



UNIVERSITAS INDONESIA

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

SKRIPSI

**EDO ADHI FITRADHANA
0906603285**

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



UNIVERSITAS INDONESIA

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

SKRIPSI

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

**EDO ADHI FITRADHANA
0906603285**

**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 : Edo Adhi Fitradhana

NPM : 0906603285

Tanda Tangan : 

Tanggal : 11 Januari 2012

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Edo Adhi Fitradhana
NPM : 0906603285
Program Studi : Teknik Elektro
Judul Skripsi : **Studi Desain Rotor 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 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, 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 : Edo Adhi Fitradhana
NPM : 0906603285
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 ROTOR 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 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 : 11 Januari 2012

Yang menyatakan


(Edo Adhi Fitradhana)

ABSTRAK

Nama : Edo Adhi Fitradhana
Program Studi : Teknik Elektro
Judul : **STUDI DESAIN ROTOR GENERATOR SINKRON
MAGNET PERMANEN FLUKS AKSIAL JENIS
CAKRAM**

Rotor magnet permanen adalah rotor dari mesin listrik, dalam hal ini mesin sinkron tanpa penguat eksternal karena penguatnya berasal dari magnet permanen itu sendiri.

Pada Studi Desain Rotor Generator Sinkron Magnet Permanen Fluks Aksial Jenis Cakram, dalam hal ini pengaruh jarak antar kutub magnet permanen sangat berpengaruh terhadap distribusi fluks magnetnya sendiri. Selain berpengaruh terhadap distribusi fluks, jarak antar kutub magnet permanen juga berpengaruh secara tidak langsung terhadap dimensi rotor dan dimensi mesin sinkron secara keseluruhan.

Kata Kunci :

Rotor, generator sinkron magnet permanen fluks aksial,
jarak antar kutub magnet permanen, distribusi fluks magnet

ABSTRACT

Name : Edo Adhi Fitradhana
Study Program : Electrical Engineering
Title : **DESIGN STUDY OF ROTOR ON AXIAL FLUX
PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS
GENERATOR DISC TYPE**

Rotor permanent magnet is the rotor from electric machine, in term of synchronous machine without external exciter because the exciter come from it permanent magnet self.

Design Study of Rotor on Axial Flux Permanent Magnet Synchronous Generator Disc Type, impact of distance between permanent magnet polarity was highly correlated to magnet flux distribution itself. In addition, distance between permanent magnet polarity also influencing indirectly into rotor dimension and dimension of sychronized machine thoroughly.

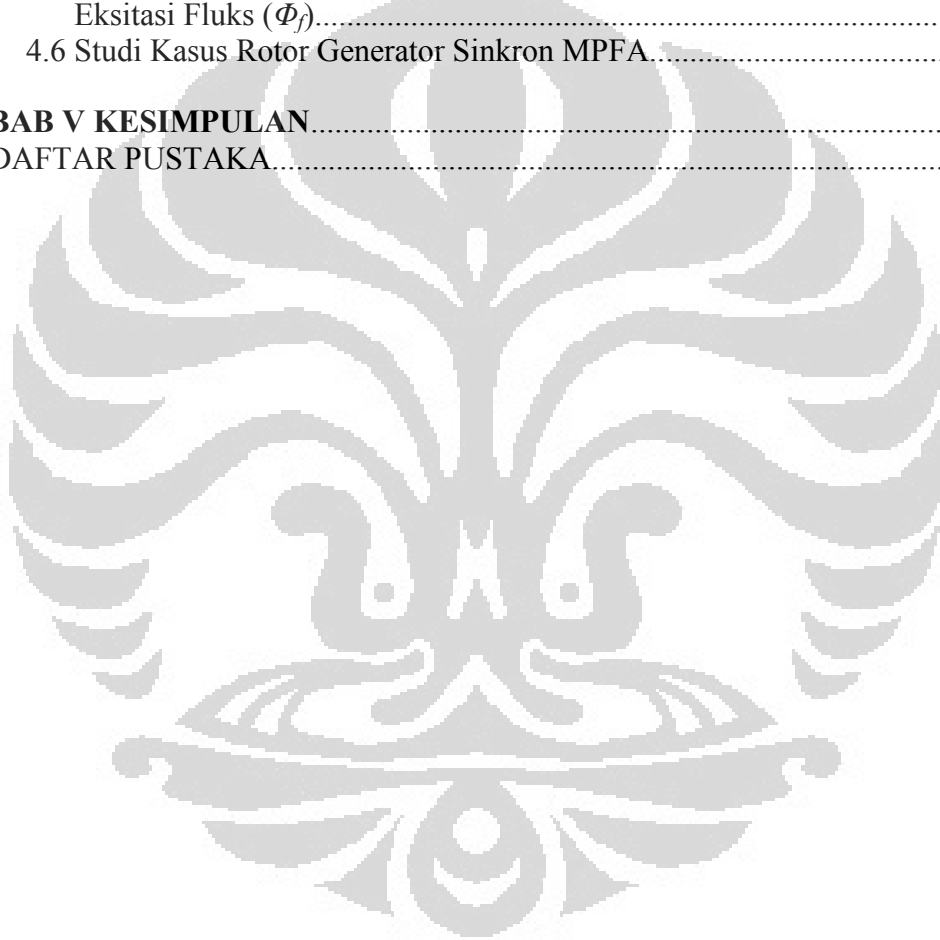
Key word :

