinkron magnet permanen fluks aksial satu sisi dengan stator tanpa inti berjenis cakram.

2. Studi bentuk stator sehingga mampu menghasilkan generator sinkron magnet permanen fluks aksial sesuai spesifikasi.
3. Studi pengaruh lebar celah udara antara stator dan rotor dan jarak antar generator sinkron magnet permanen fluks aksial terhadap jumlah lilitan dan tegangan yang dibangkitkan.

### 1.5 Metodologi Penulisan

Dalam pembuatan, penyusunan dan penulisan skripsi ini penulis menggunakan metode studi pustaka dan metode lapangan. Metode - metode yang penulis lakukan antara lain :

1. Studi Literatur  
Membaca literatur berupa buku - buku, karya ilmiah, dan *browsing* internet untuk mendapatkan data - data yang dibutuhkan dalam pembuatan alat dan sebagai dasar penulisan dan penyusunan laporan skripsi.
2. Perencanaan dan Pembuatan *Prototype*  
Melakukan perencanaan desain rangkaian, desain struktur dan penyediaan material yang dibutuhkan dalam pembuatan *prototype* skripsi. Kemudian membuat jadi alat tersebut sesuai dengan desain yang sudah direncanakan.
3. Simulasi berbasis komputer dengan menggunakan perangkat lunak FEMM 4.2.
4. Pengujian *Prototype* dan Analisa Studi Desain  
Menguji hasil pembuatan alat eksperimen skripsi, apakah alat yang dibuat bekerja sesuai dengan karakteristik dan spesifikasinya. Selanjutnya hasil pengukuran dianalisa untuk dibandingkan dengan analisa yang dilakukan, apakah sesuai atau tidak.
5. Penyusunan Laporan  
Membuat suatu laporan yang berisi penjelasan yang menggambarkan tentang alat yang dibuat.

## 1.6 Sistematika Penulisan

Untuk memudahkan melakukan pemahaman terhadap suatu penulisan maka perlu dibuat sistematika penulisan. Sistematika penulisan skripsi dimulai dari bab pertama yang berisi latar belakang masalah, tujuan penulisan, pembatasan masalah, metodologi penulisan, dan sistematika penulisan yang mendasari proses pembuatan skripsi ini.

Selanjutnya pada bab kedua diuraikan landasan teori yang mengacu pada pembahasan. Bab ini membahas mesin sinkron secara garis besar dan lebih dikhususkan ke generator sinkron. Pada bab berikutnya yaitu bab tiga, pembahasan difokuskan pada generator sinkron magnet permanen fluks aksial jenis cakram sisi tunggal dengan stator tanpa inti. Karena, bab ini menjadi acuan dalam simulasi desain dan rancang bangun untuk bab selanjutnya. Berikutnya pada bab empat dijelaskan perancangan dan desain optimal yang berkaitan dengan pengujian hasil desain generator yang dibuat. Pengujian meliputi prosedur pengetesan generator yang dibuat, pengukuran parameter - parameter generator dan analisa data berdasarkan literatur yang diperoleh. Terakhir, pada bab lima berisi kesimpulan yang diperoleh dari analisa hasil pengujian dan studi yang dilakukan berdasarkan referensi dari literatur – literatur yang ada.

## BAB II

### MESIN SINKRON

#### 2.1 Prinsip Dasar Mesin Sinkron

##### 2.1.1 Definisi

Mesin sinkron adalah suatu peralatan listrik dinamis yang bisa mengkonversi daya mekanik menjadi daya elektrik bolak-balik (generator sinkron) dan mengkonversi daya elektrik bolak-balik menjadi daya mekanik (motor sinkron). Disebut mesin sinkron karena putaran frekuensi elektrik yang dihasilkan sama (sinkron) dengan putaran mekanik rotor. [1]

Mesin sinkron biasa dioperasikan sebagai generator (alternator) terutama untuk sistem daya besar seperti generator turbin dan generator hidroelektrik pada sistem pembangkit terdistribusi. Karena kecepatan rotor sebanding dengan frekuensi eksitasi, motor sinkron dapat diaplikasikan untuk keadaan dimana kontrol kecepatan konstan dibutuhkan.

Selain itu, daya reaktif yang dihasilkan oleh mesin sinkron juga dipasang sendirian di sistem pembangkit untuk perbaikan faktor daya atau mengontrol aliran kVA reaktif. Mesin tersebut dikenal dengan kondenser sinkron, yang secara ukuran lebih ekonomis dibandingkan dengan kapasitor statis.

Penggerak utama (*prime mover*) mesin sinkron berkecepatan tinggi umumnya adalah turbin uap yang menggunakan bahan bakar fosil atau tenaga nuklir. Sedangkan pada mesin sinkron berkecepatan rendah penggerak utamanya berupa turbin hidro dengan tenaga air sebagai pembangkitnya. Terkadang, mesin sinkron dalam skala kecil dipakai untuk pembangkit sendiri dan unit cadangan, dengan turbin gas atau mesin diesel sebagai penggerak utama. [2]

Mesin sinkron dibagi menjadi 2 jenis :

- a. Mesin sinkron 1 fasa
- b. Mesin sinkron 3 fasa

### 2.1.2 Konstruksi Dasar Mesin Sinkron

Pada dasarnya konstruksi dari generator sinkron sama dengan konstruksi motor sinkron, dan secara umum biasa disebut mesin sinkron. Mesin sinkron terdiri dari tiga komponen utama, yaitu :

1. Stator/Kumparan jangkar

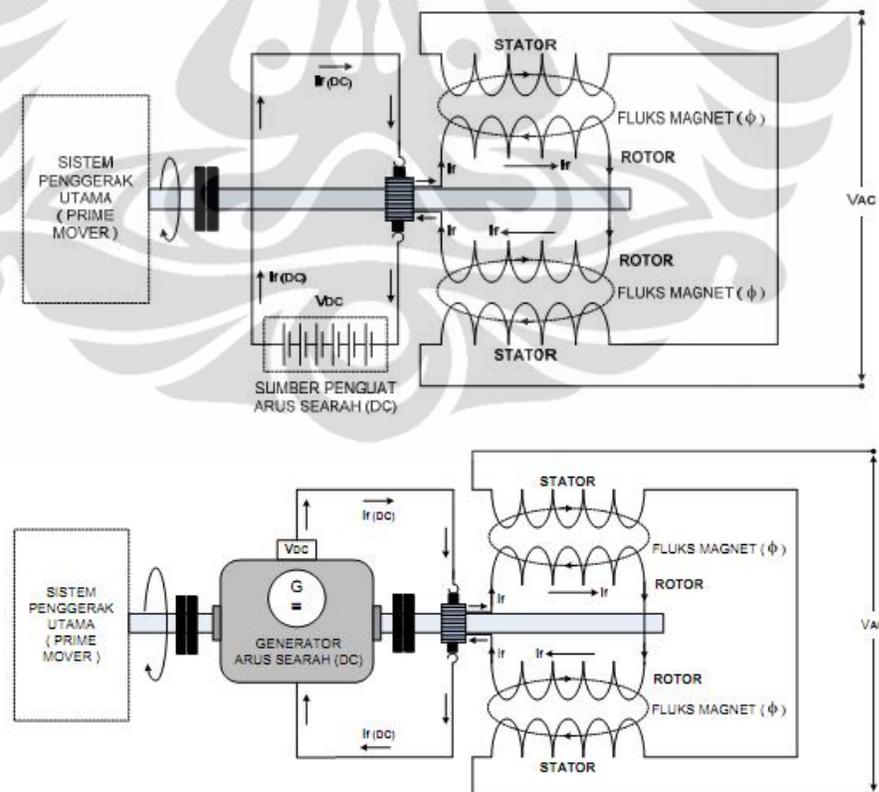
Disebut sebagai kumparan jangkar (angker) yang berfungsi menghasilkan tegangan dan arus bolak-balik (*AC/Alternating Current*).

2. Rotor/Kumparan Medan

Merupakan bagian yang ikut berputar dan berfungsi untuk menghasilkan medan magnet

3. Arus Penguat (Eksitasi)

Merupakan bagian berupa sumber arus eksternal seperti baterai atau generator DC yang berfungsi untuk menghasilkan arus ke dalam rotor yang berputar melalui cincin geser (*slip ring*) dan sikat (*brushes*) sehingga menimbulkan medan magnet.



**Gambar 2.1.** Konstruksi dasar mesin sinkron [1]

### 2.1.2.1 Stator/Kumparan Jangkar

Stator (disebut juga armatur) adalah bagian generator yang berfungsi sebagai tempat untuk menerima induksi magnet dari rotor. Arus AC yang menuju ke beban disalurkan melalui armatur, komponen ini berbentuk sebuah rangka silinder dengan lilitan kawat konduktor yang sangat banyak. Armatur selalu diam, oleh karena itu komponen ini disebut dengan stator.

Stator pada generator sinkron 3 fasa bisa terhubung secara delta ( $\Delta$ ) ataupun bintang (Y). Stator terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu :

1. Rangka stator

Merupakan rumah (kerangka) yang menyangga inti jangka generator.

2. Inti stator

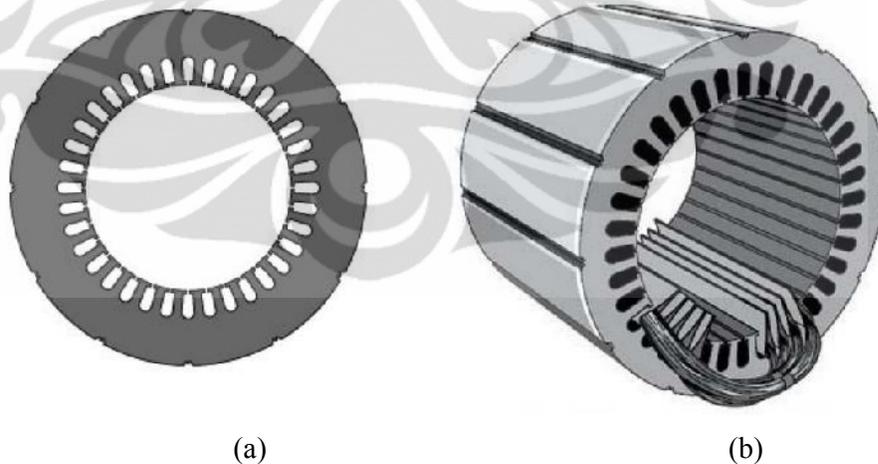
Terbuat dari laminasi - laminasi baja campuran atau besi magnetik khusus yang terpasang ke rangka stator

3. Alur (slot) dan gigi

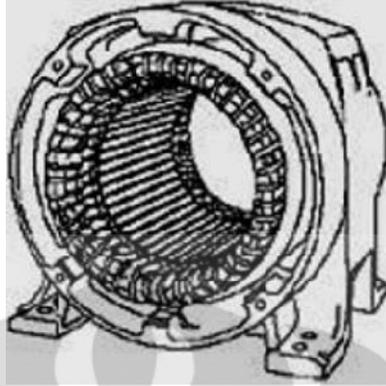
Alur dan gigi merupakan tempat meletakkan kumparan stator

4. Kumparan stator (kumparan jangkar)

Kumparan jangkar biasanya terbuat dari tembaga. Kumparan ini merupakan tempat timbulnya ggl (gaya gerak listrik) induksi.



**Gambar 2.2.**(a) Laminasi stator, (b) Beberapa kumparan dalam slot [4]



**Gambar 2.3.** Rangka stator beserta kumparan jangkarnya [4]

### 2.1.2.2 Rotor/Kumparan Medan

Rotor merupakan bagian yang ikut berputar pada generator. Pada generator sinkron, rotor pada dasarnya adalah sebuah elektromagnet yang besar. Rotor terdiri dari beberapa bagian utama, yaitu :

#### 1. *Slip ring* (cincin geser)

Merupakan cincin logam yang melingkari poros rotor tetapi dipisahkan oleh isolasi tertentu. Terminal kumparan rotor dipasangkan ke slip ring kemudian dihubungkan ke sumber arus searah melalui sikat (*brush*) yang letaknya menempel pada cincin geser.

Sikat (*brush*) merupakan sebuah blok yang terbuat dari bahan campuran karbon mirip grafit yang mampu mengonduksikan listrik secara bebas tetapi minim pergeseran, sehingga tidak membuat aus cincin geser. Jika kutub positif sumber tegangan DC (arus searah) dihubungkan ke salah satu sikat dan kutub negatif dihubungkan ke sikat lainnya, maka tegangan DC yang sama akan diberikan ke kumparan medan setiap saat tanpa tergantung posisi angular atau kecepatan rotor.

Cincin geser dan sikat memiliki beberapa masalah :

- Meningkatkan jumlah bagian mesin yang membutuhkan perawatan, karena sikat harus diperiksa keausannya secara rutin.
- Tegangan jatuh pada sikat dapat mengakibatkan rugi daya yang signifikan pada mesin dengan medan arus yang besar.

Bila pada mesin sinkron kecil menggunakan cincin geser dan sikat, maka pada mesin sinkron ukuran besar menggunakan pembangkit tanpa sikat untuk mensuplai medan arus DC. Pembangkit tanpa sikat adalah generator AC kecil dengan rangkaian medan yang diletakkan pada stator dan rangkaian jangkarnya diletakkan pada poros stator. Keluaran tiga fasa dari generator pembangkit kemudian disearahkan menjadi arus searah oleh penyearah tiga fasa yang juga diletakkan pada poros generator, selanjutnya diumpankan ke rangkaian medan DC utama. Dengan mengatur medan arus DC dari generator pembangkit (yang terletak di stator), maka medan arus pada mesin utama dapat diatur tanpa menggunakan cincin geser dan sikat. Karena tidak terjadi kontak mekanik antara rotor dan stator, pembangkit tanpa sikat membutuhkan perawatan yang lebih mudah.

2. Kumparan rotor (kumparan medan)

Merupakan unsur yang memegang peranan utama dalam menghasilkan medan magnet. Kumparan ini mendapat arus searah dari sumber eksitasi tertentu.

3. Poros rotor

Merupakan tempat meletakkan kumparan medan, dimana pada poros rotor tersebut telah terbentuk slot-slot secara paralel terhadap poros rotor.

Ada dua bentuk rotor, yaitu rotor kutub sepatu/kutub menonjol (*salient pole*) dan rotor kutub silinder (*non-salient pole/cylindrical rotor*).

1. Rotor kutub sepatu/kutub menonjol (*salient pole*)

Pada jenis ini, kutub magnet menonjol keluar dari permukaan rotor. Kumparan pada setiap kutub dihubungkan secara seri. Ketika kumparan ini disuplai oleh eksiter, maka kutub yang berdekatan akan membentuk kutub berlawanan.

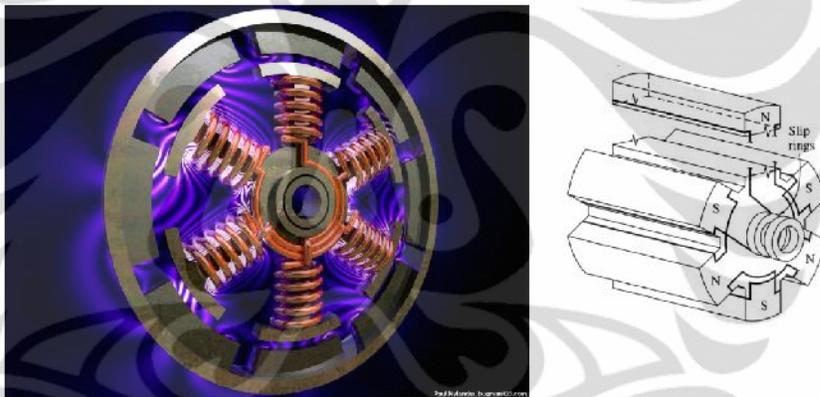
Rotor kutub sepatu umumnya digunakan pada generator sinkron dengan kecepatan putar rendah-sedang (120 – 400 rpm) dan berkutub banyak ( $\geq 4$ ). Oleh sebab itu generator sinkron tipe ini biasanya dikopel dengan mesin diesel atau turbin air pada sistem pembangkit listrik.

Jumlah kutub yang dibutuhkan di rotor jenis ini sangat banyak. Sehingga dibutuhkan diameter yang besar untuk memuat kutub yang sangat banyak tersebut

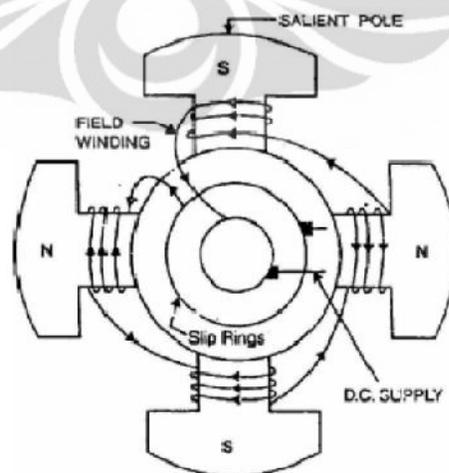
Rotor kutub sepatu cocok digunakan untuk putaran rendah-sedang karena :

- Akan mengalami rugi-rugi angin (gesekan angin) yang besar dan bersuara bising jika diputar dengan kecepatan tinggi.
- Tidak cukup kuat menahan tekanan mekanis apabila diputar dengan kecepatan tinggi.

