



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**SIMULASI OPTIMASI KETEBALAN YOKE DAN  
JARAK ANTAR KUTUB MAGNET PERMANEN PADA  
ROTOR AKSIAL**

**SKRIPSI**

**PAKSI PUJIANTO**

**0906602944**

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



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**SIMULASI OPTIMASI KETEBALAN YOKE DAN  
JARAK ANTAR KUTUB MAGNET PERMANEN PADA  
ROTOR AKSIAL**

**SKRIPSI**

**PAKSI PUJANTO**

**0906602944**

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

## PERNYATAAN ORISINALITAS

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

**Nama : Paksi Pujianto**

**NPM : 0906602944**

**Tanda Tangan :** 

**Tanggal : 28 Juni 2012**

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :  
Nama : Paksi Pujiyanto  
NPM : 0906602944  
Program Studi : Teknik Elektro  
Judul Skripsi : **Simulasi Optimasi Ketebalan Yoke Dan Jarak Antar Kutub Magnet Permanen Pada Rotor Aksial**

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

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : **Ir. Agus R. Utomo, MT** (.....)  
Penguji : **Ir. I Made Ardita Y, MT** (.....)  
Penguji : **Dr. Ir. Ridwan Gunawan, MT** (.....)

Ditetapkan di : Depok  
Tanggal : 28 Juni 2012

## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT, karena atas berkah dan rahmat-Nya saya 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 saya 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 pergaulan yang telah memberikan dukungan 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, 28 Juni 2012

Penulis

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

---

---

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

Nama : Paksi Pujiyanto  
NPM : 0906602944  
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 :

**“SIMULASI OPTIMASI KETEBALAN YOKE DAN JARAK ANTAR  
KUTUB MAGNET PERMANEN PADA ROTOR AKSIAL”**

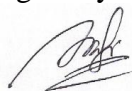
beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 28 Juni 2012

Yang menyatakan



( Paksi Pujiyanto )

## ABSTRAK

Nama : Paksi Pujianto  
Program Studi : Teknik Elektro  
Judul : **SIMULASI OPTIMASI KETEBALAN YOKE DAN JARAK ANTAR KUTUB MAGNET PERMANEN PADA ROTOR AKSIAL**

Studi desain Optimasi Ketebalan Yoke dan Jarak Antar Kutub Magnet Permanen Pada Rotor Aksial ini, menitikberatkan analisis optimasi pada ketebalan yoke dan jarak antar magnet permanen sebagai parameter desain rotor. Analisis desain dilakukan pada simulasi berbantuan perangkat lunak FEMM 4.2. (gratis). Desain rotor yang disimulasikan adalah rotor model cakram dengan kutub permanen berbentuk lingkaran. Hasil simulasi menunjukkan bahwa titik optimum adalah pada ketebalan yoke 1.5mm dan jarak antar magnet 1mm, dimana kerapatan fluks magnet yang dihasilkan sebesar 0.5407 T dan rugi inti sebesar 749.582378 watt.

Kata Kunci :

Generator sinkron magnet permanen fluks aksial, tebal yoke rotor, jarak antar kutub magnet permanen, distribusi fluks magnet, rugi inti besi

## ABSTRACT

Name : Paksi Pujianto  
Study Program : *Electrical Engineering*  
Title : **OPTIMIZATION SIMULATION OF YOKE'S THICKNESS AND DISTANCE BETWEEN PERMANENT MAGNET POLES IN AXIAL ROTOR**

*This Disc Type Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Generator Design Study, focused on optimization analysis of yoke's thickness and distance between permanent magnet as rotor design parameter. Analysis of design by simulation based on FEMM 4.2 Software (freeware). Rotor design that simulated is disc type rotor with circle permanent magnet. The result of simulation show that optimum point is on yoke's thickness 1.5mm and distance between permanent magnet 1mm, where flux density is 0.5405 T and core loss is 749.582378 watt.*

Key Words :

*Axial flux permanent magnet synchronous generator, yoke thickness, distance between poles permanent magnet, density flux, iron core loss.*

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	v
ABSTRAK.....	vi
ABSTRACT.....	vi
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	ix
DAFTAR TABEL.....	x
<b>BAB I PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang Masalah.....	1
1.2 Tujuan.....	1
1.3 Perumusan Masalah.....	2
1.4 Pembatasan Masalah.....	2
1.5 Metodologi Penelitian.....	2
1.6 Sistematika Penulisan.....	3
<b>BAB II MESIN SINKRON.....</b>	<b>4</b>
2.1 Prinsip Dasar Mesin Sinkron.....	4
2.1.1 Definisi.....	4
2.1.2 Konstruksi Dasar Mesin Sinkron.....	5
2.1.2.1 Stator/Kumparan Jangkar.....	6
2.1.2.2 Rotor/Kumparan Medan.....	7
2.1.2.3 Arus Penguat (Eksitasi).....	11
2.2 Prinsip Kerja Mesin Sinkron.....	14
2.2.1 Kecepatan Sinkron.....	14
2.2.2 Generator Sinkron Tanpa Beban.....	15
2.2.3 Generator Sinkron Berbeban.....	16
2.2.4 Reaksi Jangkar.....	17
2.2.5 Reaktansi Sinkron.....	19
<b>BAB III GENERATOR SINKRON MAGNET PERMANEN FLUKS AKSIAL.....</b>	<b>21</b>
3.1 Definisi Generator Sinkron Magnet Permanen.....	21
3.2 Generator Sinkron Magnet Permanen Fluks Aksial.....	22
3.3 Karakteristik Generator PMFA.....	24
3.3.1 Lilitan pada stator tanpa inti.....	24
3.3.2 Kemampuan Daya Putar.....	25
3.3.3 Fluks Magnetik.....	26
3.3.4 Performa Generator MPFA.....	27
3.4 Material Rotor Generator.....	28
3.4.1 Material Magnet Permanen.....	28
3.4.2 Kurva B-H Material Magnet.....	30
3.4.3 Material Yoke Rotor.....	31
3.5 Konsep Rangkaian Magnet.....	32
3.5.1 Reluktansi.....	32



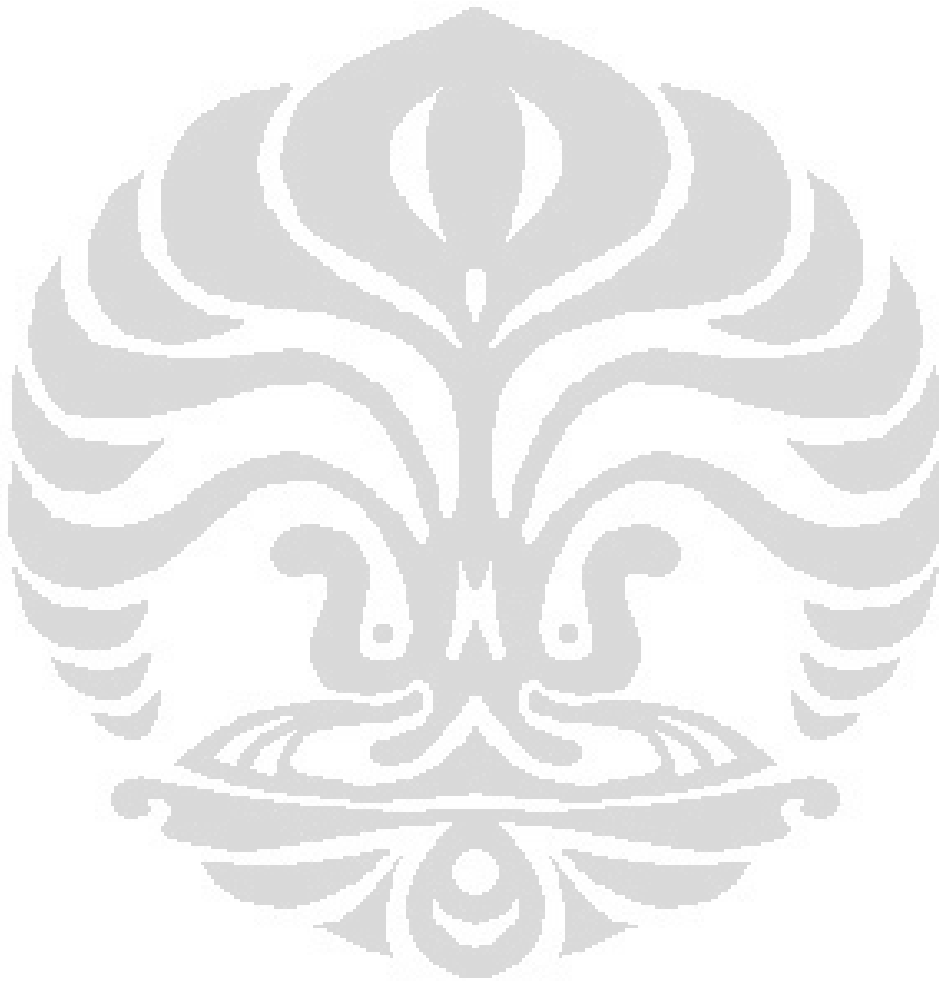
3.5.2 Permeabilitas.....	33
3.6 Rugi – rugi pada generator.....	34
3.6.1 Rugi Tembaga (Pcu).....	34
3.6.2 Rugi-rugi pada rotor.....	35
<b>BAB IV SIMULASI DESAIN KETEBALAN YOKE ROTOR</b>	
<b>GENERATOR SINKRON MP-FA-TI-MC.....</b>	<b>36</b>
4.1 Permodelan Generator Sinkron MP-FA-TI-MC.....	36
4.2 Algoritma Studi Desain Generator Sinkron MP-FA-TI-MC.....	37
4.3 Pengaruh Jenis Material Yoke Terhadap distribusi kerapatan medan magnet.....	38
4.4 Pengaruh Ketebalan Yoke Dan Jarak Antar Magnet Permanen Terhadap Distribusi Kerapatan Magnet Pada Permukaan Magne.....	39
4.4.1. Analisis Grafis Distribusi Kerapatan Fluks Magnet Berdasarkan parameter ketebalan yoke ( $T_y$ ).....	40
4.4.2. Analisis Grafis Distribusi Kerapatan Fluks Magnet berdasarkan Parameter Jarak Antar Magnet Permanen ( $X_{np}$ )...	42
4.5 Perhitungan Rugi-rugi.....	43
4.6 Optimasi Desain Rotor Berdasarkan Jarak Antar Magnet dan Ketebalan Yoke.....	47
<b>BAB V KESIMPULAN.....</b>	<b>48</b>
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>49</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Kontruksi dasar mesin sinkron.....	5
Gambar 2.2. (a) Laminasi stator, (b) Beberapa kumparan dalam slot.....	6
Gambar 2.3. Rangka stator beserta kumparan jangkarnya.....	7
Gambar 2.4. Rotor kutub sepatu/kutub menonjol ( <i>salient pole</i> ).....	9
Gambar 2.5. Rotor kutub sepatu pada generator 4 kutub.....	9
Gambar 2.6. Rotor kutub silinder (non-salient pole/cylindrical rotor).....	10
Gambar 2.7. Rotor kutub silinder pada generator 4 kutub.....	11
Gambar 2.8. Kurva karakteristik dan rangkaian ekivalen generator tanpa Beban.....	16
Gambar 2.9. Rangkaian ekivalen dan diagram vektor generator berbeban....	16
Gambar 2.10. Pengaruh reaksi jangkar untuk berbagai macam jenis beban..	18
Gambar 2.11. Kurva pengujian tanpa beban dan hubung singkat generator Sinkron.....	19
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. Generator sinkron MPFA tanpa sikat dengan kumparan film sebagai stator tanpa inti dan sistem eksitasi rotor magnet permanen satu sisi .....	24
Gambar 3.3. Lilitan tanpa inti sebuah generator MPFA tiga fasa delapan kutub dan dua rotor eksternal .....	25
Gambar 3.4. Puncak kutub dan lebar kutub pada magnet permanen .....	25
Gambar 3.5 Perbedaan kurva histerisis antara magnet permanen (magnet bahan keras) dengan magnet induksi (magnet bahan lunak).....	29
Gambar 3.6. Kurva karakteristik histerisis magnetik beberapa material magnet permanen.....	30
Gambar 3.7. Kurva B-H saturasi dari 3 material magnet.....	31
Gambar 3.8. Kurva magnetasi material besi.....	32
Gambar 4.1. Spesifikasi desain generator sinkron.....	37
Gambar 4.2. Distribusi fluks pada yoke dengan bahan pure iron.....	38
Gambar 4.3. Distribusi fluks pada yoke dengan bahan alumunium.....	38
Gambar 4.4. Kurva Kerapatan fluks magnet pada variasi jarak antar magnet dan variasi ketebalan yoke.....	39
Gambar 4.5. Hasil simulasi pada $X_{mp}=1\text{mm}$ dengan variasi ketebalan yoke 0.5mm, 1.5mm, 2mm, dan 3mm.....	41
Gambar 4.6. Hasil Simulasi pada $T_y=1.5\text{mm}$ dengan variasi jarak antar kutub magnet permanen 1mm, 2mm, dan 3mm.....	43
Gambar 4.7. Kurva Rugi Histerisis pada variasi $T_y$ dan $X_{mp}$ .....	45
Gambar 4.8. Kurva Rugi Eddy-Current pada variasi $T_y$ dan $X_{mp}$ .....	45
Gambar 4.9. Kurva Rugi Inti pada variasi $T_y$ dan $X_{mp}$ .....	46

## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1. Spesifikasi beberapa material magnet permanen.....	29
Tabel 4.1. Perbandingan nilai puncak kerapatan magnet material yoke.....	38
Tabel 4.2. Hasil nilai kerapatan magnet (B) terhadap tebal yoke dan jarak antar kutub magnet permanen ( $X_{mp}$ ).....	39
Tabel 4.3. Hasil perhitungan rugi histerisis .....	44
Tabel 4.4. Hasil perhitungan rugi arus-eddy.....	45
Tabel 4.5. Hasil perhitungan rugi inti besi.....	46
Tabel 4.6 Perbandingan Kerapatan Fluks magnetik terhadap Rugi inti besi..	47



# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang Masalah**

Seiring dengan perkembangan teknologi, kebutuhan manusia akan tersedianya sumber energi listrik semakin besar. Saat ini, penelitian dan pengembangan tentang sumber energi listrik terus dilakukan untuk mendapat sumber energi listrik alternatif, terutama yang menggunakan sumber energi terbarukan.