*Rotor, axial flux permanent magnet synchronous generator,
distance between permanent magnet polarity, magnet flux distribution*

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.....	xi
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang Masalah.....	1
1.2 Tujuan.....	1
1.3 Rumusan Masalah.....	1
1.4 Batasan Masalah.....	1
1.5 Metodologi Penelitian.....	2
1.6 Sistematika Penulisan.....	2
BAB II MESIN SINKRON.....	3
2.1 Prinsip Dasar Mesin Sinkron.....	3
2.1.1 Definisi.....	3
2.1.2 Konstruksi Dasar Mesin Sinkron.....	3
2.1.2.1 Stator/Kumparan Jangkar.....	4
2.1.2.2 Rotor/Kumparan Medan.....	6
2.1.2.3 Arus Penguat/Eksitasi.....	10
2.2 Prinsip Kerja Dan Karakteristik Mesin Sinkron.....	13
2.2.1 Kecepatan Sinkron.....	13
2.2.2 Generator Sinkron Tanpa Beban.....	14
2.2.3 Generator Sinkron Berbeban.....	15
2.2.4 Reaksi Jangkar.....	16
2.2.5 Reaktansi Sinkron.....	17
BAB III GENERATOR SINKRON MAGNET PERMANEN FLUKS AKSIAL (MPFA) JENIS CAKRAM.....	19
3.1 Definisi Generator Sinkron Magnet Permanen.....	19
3.2 Topologi Dan Geometri.....	20
3.3 Struktur dan Material Generator Sinkron MPFA.....	22
3.3.1 Magnet Permanen Pada Rotor.....	22
3.3.2 Kumparan pada Stator.....	24
3.4 Prinsip Generator Sinkron MPFA.....	25
3.4.1 Rangkaian Magnetik Pada Generator Sinkron MPFA Satu Sisi Dengan Stator Tanpa Inti.....	25
3.4.2 Lilitan Pada Stator Tanpa Inti.....	26
3.5 Karakteristik Generator Sinkron MPFA.....	27
3.5.1 Kemampuan Daya Putar (Torsi).....	27
3.5.2 Fluks Magnetik.....	27
3.5.3 Torsi Elektromagnetik Dan EMF.....	28

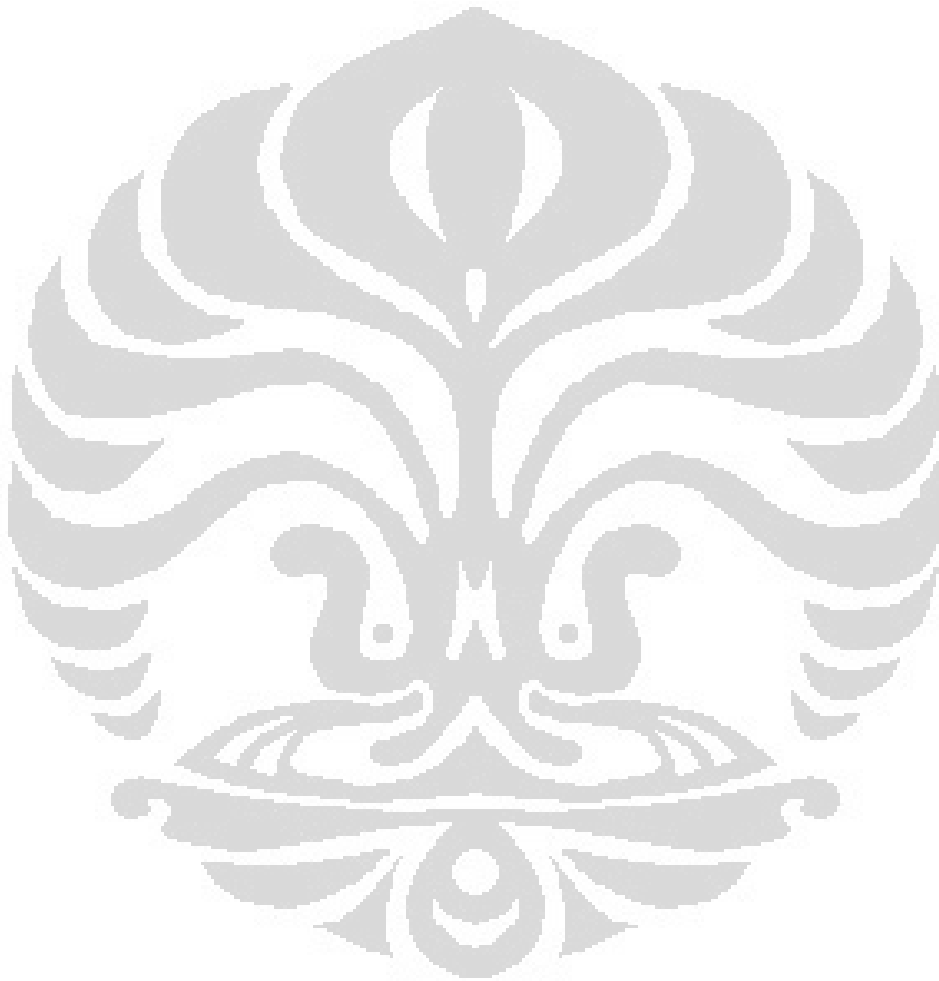
3.6 Karakteristik Performa Generator Sinkron MPFA.....	29
3.7 Kurva $B-H$ Material Magnet.....	31
BAB IV SIMULASI DESAIN ROTOR GENERATOR SINKRON MPFA JENIS CAKRAM.....	32
4.1 Pengaruh Jenis Material Magnet Permanen Terhadap Distribusi Kerapatan Fluks (B) Pada Celah Udara (<i>air gap</i>).....	33
4.2 Pengaruh Lebar Celah Udara (g) Terhadap Distribusi Kerapatan Fluks (B) Pada Celah Udara (<i>air gap</i>).....	34
4.3 Pengaruh Jarak Antar Magnet Permanen (X_{mp}) Terhadap Distribusi Kerapatan Fluks (B) Pada Celah Udara (<i>air gap</i>).....	36
4.4 Optimasi Dimensi Rotor.....	38
4.5 Pengaruh Jarak Antar Magnet Permanen (X_{mp}) Terhadap Nilai Eksitasi Fluks (Φ_f).....	39
4.6 Studi Kasus Rotor Generator Sinkron MPFA.....	40
BAB V KESIMPULAN.....	41
DAFTAR PUSTAKA.....	42