Selain itu distribusi fluks magnet pada rotor kutub sepatu cenderung berbentuk persegi dan belum mendekati sinusoidal sehingga menimbulkan harmonisasi.



**Gambar 2.4.** Rotor kutub sepatu/kutub menonjol (*salient pole*) [1]



**Gambar 2.5.** Rotor kutub sepatu pada generator 4 kutub [4]

## 2. Rotor kutub silinder (*non-salient pole/cylindrical rotor*)

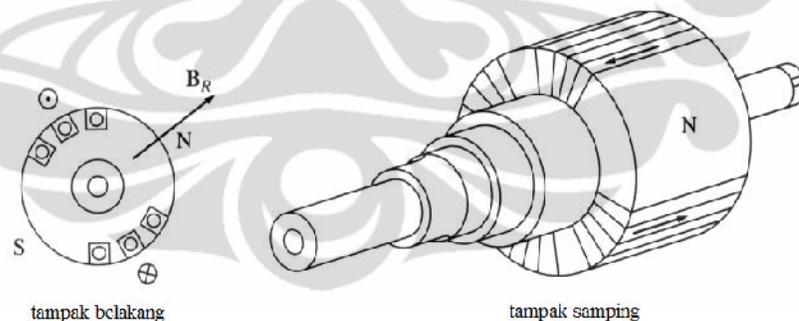
Pada jenis ini, kontruksi kutub magnet rata dengan permukaan rotor. Rotor jenis ini terbuat dari baja tempa padat yang mempunyai slot dan gigi disepanjang pinggiran luarnya seperti halnya stator. Kumputan medan pada rotor kutub silinder diletakkan di dalam slot ini. Disekitar daerah pusat kutub umumnya tidak mempunyai slot.

Rotor kutub silinder biasanya digunakan pada generator putaran tinggi (1500 atau 3000 rpm) dan berkutub sedikit ( $\leq 4$ ). Rotor kutub silinder lebih panjang daripada rotor kutub sepatu. Diameter rotor kutub silinder tidak sebesar rotor kutub sepatu untuk mengurangi gaya sentrifugal yang muncul pada kecepatan putar tinggi.

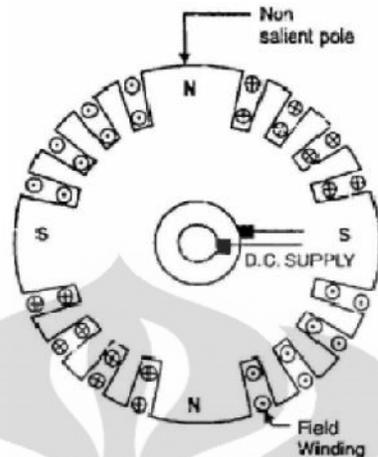
Rotor kutub silinder cocok digunakan pada putaran tinggi karena :

- Kontruksinya memiliki kekuatan mekanik yang baik pada kecepatan putar tinggi.
- Tidak menghasilkan gesekan angin yang berlebihan.

Selain itu, distribusi fluks magnet yang dihasilkan lebih mendekati sinusoidal sehingga akan menghasilkan bentuk gelombang tegangan yang lebih baik. [3][4]



**Gambar 2.6.** Rotor kutub silinder (*non-salient pole/cylindrical rotor*) [1]



**Gambar 2.7.** Rotor kutub silinder pada generator 4 kutub [4]

### 2.1.2.3 Arus Penguat (Eksitasi)

Berdasarkan cara penyaluran arus searah pada rotor generator sinkron, sistem eksitasi terdiri dari atas 2 jenis yaitu sistem eksitasi dengan menggunakan sikat (*brush excitation*) dan sistem eksitasi tanpa menggunakan sikat (*brushless excitation*).

Ada 2 jenis sistem eksitasi dengan menggunakan sikat, yaitu :

1. Sistem eksitasi konvensional (menggunakan generator arus searah)

Untuk sistem eksitasi yang konvensional, arus searah diperoleh dari sebuah generator arus searah berkapasitas kecil yang disebut eksiter. Generator sinkron dan generator arus searah tersebut terkopel dalam satu poros, sehingga putaran generator arus searah sama dengan putaran generator sinkron.

Tegangan yang dihasilkan oleh generator arus searah ini diberikan ke belitan rotor generator sinkron melalui sikat karbon dan cincin geser. Akibatnya arus searah mengalir ke dalam rotor atau kumparan medan dan menimbulkan medan magnet yang diperlukan untuk dapat menghasilkan tegangan dan arus bolak-balik. Dalam keadaan ini apabila generator diputar oleh penggerak mula maka dibangkitkan tegangan bolak-balik pada kumparan utama yang terletak di stator generator sinkron.

Pada generator konvensional ini ada beberapa kerugian yaitu: generator arus searah merupakan beban tambahan untuk penggerak mula.

Penggunaan cincin geser dan sikat menimbulkan masalah ketika digunakan untuk mensuplai sumber arus searah pada belitan medan generator sinkron. Terdapat sikat arang yang menekan cincin geser sehingga timbul rugi gesekan pada generator utamanya. Selain itu pada generator arus searah juga terdapat sikat karbon yang menekan komutator. Selama pemakaian, cincin geser dan sikat harus diperiksa secara teratur, generator arus searah juga memiliki keandalan yang rendah.

## 2. Sistem eksitasi statis (*static excitation system*)

Sistem eksitasi statis menggunakan peralatan eksitasi yang tidak bergerak (*static*), artinya peralatan eksitasi tidak ikut berputar bersama dengan rotor generator sinkron. Sistem eksitasi statis atau *self excitation* tidak memerlukan generator tambahan sebagai sumber eksitasi generator sinkron. Sumber eksitasi berasal dari tegangan output generator itu sendiri yang disearahkan terlebih dahulu dengan menggunakan penyearah thyristor.

Pada mulanya pada rotor ada sedikit magnet sisa yang akan menimbulkan tegangan pada stator, tegangan ini kemudian masuk dalam penyearah dan dimasukkan kembali pada rotor, akibatnya medan magnet yang dihasilkan makin besar dan tegangan AC akan naik demikian seterusnya sampai dicapai tegangan nominal dari generator AC tersebut. Biasanya penyearah tersebut mempunyai pengatur sehingga tegangan generator dapat diatur konstan.

Dibandingkan generator sistem konvensional, generator sistem eksitasi statis ini jauh lebih baik karena tidak ada generator arus searah (yang keandalannya rendah) dan beban generator arus searah pada penggerak utama dihilangkan. Eksiter diganti dengan eksiter yang tidak berputar yaitu penyearah.

Untuk keperluan eksitasi awal pada generator sinkron, maka sistem eksitasi statis dilengkapi dengan *field flashing*. Hal ini dibutuhkan karena generator sinkron tidak memiliki sumber arus dan tegangan sendiri untuk mensuplai kumparan medan.

Sedangkan sistem eksitasi tanpa menggunakan sikat terdiri dari :

1. Sistem eksitasi menggunakan baterai

Arus searah untuk suplai eksitasi untuk awal start generator digunakan suplai dari baterai. Kemudian arus ini disalurkan ke medan AC exciter. Tegangan keluaran generator sinkron disearahkan oleh penyearah berupa dioda yang disebut dengan *rotating rectifier*, yang diletakkan pada bagian poros ataupun pada bagian dalam dari rotor generator sinkron, sehingga *rotating rectifier* tersebut ikut berputar sesuai dengan putaran rotor.

Untuk menghindari adanya kontak geser pada bagian rotor generator sinkron, maka penguat medan generator dirancang supaya arus searah yang dihasilkan dari penyearah langsung disalurkan ke bagian belitan medan dari generator utama. Hal ini dimungkinkan karena dioda penyearah ditempatkan pada bagian poros yang dimiliki bersama-sama oleh rotor generator utama dan penguat medannya. Arus medan pada generator utama dikontrol oleh arus yang mengalir pada kumparan medan generator penguat (eksiter).

Setelah tegangan generator mencapai tegangan nominalnya maka catu daya DC (baterai) biasanya dilepas dan digantikan oleh penyearah. Penguatan yang dipakai adalah sistem *self excitation system* yaitu sistem dimana sumber daya untuk penguatnya diperoleh dari keluaran tiga fasa generator itu sendiri.

2. Sistem eksitasi menggunakan *Permanent Magnet Generator* (PMG)

Cara lain untuk menghasilkan medan magnet pada rotor adalah dengan menggunakan magnet permanen yang diletakkan pada poros generator. Sistem eksitasi ini biasanya digunakan pada generator sinkron berkapasitas besar. Hal ini bertujuan agar sistem eksitasi dari generator sama sekali tidak tergantung pada sumber daya listrik dari luar mesin.

Pada rotor terdapat magnet permanen, kumparan jangkar generator eksitasi, kumparan medan generator utama. Hal ini memungkinkan generator tersebut tidak menggunakan cincin geser dan sikat dalam pengoperasiannya sehingga lebih efektif dan efisien. [5]

## 2.2 Prinsip Kerja Mesin Sinkron

Arus penguat (eksitasi) berupa arus DC dialirkan ke kumparan medan (rotor) sehingga membangkitkan medan magnet pada rotor tersebut. Kemudian rotor digerakkan oleh tenaga penggerak utama (*prime mover*) sehingga pada rotor akan timbul medan magnet putar atau fluks yang bersifat bolak-balik. Medan magnet putar ini akan memotong kumparan kawat pada stator yang mengakibatkan timbulnya gaya gerak listrik (GGL) karena pengaruh induksi dari fluks putar tersebut. GGL yang timbul pada stator juga bersifat bolak-balik dan berputar dengan kecepatan sinkron terhadap kecepatan putar rotor. [1][3]

### 2.2.1 Kecepatan Sinkron

Ketika rotor berputar, medan magnet yang dihasilkan juga berputar dengan kecepatan yang sama. Karena medan magnet putar tersebut diinduksikan pada kumparan jangkar (stator), maka pada stator terbangkitkan tegangan induksi bolak-balik (sinusoidal) 3 fasa dengan frekuensi elektrik yang sama pula (sinkron).

Hubungan antara kecepatan putar medan magnet pada mesin sinkron dengan frekuensi elektrik pada stator adalah :

$$f \square \frac{np}{120} \quad (2.1)$$

Dimana :

$f$  = Frekuensi elektrik (Hz)

$n$  = Kecepatan mekanik rotor (rpm)

$p$  = Jumlah kutub [1][2]

### 2.2.2 Generator Sinkron Tanpa Beban

Besarnya tegangan induksi yang dibangkitkan pada stator diturunkan dari Hukum Faraday yang menyatakan gaya gerak listrik induksi :

$$E_{ind} \square \square N \frac{d\lambda}{dt} \quad (2.2)$$

$$E \square \square N \frac{d\lambda_{maks} \sin \omega t}{dt}$$

$$\square \square N \omega \lambda_{maks} \cos \omega t \quad (\omega \square 2\pi f)$$

$$e = N(2\pi f)\Phi_{maks} \cos \omega t \quad (f = \frac{np}{120})$$

$$e = N(2\pi \frac{np}{120}) \dot{\Phi}_{maks} \cos \omega t$$

$$e = (2.3, 14. \frac{np}{120}) \dot{\Phi}_{maks} \cos \omega t$$

$$E_{maks} = N(2.3, 14. \frac{np}{120}) \dot{\Phi}_{maks}$$

$$E_{eff} = E_{rms} = \frac{E_{maks}}{\sqrt{2}} = \frac{N(2.3, 14. \frac{np}{120}) \dot{\Phi}_{maks}}{\sqrt{2}}$$

$$= \frac{4, 44 Nnp \dot{\Phi}}{120} \quad (\frac{4, 44 Np}{120} = K)$$

Dimana :

$E$  = Gaya gerak listrik (volt)

$N$  = Jumlah lilitan

$K$  = Konstanta

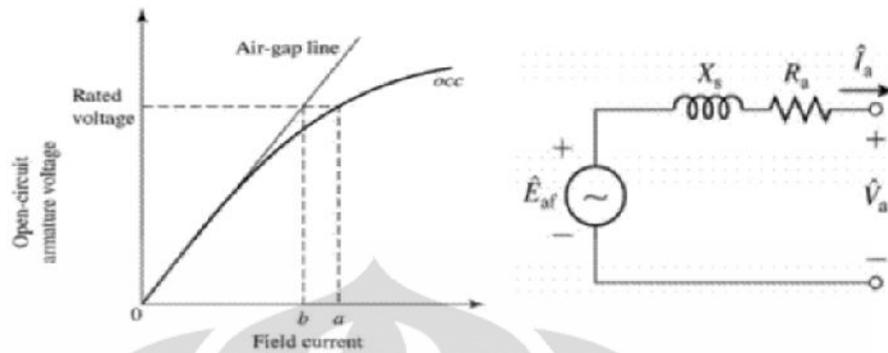
$n$  = Putaran sinkron (rpm)

$\dot{\Phi}$  = Fluks magnetik (Weber)

$F$  = Frekuensi sinkron (Hz)

$\frac{d\dot{\Phi}}{dt}$  = Laju fluks magnet (W/s) [3]

Dalam keadaan tanpa beban arus jangkar tidak mengalir pada stator, sehingga tidak ada pengaruh reaksi jangkar. Fluks hanya dihasilkan oleh arus medan ( $I_f$ ). Jika arus medan diubah - ubah harganya maka akan diperoleh harga  $E_o$ .

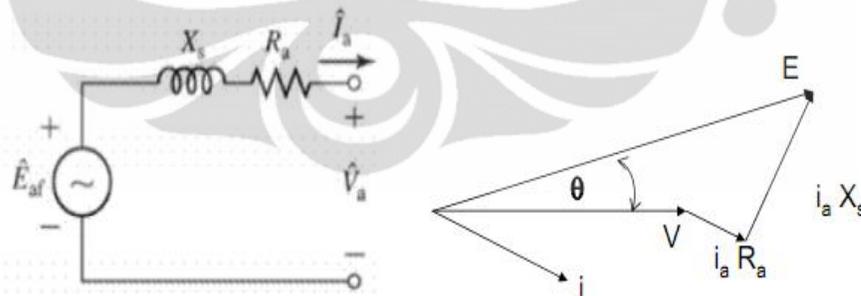


**Gambar 2.8.** Kurva karakteristik dan rangkaian ekivalen generator tanpa beban[1]

- $b - a$  = Tahanan arus beban pada daerah jenuh (*saturated*)
- $R_a$  = Resistansi jangkar (stator)
- $X_s$  = Reaktansi sinkron [1]

### 2.2.3 Generator Sinkron Berbeban

Dalam keadaan berbeban arus jangkar akan mengalir dan mengakibatkan terjadinya reaksi jangkar. Reaksi jangkar bersifat reaktif, oleh sebab itu dinyatakan sebagai reaktansi dan disebut reaktansi magnet ( $X_m$ ). Reaktansi magnet dan reaktansi fluks bocor ( $X_a$ ) disebut reaktansi sinkron ( $X_s$ ).