Salah satu perangkat sumber energi listrik terbarukan yang dikembangkan adalah generator magnet permanen. Generator adalah mesin yang dapat mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Pada umumnya, penelitian dan pengembangan generator dilakukan pada parameter-parameter yang mempengaruhi kinerja generator, baik optimasi parameter pada stator maupun optimasi parameter rotor generator untuk mendapatkan desain generator yang dapat bekerja secara optimal.

Pada penulisan skripsi ini, penulis melanjutkan studi sebelumnya, yaitu studi Optimasi Desain Rotor Aksial. Studi dilakukan pada optimasi desain rotor generator sinkron berdasarkan parameter ketebalan yoke dan jarak antar magnet permanen, sehingga didapat desain rotor generator yang dapat menghasilkan kuat medan magnet optimum.

Pembuatan studi desain rotor generator ini, diharapkan dapat digunakan sebagai sumber data dalam perancangan dan pembuatan rotor generator sinkron magnet permanen yang dapat menghasilkan kuat medan magnet yang optimum.

### **1.2 Tujuan**

Tujuan dari penulisan skripsi ini adalah untuk mengembangkan desain Rotor Generator Sinkron Magnet Permanen Fluks Aksial, terutama optimasi desain rotor generator berdasarkan parameter ketebalan yoke rotor dan jarak antar kutub magnet permanen.

### 1.3 Perumusan Masalah

Dalam Simulasi Pengaruh Ketebalan Yoke Dan Jarak Antar Kutub Magnet Permanen Terhadap Fluks Magnet Pada Desain Rotor Aksial ini, 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. Bagaimana mendesain rotor generator sinkron magnet permanen fluks aksial sehingga didapat generator yang dapat bekerja secara optimal.

### 1.4 Pembatasan Masalah

Dalam simulasi studi desain rotor generator ini, penulis melanjutkan studi desain generator yang telah dilakukan sebelumnya, studi hanya membahas tentang hal-hal sebagai berikut:

1. Tipe generator yang di studi adalah generator sinkron magnet permanen fluks aksial model cakram dengan stator tanpa inti.
2. Parameter desain rotor yang distudi adalah ketebalan yoke rotor dan jarak antar kutub magnet permanen, optimasi variasi parameter disimulasikan untuk mendapatkan titik optimum yang menghasilkan kuat fluks magnet optimum.
3. Simulasi dalam studi ini menggunakan perangkat lunak, yaitu *Finite Element Method for Magnetics.*, (FEMM) versi 4.2. (*freeware*).

### 1.5 Metodologi Penelitian

Metode-metode yang penulis lakukan antara lain :

#### 1. Studi Literatur

Membaca literature berupa buku - buku, karya ilmiah, dan *browsing Internet* untuk mendapatkan data - data yang dibutuhkan dalam pembuatan simulasi dan sebagai dasar penulisan dan penyusunan laporan.

## 2. Bimbingan

Mengadakan konsultasi dengan dosen pembimbing dan pihak - pihak lain untuk mendapatkan informasi dalam pembuatan dan penyusunan skripsi ini.

## 3. Perencanaan dan Analisis Data

Melakukan simulasi desain dan analisis optimasi desain rotor generator berdasarkan parameter ketebalan yoke rotor dan jarak antar magnet permanen dengan menggunakan perangkat lunak FEMM 4.2.

## 4. Penyusunan Laporan

Membuat suatu laporan yang berisi penjelasan yang menggambarkan tentang desain yang akan dibuat.

### **1.6 Sistematika Penulisan**

Untuk memudahkan pemahaman terhadap suatu penulisan maka perlu dibuat sistematika penulisan. Sistematika penulisan skripsi ini dimulai dari bab satu, yaitu pendahuluan yang menguraikan latar belakang masalah, tujuan penulisan, pembatasan masalah, perumusan masalah, metodologi penulisan, dan sistematika penulisan skripsi ini. Selanjutnya, bab kedua menguraikan landasan teori yang mengacu pada pembahasan. Bab ini membahas mesin sinkron secara garis besar dan lebih dikhususkan ke generator sinkron. Berikutnya, bab tiga menguraikan landasan teori yang mengacu pada tinjauan pustaka tentang pembahasan materi, yaitu membahas generator sinkron magnet permanen fluks aksial model cakram dengan stator tanpa inti. Berikutnya, bab empat menguraikan hasil simulasi desain rotor generator menggunakan perangkat lunak FEMM 4.2 dan analisis hasil kuat medan magnet optimum dan rugi-rugi yang terjadi berdasarkan parameter ketebalan yoke dan jarak antar magnet permanen. Terakhir, bab lima berisi kesimpulan berdasarkan analisis hasil simulasi optimasi desain rotor generator.

## 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

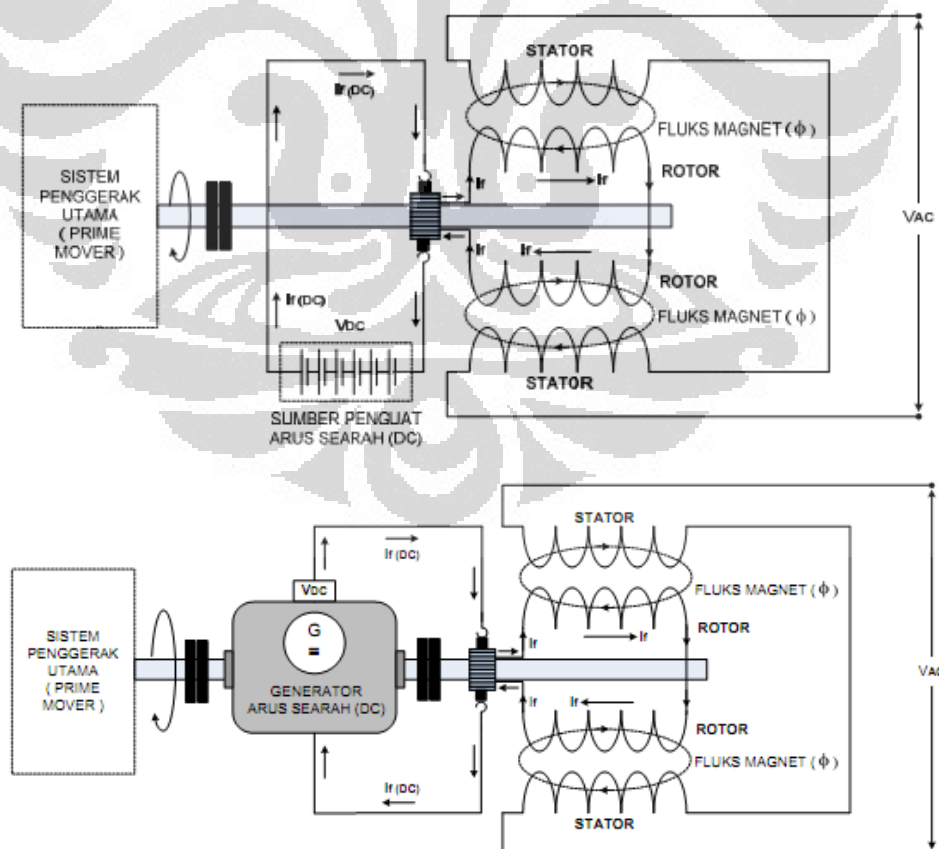
Disebut sebagai kumparan jangkar (angker) yang berfungsi menghasilkan tegangan dan arus bolak-balik (*AC/Alternating Current*).

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]

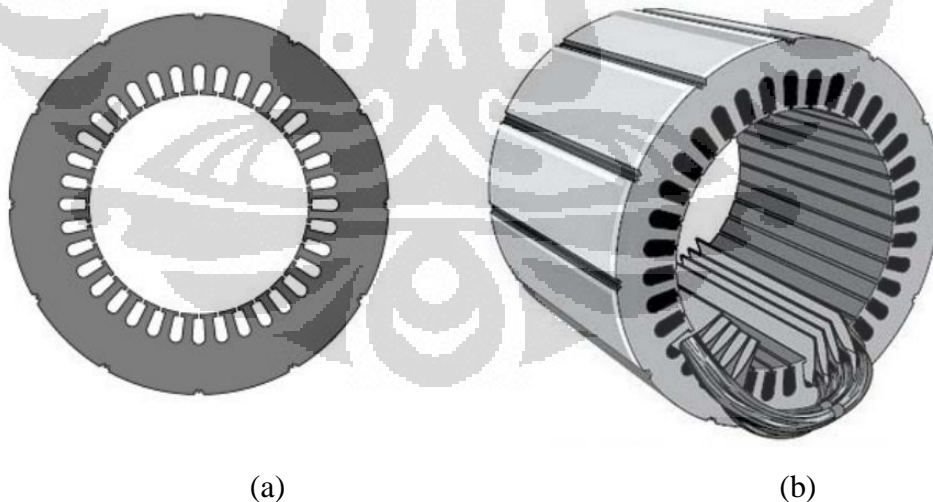


### 2.1.2.1 Stator/Kumparan Jangkar

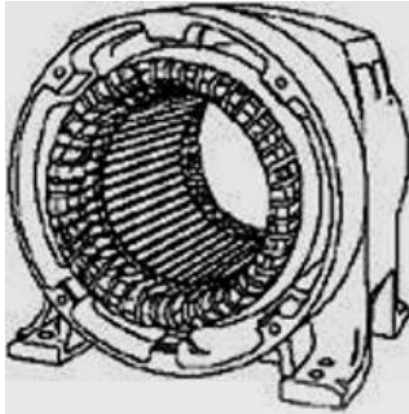
Stator (disebut juga armatur) adalah bagian generator yang berfungsi sebagai tempat untuk menerima induksi magnet dari rotor. Arus AC yang menuju ke beban disalurkan melalui armatur, komponen ini berbentuk sebuah rangka silinder dengan lilitan kawat konduktor yang sangat banyak. Armatur selalu diam, 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 jangkar 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 [12]



Gambar 2.3. Rangka stator beserta kumparan jangkarnya [12]

### 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*)

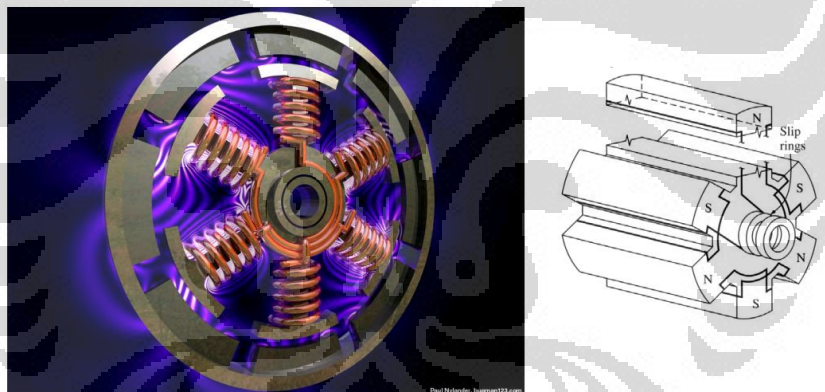
Pada jenis ini, kutub magnet menonjol keluar dari permukaan rotor. Kumparan pada setiap kutub dihubungkan secara seri. Ketika kumparan ini disuplai oleh eksiter, maka kutub yang berdekatan akan membentuk kutub berlawanan.

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.