DAFTAR GAMBAR

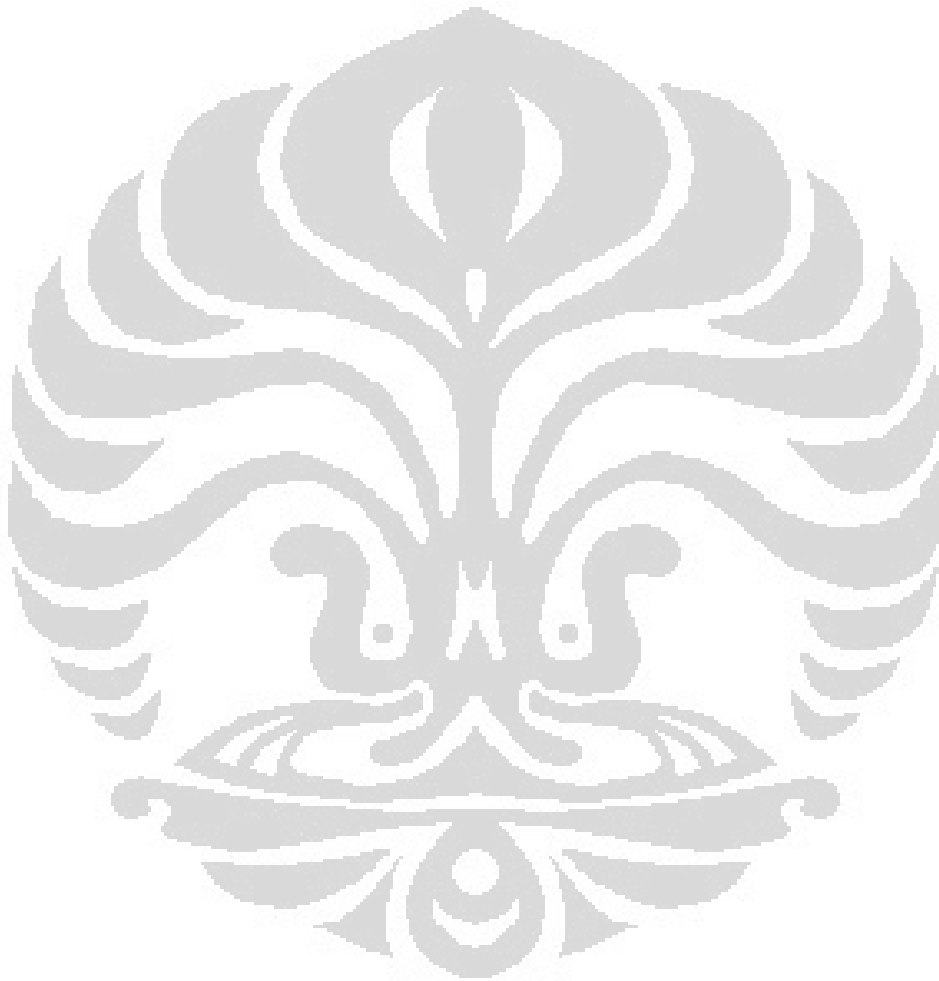
Gambar 2.1. Kontruksi dasar mesin sinkron.....	4
Gambar 2.2. (a) Laminasi stator, (b) Beberapa kumparan dalam slot.....	5
Gambar 2.3. Rangka stator beserta kumparan jangkarnya.....	6
Gambar 2.4. Rotor kutub sepatu/kutub menonjol (<i>salient pole</i>).....	8
Gambar 2.5. Rotor kutub sepatu pada generator 4 kutub.....	8
Gambar 2.6. Rotor kutub silinder (non-salient pole/cylindrical rotor).....	9
Gambar 2.7. Rotor kutub silinder pada generator 4 kutub.....	10
Gambar 2.8. Kurva karakteristik dan rangkaian ekivalen generator tanpa Beban.....	15
Gambar 2.9. Rangkaian ekivalen dan diagram vektor generator berbeban....	15
Gambar 2.10. Pengaruh reaksi jangkar untuk berbagai macam jenis beban..	16
Gambar 2.11. Kurva pengujian tanpa beban dan hubung singkat generator Sinkron.....	18
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.....	21
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.....	22
Gambar 3.3. Perbedaan kurva histerisis antara magnet permanen (magnet bahan keras) dengan magnet induksi (magnet bahan lunak)..	22
Gambar 3.4. Kurva karakteristik histerisis magnetik beberapa material magnet permanen.....	24
Gambar 3.5. Diagram koneksi lilitan sembilan kumparan dengan tipe tiga fasa dari sebuah generator MPFA.....	25
Gambar 3.6. Lilitan tiga fasa, polaritas magnet permanen dan jalur fluks magnet dari generator MPFA dua sisi dengan stator tanpa inti.....	25
Gambar 3.7. Lilitan tanpa inti dari sebuah generator MPFA tiga fasa dengan delapan kutub dan dua rotor eksternal.....	26
Gambar 3.8. Karakteristik generator sinkron MPFA tunggal untuk beban induktif.....	30
Gambar 3.9. Kurva <i>B-H</i> saturasi dari 3 material magnet.....	31
Gambar 4.1. Algoritma studi desain rotor GSMP FA.....	32
Gambar 4.2. Distribusi kerapatan fluks material magnet permanen <i>Alnico 5</i>	33
Gambar 4.3. Distribusi kerapatan fluks material magnet permanen <i>Ceramic 5</i>	33
Gambar 4.4. Kurva <i>B-H</i> magnet permanen <i>Alnico 5</i>	34
Gambar 4.4. Kurva <i>B-H</i> magnet permanen <i>Ceramic 5</i>	34