**Gambar 2.9.** Rangkaian ekivalen dan diagram vektor generator berbeban [1]

Persamaan tegangan dari model rangkaian pada Gambar 2.9. adalah :

$$\begin{aligned} E_a &\simeq V + IR_a + jIX_s \\ X_s &\simeq X_m + X_a \end{aligned} \quad (2.4)$$

Dimana :

$E_a$  = Tegangan induksi pada jangkar (Volt)

$V$  = Tegangan terminal output (Volt)

$R_a$  = Resistansi jangkar (Ohm)

$X_s$  = Reaktansi sinkron (Ohm)

$X_a$  = Reaktansi fluks bocor (Ohm)

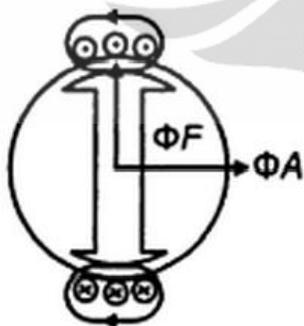
$X_m$  = Reaktansi magnet (Ohm) [1]

### 2.2.4 Reaksi Jangkar

Apabila generator sinkron (alternator) diberi beban, maka pada kumparan jangkar stator mengalir arus dan arus ini menimbulkan fluks jangkar. Fluks jangkar ini kemudian mempengaruhi fluks arus medan dan akhirnya menyebabkan berubahnya harga tegangan generator sinkron. Fluks jangkar yang ditimbulkan arus ( $\Phi_A$ ) akan berinteraksi dengan yang dihasilkan kumparan medan rotor ( $\Phi_F$ ), sehingga menghasilkan fluks resultan ( $\Phi_R$ ).

$$\Phi_R = \Phi_A + \Phi_F ; \text{jumlah secara vektor}$$

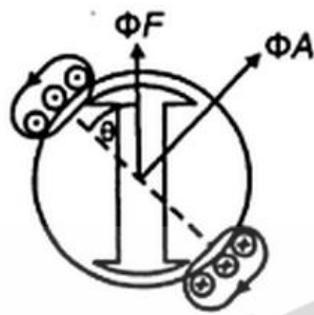
Pengaruh yang ditimbulkan dapat berupa distorsi, penguatan (*magnetizing*) dan pelemahan (*demagnetizing*) fluks arus medan. Adanya interaksi ini dikenal sebagai reaksi jangkar. Pengaruh reaksi jangkar untuk berbagai macam jenis beban adalah sebagai berikut :



Arus jangkar ( $I$ ) sefasa dengan GGL ( $E$ )

Jenis beban : tahanan (resistif)

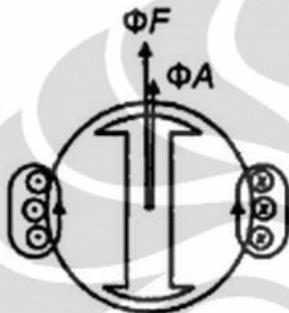
$\Phi_A$  tegak lurus terhadap  $\Phi_F$ , pengaruh reaksi jangkar terhadap fluks medan hanya sebatas mendistorsi saja tanpa mempengaruhi kekuatannya (*cross magnetizing*)



Arus jangkar (I) mendahului sebesar  $\theta$  dari GGL (E)

Jenis beban : kapasitif

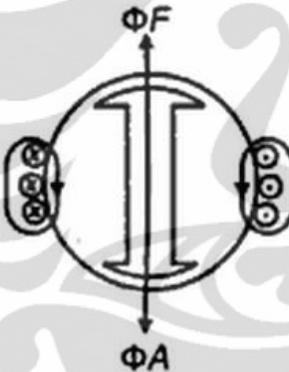
$\Phi_A$  terbelakang dengan sudut  $(90^\circ - \theta)$



Arus jangkar (I) mendahului sebesar  $90^\circ$  dari GGL (E)

Jenis beban : kapasitif murni ( $\cos\phi = 0$  lead)

$\Phi_A$  memperkuat  $\Phi_F$ , terjadi pengaruh penguatan



Arus jangkar (I) tertinggal sebesar  $90^\circ$  dari GGL (E)

Jenis beban : induktif murni ( $\cos\phi = 1$  lag)

$\Phi_A$  memperlambat  $\Phi_F$ , terjadi pengaruh pelemahan

Gambar 2.10. Pengaruh reaksi jangkar untuk berbagai macam jenis beban [6]

Untuk beban tidak murni (induktif/kapasitif), pengaruh reaksi jangkar akan menjadi sebagian dikuatkan dan sebagian dilemahkan. Saat beban kapasitif, maka reaksi jangkar akan sebagian terdistorsi dan sebagian dikuatkan. Sementara saat beban induktif, maka reaksi jangkar akan sebagian terdistorsi dan sebagian dilemahkan. Namun pada prakteknya beban umumnya induktif. [3][6]

### 2.2.5 Reaktansi Sinkron

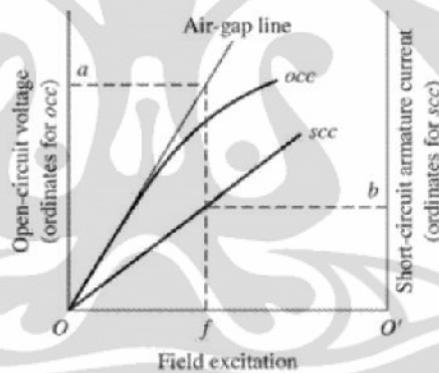
Harga reaktansi sinkron ( $X_s$ ) diperoleh dari dua macam percobaan yaitu percobaan tanpa beban dan percobaan hubungan singkat.

a. Percobaan tanpa beban akan menghasilkan harga tegangan tanpa beban ( $E_o$ ) sebagai fungsi arus penguat/eksitasi ( $I_f$ ). Kedua harga ini adalah harga nominal (*rating*) suatu mesin (generator) sinkron.

- Kurvanya berupa garis linear (pada kondisi awal hingga mencapai kejenuhan)
- Kurva akan segera melengkung (non linear) setelah mencapai kejenuhan.

Kurva yang dipakai adalah kurva linearnya (*unsaturated*), karena kelebihan arus medan pada keadaan jenuh sudah dikompensasi oleh adanya reaksi jangkar.

b. Percobaan hubungan singkat akan menghasilkan hubungan antara arus jangkar ( $I$ ) dengan arus medan ( $I_f$ ) yang berupa garis lurus ( $I_{hs}$ ). [1][6]



**Gambar 2.11.** Kurva pengujian tanpa beban dan hubung singkat generator sinkron [1]

Nilai impedansi suatu generator sinkron ( $Z_s$ ):

$$Z_s \sqcup \sqrt{R_s^2 + X_s^2} \quad \frac{E_o}{I_{hs}} \quad (2.5)$$

Karena  $X_s \gg R_s$ , maka harga reaktansi sinkron ( $X_s$ ) dihitung dengan persamaan :

$$X_s \sqcup \frac{E_o}{I_{hs}} \quad \frac{O \sqcup a}{O' \sqcup b} \quad (2.6)$$

Dimana :

$Z_s$  = Impedansi generator sinkron (Ohm)

$X_s$  = Reaktansi sinkron (Ohm)

$R_s$  = Resistansi generator sinkron (Ohm) [1][7]

### **BAB III**

## **GENERATOR SINKRON MAGNET PERMANEN FLUKS AKSIAL JENIS CAKRAM**

### **3.1 Definisi Generator Sinkron Magnet Permanen**

Generator merupakan suatu mesin yang dapat mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Generator sinkron adalah generator yang menghasilkan frekuensi arus listrik yang sebanding dengan kecepatan rotasi mekanik. Sehingga bila digabungkan definisi keduanya, maka generator sinkron magnet permanen adalah generator sinkron yang menggunakan material magnet permanen sebagai pengganti kumparan medan pada rotor sehingga tidak diperlukan adanya pembangkit (*exciter*) dan sikat.

Generator sinkron magnet permanen tetap terdiri dari dua bagian utama sebagaimana generator sinkron pada umumnya, yaitu rotor (bagian yang berputar) dan stator (bagian yang diam). Perbedaan utama dari generator sinkron magnet permanen dengan generator sinkron biasa adalah pada cara pembangkitan (sistem eksitasi) fluks magnetik, yaitu pada generator sinkron magnet permanen fluks magnet dari rotor dibangkitkan oleh magnet permanen dengan kekuatan dan spesifikasi tergantung dari material magnet yang digunakan. Sedangkan pada generator sinkron biasa fluks magnet dari rotor dibangkitkan oleh tegangan DC yang diberikan ke kumparan medan melalui cincin geser dan sikat.

Generator sinkron magnet permanen banyak digunakan untuk berbagai aplikasi, seperti mesin elektrik, pompa, kipas, kontrol katup, hingga peralatan industri. Tetapi untuk saat ini, pengembangan generator sinkron magnet permanen banyak diaplikasikan sebagai pembangkit energi listrik terbarukan (menggunakan tenaga alam) yang handal dan berbiaya rendah. Adapun keuntungan yang dimiliki oleh generator sinkron magnet permanen adalah sebagai berikut :

1. Generator tipe ini tidak membutuhkan sumber arus eksternal untuk membangkitkannya
2. Tingkat perawatan yang mudah dan murah karena generator sinkron tidak memakai cincin geser dan sikat

Secara garis besar, generator sinkron magnet permanen dapat dibagi menjadi dua jenis bila dilihat dari fluks magnet yang dihasilkan, yaitu :

- ◆ Generator sinkron magnet permanen dengan fluks radial/generator sinkron MPFR (*Radial Flux Permanent Magnet Generator/RFPM Generator*)
- ◆ Generator magnet sinkron permanen dengan fluks aksial/generator sinkron MPFA (*Axial Flux Permanent Magnet Generator/AFPM Generator*)

Pada tulisan ini, hanya akan dibahas mengenai generator magnet permanen dengan fluks aksial yang memiliki rotor dan stator berbentuk piringan (cakram). Generator tersebut dikenal juga dengan generator piringan dan merupakan alternatif yang menarik selain generator silindris radial karena bentuknya yang pipih, ringkas dan mampu menghasilkan daya output yang tinggi.

### 3.2 Topologi dan Geometri

Bila dilihat secara konstruksi, generator sinkron MPFA dapat tersusun dalam bentuk satu sisi atau sisi ganda, dengan atau tanpa slot jangkar, dengan atau tanpa inti jangkar, dengan rotor magnet permanen internal atau eksternal, dan dengan magnet permanen *surface-mounted* atau interior.

Berbagai macam topologi generator MPFA dapat dikelompokkan sebagai berikut :

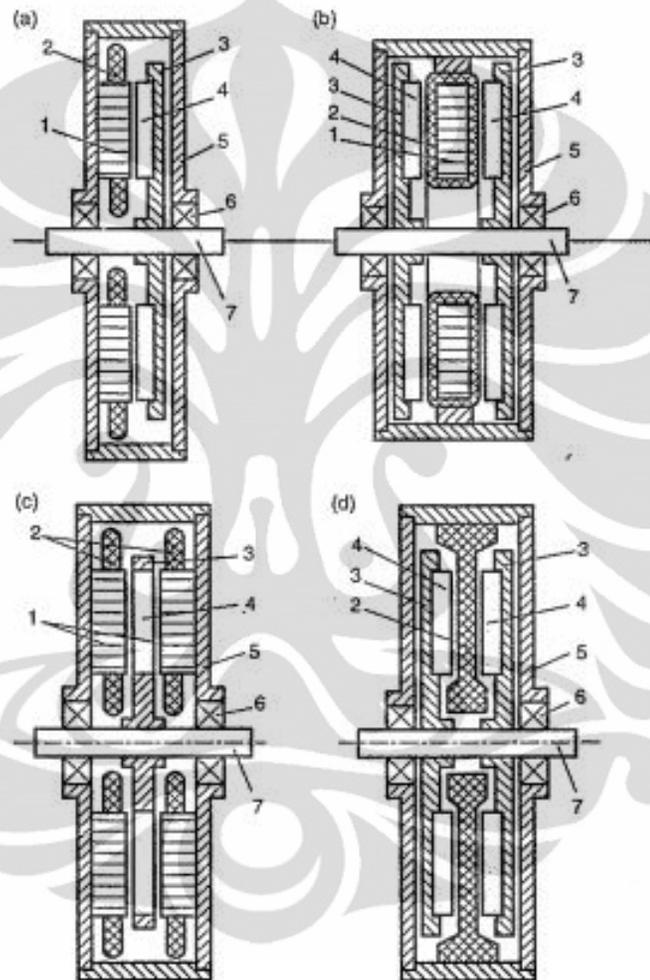
- ❖ Generator MPFA satu sisi
  - ◆ Dengan slot stator
  - ◆ Dengan stator tanpa slot
  - ◆ Dengan stator kutub tonjol atau kutub sepatu
- ❖ Generator MPFA dua sisi
  - ◆ Dengan stator internal
    - Dengan slot stator
    - Dengan stator tanpa slot
      - Dengan stator inti besi
      - Dengan stator tanpa inti
      - Keduanya tanpa inti rotor dan stator
    - Dengan stator kutub tonjol
  - ◆ Dengan rotor internal

Dengan slot stator

Dengan stator tanpa slot

Dengan stator kutub tonjol

❖ Generator MPFA multi piringan



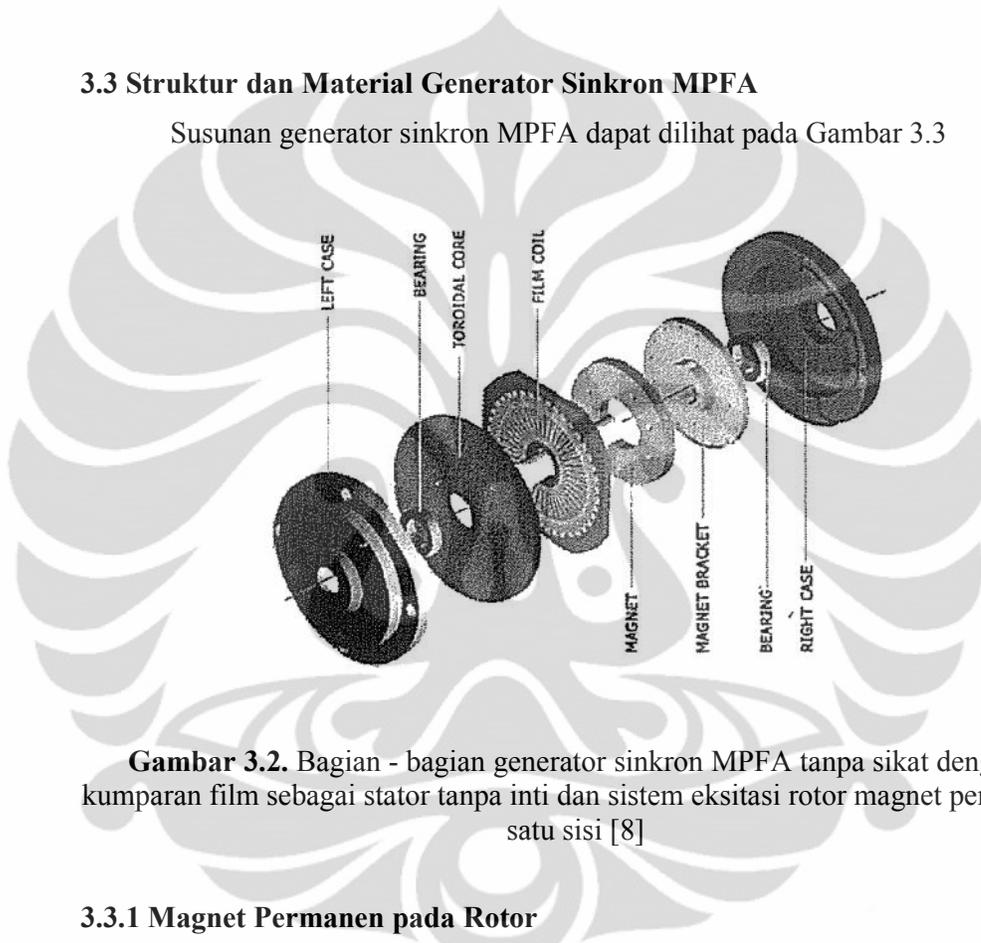
**Gambar 3.1.** Topologi dasar generator MPFA (a) generator sisi tunggal dengan slot (b) generator dua sisi tanpa slot dengan stator internal diapit dua rotor magnet permanen (c) generator dua sisi dengan slot stator dan rotor magnet permanen internal (d) generator dua sisi dengan stator internal tanpa inti. 1-inti stator, 2-lilitan stator, 3-rotor, 4-magnet permanen, 5-bingkai, 6-bearing, 7-poros [8]

Konfigurasi generator sinkron MPFA dengan stator tanpa inti tentu akan menghilangkan pemakaian bahan feromagnetik dari stator, seperti lapisan besi

tipis atau serbuk SMC pada stator (jangkar) sehingga pada akhirnya akan menghilangkan arus eddy yang diakibatkan dan rugi-rugi histerisis inti. Selain itu, karena tidak memiliki inti stator, generator sinkron MPFA dengan stator tanpa inti mampu beroperasi pada tingkat efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan generator konvensional [8].

### 3.3 Struktur dan Material Generator Sinkron MPFA

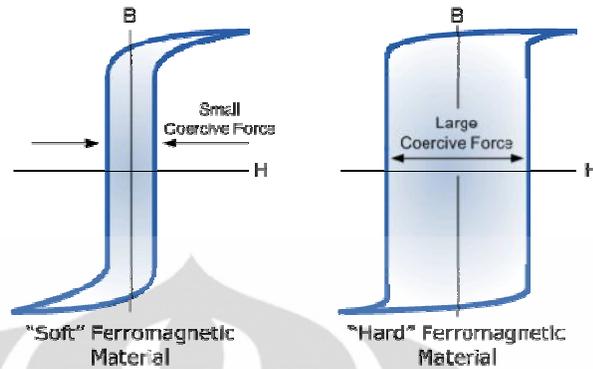
Susunan generator sinkron MPFA dapat dilihat pada Gambar 3.3



**Gambar 3.2.** Bagian - bagian generator sinkron MPFA tanpa sikat dengan kumparan film sebagai stator tanpa inti dan sistem eksitasi rotor magnet permanen satu sisi [8]

#### 3.3.1 Magnet Permanen pada Rotor

Seperti telah diketahui, penggunaan magnet permanen pada generator sinkron MPFA merupakan perbedaan yang paling mendasar dibanding generator induksi. Magnet permanen itu sendiri merupakan suatu material yang memiliki sifat kemagnetan yang tetap tanpa harus melalui proses magnetisasi terlebih dahulu. Magnet permanen dapat menghasilkan fluks magnetik di celah udara tanpa adanya lilitan penguat (*exciter*) dan disipasi daya dari sumber eksternal.