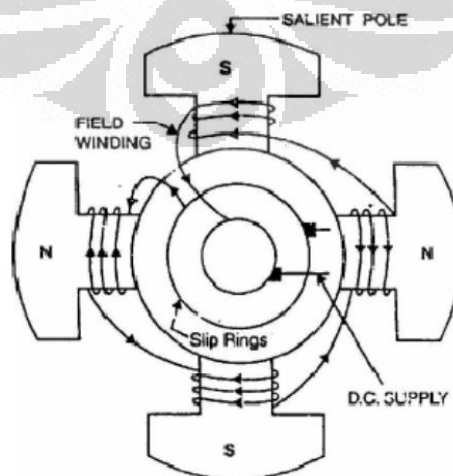
Rotor kutub sepatu cocok digunakan untuk putaran rendah-sedang karena :

- 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 [12]

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

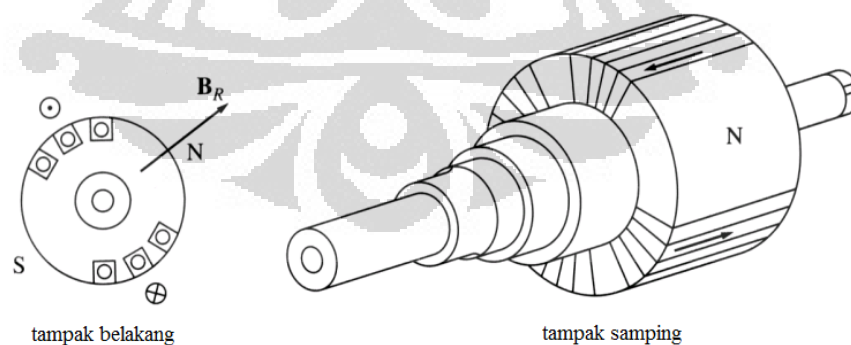
Pada jenis ini, konstruksi kutub magnet rata dengan permukaan rotor. Rotor jenis ini terbuat dari baja tempa padat yang mempunyai slot dan gigi disepanjang pinggiran luarnya seperti halnya stator. Kumputan medan pada rotor kutub silinder diletakkan di dalam slot ini. Disekitar daerah pusat kutub umumnya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

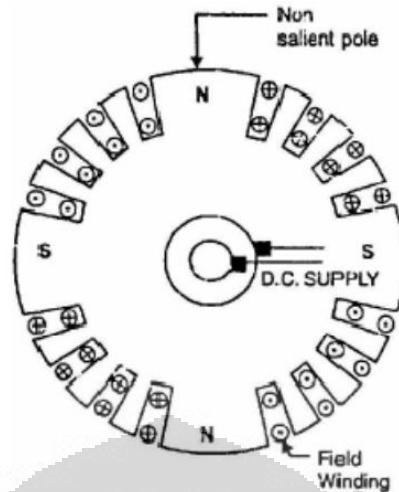
Rotor kutub silinder cocok digunakan pada putaran tinggi karena :

- Konstruksinya 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. [12]



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



Gambar 2.7. Rotor kutub silinder pada generator 4 kutub [12]

### 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.

### 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]

#### 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 [1][2][3][7]:

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

dimana :

$f$  = Frekuensi elektrik (Hz)

$n$  = Kecepatan mekanik rotor (rpm)

$p$  = Jumlah kutub

### 2.2.2. Generator Sinkron Tanpa Beban

Besarnya tegangan induksi yang dibangkitkan pada stator diturunkan dari Hukum Faraday yang menyatakan gaya gerak listrik induksi [2][3][7]:

$$E_{ind} = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (2.2)$$

$$E = -N \frac{d\phi_{maks} \sin \omega t}{dt}$$

$$= -N \omega \phi_{maks} \cos \omega t \quad (\omega = 2\pi f)$$

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

$$= N(2\pi \frac{np}{120}) \phi_{maks} \cos \omega t$$

$$= -N(2.3,14. \frac{np}{120}) \phi_{maks} \cos \omega t$$

$$E_{maks} = N(2.3,14. \frac{np}{120}) \phi_{maks} \quad (2.3)$$

$$E_{eff} = E_{rms} = \frac{E_{maks}}{\sqrt{2}} = \frac{N(2.3,14. \frac{np}{120}) \phi_{maks}}{\sqrt{2}} \quad (2.4)$$

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

dimana :

$E$  = Gaya gerak listrik (volt)

$N$  = Jumlah lilitan

$K$  = Konstanta

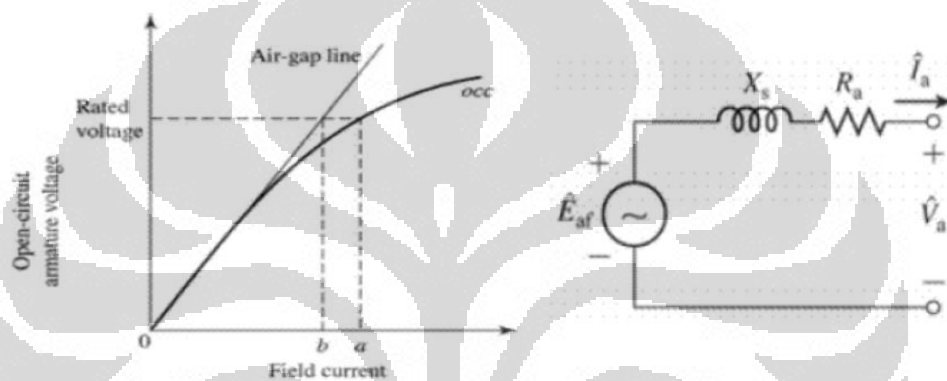
$n$  = Putaran sinkron (rpm)

$\phi$  = Fluks magnetik (Weber)

$F$  = Frekuensi sinkron (Hz)

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

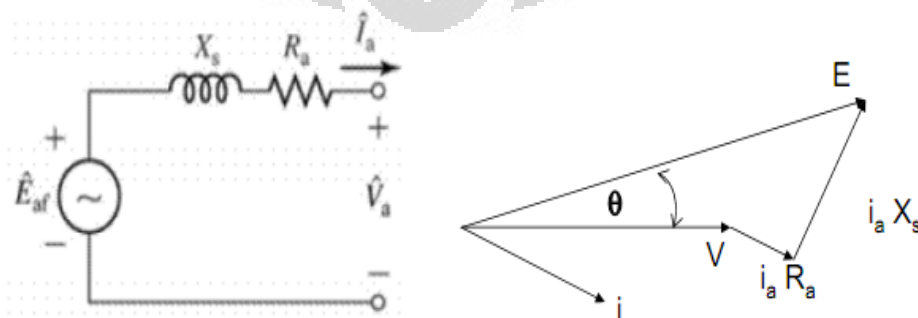
Dalam keadaan tanpa beban arus jangkar tidak mengalir pada stator, sehingga tidak ada pengaruh reaksi jangkar. Fluks hanya dihasilkan oleh arus medan ( $I_f$ ). Jika arus medan diubah - ubah harganya maka akan diperoleh harga  $E_o$ .



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

### 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 [1][2] :

$$\begin{aligned} E_a &= V + IR_a + jIX_s \\ X_s &= X_m + X_a \end{aligned} \quad (2.5)$$

dimana :

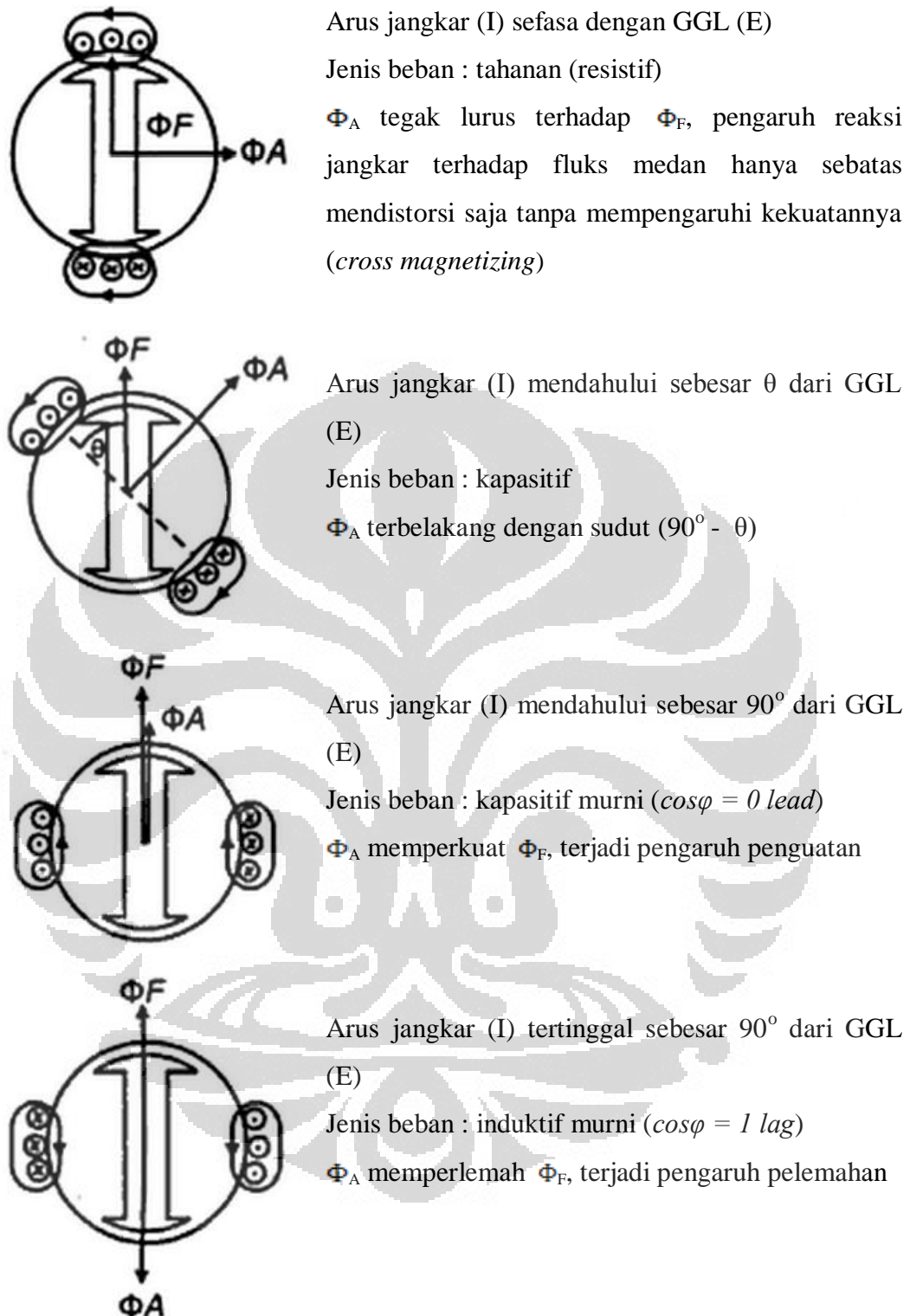
- $E_a$  = Tegangan induksi pada jangkar (Volt)
- $V$  = Tegangan terminal output (Volt)
- $R_a$  = Resistansi jangkar (Ohm)
- $X_s$  = Reaktansi sinkron (Ohm)
- $X_a$  = Reaktansi fluks bocor (Ohm)
- $X_m$  = Reaktansi magnet (Ohm) [1]

#### 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 ( $\Phi_R$ ) [1][2].

$$\Phi_R = \Phi_A + \Phi_F ; \text{jumlah secara vektor} \quad (2.6)$$

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 :



Gambar 2.10. Pengaruh reaksi jangkar untuk berbagai macam jenis beban[2][3]

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. [2][3]

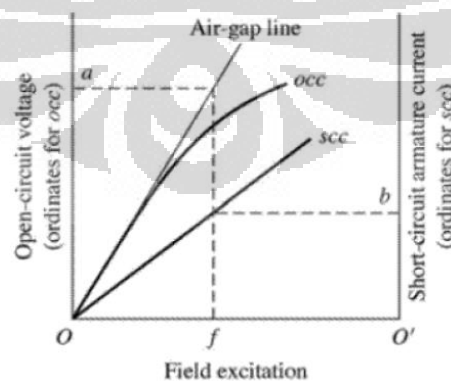
### 2.2.5. Reaktansi Sinkron

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.
  1. Kurvanya berupa garis linear (pada kondisi awal hingga mencapai kejenuhan)
  2. 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][2]



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

Nilai impedansi suatu generator sinkron ( $Z_s$ ) [2][3]:

$$Z_s = \sqrt{R_s^2 + X_s^2} = \frac{E_o}{I_{hs}} \quad (2.7)$$

Karena  $X_s \gg R_s$ , maka harga reaktansi sinkron ( $X_s$ ) dihitung dengan persamaan[2] :

$$X_s \approx \frac{E_o}{I_{hs}} = \frac{O-a}{O'-b} \quad (2.8)$$

Dimana :

$Z_s$  = Impedansi generator sinkron (Ohm)

$X_s$  = Reaktansi sinkron (Ohm)

$R_s$  = Resistansi generator sinkron (Ohm)

## BAB III

### GENERATOR SINKRON MAGNET PERMANEN FLUKS AKSIAL

#### 3.1. Generator Sinkron Magnet Permanen Fluks Aksial

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. Perbedaan utama dari generator sinkron magnet permanen dengan generator sinkron biasa yaitu pada cara pembangkitan (sistem eksitasi) fluks magnetik. 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.