Gambar 4.6. Perbandingan pengaruh lebar celah udara (g) terhadap nilai kerapatan fluks.....	35
Gambar 4.7. Perbandingan pengaruh lebar celah udara (g) terhadap distribusi kerapatan fluks.....	35
Gambar 4.8. Perbandingan pengaruh jarak antar magnet (X_{mp}) terhadap distribusi kerapatan fluks.....	37
Gambar 4.9. Penampang (<i>yoke</i>) rotor magnet permanen bentuk lingkaran.	38



DAFTAR TABEL

Tabel 3.1. Spesifikasi beberapa material magnet permanen.....	23
Tabel 4.1. Pengaruh jarak antar magnet permanen dan lebar celah udara terhadap nilai puncak kerapatan fluks pada celah udara.....	36
Tabel 4.2. Pengaruh jarak antar magnet permanen terhadap nilai eksitasi fluks magnet.....	40



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

1. Memanfaatkan sumber-sumber energi terbarukan untuk membangkitkan energi listrik.
2. Mengembangkan desain generator untuk aplikasi konversi sumber-sumber energi alternatif (terbarukan).
3. Mengembangkan desain generator sinkron magnet permanen.

1.2 Tujuan

1. Mengembangkan desain Generator Sinkron Magnet Permanen Fluks Aksial (GSMPPFA) tipe cakram.
2. Studi desain rekayasa rotor magnet permanen.
3. Studi optimasi desain dimensi generator.

1.3 Rumusan Masalah

Dalam Studi Desain Rotor 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. Faktor-faktor apa yang harus diperhatikan dalam mendesain rotor generator magnet permanen fluks aksial jenis cakram.
5. Bagaimana cara mendesain rotor generator sinkron magnet permanen fluks aksial sehingga dapat bekerja secara optimal.

1.4 Batasan Masalah

1. Tipe generator yang menjadi studi desain adalah generator sinkron magnet permanen fluks aksial jenis cakram satu sisi dengan stator tanpa inti (*coreless*).

2. Magnet permanen yang digunakan berbentuk lingkaran dengan permukaan datar dan dipasang secara *surface mount*.
3. Analisis dalam studi ini dibantu dengan perangkat lunak *Finite Element Method Magnetics* (FEMM) versi 4.2.

1.5 Metodologi Penelitian

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. Pembuatan Prototype

Menyediakan material yang dibutuhkan dan membuat prototype berdasarkan studi literatur.

3. Pengujian Prototype

Menguji hasil pembuatan prototype. Selanjutnya hasil pengujian dibandingkan dengan literatur dan dianalisis.

4. Analisis dengan pendekatan matematis dan gambar menggunakan perangkat lunak FEMM 4.2.

5. Penyusunan Laporan

Membuat suatu laporan yang berisi penjelasan tentang studi yang dilakukan

1.6 Sistematika Penulisan

Bab pertama merupakan pendahuluan yang berisi latar belakang masalah, tujuan, rumusan masalah, batasan masalah, metodologi penulisan dan sistematika penulisan. Bab kedua merupakan landasan teori dari mesin sinkron, yang berisi penjelasan secara garis besar tentang mesin listrik dan dikhususkan pada generator sinkron. Pada bab ketiga pembahasan difokuskan pada generator sinkron magnet permanen fluks aksial jenis cakram satu sisi dengan stator tanpa inti. Bab keempat menguraikan analisis desain khususnya desain rotor berbasis komputer menggunakan perangkat lunak FEMM 4.2. Bab kelima merupakan bab terakhir yang berisi kesimpulan dari studi yang dilakukan.