**Gambar 3.3** Perbedaan kurva histerisis antara magnet permanen (magnet bahan keras) dengan magnet induksi (magnet bahan lunak) [9]

Salah satu karakteristik utama dari magnet permanen adalah memiliki kurva histerisis yang lebar, oleh karena itu magnet permanen disebut juga dengan magnet bahan keras. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 3.3. Kurva histerisis merupakan kurva yang menunjukkan karakter hubungan kerapatan fluks magnetik ( $B$ ) dengan intensitas medan magnet ( $H$ ) tidak linear.

Pada kondisi hampa udara, kerapatan fluks magnetik sebanding dengan intensitas medan magnet, sehingga :

$$B = \mu_0 \cdot H \quad (3.1)$$

Dimana :

$B$  = Kerapatan fluks magnetik (T)

$\mu_0$  = Konstanta magnetik ( $4\pi \times 10^{-7}$ )

$H$  = Intensitas medan magnet (A/m) [2]

Intensitas medan magnet itu sendiri besarnya dipengaruhi oleh kuat arus ( $I$ ) dan jaraknya ( $L$ ) sebagaimana dijelaskan dalam persamaan berikut :

$$\begin{aligned} \int H \, dL &= I \\ H \cdot L &= I \\ H &= \frac{I}{L} \end{aligned} \quad (3.2)$$

Dimana :

$H$  = Intensitas medan magnet (A/m)

$I$  = Kuat arus (Ampere)

$L$  = Jarak magnet (A/m) [10]

Dari persamaan (3.2) nampak bahwa jarak magnet mempengaruhi kuat arus yang dibangkitkan dan tegangannya. Nilai kepadatan fluks magnet setiap magnet berbeda, tergantung dari material penyusunnya. Terdapat tiga material penyusun magnet permanen yang umum digunakan saat ini, yaitu :

1. Alnico, merupakan material campuran dari aluminium, nikel, kobalt, dan besi
2. Keramik, merupakan material campuran dari ferit dan bahan lainnya, contohnya barium ferit ( $BaO \times 6Fe_2O_3$ ) dan strontium ferit ( $SrO \times 6Fe_2O_3$ )
3. Magnet dari material bumi langka seperti samarium kobalt (SmCo) dan besi-boron-neodimium (NdFeB)

Berikut adalah tabel spesifikasi beberapa bahan magnet permanen :

**Tabel 3.1.** Spesifikasi Beberapa Material Magnet Permanen [11]

<b>Material Magnet</b>	<b>Energi Maksimum</b> <i>Bh<sub>max</sub> (MGOe)</i>	<b>Kepadatan Fluks Magnet</b> <i>Br(G)</i>	<b>Daya Tarik</b> <i>H<sub>c</sub>(Koe)</i>	<b>Temperatur Kerja °C</b>
Keramik 5	3.4	3950	2400	400
Alnico 5	3.9	10900	620	540
Alnico cetak 8	5.3	8200	1650	540
Samarium kobalt 20 (1.5)	20	9000	8000	260
Samarium kobalt 28 (2.17)	28	10500	9500	350
Neodimium N45	45	13500	10800	80
Neodimium 33UH	33	11500	10700	180

Berdasarkan data di Tabel 3.1, nilai kerapatan fluks magnet yang berbeda akan mengakibatkan fluks pada magnet berbeda, sehingga :

$$\Phi = B \cdot A$$

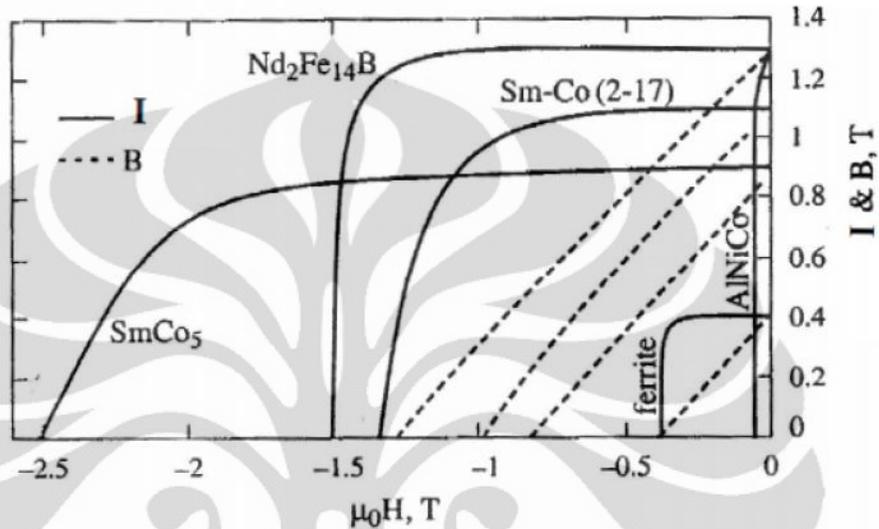
Dimana :

$\Phi$  = fluks pada komponen

B = Kerapatan fluks magnetik

A = Luas penampang [2]

Sedangkan kurva histerisis beberapa bahan magnet dapat dilihat pada Gambar 3.4.



**Gambar 3.4.** Kurva karakteristik histerisis magnetik beberapa material magnet permanen [11]

### 3.3.2 Kumputan pada Stator

Lilitan dari kumputan pada generator sinkron MPFA terbuat dari kawat tembaga kaku dengan bentuk penampang persegi atau bundar. Konduktivitas elektrik dari kawat tembaga pada suhu  $20^{\circ}\text{C}$  adalah  $57 \times 10^6 \geq \sigma_{20} \geq 56 \times 10^6 \text{ S/m}$ . Untuk kawat aluminium  $\sigma_{20} \approx 33 \times 10^6 \text{ S/m}$ . Konduktivitas elektrik tergantung dari temperatur dan untuk  $\theta - 20^{\circ}\text{C} \leq 150^{\circ}\text{C}$  dapat diekspresikan sebagai berikut :

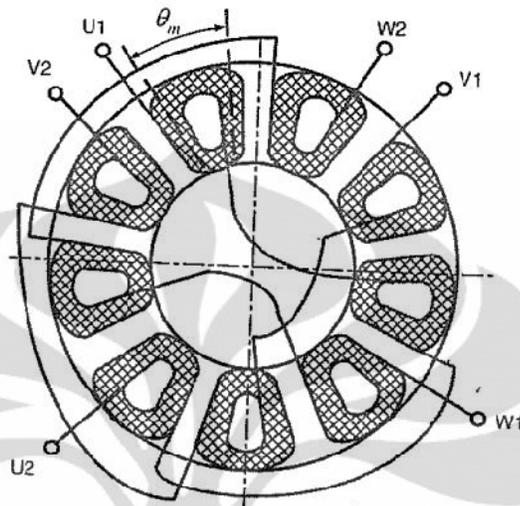
$$\sigma = \frac{\sigma_{20}}{1 + \alpha(\theta - 20)} \quad (3.1)$$

Dimana :  $\alpha$  = koefisien temperatur dari resistansi elektrik, untuk kawat tembaga  $\alpha = 0.00393 \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$  dan untuk kawat aluminium  $\alpha = 0.00403 \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$  [8]

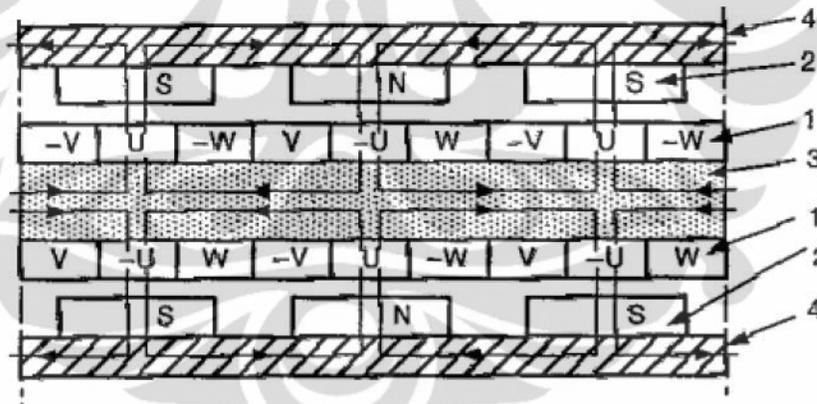
Kenaikan temperatur maksimum untuk lilitan pada generator MPFA ditentukan oleh temperatur maksimum material selubung lilitan itu sendiri, dan dapat dirumuskan sebagai :

$$\theta_{maks} = \theta_c \quad (3.2)$$

Dimana :  $\Delta$  = kenaikan temperatur maksimum yang dibolehkan [8]



**Gambar 3.5.** Diagram koneksi lilitan sembilan kumparan dengan tipe tiga fasa dari sebuah generator MPFA [8]



**Gambar 3.6.** Lilitan tiga fasa, polaritas magnet permanen dan jalur gaya fluks magnet dari generator MPFA dua sisi dengan stator tanpa inti. 1-lilitan, 2-magnet permanen, 3-plat stator, 4-plat rotor [8]

### 3.4 Prinsip Generator Sinkron MPFA

#### 3.4.1 Rangkaian Magnetik Generator MPFA Satu Sisi dengan Stator tanpa Inti

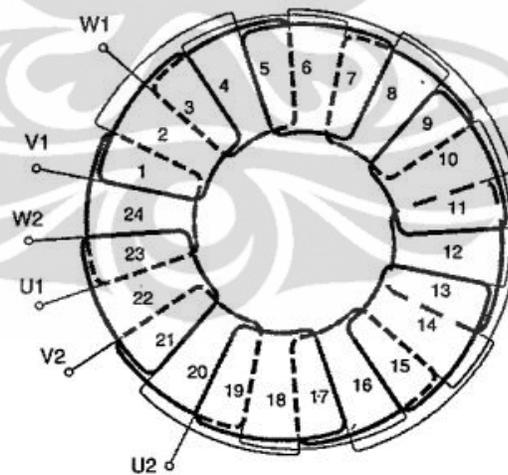
Desain satu sisi dari generator fluks aksial lebih sederhana dibanding dengan desain dua sisi, tetapi memiliki kelemahan yaitu produksi putarannya lebih rendah. Dengan adanya stator tanpa inti, maka stator akan melilit pada

struktur penahan non-magnetik dan non-konduktif sehingga rugi-rugi pada inti stator seperti arus eddy dan histerisis dapat dihilangkan. Rugi-rugi pada magnet permanen dan rotor besi dapat diabaikan. Desain generator semacam ini mampu menghasilkan efisiensi yang cukup tinggi saat daya putaran roda penggerak nol.

### 3.4.2 Lilitan pada Stator tanpa Inti

Lilitan pada stator tanpa inti dapat berbentuk dua jenis, trapesium atau belah ketupat. Bentuk kumparan trapesium lebih umum digunakan dan biasanya terdiri dari satu lapis kumparan. Karena akhir kumparan dapat ditebuk dalam beberapa sudut, maka konduktor yang aktif berada dalam bidang datar yang sama dan ujung lilitan tersebut berdekatan dalam satu kelompok. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat Gambar 3.7.

Pada bentuk lilitan belah ketupat, memiliki akhir lilitan yang lebih pendek dibandingkan dengan lilitan bentuk trapesium. Sisi konduktor yang aktif disusun miring sehingga memungkinkan untuk diletakkan saluran air pendingin di dalam stator. Adapun kerugian utama dari lilitan berbentuk belah ketupat adalah dapat mengurangi daya putar (torsi) dari generator.



**Gambar 3.7.** Lilitan tanpa inti dari sebuah generator MPFA tiga fasa dengan delapan kutub dan dua rotor eksternal [8]

### 3.5 Karakteristik Generator Sinkron MPFA

#### 3.5.1 Fluks Magnetik

Bentuk gelombang sinusoidal yang dibangkitkan oleh magnet permanen memiliki nilai rata-rata kerapatan fluks magnetik sebagai berikut :

$$B_{avg} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} B_{mg} \sin \omega t \, d\omega = \frac{p}{2\pi} B_{mg} \int_0^{2\pi} \cos \omega t \, d\omega = \frac{1}{\pi} B_{mg} [\cos \omega t - \cos 0] = \frac{2}{\pi} B_{mg} \quad (3.8)$$

Dimana :

$B_{mg}$  = nilai puncak dari kerapatan fluks magnetik pada celah udara [8]

Sedangkan fluks magnetik yang dibangkitkan oleh setiap kutub magnet permanen untuk bentuk gelombang nonsinusoidal  $B_{avg} = \alpha_i B_{mg}$  adalah :

$$\phi_f = \frac{2}{\pi} B_{mg} \frac{p}{2p} (R_{out}^2 - R_{in}^2) \quad (3.9)$$

Dimana :

$p$  = jumlah pasangan kutub

$R_{out}$  =  $0.5D_{out}$  = merupakan jari – jari luar dari magnet permanen

$R_{in}$  =  $0.5D_{in}$  = merupakan jari – jari dalam dari magnet permanen [8]

Dengan menggunakan rasio diameter dalam terhadap diameter luar sebagai berikut :

$$k_d = \frac{R_{in}}{R_{out}} = \frac{D_{in}}{D_{out}} \quad (3.10)$$

Maka persamaan (3.9) menjadi :

$$\phi_f = \frac{2}{\pi} B_{mg} \frac{p}{8p} D_{out}^2 (1 - k_d^2) \quad [8] \quad (3.11)$$

#### 3.5.2 Torsi Elektromagnetik dan EMF

Berdasarkan persamaan (3.6) dan (3.7), torsi elektromagnetik rata – rata dari generator MPFA adalah :

$$dT_d = 2\pi m_1 I_a N_1 k_w B_{mg} r dr \quad [8] \quad (3.12)$$

Jika persamaan di atas diintegrasikan dari  $D_{out}/2$  hingga  $D_{in}/2$  terhadap  $r$ , maka persamaan torsi elektro magnetik rata-rata dapat ditulis sebagai berikut :

$$T_d \approx \frac{1}{4} \frac{m_1 I_a N_1 k_{w1} B_m g (D_o u t^2 - D_i n^2)}{B_{mg} D_{out}^2 (1 - k_d^2) I_a} \quad (3.13)$$

Dimana  $k_d$  berdasarkan persamaan (3.10). Dengan mensubstitusikan persamaan (3.11) ke dalam persamaan (3.13), torsi rata-rata adalah :

$$T_d \approx 2 \frac{p}{\pi} m_1 N_1 k_{w1} \sum_f I_a \quad [8] \quad (3.14)$$

Untuk mendapatkan torsi rms pada arus sinusoidal dan kerapatan fluks magnetik sinusoidal, persamaan (3.14) harus dikalikan dengan koefisien 1,11, sehingga :

$$T_d \approx \frac{m_1}{\sqrt{2}} m_1 N_1 k_{w1} \sum_f I_a \quad k_t I_a \quad [8] \quad (3.15)$$

Dimana  $k_t$  adalah konstanta torsi.