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

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

- Generator magnet permanen dengan fluks radial (*Radial Flux Permanent Magnet Generator* / Generator RFPM)
- Generator magnet permanen dengan fluks aksial (*Axial Flux Permanent Magnet Generator* / Generator MPFA)



### 3.2. Generator Sinkron Magnet Permanen Fluks Aksial (MPFA)

Bila dilihat secara konstruksi, generator PMFA 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 PMFA dikelompokkan sebagai berikut :

❖ Generator PMFA satu sisi :

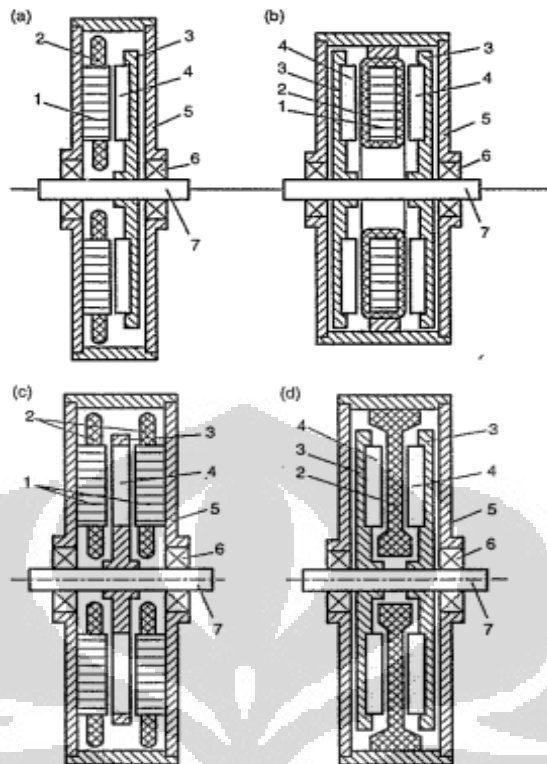
- Dengan slot stator
- Dengan stator tanpa slot
- Dengan stator kutub tonjol atau kutub sepatu

❖ Generator PMFA dua sisi :

- Dengan stator internal - Dengan slot stator
- Dengan stator tanpa slot - Dengan stator inti besi
- Dengan stator tanpa inti - Tanpa inti rotor dan stator
- Dengan stator kutub tonjol - Dengan rotor internal
- Dengan slot stator - Dengan stator tanpa slot
- Dengan stator kutub tonjol

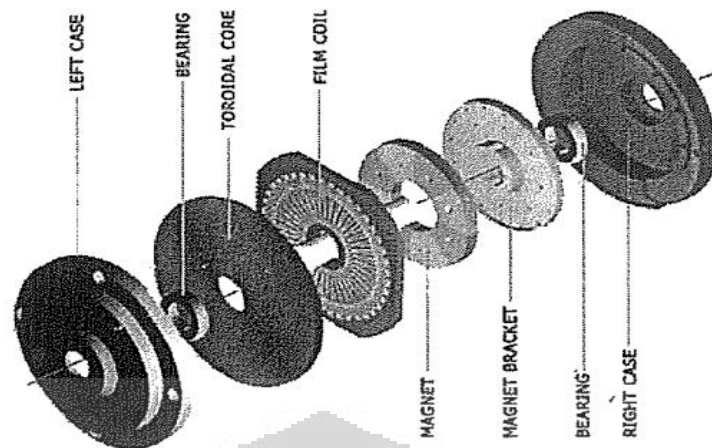
❖ Generator PMFA multi piringan

Konfigurasi generator PMFA 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 PMFA dengan stator tanpa inti mampu beroperasi pada efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan generator konvensional. Topologi dasar Generator MPFA ditunjukkan pada gambar 3.1.



Gambar 3.1. Topologi dasar generator MPFA [3]

Desain satu sisi dari generator fluks aksial lebih sederhana dibanding dengan desain dua sisi, tetapi hal tersebut 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. Desain generator semacam ini mampu menghasilkan efisiensi yang cukup tinggi saat daya putaran roda penggerak nol. Generator sinkron MPFA dengan stator tanpa inti dan sistem eksitasi rotor magnet permanen permanen satu sisi ditunjukkan gambar 3.2.



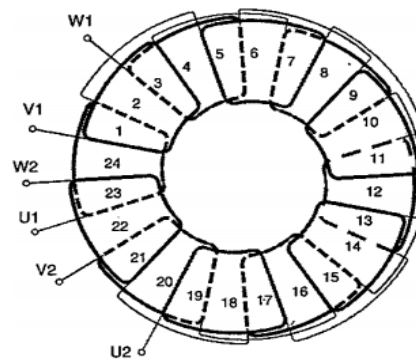
Gambar 3.2. Generator sinkron MPFA tanpa sikat dengan kumparan film sebagai stator tanpa inti dan sistem eksitasi rotor magnet permanen satu sisi [3]

Untuk menjaga kerapatan fluks diantara celah udara rotor dengan stator tetap stabil, dibutuhkan jumlah volume magnet permanen yang lebih banyak dibandingkan dengan inti stator mesin MPFA terlamnasi. Kumparan lilitan ditempatkan di medan magnet yang dihasilkan oleh magnet permanen, diletakkan di antara piringan rotor yang berlawanan. Saat bekerja pada frekuensi tinggi, rugi-rugi arus eddy yang signifikan pada konduktor lilitan stator akan terjadi.

### 3.3. Karakteristik Generator PMFA

#### 3.3.1. 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 ditekuk 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 3.3.



Gambar 3.3. Lilitan tanpa inti sebuah generator MPFA tiga fasa delapan kutub dan dua rotor eksternal[3]

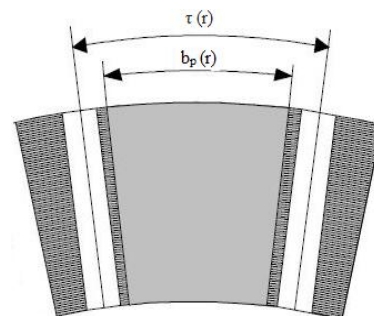
Pada bentuk lilitan belah ketupat, memiliki akhir lilitan yang lebih pendek dibandingkan dengan lilitan bentuk trapesium. Sisi konduktor yang aktif disusun miring sehingga memungkinkan untuk diletakkan saluran air pendingin di dalam stator. Adapun kerugian utama dari lilitan berbentuk belah ketupat adalah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

### 3.3.2. Kemampuan Daya Putar (Torsi)

Karena dimensi dari generator MPFA merupakan fungsi radius, maka torsi elektromagnetik yang dihasilkan melebihi kontinum jari – jari, bukan berupa jari - jari konstan sebagaimana mesin silindris. Tinggi kutub  $\tau(r)$  dan lebar kutub  $b_p(r)$  dari generator MPFA merupakan fungsi dari jari–jari, sehingga didapat persamaan[3]:

$$\tau(r) = \frac{2\pi r}{2p} = \frac{\pi r}{p} \quad (3.1)$$

$$b_p(r) = \alpha_i \tau(r) = \alpha_i \frac{\pi r}{p} \quad (3.2)$$



Gambar 3.4. Puncak kutub dan lebar kutub pada magnet permanen [16]

Dimana  $\alpha_i$  merupakan perbandingan (rasio) antara  $B_{avg}$  terhadap nilai puncak  $B_{mg}$  dari kerapatan fluks magnetik di celah udara[3] :

$$\alpha_i = \frac{B_{avg}}{B_{mg}} \text{ atau } \alpha_i = \frac{B_p(r)}{\tau(r)} \quad (3.3)$$

Dimana, parameter  $\alpha_i$  umumnya tidak tergantung dari dari jari – jari.

Kerapatan arus juga merupakan fungsi dari jari – jari r. Sehingga nilai puncak dari kerapatan arus adalah [3] :

$$A_m(r) = \frac{m_1 \sqrt{2} N_1 I_a}{p \tau(r)} = \frac{m_1 \sqrt{2} N_1 I_a}{\pi r} \quad (3.4)$$

Asumsikan kerapatan fluks magnetik pada celah udara  $B_{mg}$  tidak tergantung dari jari – jari,  $dS = 2\pi r dr$  dan  $B_{avg} = \alpha_i B_{mg}$ , maka torsi elektro magnetik adalah[3] :

$$dT_d = r dF_x = r \{ k_{w1} A(r) B_{avg} dS \} = 2\pi \alpha_i k_{w1} A(r) B_{mg} r^2 dr \quad (3.5)$$

Kerapatan arus  $A(r)$  adalah muatan listrik dari seluruh stator bila stator yang digunakan tanpa inti.

### 3.3.3. Fluks Magnetik

Bentuk gelombang sinusoidal yang dibangkitkan oleh magnet permanen memiliki nilai rata-rata kerapatan fluks magnetik sebagai berikut[3] :

$$\begin{aligned} B_{avg} &= \frac{1}{\pi/p-0} \int_0^{\pi/p} B_{mg} \sin(p\alpha) = -\frac{p}{\pi} B_{mg} \left[ \frac{1}{p} \cos(p\alpha) \right]_0^{\pi/p} \\ &= -\frac{1}{\pi} B_{mg} [\cos \pi - \cos 0] = \frac{2}{\pi} B_{mg} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Dimana,  $B_{mg}$  = nilai puncak dari kerapatan fluks magnetik pada celah udara.

Sedangkan fluks magnetik yang dibangkitkan oleh setiap kutub magnet permanen untuk bentuk gelombang nonsinusoidal  $B_{avg} = \alpha_i B_{mg}$  adalah[3] :

$$\phi_f = \alpha_i B_{mg} \frac{\pi}{2p} (R_{out}^2 - R_{in}^2) \quad (3.7)$$

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

Dengan menggunakan rasio diameter dalam terhadap diameter luar sebagai berikut[3] :

$$k_d = \frac{R_{in}}{R_{out}} = \frac{D_{in}}{D_{out}} \quad (3.8)$$

Maka [3]:

$$\phi_f = \alpha_i B_{mg} \frac{\pi}{8p} D_{out}^2 (1 - k_d^2) \quad (3.9)$$

### 3.3.4. 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 [3]:

$$Z_L = R_L + j\omega L_L - j\frac{1}{\omega C} \quad (3.10)$$

Dimana :  $Z_L$  = impedansi beban ;  $R_L$  = resistansi beban ;

$L_L$  = induktansi beban

Arus input pada lilitan stator (jangkar) adalah [3]:

$$I_a = \frac{E_f}{\sqrt{(R_s + R_L)^2 + [\omega L_s + \omega L_L - \frac{1}{\omega C}]^2}} \quad (3.11)$$

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

Tegangan yang dihasilkan pada terminal output adalah [3] :

$$V_1 = I_a \sqrt{R_L^2 + (\omega L_L - \frac{1}{\omega C})^2} \quad (3.12)$$

Dimana :  $V_1$  = tegangan pada salah satu fasa

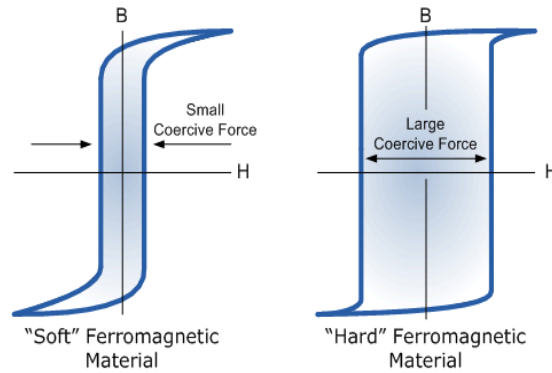
Karakteristik EMF per fasa  $E_f$ , tegangan salah satu fasa  $V_1$ , arus pada stator (beban)  $I_a$ , daya output  $P_{out}$ , daya input  $P_{in}$ , efisiensi  $\eta$  dan faktor daya  $pf = \cos \phi$  terhadap kecepatan  $n$  dari generator sinkron MPFA untuk beban induktif  $Z_L = R_L + j\omega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

### 3.4. Material Rotor Generator

#### 3.4.1. Material Magnet Permanen

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.

Salah satu karakteristik utama dari magnet permanen adalah memiliki kurva histerisis yang lebar, oleh karena itu magnet permanen disebut juga dengan magnet bahan keras. Kurva histerisis merupakan kurva yang menunjukkan karakter hubungan kepadatan fluks magnetik ( $B$ ) dengan intensitas medan magnet ( $H$ ) tidak linear.



Gambar 3.5. Perbedaan kurva histerisis antara magnet permanen (magnet bahan keras) dengan magnet induksi (magnet bahan lunak) [19]

Terdapat tiga material magnet permanen yang umum digunakan saat ini, yaitu :

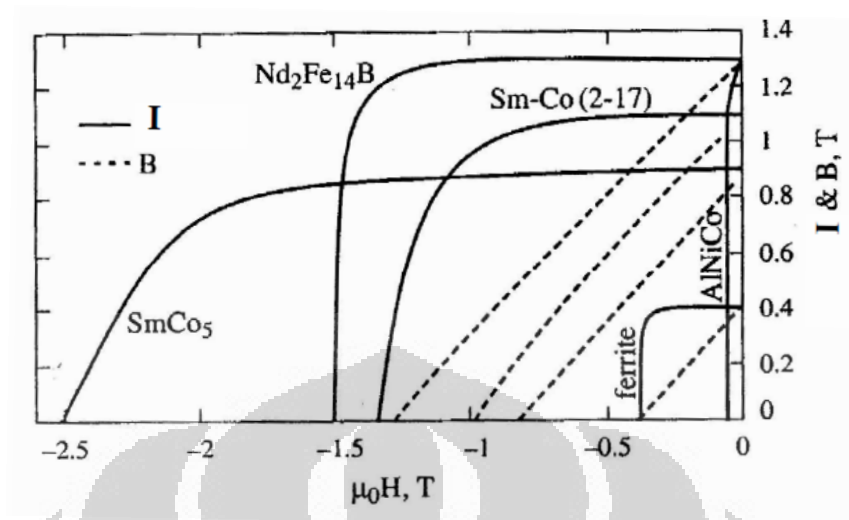
1. Alnico, merupakan material campuran dari aluminium, nikel, kobalt, dan besi
2. Keramik, merupakan material campuran dari ferit dan bahan lainnya, contohnya barium ferit ( $\text{BaO} \times 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) dan strontium ferit ( $\text{SrO} \times 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ )
3. Magnet dari material bumi langka seperti samarium kobalt ( $\text{SmCo}$ ) dan besi-boron-neodimium ( $\text{NdFeB}$ )

Tabel 3.1. Spesifikasi beberapa bahan magnet permanen

Material Magnet	Energi Maksimum $B_{hmax}$ (Joule)	Kepadatan Fluks Magnet (T)	Daya Tarik $H_c$ (A/m)	Temperatur Kerja ( $^{\circ}\text{C}$ )
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	20	9000	8000	260
Samarium kobalt 28	28	10500	9500	350
Neodimium N45	45	13500	10800	80



Sedangkan kurva histerisis beberapa bahan magnet dapat dilihat pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6. Kurva karakteristik histerisis magnetik beberapa material magnet permanen [3]