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 listrik bolak-balik (generator sinkron) dan mengkonversi daya listrik bolak-balik menjadi daya mekanik (motor sinkron). Disebut mesin sinkron karena frekuensi putaran 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 pada 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 Kontruksi Dasar Mesin Sinkron

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

1. Stator

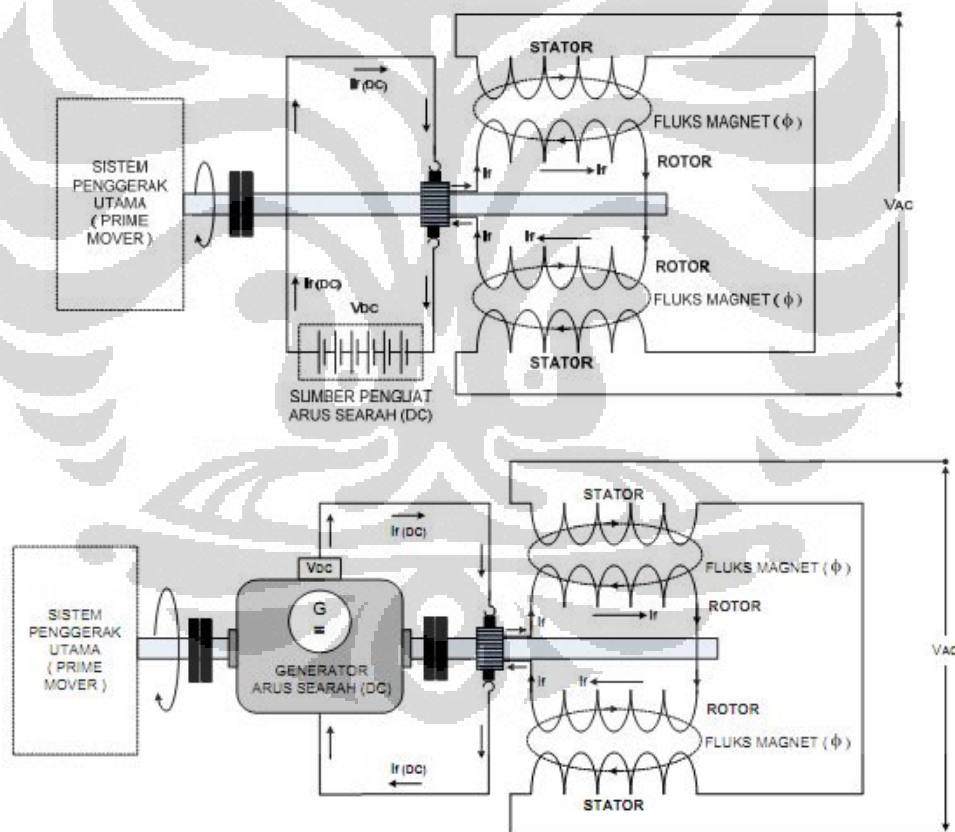
Disebut sebagai kumparan jangkar (angker) yang berfungsi menghasilkan tegangan dan arus bolak-balik (*Alternating Current*).

2. Rotor

Disebut sebagai kumparan medan magnet yang berfungsi menginduksikan medan magnet berputar pada stator.

3. Arus Penguat (Eksitasi)

Berupa arus searah (*Direct Current*) yang berasal dari sumber luar (*external source*) kemudian dialirkan ke dalam rotor yang berputar melalui cincin geser (*slip ring*) dan sikat (*brushes*). Arus penguat berfungsi untuk memperkuat medan magnet yang dihasilkan pada kumparan medan (rotor).



Gambar 2.1. Kontruksi 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 (Δ) ataupun bintang (Y). Stator terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu :

1. Rangka stator.

Merupakan rumah (kerangka) yang menyangga inti jangkar generator.

2. Inti stator

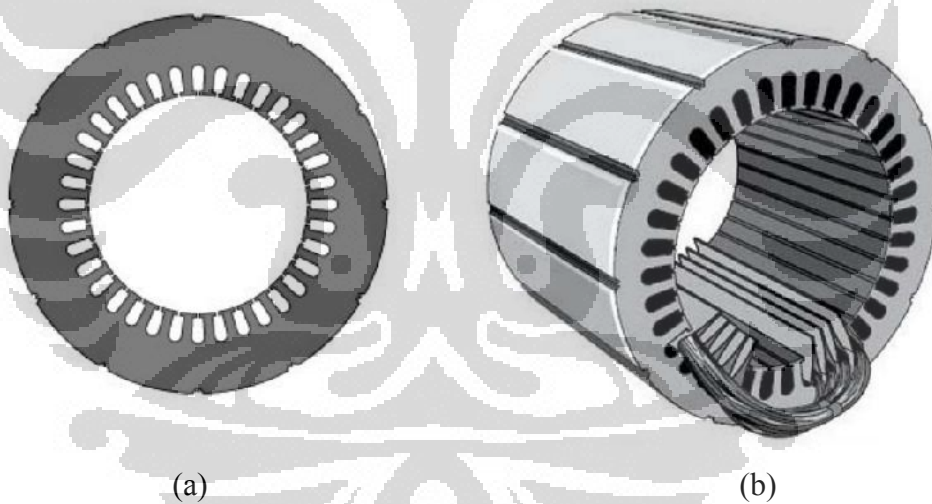
Terbuat dari laminasi-laminasi baja campuran atau besi magnetik khusus yang terpasang ke rangka stator

3. Alur (slot) dan gigi

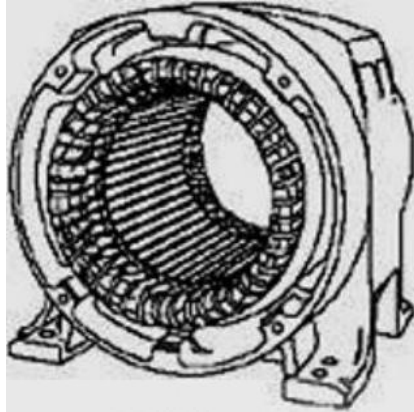
Alur dan gigi merupakan tempat meletakkan kumparan stator

4. Kumparan stator (kumparan jangkar)

Kumparan jangkar biasanya terbuat dari tembaga. Kumparan ini merupakan tempat timbulnya ggl 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 slip ring.