EMF saat tanpa beban dapat ditemukan dengan mendiferensiasikan gelombang fluks harmonik pertama  $f_1 = f \sin t$  dan mengalikannya dengan  $N_1 k_{w1}$  :

$$e_f \approx N_1 k_{w1} \frac{d\phi_{f1}}{dt} \approx 2\pi f N_1 k_{w1} \sum_f \cos t \quad [8] \quad (3.16)$$

Nilai rms persamaan (3.16) dapat diperoleh dengan membagi nilai puncak  $2\pi f N_1 k_{w1} \sum_f$  dari EMF dengan  $\sqrt{2}$  sehingga :

$$E_f \approx \frac{1}{\sqrt{2}} 2\pi f N_1 k_{w1} \sum_f \approx \sqrt{2} p N_1 k_{w1} \sum_f n_s \quad k_E n_s \quad (3.17)$$

Dimana konstanta EMF (konstanta jangkar) adalah :

$$k_E \approx \sqrt{2} p N_1 k_{w1} \sum_f \quad [8] \quad (3.17)$$

### 3.6 Rugi-rugi dan Efisiensi pada Generator Sinkron MPFA

#### 3.6.1 Rugi-rugi Lilitan pada Stator

Menurut Sadeghierad et al. rugi-rugi lilitan stator dapat diperoleh menggunakan persamaan dasar,  $I^2 R$  yang dihitung berdasarkan resistansi nominal yang diperbaiki untuk suhu dan frekuensi (1099) :

$$P_{cu} \approx R_s |I_{load}|^2 \quad (3.18)$$

Dimana :  $I_{load}$  = Arus beban penuh dari generator

$R_s$  = Resistansi lilitan [12]

### 3.6.2 Rugi-rugi Arus Eddy

Gerakan dari magnet permanen relatif terhadap lilitan stator menghasilkan medan alternatif yang melalui setiap konduktor dan menghasilkan arus eddy. Arus eddy merupakan arus yang terpusat pada satu titik bias, umumnya terjadi pada mesin listrik yang menggunakan inti dan kumparan dari besi. Arus eddy terjadi karena tingginya frekuensi dari medan magnet sehingga mengakibatkan terjadinya rugi-rugi tambahan pada stator sebagai berikut :

$$P_{eddy\_cu} \sqcup \frac{(B_g 2\pi f D_{strand} 10^{-3})^2}{32\rho_{cu}} V_{cu} \quad (3.20)$$

Dimana :  $B_g$  = Kerapatan fluks di celah udara  
 $f$  = Frekuensi rotor  
 $D_{strand}$  = Diameter setiap kawat konduktor  
 $V_{cu}$  = Volume tembaga (lilitan)  
 $\rho_{cu}$  = Resistivitas konduktor [12]

### 3.6.3 Efisiensi

Total rugi – rugi keseluruhan dari generator MPFA adalah :

$$P \sqcup \Delta P_{cu} + P_{eddy\_cu} + P_{mech} \quad (3.21)$$

Sehingga efisiensi generator MPFA yaitu :

$$\eta \sqcup \frac{P_{out}}{P_{out} + P} \quad (3.22)$$

Dimana :  $P_{out}$  = Daya output elektrik

$P$  = Total rugi – rugi keseluruhan [12]

### 3.7 Karakteristik Performa Generator MPFA

Generator MPFA saat diberikan penggerak utama dan dihubungkan ke beban elektrik akan bekerja sebagai generator sinkron tunggal (*stand alone*), dan memiliki impedansi beban setiap fasa sebagai berikut :

$$Z_L \sqcup R_L + j\omega L_L + j\omega \frac{1}{C} \quad (3.23)$$

Dimana :  $Z_L$  = Impedansi beban

$R_L$  = Resistansi beban

$L_L =$  Induktansi beban [8]

Arus input pada lilitan stator (jangkar) adalah :

$$I_a \approx \frac{E_f}{\sqrt{(R_1 + R_L)^2 + (L_s - L_L - \frac{1}{C})^2}} \quad (3.24)$$

Dimana :  $I_a =$  Arus pada stator (beban)

$E_f =$  Gaya EMF per fasa

$R_1 =$  Resistansi pada salah satu fasa

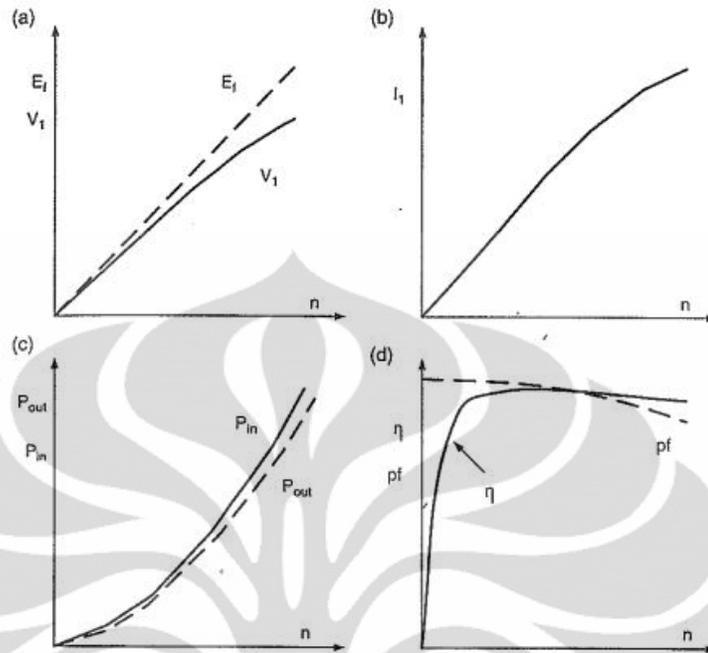
$L_s =$  Induktansi pada stator [8]

Tegangan yang dihasilkan pada terminal output adalah :

$$V_1 \approx I_a \sqrt{R_L^2 + (L_L - \frac{1}{C})^2} \quad (3.25)$$

Dimana :  $V_1 =$  Tegangan pada salah satu fasa [8]

Karakteristik EMF per fasa  $E_f$ , tegangan salah satu fasa  $V_1$ , arus pada stator (beban)  $I_a$ , daya output  $P_{out}$ , daya input  $P_{in}$ , efisiensi dan faktor daya  $pf = \cos$  terhadap kecepatan  $n$  dari generator sinkron MPFA untuk beban induktif  $Z_L = R_L + j L_L$  dapat dilihat pada Gambar 3.8.



**Gambar 3.8.** Karakteristik generator sinkron MPFA tunggal untuk beban induktif  $Z_L = R_L + j L_L$  : (a) EMF  $E_f$  per fasa dan tegangan fasa  $V_1$  terhadap kecepatan  $n$ , (b) Arus beban  $I_a$  terhadap kecepatan  $n$ , (c) daya output  $P_{out}$  dan daya input  $P_{in}$  terhadap kecepatan  $n$ , (d) Efisiensi  $\eta$  dan faktor daya  $pf = \cos \phi$  terhadap kecepatan  $n$  [8]

## BAB IV SIMULASI DESAIN STATOR GENERATOR SINKRON MPFA JENIS CAKRAM

### 4.1 Prototipe Generator Sinkron MPFA Jenis Cakram

Generator sinkron MPFA berbentuk cakram (piringan), hal ini dikarenakan fluks magnet yang dimanfaatkan berasal dari sisi aksial dari magnet permanen. Bentuk rotor dan statornya serupa, berbentuk lingkaran seperti cakram. Dari segi dimensi, ukuran generator ini lebih kecil dibandingkan generator berbentuk silinder. Sehingga pada aplikasinya akan lebih hemat ruang dan biaya. Adapun spesifikasi generator yang direncanakan berdasarkan pada konsep generator mini yang sudah ada, seperti dinamo sepeda dan berdasarkan literatur yang diperoleh. Berikut adalah spesifikasi generator yang direncanakan :

Jumlah kutub magnet permanen	6 buah
Material magnet permanen	Keramik
Bentuk magnet permanen	Lingkaran
Diameter magnet permanen	25 mm
Tebal magnet permanen	3 mm
Jarak antar magnet permanen	3 mm
Jumlah lilitan	400 lilitan
Bentuk kumparan stator	Lingkaran tanpa inti
Diameter dalam kumparan	10 mm
Diameter luar kumparan	25 cm
Diameter lilitan kawat	0,3 mm
Jumlah fasa	Satu fasa
Lebar celah udara ( <i>air gap</i> )	2 mm
Panjang aksial	7 mm
Jumlah kumparan stator	6 buah
Tegangan output	12 Volt

Tegangan output yang diinginkan adalah 12 Volt karena tegangan tersebut lebih mudah bila dihubungkan dengan perangkat luar seperti untuk mengisi aki atau baterai. Berdasarkan spesifikasi tersebut, penulis kemudian merealisasikan generator sinkron MPFA jenis cakram menjadi alat eksperimen untuk menguji

karakteristik dan parameter secara riil. Alat eksperimen jadi dapat dilihat pada Gambar 4.1.



**Gambar 4.1.** Prototipe generator sinkron MPFA

#### 4.1.1 Bentuk dan Material Rotor

Komponen utama rotor pada generator MPFA berupa magnet permanen, yang ditempelkan pada penampang rotor (*yoke*) berupa plat besi berbentuk lingkaran. Magnet permanen yang digunakan berbentuk bulat pipih. Bentuk bulat ini dipilih karena magnet dengan bentuk bulat lebih mudah ditemukan dan dijual bebas di pasaran.



**Gambar 4.2.** Prototipe rotor

#### 4.1.2 Bentuk dan Material Stator

Komponen utama stator pada generator sinkron MPFA berupa kumparan berbentuk bulat yang ditempelkan pada penampang (*yoke*) berupa kayu pipih berbentuk lingkaran. Bentuk lingkaran disesuaikan dengan bentuk rotor yang berbentuk lingkaran. Material kawat yang digunakan sebagai kumparan adalah kawat email yang terbuat dari tembaga (*copper wire*) berdiameter 0,3 mm.



**Gambar 4.3.** Prototipe stator

### 4.2 Pengujian Generator Sinkron MPFA Jenis Cakram

#### 4.2.1 Metodologi Pengujian

Pengujian dilakukan untuk mengetahui karakteristik dari generator sinkron MPFA jenis cakram. Adapun karakteristik yang diukur pada generator sinkron MPFA adalah :

- ◆ Kecepatan putar  $n$  (rpm)
- ◆ Frekuensi putaran,  $f$  (Hz)
- ◆ Tegangan tanpa beban,  $V$  (Volt)
- ◆ Arus hubungan singkat,  $I_{sc}$  (Ampere)
- ◆ Reaktansi sinkron,  $X_s$

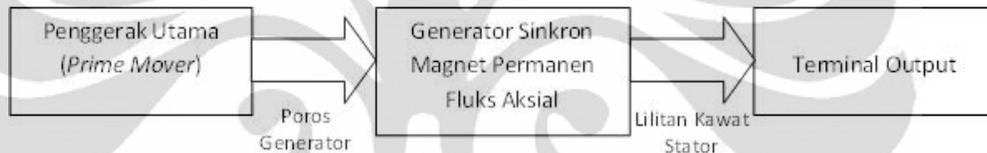
#### 4.2.2 Lokasi Pengujian

- ◆ Lokasi : Laboratorium Kendali Gedung Departemen Teknik Elektro, Universitas Indonesia
- ◆ Tanggal Pelaksanaan : 23 Desember 2011
- ◆ Pelaksana : Irwinsyah Fuadi
- ◆ Pembimbing : Ir. Agus R. Utomo, MT.

#### 4.2.3 Blok Diagram Pengujian

Rangkaian pengujian terdiri dari menjadi tiga blok utama, yaitu

- ◆ Blok penggerak utama (*prime mover*)
- ◆ Blok generator sinkron magnet permanen
- ◆ Blok output



**Gambar 4.4.** Blok diagram pengujian generator sinkron MPFA Jenis Cakram

Sebagai penggerak utama dari generator, digunakan mesin motor DC dengan frekuensi kecepatannya bisa diatur. Penggerak utama dihubungkan dengan poros generator (dikopel). Kedua ujung kawat kumparan pada stator dihubungkan dengan terminal keluaran (*output*) yang dipasang multimeter sebagai alat ukur.

#### 4.2.4 Bahan dan Alat Bantu Yang Digunakan

- ◆ Motor DC 1 set
- ◆ Modul pengontrol kecepatan motor DC 1 set
- ◆ Multimeter digital 1 buah
- ◆ Generator sinkron MPFA jenis cakram 1 set
- ◆ Toolset 1 set
- ◆ Kabel - kabel penghubung secukupnya

#### 4.2.5 Langkah-Langkah Pengujian

- a. Menghubungkan poros generator sinkron magnet permanen dengan *gear* motor DC.
- b. Menghubungkan kabel power motor DC ke tegangan jala-jala.
- c. Menghubungkan kabel – kabel pada modul – modul pembantu DC dengan modul utama pengontrol kecepatan motor DC .
- d. Menghubungkan terminal output kawat stator dengan kabel penghubung ke multimeter.
- e. Mengaktifkan modul motor DC.
- f. Mengatur putaran motor DC hingga tachometer pada modul pengontrol kecepatan motor DC menunjukkan frekuensi yang diinginkan.
- g. Tunggu hingga kecepatan stabil, lalu mengamati dan mencatat hasil pengujian, seperti tampak pada tabel 4.1.
- h. Menaikkan frekuensi secara perlahan dan ulangi langkah g untuk frekuensi yang lainnya.

#### 4.2.6 Data Hasil Pengujian

Dari hasil pengukuran didapatkan resistansi generator sinkron  $R_s = 8,25$

**Tabel 4.1** Hasil Pengukuran Karakteristik Generator Sinkron MPFA Jenis Cakram dengan Jarak rotor dan Stator  $\pm 2,5$  mm.

No.	Kecepatan (rpm)	Tegangan (Volt)	Frekuensi (Hertz)	Arus Hubung Singkat (Ampere)
1	50	0,38	4,64	-
2	100	0,69	10,46	0,021
3	150	0,97	13,8	0,039
4	200	1,26	17,84	0,048
5	250	1,63	23,12	0,06
6	300	1,96	27,83	0,071
7	350	2,30	32,67	0,082
8	400	2,64	37,46	0,094
9	450	2,98	42,24	0,105
10		3,20	53,29	0,120
11		3,23	45,87	0,113
12		3,59	50,8	0,125
13		4,12	58,11	0,143

**Tabel 4.2** Hasil Pengukuran Karakteristik Generator Sinkron MPFA Jenis Cakram dengan Jarak Rotor dan Stator  $\pm 1,5$  mm

No.	Kecepatan (rpm)	Tegangan (Volt)	Frekuensi (Hertz)	Arus Hubung Singkat (Ampere)
1	50	0,35	4,76	0,025
2	100	0,6	7,41	0,03
3	150	0,75	11,86	0,033
4	200	1,03	15,8	0,041
5	250	1,33	19,6	0,051
6	300	1,53	22,12	0,057
7	350	1,72	24,4	0,064
8	400	2,02	28,16	0,074
9	450	2,21	30,6	0,08
10	500	2,5	34,16	0,09
11	550	2,76	33,6	0,1
12	600	2,95	35,83	0,105
13	650	3,22	39,13	0,115
14	700	3,48	42,15	0,123

### 4.3 Analisa Data Hasil Pengujian

Dengan menggunakan persamaan (2.1) untuk menentukan kecepatan berdasarkan frekuensi hasil pengukuran dan persamaan (2.6) untuk menentukan reaktansi sinkron, dapat diperoleh hasil perhitungan pada Tabel 4.3. Dan dengan cara yang sama, diperoleh hasil perhitungan untuk jarak rotor dan stator 1,5 mm pada Tabel 4.4.

Pada Tabel 4.1 (pengukuran pertama) dapat dilihat setelah kecepatan 450 rpm (no. 9) tidak ada lagi data yang berhubungan dengan kecepatan. Hal ini dikarenakan kesalahan (*error*) pada tachometer. Kesalahan ini diketahui saat kecepatan pada tachometer menunjukkan kecepatan 500 rpm, frekuensi, tegangan dan arus hubungan singkat yang dihasilkan lebih kecil daripada saat kecepatan 450 rpm. Sehingga pengukuran yang dilakukan selanjutnya berdasarkan frekuensi. Saat pengukuran kedua, tachometer digunakan lagi. Dan hasilnya dapat dilihat pada Tabel 4.2.

**Tabel 4.3** Hasil Perhitungan Karakteristik Generator Sinkron MPFA Jenis Cakram dengan Jarak Rotor dan Stator (Lebar Celah Udara)  $\pm 2,5$  mm.

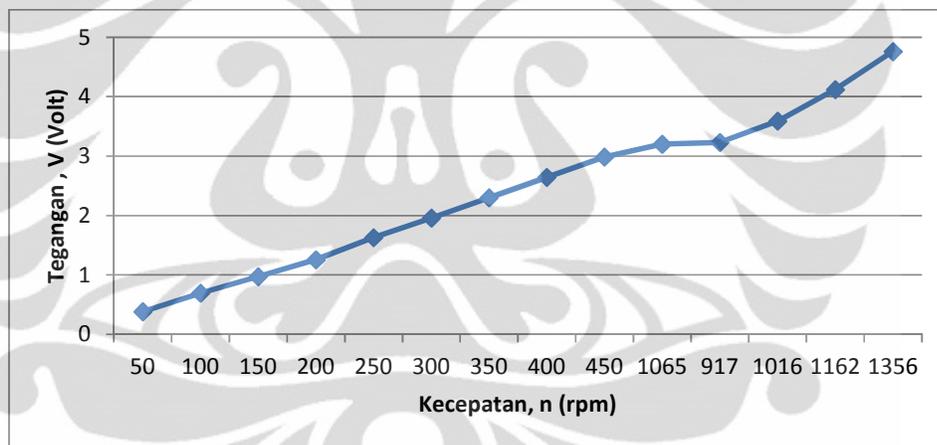
No.	Tegangan (Volt)	Frekuensi (Hertz)	Arus Hubung Singkat (Ampere)	Kecepatan (rpm)	Reaktansi Sinkron (Ohm)
1	0,38	4,64	-	92,8	-
2	0,69	10,46	0,021	209,2	33
3	0,97	13,8	0,039	276	24,90
4	1,26	17,84	0,048	356,8	26,19
5	1,63	23,12	0,06	462,4	27,15
6	1,96	27,83	0,071	556,6	27,58
7	2,30	32,67	0,082	653,4	28,04
8	2,64	37,46	0,094	749,2	28,13
9	2,98	42,24	0,105	844,8	28,42
10	3,20	53,29	0,120	1065,8	26,67
11	3,23	45,87	0,113	917,4	28,58
12	3,59	50,8	0,125	1016	28,72
13	4,12	58,11	0,143	1162,2	28,81
14	4,76	67,8	0,16	1356	29,75

**Tabel 4.4** Hasil Perhitungan Karakteristik Generator Sinkron MPFA Jenis Cakram dengan Jarak Rotor dan Stator (Lebar Celah Udara)  $\pm 1,5$  mm.