### 3.4.2. Kurva $B$ - $H$ Material Magnet

Pada ruang hampa udara, hubungan kerapatan fluks magnet ( $B$ ) proporsional dengan intensitas medan magnet ( $H$ ), nilai kerapatan fluks pada ruang hampa udara dihitung dengan persamaan [2][3]:

$$B_v = \mu_o H \quad (3.13)$$

Sedangkan nilai kerapatan fluks pada material dihitung dengan persamaan [2][3]:

$$B = \mu_o \mu_r H \quad (3.14)$$

dimana :

$B_v$  = kerapatan fluks pada ruang hampa udara (T)

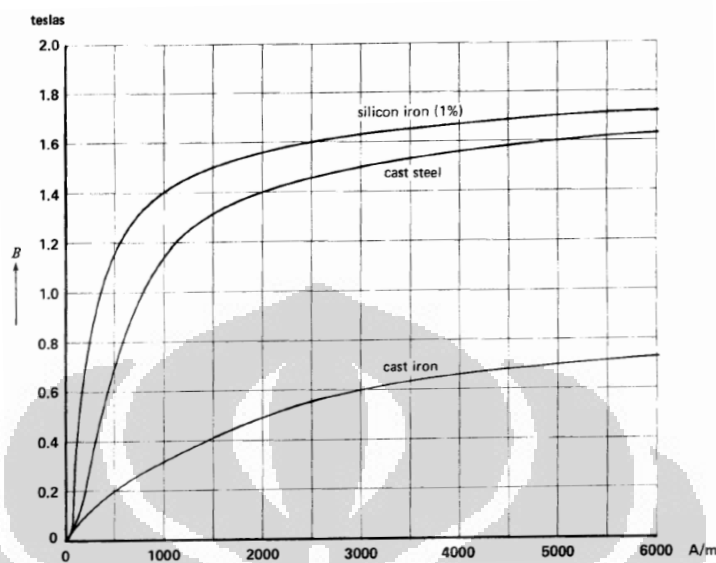
$B$  = kerapatan fluks (T)

$\mu_o$  = konstanta magnet ( $= 4\pi \times 10^{-7}$  henry/m)

$\mu_r$  = *relative permeability* dari material

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

Hubungan antara  $B$  dan  $H$  tidak linear, sehingga persamaan 3.14 jarang digunakan dalam prakteknya. Hubungan  $B$  dan  $H$  biasanya digambarkan dengan kurva.



Gambar 3.7. Kurva  $B$ - $H$  saturasi dari 3 material magnet [3]

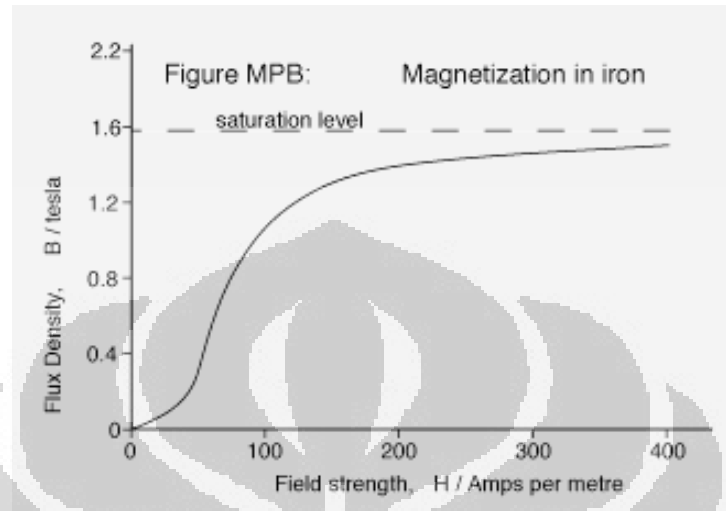
### 3.4.3. Material Yoke Rotor

Pada generator sederhana, yoke biasanya terbuat dari bahan besi. Tapi untuk generator yang lebih besar menggunakan material yoke yang terbuat dari baja. Secara umum, pada rotor yoke berfungsi [13] :

1. Sebagai bahan material untuk penampang magnet permanen dan sebagai pelindung keseluruhan mesin.
2. Membawa fluks magnetik yang dihasilkan oleh magnet permanen.

Material yang baik digunakan untuk yoke adalah material yang memiliki permeabilitas dan konduktivitas elektrik relatif tinggi. Material yang memiliki karakteristik ini disebut juga dengan material ferromagnetik, misal besi, cobalt dan nikel. Material ferromagnetik adalah salah satu benda yang dapat dibuat jadi magnet, karena elektron-elektron pada atom benda itu mudah untuk diarahkan gerakannya oleh medan magnet dari luar. Keuntungan menggunakan material ferromagnetik sebagai inti besi pada generator sinkron adalah dimungkinkan

memperoleh fluks yang berlipat ganda [2]. Kurva magnetasi material besi ditunjukkan pada gambar 3.8.



Gambar 3.8. Kurva magnetasi material besi [16]

### 3.5. Konsep Rangkaian Magnet

Gaya Gerak Magnet (ggm) adalah percobaan potensial magnet yang cenderung menggerakkan fluks disekitar di cincin toroidal [2]. Hubungan besarnya fluks magnet dengan nilai reluktansi ditunjukkan pada rumus [2] :

$$\Phi = \frac{\mathcal{F}}{\mathcal{R}} \text{ weber ,} \quad (3.15)$$

dimana,  $\Phi$  = Fluks magnet (webber)

$\mathcal{F}$  = Gaya Gerak magnet (ampere\_turn)

$\mathcal{R}$  = Reluktansi (ampere\_turn/webber)

#### 3.5.1. Reluktansi

Gerak fluks di sekitar cincin merupakan fungsi tahanan dari inti besi yang membawa fluks tersebut atau disebut Reluktasnsi ( $\mathcal{R}$ ) [2]. Reluktansi berbanding lurus dengan panjang ( $l$ ), berbanding terbalik dengan penampang luas bidang ( $A$ ),

dan bergantung pada bahan magnetik rangkaian magnetik tersebut. Persamaan rumus reluktansi adalah sebagai berikut [2][12]:

$$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu A} \text{ Ampere/weber}, \quad (3.16)$$

dimana,  $\mathcal{R}$  = Reluktansi (ampere\_turn/webber)

$l$  = panjang (m)

$A$  = Luas Penampang ( $\text{m}^2$ )

$\mu$  = permeabilitas (H/m)

Terdapat analogi antara hubungan rangkaian magnet dan hubungan rangkaian listrik sebagai berikut [2]:

$$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu A} \Leftrightarrow R = \frac{l}{\sigma A} \quad (3.17)$$

dimana,  $R$  = tahanan (Ohm)

$l$  = panjang (m)

$A$  = luas penampang ( $\text{m}^2$ )

$\sigma$  = konduktivitas (Ms/m)

Perbedaan utama antara rumus rangkaian magnet dan rangkaian listrik adalah reluktansi pada suatu bahan terhadap fluks magnet selalu berubah-ubah nilainya apabila nilai konsentrasi fluks yang melewatinya berubah-ubah [14]. Hal ini menyebabkan persamaan rumus rangkaian magnet ini tidak linier seperti rumus hukum Ohm listrik.

### 3.5.2. Permeabilitas

Permeabilitas adalah kemampuan suatu material dalam menerima/melewatkan fluks magnet. Sifat magnetik suatu bahan dipengaruhi oleh permeabilitasnya. Seperti ditunjukkan pada persamaan (3.17), permeabilitas dianalogikan seperti koefisien resistansi material ( $\rho$ ) dalam rangkaian listrik. Tetapi, jika dalam konsep rangkaian listrik semakin besar nilai  $\rho$ , maka semakin besar resistansinya,

sehingga semakin susah arus untuk mengalir bahan itu. Sedangkan dalam rangkaian magnet, semakin besar nilai permeabilitas, maka semakin mudah bagi fluks magnet untuk melewati bahan itu.

Berdasarkan kurva B-H diketahui bahwa permeabilitas besar untuk keadaan tidak jenuh dan kemudian berangsur-angsur menurun ketika keadaan besi menjadi jenuh [2]. Jika dikehendaki harga fluks sebanding dengan harga ggm-nya, maka inti besi harus dioperasikan pada keadaan tidak jenuh. Pada rangkaian magnet, medan magnet dipengaruhi oleh permeabilitas material, dimana permeabilitas dipengaruhi oleh kadar karbon dan campuran material. Material yang memiliki kadar karbon tinggi, permeabilitasnya kecil sehingga akan menahan lebih banyak fluks magnet dibandingkan material dengan kadar karbon rendah [14]. Permeabilitas dapat dihitung dengan persamaan [2][12][18]:

$$\mu = \mu_r \times \mu_0 \quad (3.18)$$

dimana,  $\mu$  = Permeabilitas material (H/m)

$\mu_r$  = Permeabilitas Relative (H/m)

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

*Relative permeability* ( $\mu_r$ ) adalah perbandingan kerapatan fluks pada material terhadap kerapatan fluks yang dihasilkan pada ruang hampa udara pada intensitas medan magnet yang sama. Nilai  $\mu_r$  tidak konstan, tetapi bervariasi terhadap kerapatan fluks pada material.

### 3.6. Rugi-Rugi Pada Generator

#### 3.6.1. Rugi Tembaga ( $P_{cu}$ )

Rugi Tembaga adalah rugi yang disebabkan arus beban mengalir pada kawat tembaga. Rugi tembaga tidak konstan, bergantung pada beban karena arus beban berubah-ubah. Persamaan untuk menghitung rugi tembaga adalah [2] :

$$P_{cu} = I^2 R \text{ (watt)} \quad (3.19)$$

dimana,  $P_{cu}$  = rugi tembaga (watt)  
 $I$  = arus (Amp)  
 $R$  = tahanan (Ohm)

### 3.6.2. Rugi-rugi pada Rotor (Rugi Inti Besi)

Rugi inti yang terjadi pada generator sinkron terdiri atas [2]:

$$P_i = P_h + P_e \quad (3.20)$$

dimana,  $P_i$  = rugi inti besi (watt)  
 $P_h$  = rugi histerisis (watt)  
 $P_e$  = rugi eddy\_current / rugi arus pusar (watt)

Rugi Histerisis, yaitu rugi yang disebabkan fluks bolak balik pada inti besi, yang dinyatakan sebagai [2]:

$$P_h = K_h \cdot f \cdot B_{max}^{1.6} \quad (3.21)$$

dimana :  $P_h$  = Rugi Histerisis (watt)  
 $K_h$  = Konstanta histerisis  
 $B_{max}$  = Fluks Maksimum (webber)

Rugi arus pusar (*Eddy Current*), yaitu rugi yang disebabkan arus pusar pada inti besi, dirumuskan sebagai [2]:

$$P_e = K_e \cdot f^2 \cdot B_{maks}^2 \quad (3.22)$$

dimana,  $P_e$  = Rugi Arus pusar (watt)  
 $K_e$  = Konstanta arus\_pusar  
 $B_{max}$  = Fluks Maksimum (webber)

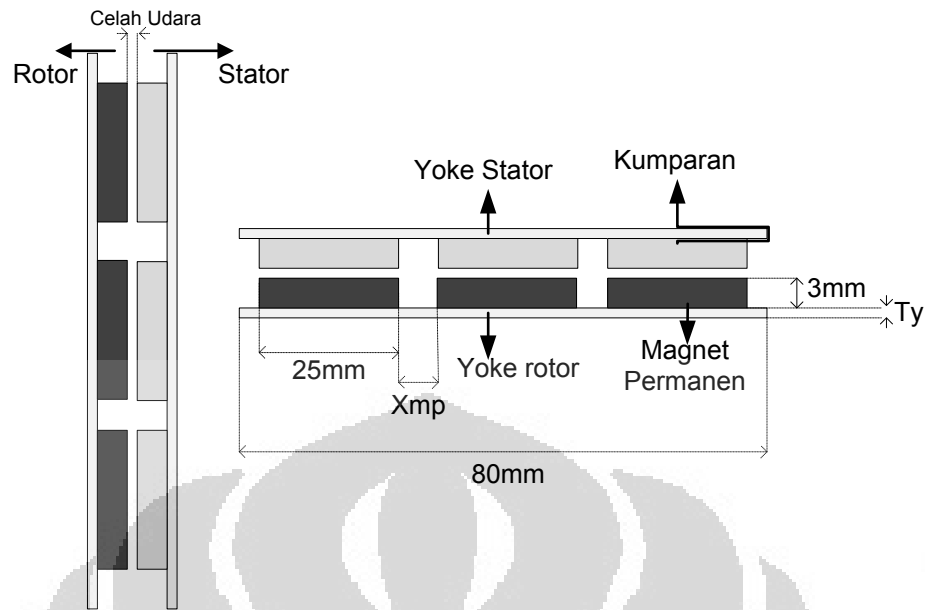
## BAB IV SIMULASI DESAIN KETEBALAN YOKE ROTOR GENERATOR SINKRON MP-FA-TI-MC

### 4.1. Permodelan Generator Sinkron MP-FA-TI-MC

Studi ini melanjutkan studi yang dilakukan sebelumnya, studi dilakukan pada desain rotor generator sinkron aksial dengan spesifikasi sebagai berikut :

Jumlah kutub magnet permanen	6 buah
Material magnet permanen	keramik
Bentuk magnet permanen	lingkaran
Diameter magnet permanen	25 mm
Tebal magnet permanen	3 mm
Pemasangan magnet permanen	<i>Surface Mounted</i>
Bentuk Generator	Cakram
Tipe Stator	Tanpa Inti
Bentuk material yoke	lingkaran
Material Yoke	besi ( <i>Pure Iron</i> )
Diameter Yoke	80 mm

Parameter yang dioptimasi pada studi desain rotor generator ini adalah ketebalan yoke rotor ( $T_y$ ) dan jarak antar kutub magnet permanen ( $X_{mp}$ ). Analisa dilakukan dengan metode pendekatan analisis grafis berbasis komputer menggunakan perangkat lunak FEMM 4.2 (*freeware*). Spesifikasi dari desain generator sinkron yang distudi ditunjukkan gambar 4.1.