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.

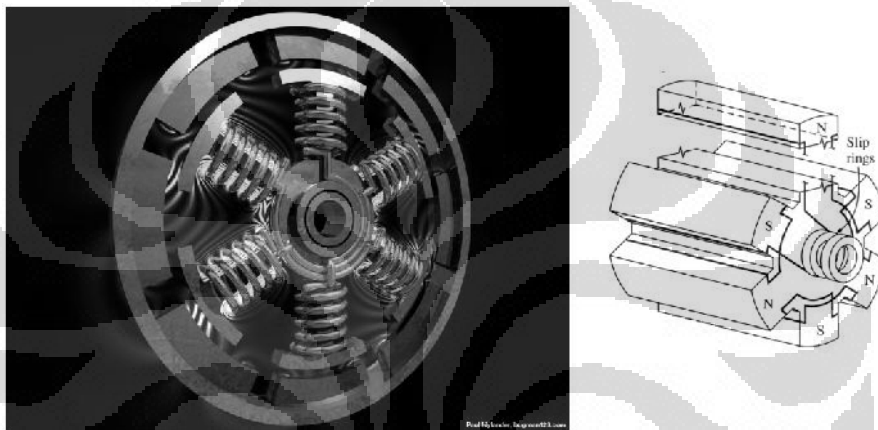
Rotor kutub sepatu umumnya digunakan pada generator sinkron dengan kecepatan putar rendah-sedang (120-400rpm) dan berkutub banyak (≥ 4). Oleh sebab itu generator sinkron tipe ini biasanya dikopel dengan mesin diesel atau turbin air pada sistem pembangkit listrik.

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

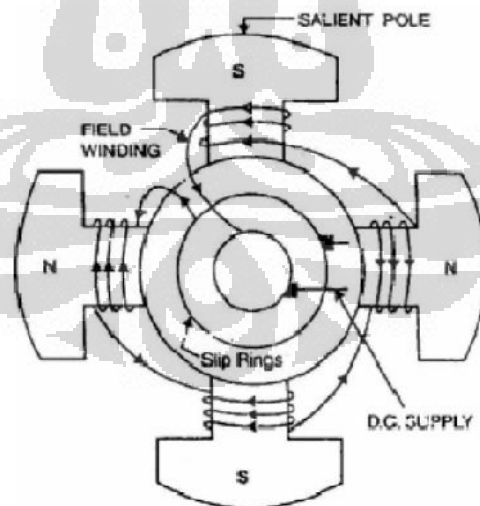
Rotor kutub sepatu cocok digunakan untuk putaran rendah-sedang karena :

- 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*)

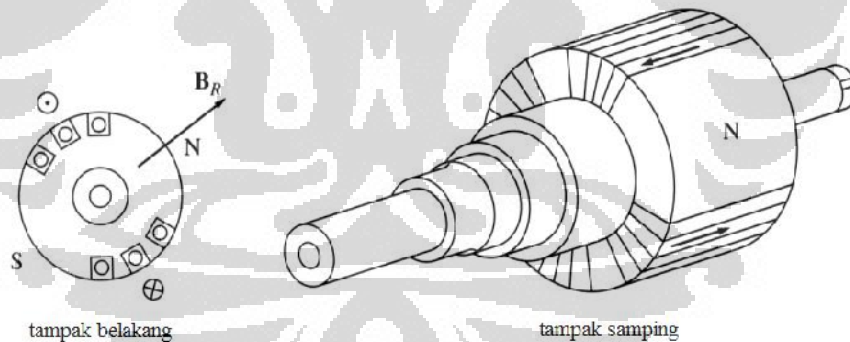
Pada jenis ini, konstruksi kutub magnet rata dengan permukaan rotor. Rotor jenis ini terbuat dari baja tempa padat yang mempunyai slot dan gigi disepanjang pinggiran luarnya seperti halnya stator. Kumputan medan pada rotor kutub silinder diletakkan di dalam slot ini. Disekitar daerah pusat kutub umumnya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

Rotor kutub silinder biasanya digunakan pada generator putaran tinggi (1500 atau 3000rpm) dan berkutub sedikit (≤ 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.

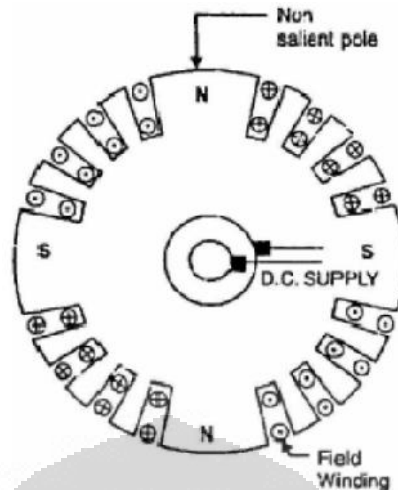
Rotor kutub silinder cocok digunakan pada putaran tinggi karena :

- 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. ^{[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 slip ring. Akibatnya arus searah mengalir ke dalam rotor atau kumparan medan dan menimbulkan medan magnet yang diperlukan untuk dapat menghasilkan tegangan 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 ada beberapa kerugian yaitu:

- Generator arus searah merupakan beban tambahan untuk penggerak mula.
- Penggunaan slip ring dan sikat menimbulkan masalah ketika digunakan untuk mensuplai sumber arus searah pada belitan medan generator sinkron.
- Terdapat sikat arang yang menekan slip ring sehingga timbul rugi gesekan pada generator utamanya.
- Selain itu pada generator arus searah juga terdapat sikat karbon yang menekan komutator.
- Selama pemakaian, slip ring 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 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 *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 berskala kecil. 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 slip ring 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 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) AC 3 fasa dengan frekuensi elektrik yang sama pula (sinkron).