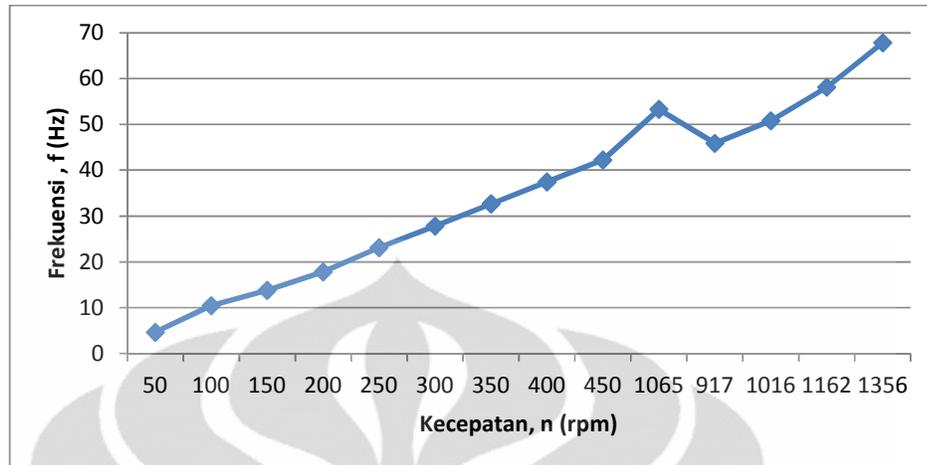
No.	Tegangan (Volt)	Frekuensi (Hertz)	Kecepatan (rpm)	Arus Hubung Singkat (Ampere)	Reaktansi Sinkron (Ohm)
1	0,35	4,76	95,2	0,025	14
2	0,6	7,41	148,2	0,03	20
3	0,75	11,86	237,2	0,033	22,73
4	1,03	15,8	316	0,041	25,12
5	1,33	19,6	392	0,051	26,08
6	1,53	22,12	442,4	0,057	26,84
7	1,72	24,4	488	0,064	26,88
8	2,02	28,16	563,2	0,074	27,30
9	2,21	30,6	612	0,08	27,63
10	2,5	34,16	683,2	0,09	27,78
11	2,76	33,6	672	0,1	27,60
12	2,95	35,83	716,6	0,105	28,10
13	3,22	39,13	782,6	0,115	28
14	3,48	42,15	843	0,123	28,29

Pada Tabel 4.3 dan Tabel 4.4 dapat dilihat nilai kecepatan berdasarkan perhitungan. Jika dibandingkan dengan nilai kecepatan pada Tabel 4.1 dan Tabel 4.2, terdapat perbedaan yang sangat signifikan antara nilai kecepatan hasil perhitungan dan nilai kecepatan hasil pengukuran. Dari hasil pengukuran yang mengalami kesalahan baca pada tachometer dan beda hasil pengukuran yang cukup besar dibandingkan dengan hasil perhitungan, maka dapat disimpulkan pada percobaan kali ini masih belum akurat dan banyak kekurangan.

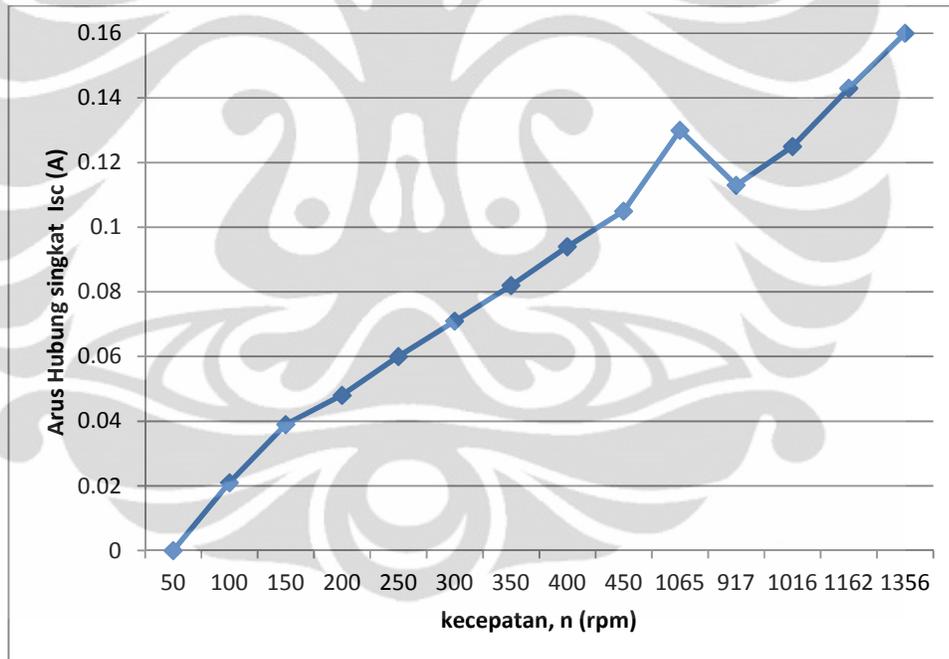
Faktor lain yang turut mempengaruhi hasil pengukuran karakteristik generator sinkron MPFA jenis cakram adalah adanya pergeseran pada poros generator sehingga mengurangi ketepatan pengukuran. Berdasarkan karakteristik hasil pengujian yang diperoleh, dapat dibuat kurva hubungan antara tegangan tanpa beban, frekuensi, arus dan kecepatan.



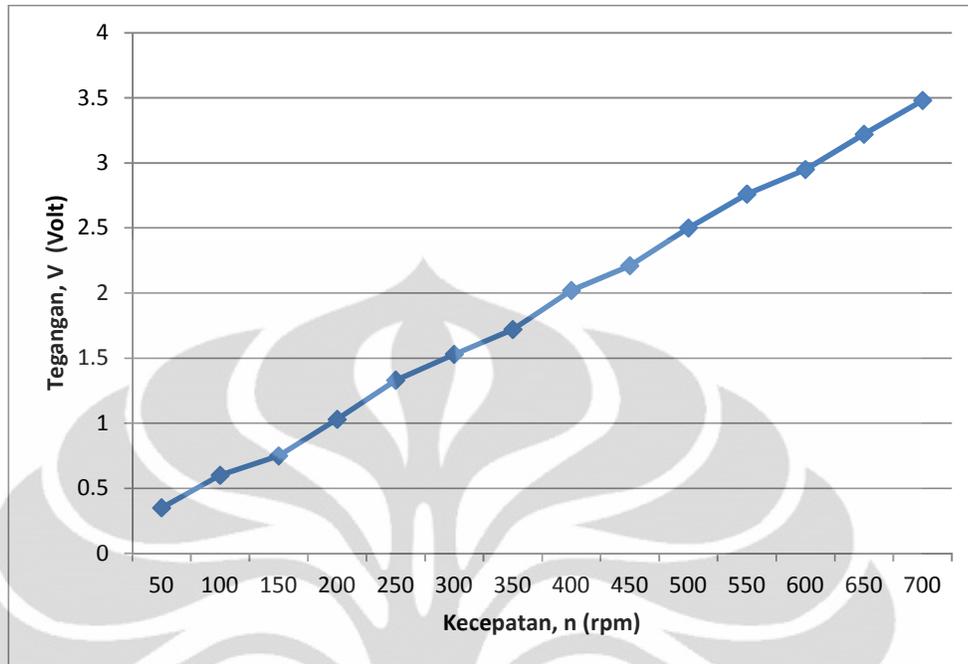
**Gambar 4.5.** Kurva hubungan tegangan tanpa beban terhadap kecepatan mekanik generator (jarak rotor-stator 2,5 mm)



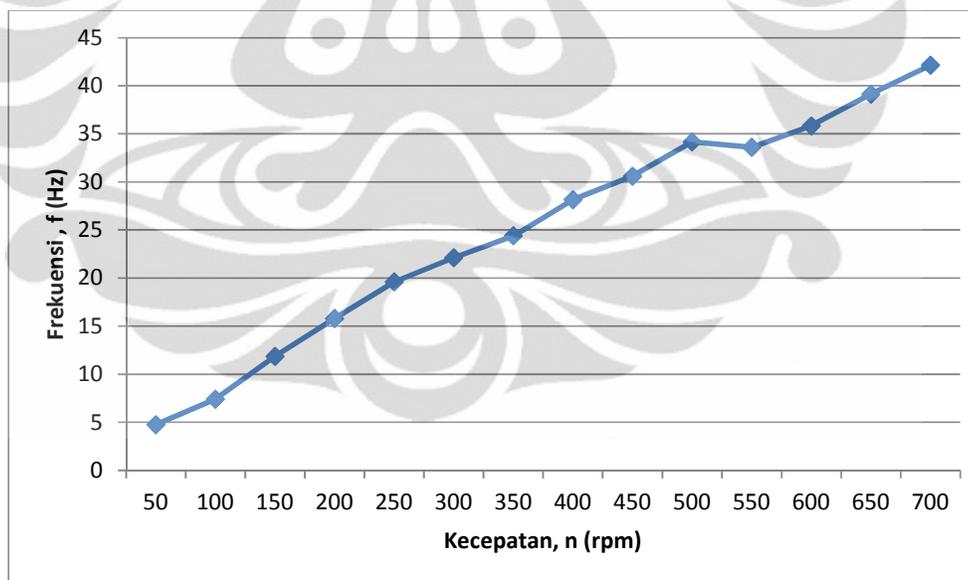
**Gambar 4.6.** Kurva hubungan frekuensi  $f$  terhadap kecepatan mekanik generator (jarak rotor-stator 2,5 mm)



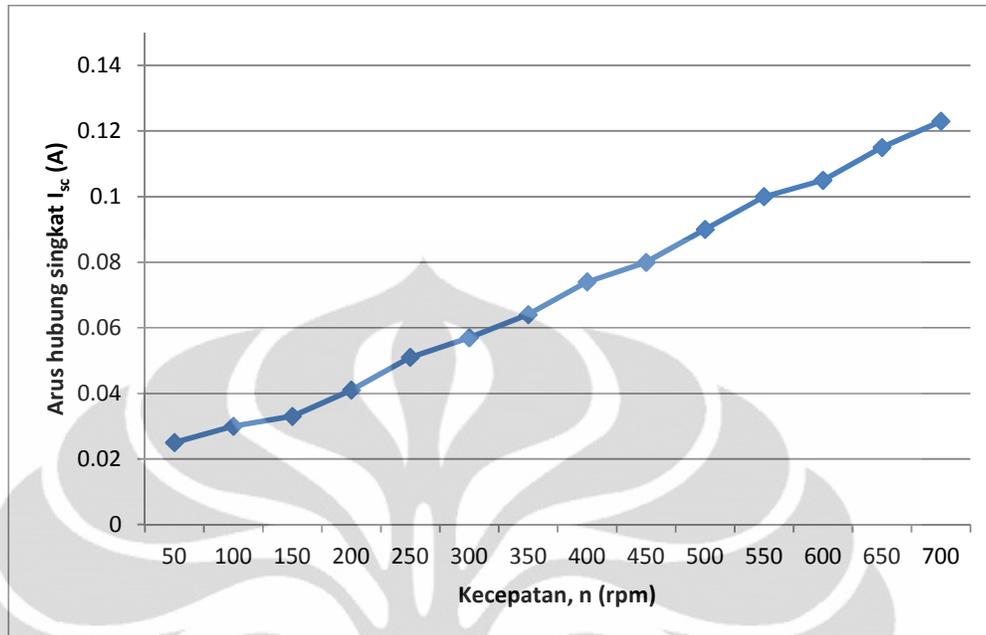
**Gambar 4.7.** Kurva hubungan arus hubung singkat  $I_{sc}$  terhadap kecepatan mekanik generator (jarak rotor-stator 2,5 mm)



**Gambar 4.8.** Kurva hubungan tegangan tanpa beban terhadap kecepatan mekanik generator (jarak rotor-stator 1,5 mm)



**Gambar 4.9.** Kurva hubungan frekuensi  $f$  terhadap kecepatan mekanik generator (jarak rotor-stator 1,5 mm)



**Gambar 4.10.** Kurva hubungan arus hubung singkat  $I_{sc}$  terhadap kecepatan mekanik generator (jarak rotor-stator 1,5 mm)

#### 4.4 Studi Desain Stator Generator Sinkron MPFA Jenis Cakram

Sebelum melakukan optimasi desain stator, terlebih dahulu penulis melakukan identifikasi parameter dan variabel dari generator sinkron MPFA jenis cakram sebagai berikut :

$X_{mp}$  = Jarak antar magnet permanen

$T_{mp}$  = Tebal magnet permanen

$T_y$  = Tebal plat rotor (*yoke*)  
= Sudut elevasi fluks magnet

$h_a$  = Panjang aksial

$h_m$  = Tinggi amplitudo (nilai maksimum) gelombang fluks magnet

$D_{mp}$  = Diameter magnet permanen

$D_{sto}$  = Diameter luar stator;  $R_{sto}$  = jari – jari luar stator

$D_{sti}$  = Diameter dalam stator;  $R_{sti}$  = jari – jari dalam stator

$h_{st}$  = Tinggi stator

$A_g$  = Lebar celah udara

$D_k$  = Diameter kawat

$N$  = Jumlah lilitan keseluruhan

$N_l$  = Jumlah lapisan kumparan stator

$N_{pl}$  = Jumlah lilitan per lapis (lilitan/*layer*)

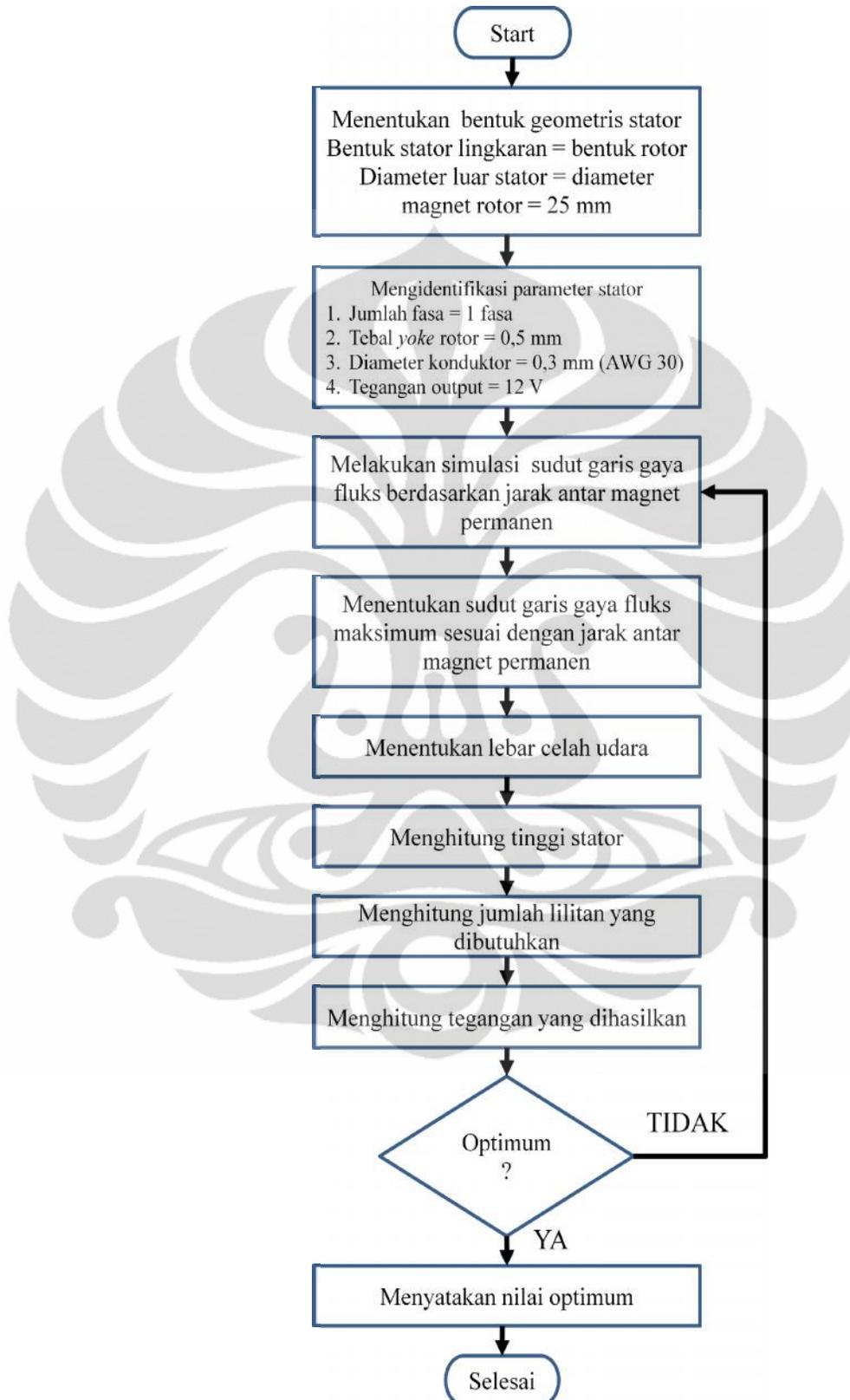
Dimana seluruh satuannya menggunakan ukuran milimeter. Saat mendesain stator, parameter bebas yang dipergunakan adalah lebar celah udara antara rotor dengan stator dan jarak antar magnet permanen. Sedangkan parameter lainnya seperti tebal dan diameter magnet permanen, tebal plat rotor dan panjang aksial serta diameter luar stator sudah ditentukan berdasarkan ukuran material yang ada.