Gambar 4.1. Spesifikasi desain generator sinkron

#### 4.2. Algoritma Studi Desain Generator Sinkron MP-FA-TI-MC

Algoritma simulasi desain rotor generator sinkron ini dimulai dengan menentukan spesifikasi desain generator sinkron yang akan distudi. Kemudian membuat model rotor generator sesuai spesifikasi pada perangkat lunak FEMM 4.2. dengan ditentukan jenis material yoke dan magnet permanennya terlebih dahulu. Selanjutnya, tentukan Variasi jarak antar kutub magnet permanen ( $X_{mp}$ ) dan ketebalan yoke ( $T_y$ ) yang disimulasikan. Jalankan simulasi pada variasi parameter  $X_{mp}$  dan  $T_y$  yang telah ditentukan untuk mengetahui besar kerapatan fluks magnet yang dihasilkan. Simulasi dijalankan dengan mengubah-ubah variasi  $X_{mp}$  pada  $T_y$  yang tetap dan mengubah-ubah variasi  $T_y$  pada  $X_{mp}$  yang tetap, sehingga didapatkan besar kerapatan fluks magnet pada masing-masing variasi parameter  $T_y$  dan  $X_{mp}$ . Kemudian, hitung besar rugi inti besi yang terjadi pada masing-masing variasi  $X_{mp}$  dan  $T_y$  berdasarkan besar kerapatan fluks magnet yang dihasilkan. Kemudian, besarnya rugi-rugi yang terjadi diamati terhadap kerapatan fluks magnet yang dihasilkan. Selanjutnya menghitung besar rasio antara kerapatan fluks magnet dengan rugi-ruginya sehingga didapatkan titik optimum  $T_y$  dan  $X_{mp}$  yang menghasilkan kerapatan fluks magnet optimal.

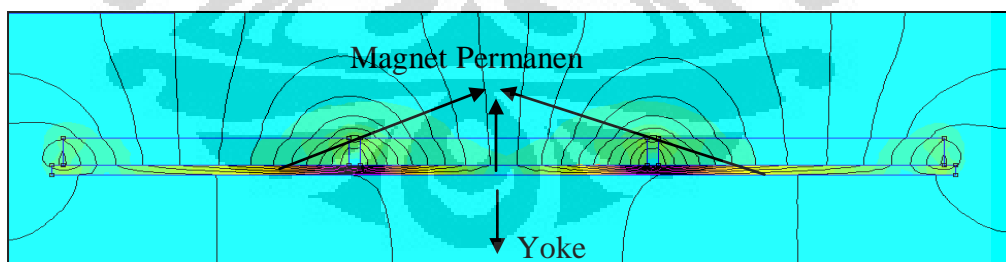


### 4.3. Pengaruh jenis material yoke terhadap distribusi kerapatan medan magnet

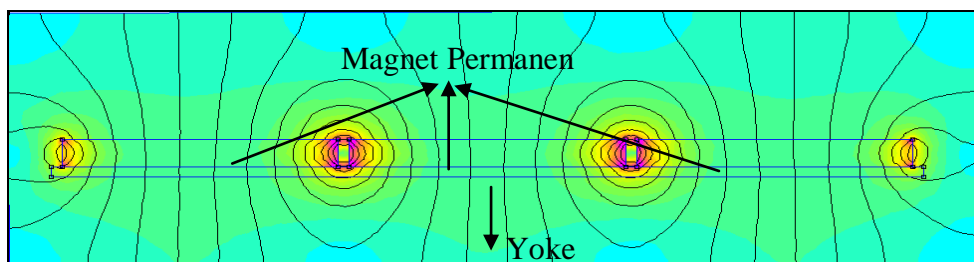
Material yoke sangat berpengaruh terhadap distribusi kerapatan fluks yang dihasilkan pada rotor, besarnya distribusi kerapatan fluks yang dihasilkan dipengaruhi oleh besarnya permeabilitas material dan sifat material magnetik atau non-magnetik. Perbandingan besarnya kerapatan fluks magnet pada material yoke magnetik dan non-magnetik, disimulasikan menggunakan perangkat lunak FEMM 4.2 pada tebal yoke (1mm), jarak antar magnet (1mm), dan bahan magnet permanen yang sama (*ceramic5*). Hasil simulasi distribusi kerapatan fluks yang dihasilkan pada material yoke besi (magnetik) ditunjukkan gambar 4.2 dan material yoke aluminium (non-magnetik) ditunjukkan gambar 4.3. Perbandingan nilai puncak kerapatan fluks masing-masing material yoke ditunjukkan tabel 4.1.

Tabel 4.1. Tabel perbandingan nilai puncak kerapatan magnet material yoke

No	Material Yoke	Permeability ( $\mu_r$ ) H/m	Kerapatan fluks magnet (B) T
1.	Pure Iron (magnetik)	14872	0.536591
2.	US Steel Type 2-S 0.018 inch (magnetik)	9400	0.535568
3.	Alumunium 6061 T6 (non-magnetik)	1	0.46411
4.	316 Stainless Steel (non-magnetik)	1	0.46411



Gambar 4.2. Distribusi fluks pada yoke dengan bahan *pure iron*



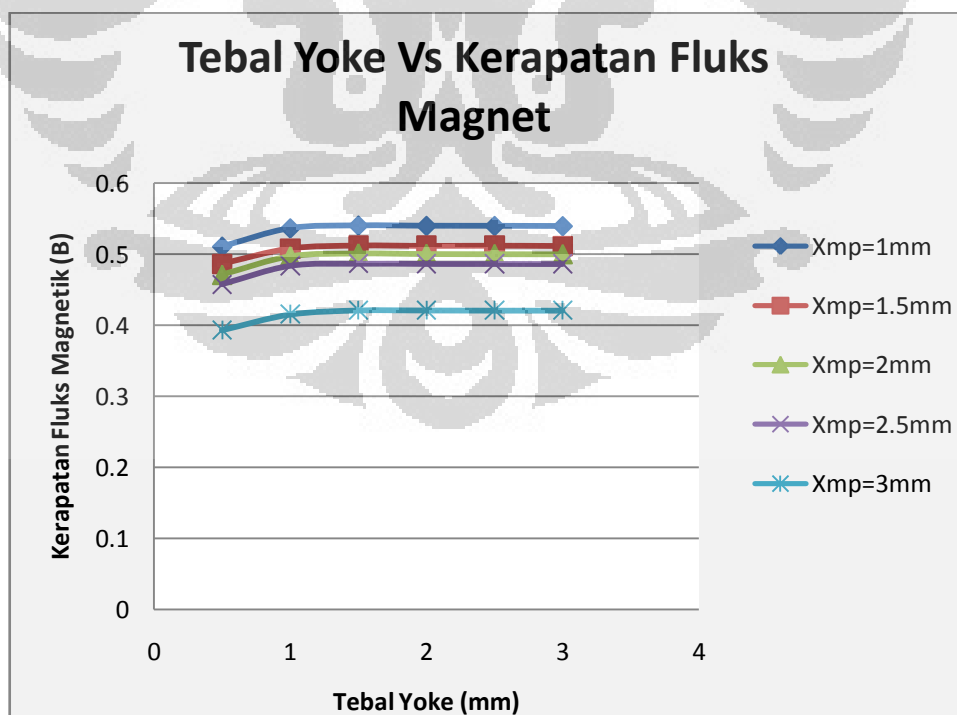
Gambar 4.3. Distribusi fluks pada yoke dengan bahan Alumunium 6061T6

#### 4.4. Pengaruh Ketebalan Yoke Dan Jarak Antar Magnet Permanen Terhadap Distribusi Kerapatan Fluks Magnet Pada Permukaan Magnet

Pada studi ini, penulis melakukan simulasi desain rotor pada variasi parameter  $T_y$  dan  $X_{mp}$  untuk mendapatkan titik yang menghasilkan kerapatan fluks magnet optimum. Besar kerapatan fluks magnet dari masing-masing variasi ditunjukkan pada tabel 4.2 dan kurva pengaruh ketebalan yoke terhadap nilai kerapatan fluks pada masing-masing variasi jarak magnet ditunjukkan pada kurva gambar 4.4.

Tabel 4.2. Hasil nilai kerapatan fluks magnet (B) terhadap tebal yoke ( $T_y$ ) dan jarak antar magnet ( $X_{mp}$ )

No.	$T_y$ (mm)	Kerapatan fluks magnet (T)				
		$X_{mp}=1\text{mm}$	$X_{mp}=1.5\text{mm}$	$X_{mp}=2\text{mm}$	$X_{mp}=2.5\text{mm}$	$X_{mp}=3\text{mm}$
1.	0.5	0.510916	0.486499	0.471219	0.4578	0.393194
2.	1	0.536756	0.507861	0.497392	0.483958	0.415463
3.	1.5	0.540699	0.511957	0.501403	0.486932	0.421297
4.	2	0.540245	0.511546	0.500669	0.486655	0.421278
5.	2.5	0.54013	0.511799	0.500447	0.486596	0.421078
6.	3	0.53986	0.511388	0.500265	0.486508	0.421065

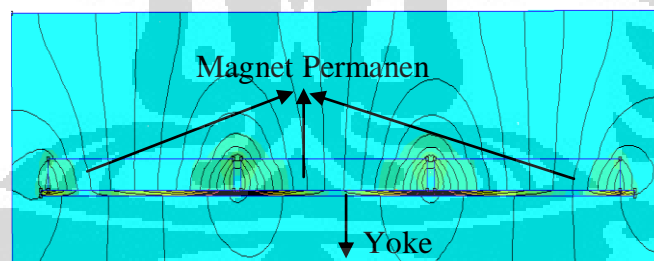


Gambar 4.4. Kurva kerapatan fluks magnet pada variasi jarak antar magnet dan Variasi ketebalan magnet

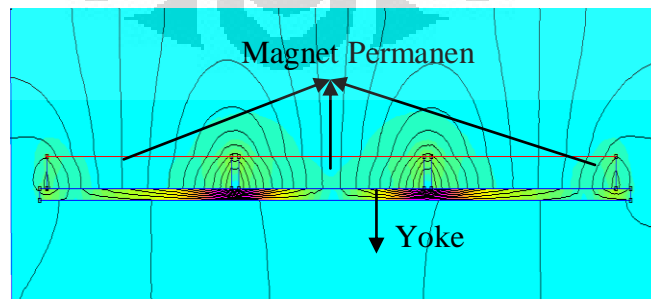
#### 4.4.1. Analisis Grafis Distribusi Kerapatan Fluks berdasarkan Parameter Ketebalan Yoke ( $T_y$ )

Ketebalan yoke berpengaruh terhadap distribusi kerapatan fluks yang dihasilkan. Berdasarkan rumus Reluktansi persamaan (3.16), besarnya reluktansi dipengaruhi oleh  $l$  (panjang/tebal magnet), permeabilitas ( $\mu$ ) dan luas penampang ( $A$ ). Jika semakin panjang  $l$  (semakin tebal) maka reluktansi semakin besar, jadi nilai fluks magnet semakin kecil. Selain itu, permeabilitas material juga mempengaruhi besarnya kerapatan medan magnet seperti ditunjukkan pada persamaan (3.18).

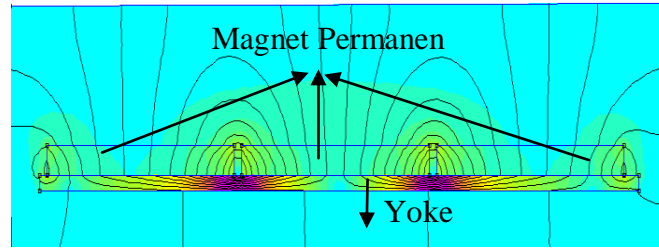
Pada tabel 4.2 ditunjukkan bahwa besar kerapatan fluks magnet yang dihasilkan pada variasi jarak antar magnet cenderung naik dari ketebalan 0.5mm sampai 1.5mm (optimum), kemudian berangsur-angsur menurun sampai ketebalan 3mm. Hal ini karena dipengaruhi oleh permeabilitas material yang akan bernilai optimum pada keadaan tidak jenuh dan akan menurun pada saat jenuh, jadi nilai kerapatan fluks magnet semakin kecil. Hasil simulasi desain rotor dengan  $X_{mp}=1\text{mm}$  pada variasi ketebalan yoke 0.5mm, 1mm, 1.5 mm, 2mm, 2.5mm dan 3mm ditunjukkan gambar 4.5.