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

$$f = \frac{2pn}{120} \quad (2.1)$$

Dimana :

f = Frekuensi elektrik (Hz)

n = Kecepatan mekanik rotor (rpm)

$2p$ = Jumlah kutub

p = Jumlah pasangan kutub ^{[1][2]}

2.2.2 Generator Sinkron Tanpa Beban

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

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

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

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

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

$$= N \left(2\pi \frac{2pn}{120} \right) \Phi_{maks} \cos \omega t$$

$$= - \left(2.3, 14. \frac{2pn}{120} \right) \Phi_{maks} \cos \omega t$$

$$E_{maks} = N(2.3, 14. \frac{2pn}{120} \Phi_{maks}$$

$$E_{eff} = E_{rms} = \frac{E_{maks}}{\sqrt{2}} = \frac{N(2.3, 14. \frac{2pn}{120}) \Phi_{maks}}{\sqrt{2}}$$

$$= \frac{8,88Nnp\Phi}{120} \quad \left(\frac{8,88Np}{120} = K \right)$$

$$E_{eff} = Kn\Phi \quad (2.3)$$

Dimana :

E = Gaya gerak listrik (volt)

N = Jumlah lilitan

K = Konstanta

$2p$ = Jumlah kutub

p = Jumlah pasangan kutub

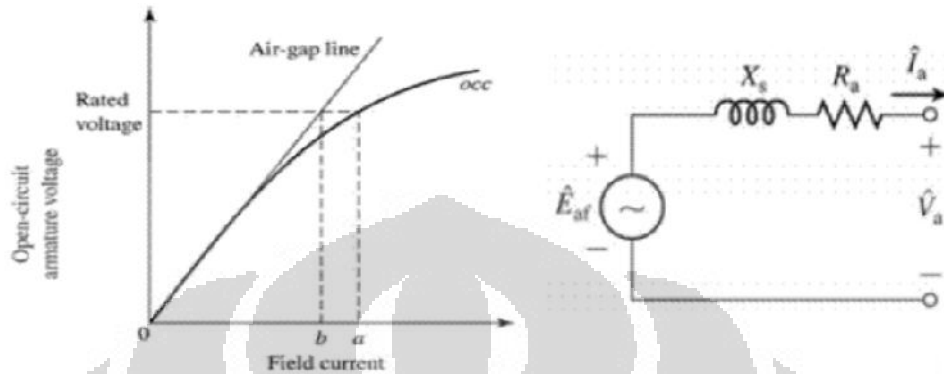
n = Putaran sinkron (rpm)

Φ = 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 hana 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]

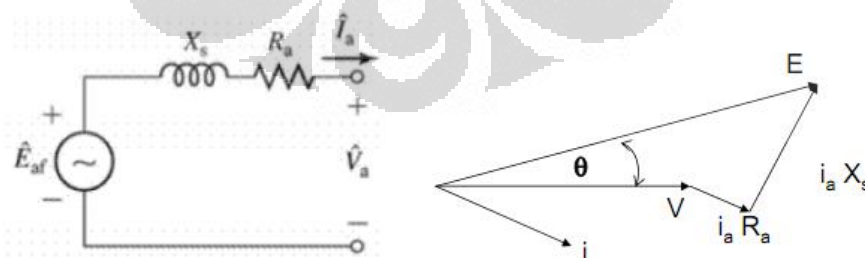
b – a = Tahanan arus beban pada daerah jenuh (*saturated*)

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 :

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

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]

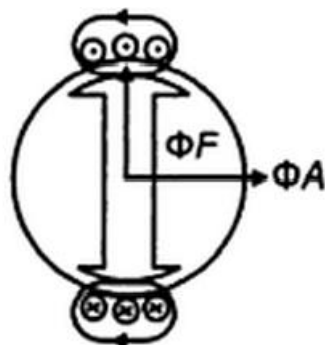
2.2.4 Reaksi Jangkar

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 (Φ_A) akan berinteraksi dengan yang dihasilkan kumparan medan rotor (Φ_F), sehingga menghasilkan fluks resultan (Φ_R).

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

Pengaruh yang ditimbulkan dapat berupa distorsi, penguatan (*magnetising*) dan pelemahan (*demagnetising*) fluks arus medan.