Algoritma atau urutan langkah dalam mendesain stator generator sinkron MPFA dapat dilihat di Gambar 4.11.

#### 4.4.1 Studi Desain Bentuk Stator

Desain bentuk stator terdiri dari dua bagian, yaitu bentuk plat stator (*stator yoke*) yang berfungsi sebagai tempat meletakkan kumparan kawat dan bentuk kumparan kawat yang terdiri dari lilitan tembaga. Kedua bagian tersebut berbentuk lingkaran, dimana plat stator terbuat dari kayu dan kumparan kawat terdiri dari kawat tembaga yang dililit melingkar tanpa inti sehingga kumparannya berbentuk seperti donat (memiliki lubang di bagian tengahnya).

Menurut del Ferraro, Terrigi dan Capponi, karena kumparan berbentuk lingkaran, maka tidak diperlukan titik pertemuan antar kumparan dan bentuknya ditentukan oleh jumlah kutub magnet permanen yang ada pada rotor. Selain itu, kumparan berbentuk lingkaran juga memiliki performa yang lebih baik saat jumlah kutub sama dengan panjang radius sehingga medan magnet permanen dapat mencakup kumparan kawat [15]. Berdasarkan hal tersebut penulis menggunakan kumparan kawat tanpa inti (inti udara) yang diletakan dengan cara ditempel pada plat kayu berbentuk lingkaran bertujuan untuk mengikuti desain rotor dan magnet permanen dengan ukuran yang sama.



**Gambar 4.11.** Algoritma studi desain stator

Karena penulis menggunakan magnet permanen jenis keramik dengan spesifikasi sebagai berikut :

$$\begin{aligned} D_{mp} &= 25 \text{ mm} \\ T_{mp} &= 30 \text{ mm} \\ B &= 0,4 \text{ Tesla} \end{aligned}$$

Maka, ukuran kumparan ditentukan :

$$\begin{aligned} D_{mp} \sqcup D_{st} &= 25 \text{ mm} \\ R_{mp} \sqcup R_{sto} &= 12,5 \text{ mm} \\ R_{sti} &= 5 \text{ mm} \end{aligned}$$

Jika perlu, untuk mendapatkan tegangan induksi pada stator secara maksimal, maka kumparan stator dapat disusun memakai teknik anyaman (*overlapping winding*).

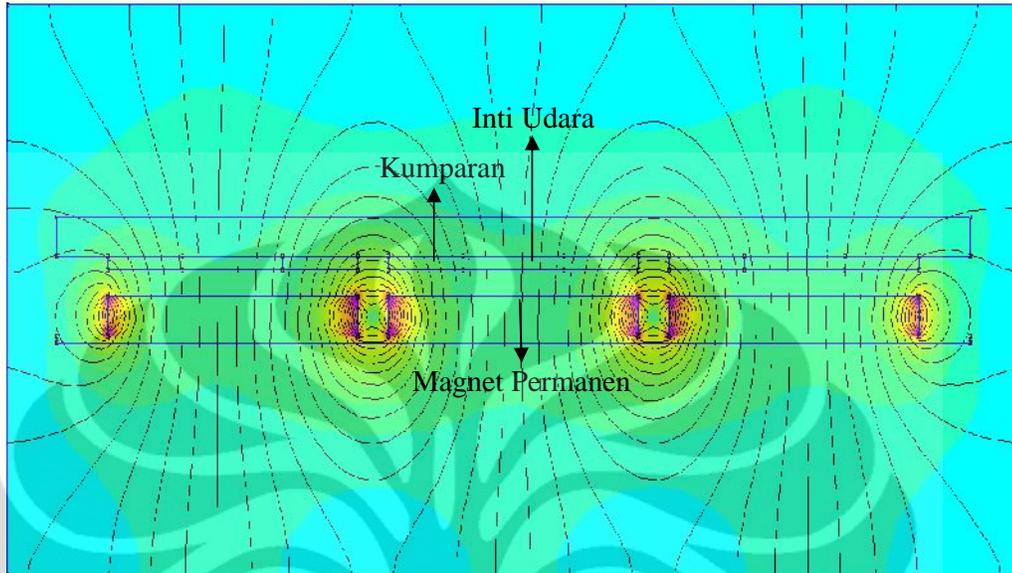
#### 4.4.2 Pengaruh Sudut Elevasi Fluks Magnet $\theta$ terhadap Parameter Kumparan Stator dengan Pendekatan Grafis

Fluks magnet permanen akan menghasilkan medan magnet melingkupi kumparan stator dengan luas dan amplitudo fluks tergantung sudut fluks yang terjadi berdasarkan jarak antar magnetnya, Untuk lebih jelas, penulis menggunakan bantuan perangkat lunak yang disebut dengan FEMM (*Finite Element Magnetics Method*). FEMM dapat mensimulasikan bentuk dan arah fluks magnet yang terjadi antar magnet permanen dan lingkungannya terhadap kumparan stator.

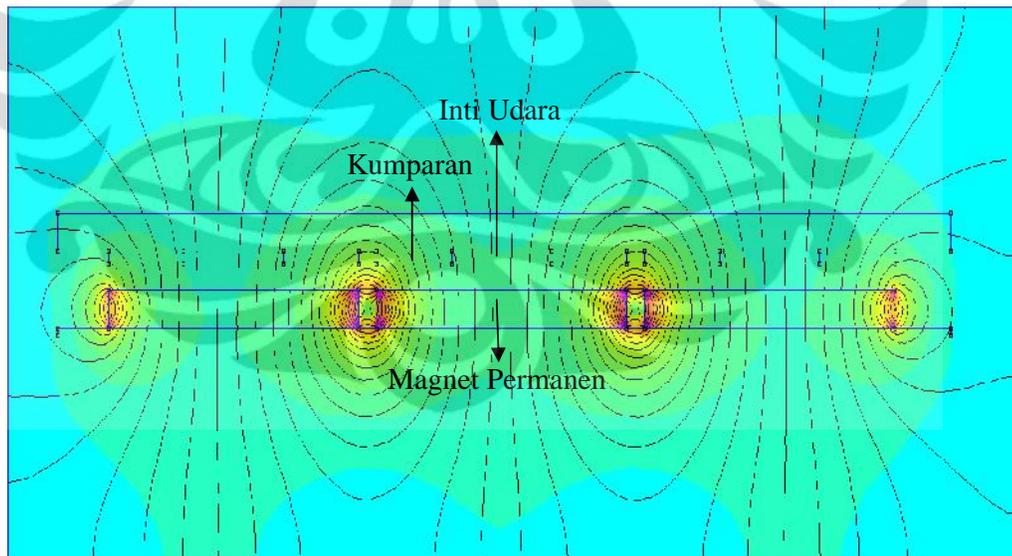
Penulis menggunakan FEMM versi 4.2 dan memvariasikan jarak antar magnet permanen untuk menentukan sudut elevasi fluks magnet yang optimal berdasarkan persamaan :

$$\sin \theta = \frac{T_{mp}}{\sqrt{T_{m1}^2 + X_{m1}^2}}$$

Karena nilai  $T_{mp}$  sudah tetap (30 mm) dan nilai jarak antar magnet permanen bervariasi, diperoleh hasil simulasi FEMM berupa grafis seperti pada Gambar 4.12 dan 4.13. Berdasarkan pendekatan grafis tersebut dapat ditentukan sudut elevasi fluks magnet yang optimal untuk mengetahui amplitudo fluks magnet yang akan mencakup kumparan stator.



**Gambar 4.12.** Simulasi Sudut Elevasi  $45^\circ$  dari Fluks Magnet dengan Jarak antar Magnet Permanen 3 mm, Lebar Celah Udara 2 mm dan Tebal Stator 1 mm



**Gambar 4.13.** Simulasi Sudut Elevasi  $60^\circ$  dari Fluks Magnet dengan Jarak antar Magnet Permanen 1,73 mm, Lebar Celah Udara 2 mm dan Tebal Stator 1 mm

Berdasarkan amplitudo fluks magnet tersebut dan dipengaruhi oleh parameter tebal *yoke*, tebal magnet permanen dan lebar celah udara, maka tinggi kumparan stator dapat diketahui. Tinggi atau tebal kumparan ( $h_{st}$ ) stator adalah tebal lapisan (*layer*) lilitan stator efektif yang dapat menghasilkan tegangan induksi E. Persamaan untuk menghitung tinggi kumparan stator ditunjukkan pada persamaan (4.1) :

$$h_{st} = h_a \sin \theta - t_y - T_{mp} - a_g \quad (4.1)$$

Dimana :  $h_a \sin \theta = h_{\Phi n}$

$$\text{Dan : } \sin \theta = \frac{T_{mp}}{\sqrt{T_{ml}^2 + X_{ml}^2}} \quad (4.2)$$

Maka jumlah lapisan lilitan pada ketinggian atau ketebalan stator  $h_{st}$  adalah :

$$N_l = \frac{h_{st}}{D_k} \quad (4.3)$$

Dengan jumlah lilitan per lapisan kumparan stator :

$$N_{pl} = \frac{R_{sto} - R_{sti}}{D_k} \quad (4.4)$$

Dari persamaan (4.3) dan (4.4), dapat diperoleh jumlah lilitan N sebagai berikut :

$$N = N_l \cdot N_{pl} \quad (4.5)$$

$$N = \frac{R_{sto} \cdot T_{ml}}{D_k^2} \left( \frac{h_a}{X_{mp} \sqrt{1 + \frac{T_{ml}^2}{X_{ml}^2}}} - \frac{(A_g + t_y)}{T_{ml}} - 1 \right) \left( 1 - \frac{R_{sti}}{R_{sto}} \right) \quad (4.6)$$

Besarnya tegangan yang terinduksi pada sebuah kumparan stator adalah :

$$V_{no-load} = 2\pi f \cdot N \cdot \Phi \quad [16] \quad (4.7)$$

Dengan  $\Phi = B \cdot A$

Dimana : B = Rapat fluks magnet (Tesla)

A = Luas penampang ( $m^2$ )

Adapun luas penampang pada kumparan stator adalah :

$$A = 2\pi(R_{sto}^2 - R_{sti}^2)$$

$$A = 6,28(131,25) = 824,25 \text{ mr.}^2 = 0,82 \cdot 10^{-3} r^2$$

Dan diketahui rapat fluks magnet untuk magnet keramik adalah 0,4 Tesla, maka :

$$\Phi = B \cdot A = 0,4 \cdot 0,82 \cdot 10^{-3} = 0,33 \cdot 10^{-3} \text{ Wl/n}^2$$

#### 4.4.3 Pengaruh Lebar Celah Udara terhadap Jumlah Lilitan dan Tegangan Terinduksi

Untuk menentukan karakteristik ini, parameter yang divariasikan adalah lebar celah udara antara rotor dengan stator, sedangkan parameter yang dibuat tetap adalah :

Diameter kawat	= 0,3 mm
Panjang aksial	= 7 mm
Tebal magnet permanen	= 3 mm
Jari – jari luar kumparan stator	= 12,5 mm
Jari – jari dalam kumparan stator	= 5 mm
Tebal <i>yoke</i>	= 0,5 mm
Jarak antar magnet permanen	= 2 mm

Untuk menentukan jumlah lilitan pada kumparan stator dengan lebar celah udara antara rotor dan stator 1 mm, dapat langsung menggunakan persamaan (4.6) :

$$N = \frac{R_{sto} \cdot T_{ml}}{D_k^2} \left( \frac{h_a}{X_{ml} \sqrt{1 + \frac{T_{mp}^2}{X_{mp}^2}}} - \frac{(A_g + T_y)}{T_{ml}} - 1 \right) \left( 1 - \frac{R_{sti}}{R_{sto}} \right)$$

$$N = \frac{12,5 \cdot 3}{0,3^2} \left( \frac{7}{2 \sqrt{1 + \frac{3^2}{2^2}}} - \frac{(1+0,5)}{3} - 1 \right) \left( 1 - \frac{5}{12,5} \right)$$

$$N = \frac{37,5}{0,09} (0,264) = 110 \text{ lilitan}$$

Selain menggunakan persamaan (4.6), bisa juga menggunakan persamaan (4.5) dengan terlebih dahulu melakukan langkah – langkah berikut :

1. Menentukan  $\sin \theta$

Dengan memasukkan nilai parameter di atas ke dalam persamaan (4.2) diperoleh:

$$\sin \theta = \frac{T_{mp}}{\sqrt{T_{mp}^2 + X_{ml}^2}}$$

$$\sin \theta = \frac{3}{\sqrt{3^2 + 2^2}} = \frac{3}{\sqrt{13}} = 0,83$$

2. Menentukan tinggi kumparan stator  $h_{st}$

Menggunakan persamaan (4.1), tinggi kumparan stator adalah :

$$h_{st} = h_a \sin \theta - t_y - t_{ml} - a_g$$

$$h_{st} = 7,083 - 0,5 - 3 - 1 = 1,31$$

3. Menentukan jumlah lilitan per layer

Menggunakan persamaan (4.3), jumlah lapisan lilitan kumparan adalah :

$$N_l = \frac{h_{st}}{D_k}$$

$$N_l = \frac{1,31}{0,3} = 4,37 \text{ lapisan}$$

4. Menentukan jumlah lilitan per lapisan kumparan stator

Menggunakan persamaan (4.4), jumlah lilitan pada setiap lapisan adalah :

$$N_{pl} = \frac{r_{sto} - r_{sti}}{D_k}$$

$$N_{pl} = \frac{12,5 - 5}{0,3} = 25$$

5. Menentukan jumlah lilitan N

Menggunakan persamaan (4.5), jumlah lilitan yang dipergunakan adalah :

$$N = N_l \cdot N_{pl}$$

$$N = 4,37 \cdot 25 = 109,25 \approx 109 \text{ lilitan}$$

6. Menentukan tegangan yang dibangkitkan pada kumparan stator

Menggunakan persamaan (4.7), tegangan yang dibangkitkan pada kumparan stator adalah :

$$V = 2\pi f \cdot N \cdot \phi$$

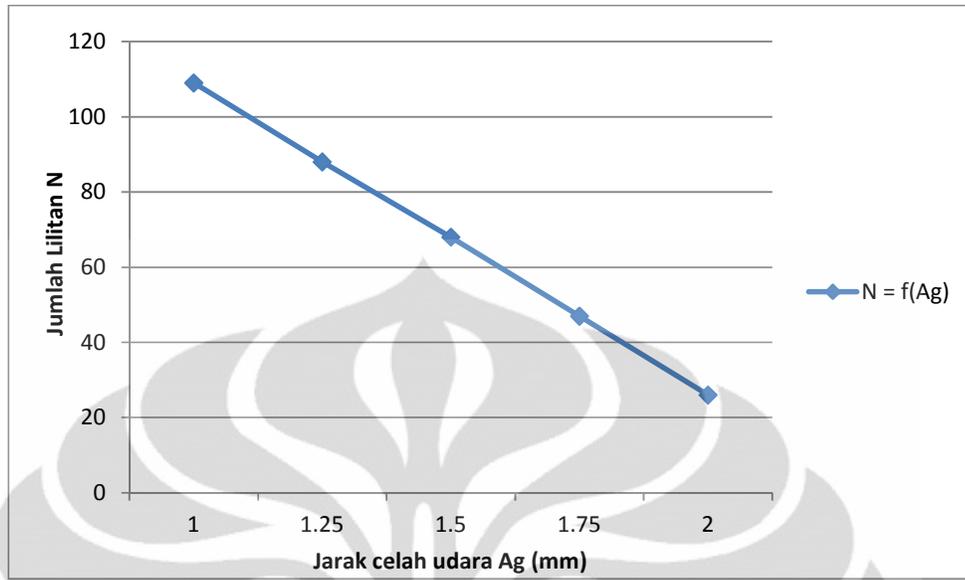
$$V = 2\pi \cdot 50 \cdot 109 \cdot 0,33 \cdot 10^{-3} = 11,29 \text{ V}$$

Dengan menggunakan langkah yang sama untuk lebar celah udara antara rotor dengan stator 1,25, 1,5, 1,75 dan 2 mm, dapat dibuat tabel sebagai berikut :