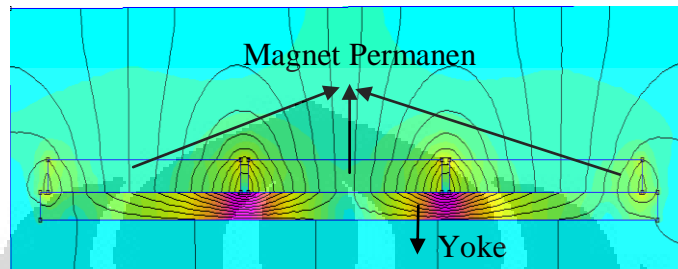
a) Tebal Yoke 0.5 mm



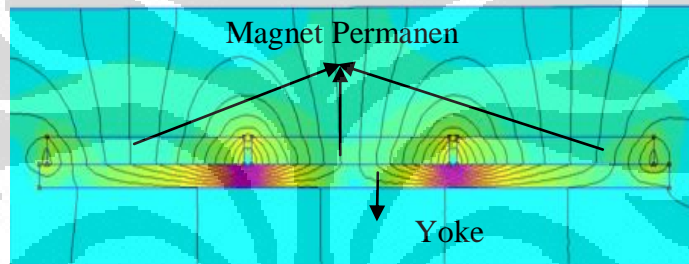
b) Tebal Yoke 1mm



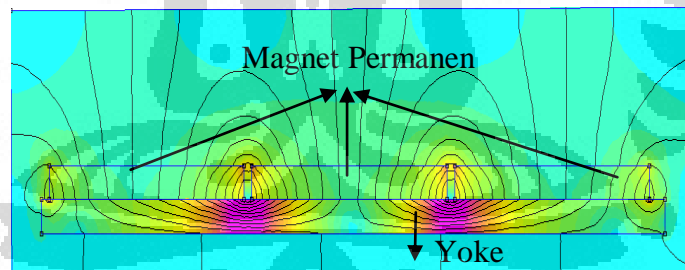
c) Tebal Yoke 1.5mm



d) Tebal yoke 2mm



e) Tebal Yoke 2.5mm



f) Tebal Yoke 3mm

Gambar 4.5. Hasil Simulasi pada  $X_{mp}=1\text{ mm}$  dengan variasi ketebalan yoke 0.5mm, 1mm, 1.5mm, 2mm, dan 3mm

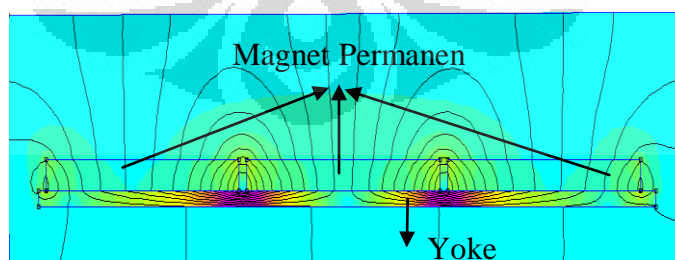
Berdasarkan gambar 4.5., pada masing-masing variasi ketebalan distribusi fluks terdapat pada penampang yoke dan celah antar kutub magnet permanen. Dari perbandingan hasil simulasi pada gambar 4.5., dapat dilihat bahwa distribusi kerapatan fluks magnet pada penampang yoke yang dihasilkan pada ketebalan 0.5mm / gambar (a) lebih pekat (ungu pekat) dibandingkan dengan gambar (b),

(c), (d) dan (e). Hal ini menunjukkan bahwa pada ketebalan 0.5mm distribusi fluks magnet lebih banyak terpusat pada penampang yoke. Selain itu, distribusi fluks magnet pada celah antar kutub magnet permanen dan permukaan magnet, pada ketebalan yoke 0.5mm sangat kecil, hal ini dapat dilihat pada gambar 4.5. (a) hampir tidak ada distribusi fluks magnet pada celah antar magnet dan permukaan magnetnya. Sedangkan pada gambar 4.5. (b), (c), (d) dan (e) terdapat distribusi fluks pada celah antar jarak antar magnet dan permukaan magnet.

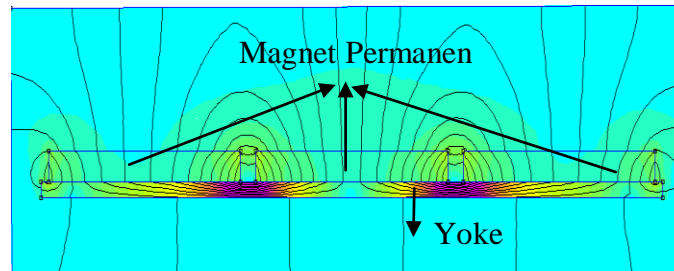
Dari perbandingan gambar 4.5 (b), (c), (d), (e) dapat diketahui bahwa besarnya fluks pada celah antar magnet dan permukaan magnet pada ketebalan 1.5mm lebih besar daripada ketebalan 2mm, 2.5mm dan 3mm, dimana semakin tebal yoke distribusi fluks pada celah antar magnet dan permukaan magnet semakin mengecil. Dari perbandingan gambar 4.5 (b), (c), (d), dan (e) serta perbandingan besarnya fluks magnet pada tabel 4.2. dapat diketahui bahwa titik optimum parameter ketebalan yoke adalah pada ketebalan 1.5mm.

#### 4.4.2. Analisa Grafis Distribusi Kerapatan Fluks Magnet berdasarkan Parameter Jarak Antar Magnet Permanen ( $X_{mp}$ )

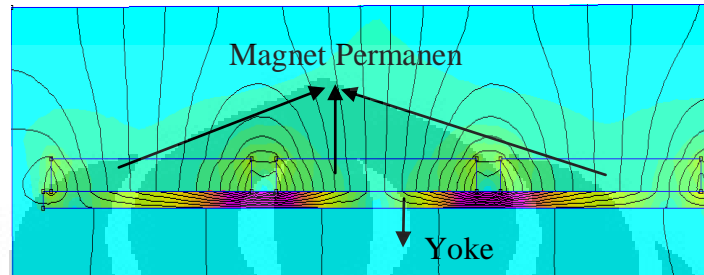
Jarak antar magnet juga berpengaruh terhadap kerapatan fluks magnet yang dihasilkan. Hasil simulasi desain rotor pada  $T_y=1.5\text{mm}$  dengan variasi jarak antar magnet 1mm, 2mm, dan 3mm ditunjukkan gambar 4.6.



a) Jarak Antar Magnet 1mm



b) Jarak Antar Magnet 2mm



c) Jarak Antar Magnet 3mm

Gambar 4.6. Hasil Simulasi pada  $T_y=1.5\text{mm}$  dengan variasi jarak antar kutub magnet permanen 1mm, 2mm, dan 3mm

Berdasarkan hasil simulasi pada gambar 4.6., diketahui bahwa saat jarak antar kutub magnet paling dekat ( $X_{mp}=1\text{mm}$ ) nilai fluks magnetnya paling tinggi dibandingkan dengan yang lainnya. Tetapi, distribusi kerapatan fluks magnet hampir merata pada daerah celah antar kutub magnet. Jarak antar magnet mempengaruhi kerapatan fluks magnet, semakin lebar jarak antar magnet maka daya tarik magnet antar kutub magnet semakin kecil, sehingga kuat fluksnya juga semakin kecil. Hal ini dapat dilihat pada perbandingan gambar 4.6 (a), (b), dan (c), dimana pada jarak antar magnet 1mm distribusi fluks magnet pada celah antar kutub magnet permanen, dihasilkan lebih kuat dibandingkan dengan 2mm dan 3mm.

#### 4.5. Perhitungan Rugi-rugi

Pada  $T_y=1\text{mm}$  dan  $X_{mp}=1\text{mm}$ , nilai fluks magnetiknya adalah 0.536756 T, kemudian besar nilai fluks tersebut digunakan untuk menghitung rugi inti besi. Untuk menghitung rugi histeris, besar frekuensi diasumsikan tetap 50 Hz dan konstanta histerisis diasumsikan tetap (diasumsikan bernilai 1). Begitu juga untuk

menghitung rugi arus\_eddy, frekuensi dan konstanta arus\_eddy juga diasumsikan tetap.

Jadi, perhitungan rugi histerisis dihitung dengan persamaan (3.21):

$$\begin{aligned} P_h &= K_h \cdot f \cdot B_{\max}^{1.6} \text{ watt} \\ &= 1 \cdot 50 \cdot 0.536756^{1.6} \text{ watt} \\ &= 18.4762171 \text{ watt} \end{aligned}$$

Dan besar rugi eddy-current nya dihitung dengan persamaan (3.22):

$$\begin{aligned} P_e &= K_e \cdot f^2 \cdot B_{\max}^2 \text{ watt} \\ &= 1 \cdot 50^2 \cdot 0.536756^2 \text{ watt} \\ &= 720.267509 \text{ watt} \end{aligned}$$

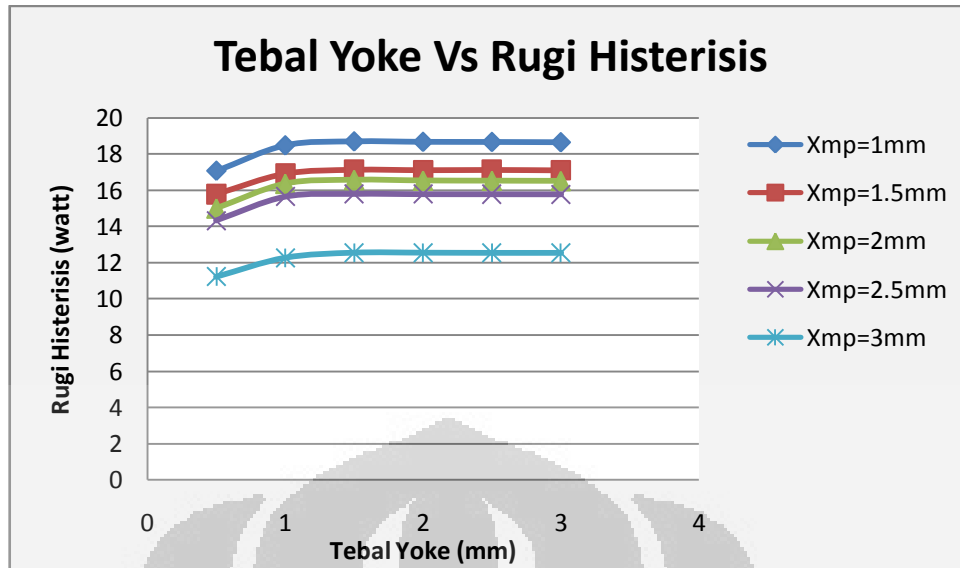
Jadi besar rugi intinya persamaan (3.20) :

$$\begin{aligned} P_i &= P_h + P_e \\ &= 18.4762171 \text{ watt} + 720.267509 \text{ watt} \\ &= 738.743726 \text{ watt} \end{aligned}$$

Dengan menggunakan langkah perhitungan yang sama didapatkan besar rugi histerisis untuk masing-masing variasi parameter ditunjukkan pada tabel 4.3, besar rugi arus-eddy ditunjukkan pada tabel 4.4 dan rugi total inti besinya ditunjukkan pada tabel 4.5. Grafik besarnya rugi histerisis, rugi eddy-current, dan rugi inti besi pada masing-masing variasi  $X_{mp}$  dan  $T_y$  ditunjukkan pada gambar 4.7, gambar 4.8, dan gambar 4.9.

Tabel 4.3. Hasil perhitungan rugi histerisis

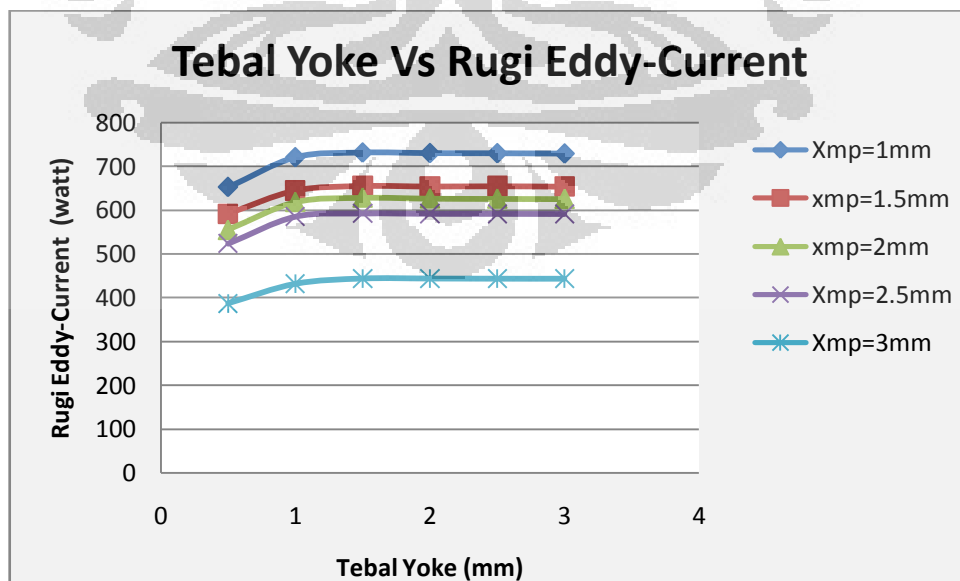
No.	$T_y$ (mm)	Rugi Histerisis (watt)				
		$X_{mp}=1 \text{ mm}$	$X_{mp}=1.5 \text{ mm}$	$X_{mp}=2 \text{ mm}$	$X_{mp}=2.5 \text{ mm}$	$X_{mp}=3 \text{ mm}$
1.	0.5	17.0737615	15.7870552	15.0012163	14.3235697	11.2289983
2.	1	18.4762171	16.9107078	16.3564134	15.655332	12.2637071
3.	1.5	18.6938568	17.1294564	16.567962	15.8095428	12.5404
4.	2	18.6687489	17.1074592	16.5291731	15.7951556	12.5394952
5.	2.5	18.662391	17.1209988	16.517448	15.7920918	12.5299716
6.	3	18.6474669	17.0990057	16.5078379	15.7875225	12.5293527



Gambar 4.7. Kurva Rugi Histerisis pada variasi Ty dan Xmp

Tabel 4.4. Hasil perhitungan rugi arus-eddy

No.	Ty (mm)	Rugi Eddy Current (watt)				
		Xmp=1mm	Xmp=1.5mm	Xmp=2mm	Xmp=2.5mm	Xmp=3mm
1.	0.5	652.587898	591.703193	555.118365	523.9521	386.503804
2.	1	720.267509	644.806988	618.497004	585.538364	431.523761
3.	1.5	730.888522	655.249925	628.512421	592.756932	443.727906
4.	2	729.66165	654.198275	626.673619	592.082723	443.687883
5.	2.5	729.351042	654.845541	626.118	591.939168	443.266705
6.	3	728.622049	653.794216	625.662676	591.725085	443.239336