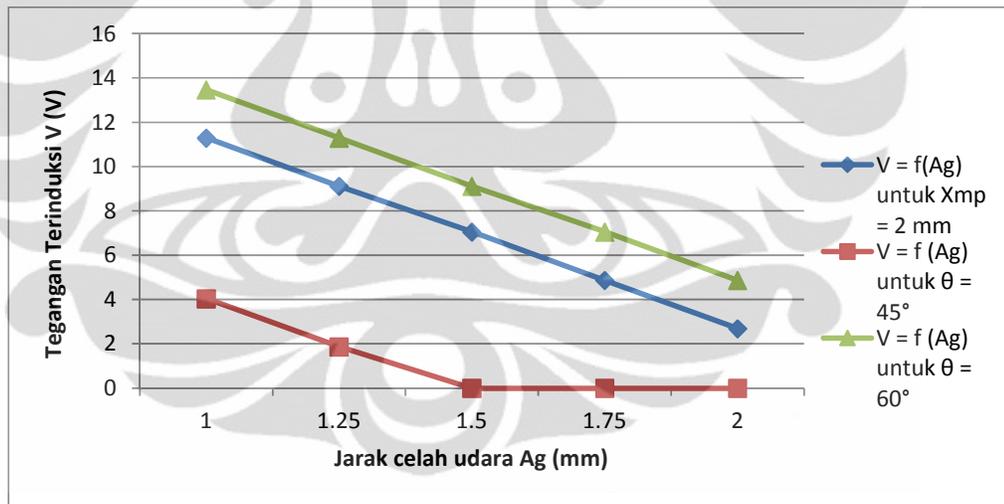
**Tabel 4.5** Hasil Perhitungan Parameter Tinggi Stator, Jumlah Lilitan/Kumparan dan Tegangan Terinduksi untuk Celah Udara Bervariasi

Jarak antar MP = 2 mm	Lebar Celah Udara antara Rotor dengan Stator, $A_g$ (mm)				
Jari – Jari Dalam = 5 mm	1	1,25	1,5	1,75	2
Tinggi Stator $h_{st}$ (mm)	1,31	1,06	0,81	0,56	0,31
Jumlah Lilitan/Kumparan	109	88	68	47	26
Tegangan Terinduksi per kumparan (V)	11,29	9,12	7,05	4,87	2,69
Sudut fluks magnet = $45^\circ$	Lebar Celah Udara antara Rotor dengan Stator, $A_g$ (mm)				
Jari – Jari Dalam = 5 mm	1	1,25	1,5	1,75	2
Tinggi Stator $h_{st}$ (mm)	0,47	0,22	-0,03	-0,28	-0,53
Jumlah Lilitan / Kumparan	39	18	-3	-23	-44
Tegangan Terinduksi / Kumparan (V)	4,04	1,87	-	-	-
Sudut fluks magnet = $60^\circ$	Lebar Celah Udara antara Rotor dengan Stator, $A_g$ (mm)				
Jari – Jari Dalam = 5 mm	1	1,25	1,5	1,75	2
Tinggi Stator $h_{st}$ (mm)	1,56	1,31	1,06	0,81	0,56
Jumlah Lilitan / Kumparan	130	109	88	68	47
Tegangan Terinduksi / Kumparan (V)	13,47	11,29	9,12	7,05	4,87

Berikut adalah grafik hubungan antara lebar celah udara  $A_g$  terhadap jumlah lilitan  $N$  dan tegangan yang dibangkitkan  $V$  :



**Gambar 4.14.** Hubungan antara lebar celah udara  $A_g$  terhadap jumlah lilitan  $N$  sebagai fungsi  $N = f(A_g)$



**Gambar 4.15.** Hubungan antara lebar celah udara  $A_g$  terhadap tegangan terinduksi sebagai fungsi  $V = f(A_g)$

Sesuai parameter spesifikasi generator sinkron MPFA jenis cakram yang membutuhkan tegangan 12 Volt, lebar celah udara optimal adalah saat 1,75 mm dengan jarak antar magnet permanen 2 mm, sehingga menghasilkan tegangan  $4,87 \times 3 = 14,61$  Volt.

Pada baris tabel dibawahnya, penulis menggunakan sudut fluks medan magnet yang berbeda berfungsi sebagai pembanding. Sudut fluks medan magnet ditentukan oleh jarak antar magnet permanen pada rotor dan tebal magnet permanen sebagaimana dijabarkan pada persamaan (4.2).

Bila tebal magnet permanen tetap, maka jarak antar magnet dapat diatur sedemikian rupa sehingga tercapai tegangan yang diinginkan. Saat sudut elevasi  $45^\circ$  yaitu jarak antar magnet permanen 3 mm (sama dengan tebalnya), nilai tegangan yang dibangkitkan sesuai spesifikasi perencanaan. Untuk sudut elevasi fluks  $60^\circ$  yaitu jarak antar magnet permanen 1,73 mm, menghasilkan tegangan  $4,87 \times 3 = 14,61$  Volt dengan lebar celah udara 2 mm.

#### 4.4.4 Pengaruh Jarak antar Magnet Permanen dengan Jumlah Lilitan dan Tegangan Terinduksi

Untuk menentukan karakteristik ini, parameter yang divariasikan adalah jarak antar magnet permanen  $X_{mp}$ , sedangkan parameter yang dibuat tetap adalah :

Diameter kawat	= 0,3 mm
Panjang aksial	= 7 mm
Tebal magnet permanen	= 3 mm
Jari – jari luar kumparan stator	= 12,5 mm
Jari – jari dalam kumparan stator	= 5 mm
Lebar celah udara	= 2 mm
Tebal yoke	= 0,5 mm

Untuk menentukan jumlah lilitan pada kumparan stator dengan jarak antar magnet permanen 1 mm, dapat langsung menggunakan persamaan (4.6) :

$$N = \frac{R_{sto} \cdot T_{m1}}{D_k^2} \left( \frac{h_a}{X_{m1} \sqrt{1 + \frac{T_{mp}^2}{X_{mp}^2}}} - \frac{(A_g + T_y)}{T_{m1}} - 1 \right) \left( 1 - \frac{R_{sti}}{R_{sto}} \right)$$

$$N = \frac{12,5 \cdot 3}{0,3^2} \left( \frac{7}{1 \sqrt{1 + \frac{3^2}{1^2}}} - \frac{(2+0,5)}{3} - 1 \right) \left( 1 - \frac{5}{12,5} \right)$$

$$N = \frac{37,5}{0,09} (0,234) = 97,5 \approx 98 \text{ lilitan}$$

Selain menggunakan persamaan (4.6), bisa juga menggunakan persamaan (4.5) dengan terlebih dahulu melakukan langkah – langkah berikut :

## 1. Menentukan sin

Dengan memasukkan nilai parameter di atas ke dalam persamaan (4.2) diperoleh:

$$\sin \theta = \frac{r_{mp}}{\sqrt{r_{mp}^2 + x_{m1}^2}}$$

$$\sin \theta = \frac{3}{\sqrt{3^2 + 1^2}} = \frac{3}{\sqrt{10}} = 0,95$$

2. Menentukan tinggi kumparan stator  $h_{st}$ 

Menggunakan persamaan (4.1), tinggi kumparan stator adalah :

$$h_{st} = h_a \sin \theta - t_y - t_{m1} - a_g$$

$$h_{st} = 7,095 - 0,5 - 3 - 2 = 1,15$$

## 3. Menentukan jumlah lapisan lilitan

Menggunakan persamaan (4.3), jumlah lapisan lilitan kumparan adalah :

$$N_l = \frac{h_{st}}{D_k}$$

$$N_l = \frac{1,15}{0,3} = 3,83 \text{ lapisan}$$

## 4. Menentukan jumlah lilitan per lapisan kumparan stator

Menggunakan persamaan (4.4), jumlah lilitan pada setiap lapisan adalah :

$$N_{pl} = \frac{r_{sto} - r_{sti}}{D_k}$$

$$N_{pl} = \frac{12,5 - 5}{0,3} = 25$$

## 5. Menentukan jumlah lilitan N

Menggunakan persamaan (4.5), jumlah lilitan yang dipergunakan adalah :

$$N = N_l \cdot N_{pl}$$

$$N = 3,83 \cdot 25 = 95,75 \approx 96 \text{ lilitan}$$

## 6. Menentukan tegangan yang dibangkitkan pada kumparan stator

Menggunakan persamaan (4.7), tegangan yang dibangkitkan pada kumparan stator adalah :

$$V_{no-load} = 2\pi f \cdot N \cdot \phi$$

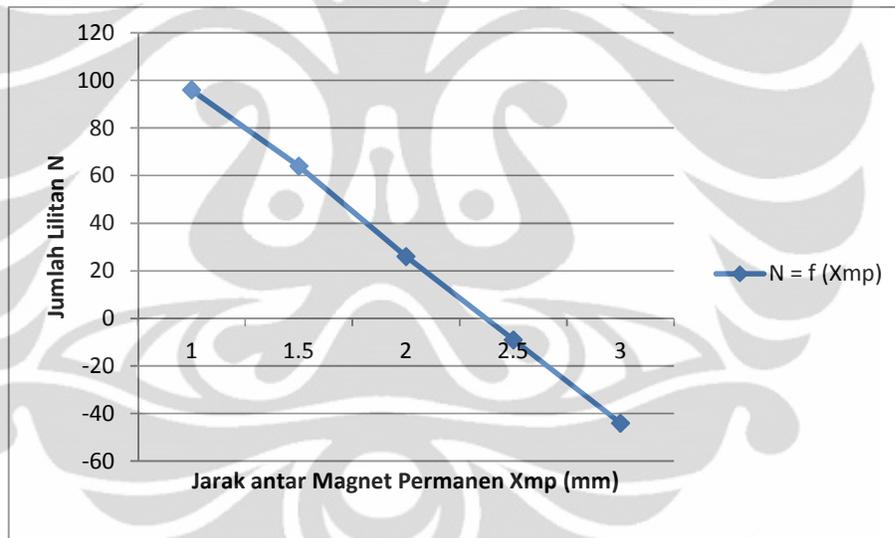
$$V_{no-load} = 2\pi 50 \cdot 96 \cdot 0,33 \cdot 10^{-3} = 9,95 \text{ V}$$

Dengan menggunakan cara yang sama untuk jarak antar magnet permanen 1,5, 2, 2,5 dan 3 mm, dapat dibuat tabel sebagai berikut :

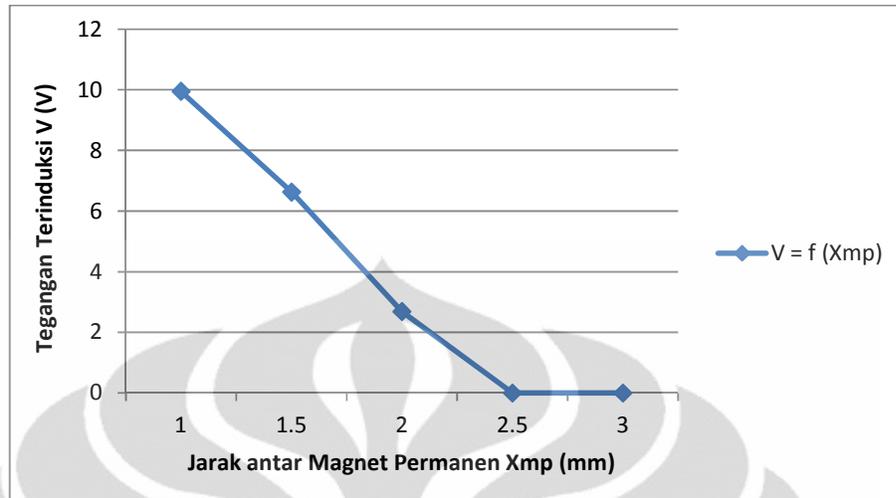
**Tabel 4.6.** Hasil Perhitungan Parameter Tinggi Stator, Jumlah Lilitan/Kumparan dan Tegangan Terinduksi untuk Jarak antar Magnet Permanen Bervariasi

Lebar Celah Udara = 2 mm Jari – Jari Dalam = 5 mm	Jarak antar Magnet Permanen, $X_{mp}$ (mm)				
	1	1,5	2	2,5	3
Tinggi Stator $h_{st}$ (mm)	1,15	0,77	0,31	-0,11	-0,53
Sudut Elevasi Fluks ( $^{\circ}$ )	71,81	63,58	56,20	50,12	45,04
Jumlah Lilitan/Kumparan	96	64	26	-9	-44
Tegangan Terinduksi (V)	9,95	6,63	2,69	-	-

Berikut adalah hubungan antara jarak antar magnet permanen  $X_{mp}$  terhadap jumlah lilitan  $N$  dan tegangan yang dibangkitkan  $V$  :



**Gambar 4.16.** Hubungan antara jarak antar magnet permanen  $X_{mp}$  terhadap jumlah lilitan  $N$  sebagai fungsi  $N = f(X_{mp})$



**Gambar 4.17.** Hubungan antara jarak celah udara  $X_{mp}$  terhadap tegangan terinduksi sebagai fungsi  $V = f(X_{mp})$

Sesuai parameter spesifikasi generator sinkron MPFA jenis cakram yang membutuhkan tegangan 12 Volt, jarak optimal antar magnet permanen adalah saat 1,5 sampai 2 mm (lebih tepatnya 1,7 mm dengan sudut fluks  $60^\circ$ ) dengan lebar celah udara 2 mm, sehingga menghasilkan tegangan  $4,87 \times 3 = 14,61$  Volt.

## **BAB V**

### **KESIMPULAN**

Berdasarkan hasil pengujian generator sinkron MPFA jenis cakram dan studi desain statornya, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut :

1. Bentuk dan ukuran stator pada generator sinkron MPFA jenis cakram ditentukan oleh bentuk dan ukuran magnet permanen pada rotor, dalam hal ini berbentuk lingkaran sehingga fluks medan magnet dapat tercakup dengan sempurna.
2. Cakupan fluks magnet pada kumparan stator dipengaruhi oleh lebar celah udara dan jarak antar magnet permanen.
3. Jumlah lilitan stator dalam kasus ini ditentukan oleh jarak antar magnet permanen dan lebar celah udara antara rotor dengan stator, sehingga pada akhirnya akan menentukan tegangan yang terinduksi pada kumparan stator.
4. Menurut analisa, hasil optimal sesuai dengan perencanaan terjadi saat jarak antar magnet permanen 1,75 mm sehingga sudut fluksnya  $60^\circ$  dan lebar celah udara antara rotor dan stator 2 mm sehingga diperoleh jumlah lilitan 47 buah dengan tegangan induksi 14 Volt.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Utomo, Agus R., *Mesin Sinkron*, Diktat Kuliah Teknik Tenaga Listrik, Departemen Teknik Elektro, Universitas Indonesia.
- [2] Wildi, Theodore. *Electrical Machines, Drives, and Power System Third Edition*, New Jersey: Prentice-Hall International, Inc., 1997.
- [3] Pane, Ennopati. *Studi Sistem Eksitasi Dengan Menggunakan Permanent Magnet Generator (Aplikasi Pada Generator Sinkron di PLTD PT. Manunggal Wiratama*, Medan: Universitas Sumatera Utara, 2009.
- [4] *Bab II Generator Sinkron*  
<http://repository.usu.ac.id/bitstream/123456789/22352/4/Chapter%20II.pdf>  
diakses pada tanggal 20 Desember 2011
- [5] Tiantoro, Feliks A., *Proposal Kerja Praktek Analisis Sistem Eksitasi Pada Generator Sinkron Tiga Fasa 67MVA di PT Indonesia Power PLTA Panglima Besar Soedirman Unit Bisnis Pembangkitan MRICA Banjarnegara*, Purwokerto: Universitas Jenderal Soedirman, 2009
- [6] Zuhail. *Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya*, Jakarta: PT. Gramedia Pustaka Utama, 1995.
- [7] Tcheslavski, Gleb V., *Lecture 7: Synchronous Machines*,  
<http://ee.lamar.edu/gleb/Index.htm> diakses pada tanggal 12 September 2011.
- [8] J.F. Gieras, R. Wang dan M.J. Kamper. *Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machine, Second Edition*. The Netherlands : Springer, 2008
- [9] *Electronics Tutorial About Magnetic Hysteresis*,  
<http://www.electronics-tutorials.ws/electromagnetism/magnetic-hysteresis.html> diakses pada tanggal 12 September 2011.
- [10] *Ampere Circuital Law (with Maxwell correction) in Macroscopic equations*,  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Maxwell%27s\\_equations](http://en.wikipedia.org/wiki/Maxwell%27s_equations) diakses pada tanggal 10 Januari 2012.
- [11] *MMC Lecture7-Hard Magnetic Materials*,  
<http://www.scribd.com/doc/55083001/MMC-Lecture7> diakses pada tanggal 12 September 2011.
- [12] Sadeghierad, M., et al, "High Speed of Axial-Flux Permanent Magnet Generator with Coreless Stator". *Can J. Elect. Comput. Eng.*, Vol. 34, No. ½, Winter/Spring, (2009) : 63 – 67.

- [13] Aliansyah, Eduward. *Studi Analisa Daya Keluaran Generator Sinkron Tiga Phasa Dengan Rotor Silinder*, Medan: Universitas Sumatera Utara, 2008.
- [14] *Generator Listrik Sederhana*,  
<http://tonytaufik.wordpress.com/generator-listrik-sederhana/>  
diakses pada tanggal 12 September 2011.
- [15] Del Ferraro, Luca, R. Terrigi, dan F.G Capponi. "Coil and Magnet Shape Optimization of an Ironless AFPM Machine by Means of 3D FEA". *Journal of IEEE*, (2007) : 927 – 931.
- [16] Sadeghierad, M., et al., "Air Gap Optimization of High Speed Axial-Flux PM Generator". *Journal of Applied Science* 9 (10), (2009) : 1915 – 1921.