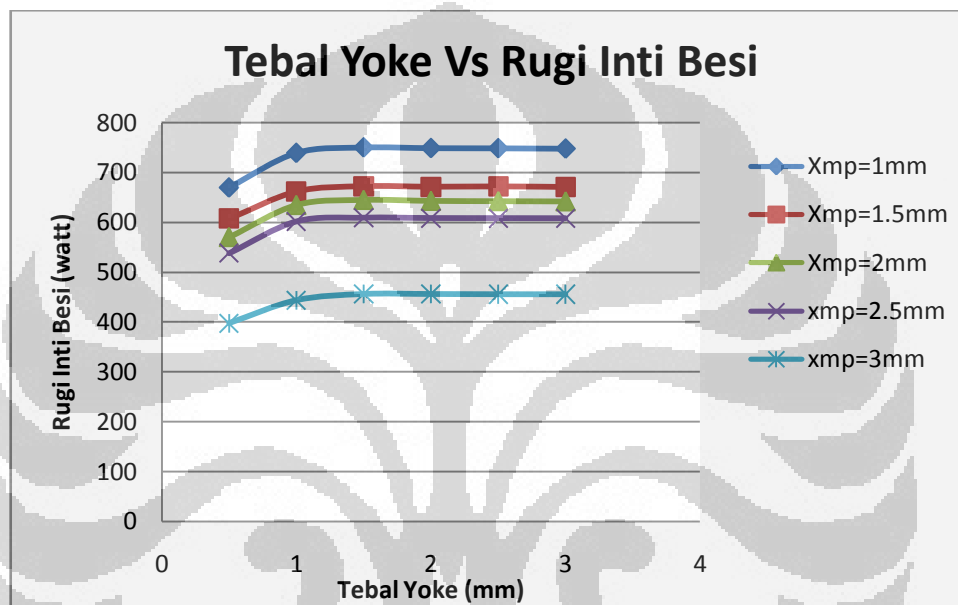


Gambar 4.8. Kurva Rugi Eddy-Current pada variasi Ty dan Xmp



Tabel 4.5 Hasil perhitungan rugi inti besi

No.	Ty (mm)	Rugi Inti Besiz (watt)				
		Xmp=1mm	Xmp=1.5mm	Xmp=2mm	Xmp=2.5mm	Xmp=3mm
1.	0.5	669.661659	607.490248	570.119581	538.27567	397.732802
2.	1	738.743726	661.717696	634.853418	601.193696	443.787468
3.	1.5	749.582378	672.379381	645.080383	608.566474	456.268306
4.	2	748.330399	671.305735	643.202792	607.877878	456.227378
5.	2.5	748.013433	671.96654	642.635448	607.73126	455.796677
6.	3	747.269516	670.893222	642.170513	607.512608	455.768688



Gambar 4.9. Kurva Rugi Inti Besi pada variasi Ty dan Xmp

Berdasarkan hasil perhitungan rugi inti besi pada tabel 4.5, dapat diketahui bahwa semakin lebar Xmp maka besarnya rugi inti besinya semakin kecil, hal ini karena semakin lebar Xmp maka semakin kecil kerapatan fluks magnet yang dihasilkan. Sedangkan pada variasi ketebalan yoke, rugi-rugi yang terjadi terbesar pada ketebalan 1.5mm, karena pada ketebalan yoke 1.5mm besar kerapatan fluks yang dihasilkan lebih besar dibandingkan ketebalan yoke 0.5mm, 1mm, 2mm, 2.5mm dan 3mm.

#### 4.6. Perhitungan Rasio Kerapatan Fluks Magnet dan Rugi Besi

Untuk menentukan titik optimum  $X_{mp}$  dan  $T_y$ , dihitung dari perbandingan kerapatan fluks magnet dengan nilai rugi inti besi yang dihasilkan pada variasi masing-masing parameter. Pada  $T_y=1.5\text{mm}$  dan  $X_{mp}=1\text{mm}$ , fluks yang dihasilkan adalah  $0.540699\text{ T}$  dan rugi inti besinya adalah  $749.582378\text{ watt}$ , perhitungan rasio kerapatan fluks terhadap rugi inti besinya adalah  $0.00072658$ . Hasil Rasio kerapatan fluks magnet terhadap rugi inti besi pada masing-masing variasi ditunjukkan pada tabel 4.6.

Tabel 4.6 Rasio Kerapatan Fluks Magnet terhadap Rugi Inti Besi

No.	$T_y$ (mm)	Hasil Rasio kerapatan fluks magnet dengan Rugi inti besi				
		$X_{mp}=1\text{mm}$	$X_{mp}=1.5\text{mm}$	$X_{mp}=2\text{mm}$	$X_{mp}=2.5\text{mm}$	$X_{mp}=3\text{mm}$
1	0.5	0.00076295	0.00080083	0.00082653	0.00085049	0.00098859
2	1	0.00072658	0.00076749	0.00078348	0.000805	0.00093618
3	1.5	0.00072133	0.00076141	0.00077727	0.00080013	0.00092335
4	2	0.00072193	0.00076202	0.0007784	0.00080058	0.00092339
5	2.5	0.00072209	0.00076164	0.00077874	0.00080068	0.00092383
6	3	0.00072244	0.00076225	0.00077902	0.00080082	0.00092386

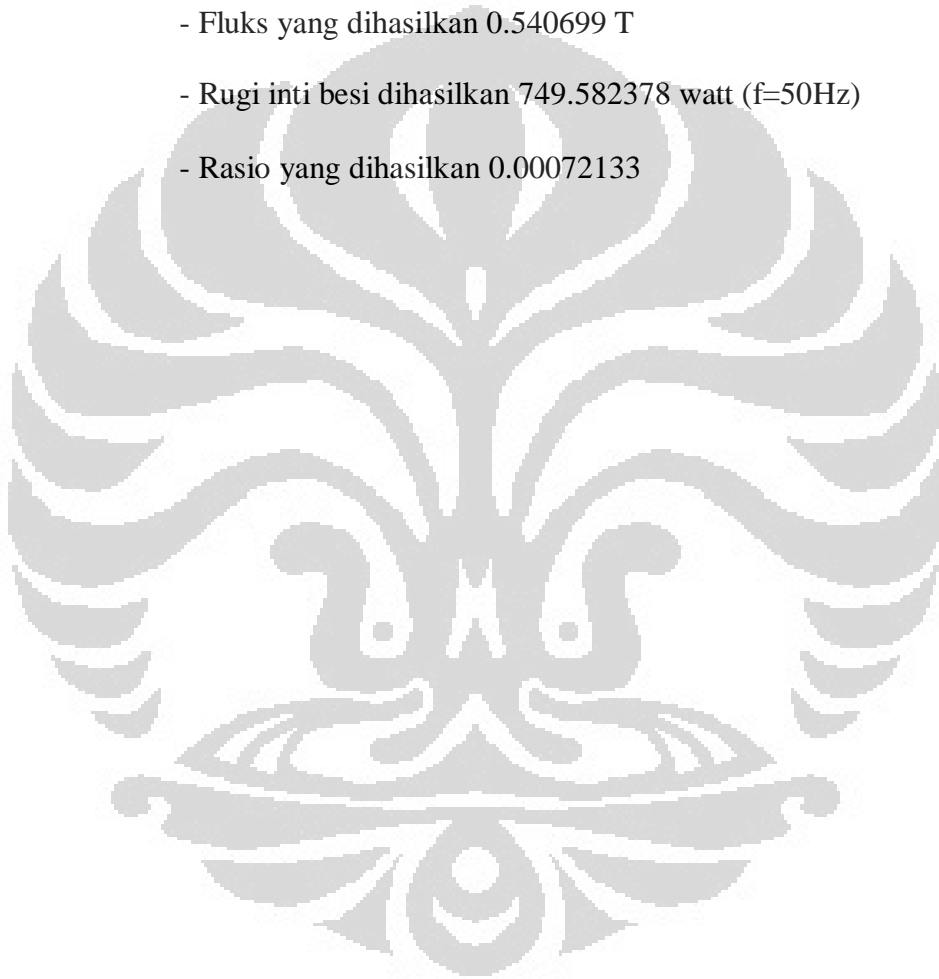
Pada tabel 4.6, rasio kerapatan fluks magnet dan rugi inti besi pada  $T_y=1.5\text{mm}$  dan  $x_{mp}=1\text{mm}$ , besar rasio kerapatan fluks magnet dan rugi intinya bernilai  $0.00072133$ , paling rendah dibandingkan dengan variasi parameter yang lain. Jadi dapat diketahui, titik optimum ketebalan yoke dan jarak antar kutub magnet permanen berada pada  $T_y=1.5\text{mm}$  dan  $x_{mp}=1\text{mm}$  karena menghasilkan kerapatan fluks magnet optimum dan rasio terhadap rugi-ruginya bernilai minimum.

## **BAB V**

### **KESIMPULAN**

Pada studi desain rotor generator sinkron MP-FA-TI-MC ini, dapat diambil kesimpulan bahwa titik-titik optimum adalah sebagai berikut :

- Ketebalan yoke 1.5mm
- Jarak antar magnet permanen 1mm
- Fluks yang dihasilkan 0.540699 T
- Rugi inti besi dihasilkan 749.582378 watt ( $f=50\text{Hz}$ )
- Rasio yang dihasilkan 0.00072133



## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Utomo, Agus R. *Mesin Sinkron*, Diktat Kuliah Teknik Tenaga Listrik, Departemen Teknik Elektro, Universitas Indonesia.
- [2] Zuhail. *Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya*, Jakarta: PT. Gramedia Pustaka Utama, 1995.
- [3] J.F. Gieras, R. Wang dan M.J. Kamper. *Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machine, Second Edition*. The Netherlands : Springer, 2008.
- [4] M. Sadeghierad, A. Darabi, H. Lesani, H. Monset. *Rotor Yoke Thickness of Coreless High-Speed Axial-Flux Permanent Magnet Generator*. Electrical and Computer Engineering Department, University of Tehran, Tehran, Iran., Faculty of Electrical and Robotic Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran, 2009.
- [5] Firmansyah, Muhammad. *Eddy Current Losses Calculation in Rotor Back Iron and Magnet for Concentrated Winding Permanent Magnet Generator*. Delft University of Technology, 2009.
- [6] J.R. Riba Ruiz, X. Alabern Morera. *Experimental behavior of a magnetic field shield for an underground power line*. Department d'Enginyeria Elèctrica, UPC. Spain. Delft University of Technology.
- [7] Aliansyah, Eduward. *Studi Analisa Daya Keluaran Generator Sinkron Tiga Fasa Dengan Rotor Silinder*, Medan: Universitas Sumatera Utara, 2008.
- [8] Tamura, Junji. *Calculation Method of Losses and Efficiency of Wind Generators*. Springer-Verlag. London, 2012.
- [9] Sunarjo. *Pemodelan Histerisis Ferromagnetik Untuk Analisis Medan Magnet Mesin Listrik*. Jurusan Teknik Elektro. Politeknik Negeri Malang.
- [10] M. Sadeghierad, A. Darabi, H. Lesani, H. Monset. *Leakage Flux Consideration in modeling of High Speed Axial Flux PM Generator*. Electrical and Computer Engineering Department, University of Tehran, Tehran, Iran., Faculty of Electrical and Robotic Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran, 2008.

- [11] *Properties of mag mat.*  
[ftp://ftp.dei.polimi.it/outgoing/Massimo.Ghioni/Power%20Electronics%20Passives/magnetics/magnetics\\_basics/properties%20of%20mag%20%20mat.pdf](ftp://ftp.dei.polimi.it/outgoing/Massimo.Ghioni/Power%20Electronics%20Passives/magnetics/magnetics_basics/properties%20of%20mag%20%20mat.pdf)  
diakses pada tanggal 5 April 2012
- [12] Bab II Generator Sinkron  
<http://repository.usu.ac.id/bitstream/123456789/22352/4/Chapter%20I.pdf>  
diakses pada tanggal 5 April 2012
- [13] *Generator Equivalent Circuit And Main parts*  
<http://www.powerelectricalblog.com/2007/03/generator-equivalent-circuit-and-main.html>  
diakses pada tanggal 5 April 2012
- [14] Magnet dan Elektromagnet (bagian 1)  
<http://airlangga25.wordpress.com/2011/08/27/magnet-dan-elektromagnet-bagian-1/>  
diakses pada tanggal 18 April 2012
- [15] Magnet dan Elektromagnet (bagian 2)  
<http://airlangga25.wordpress.com/2011/08/27/magnet-dan-elektromagnet-bagian-2/>  
diakses pada tanggal 18 April 2012
- [16] Panu Kurronen. *Torque Vibration Model Of Axial-Flux Surfacemounted Permanent Magnet Synchronous Machine*. Acta Universitatis. Lappeenrantaensis, 2003.
- [17] *HysteresisLoop.*  
<http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/MagParticle/Physics/HysteresisLoop.html>  
diakses pada tanggal 1 Juni 2012
- [18] *Permeablity.*  
<http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/MagParticle/Physics/Permeability.html>  
diakses pada tanggal 1 Juni 2012
- [19] *Electronics Tutorial About Magnetic Hysteresi,*  
<http://www.electronics-tutorials.ws/electromagnetism/magnetichysteresis.html>  
diakses pada tanggal 1 Juni 2012