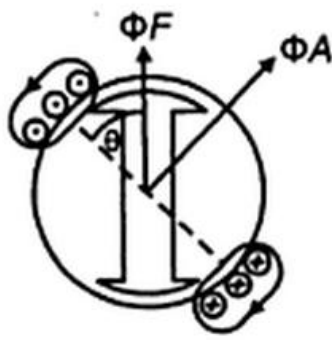
Adanya interaksi ini dikenal sebagai reaksi jangkar. Pengaruh reaksi jangkar untuk berbagai macam jenis beban adalah sebagai berikut :



Arus jangkar (I) sefasa dengan GGL (E)

Jenis beban : tahanan (resistif)

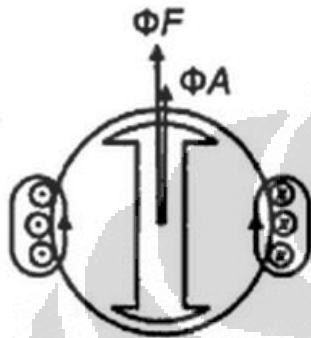
Φ_A tegak lurus terhadap Φ_F , pengaruh reaksi jangkar terhadap fluks medan hanya sebatas mendistorsi saja tanpa mempengaruhi kekuatannya (*cross magnetising*)



Arus jangkar (I) mendahului sebesar θ dari GGL (E)

Jenis beban : kapasitif

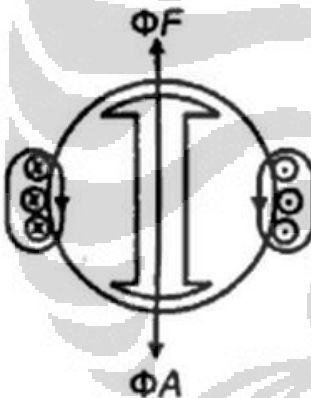
Φ_A terbelakang dengan sudut $(90^\circ - \theta)$



Arus jangkar (I) mendahului sebesar 90° dari GGL (E)

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

Φ_A memperkuat Φ_F , terjadi pengaruh *magnetising*



Arus jangkar (I) tertinggal sebesar 90° dari GGL (E)

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

Φ_A memperlemah Φ_F , terjadi pengaruh *demagnetising*

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

Untuk beban tidak murni (induktif/kapasitif), pengaruh reaksi jangkar akan menjadi sebagian *magnetising* dan sebagian *demagnetising*. Saat beban kapasitif, maka reaksi jangkar akan sebagian distorsi dan sebagian *magnetising*. Sementara saat beban induktif, maka reaksi jangkar akan sebagian distorsi dan sebagian *demagnetising*. Namun pada prakteknya beban umumnya induktif. ^{[3][6]}

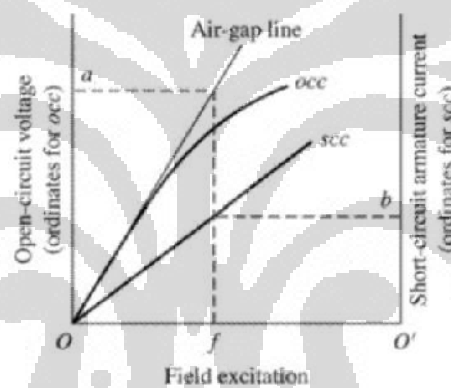
2.2.5 Reaktansi Sinkron

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):

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

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

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

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.

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

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

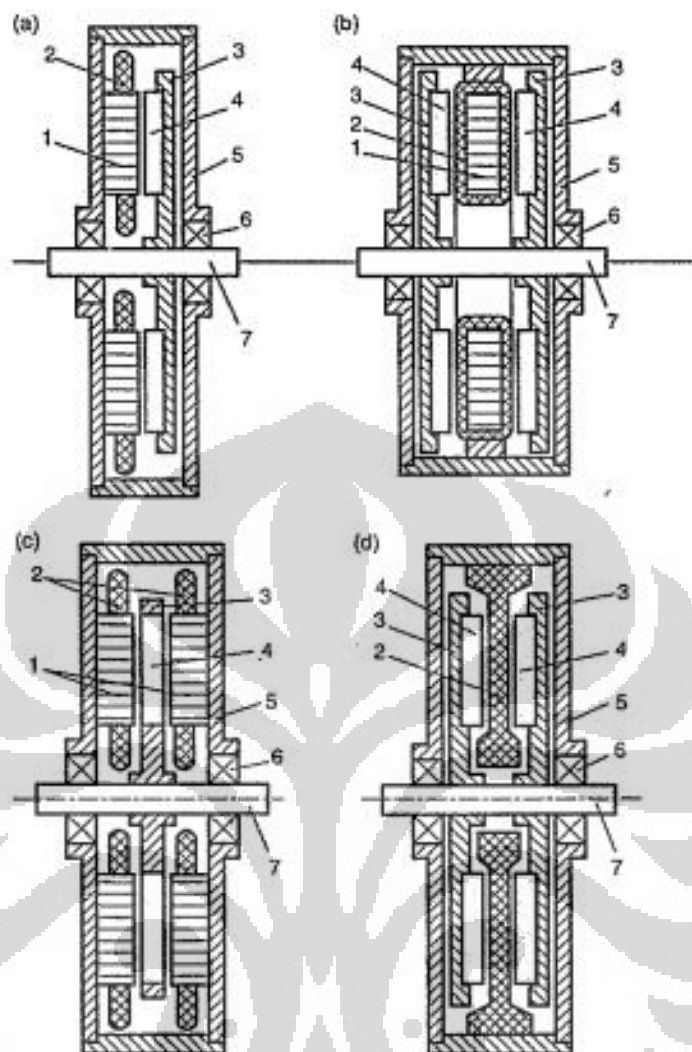
Pada skripsi ini, hanya membahas mengenai generator sinkron magnet permanen, fluks aksial dengan rotor berbentuk piringan (cakram). Generator tersebut dikenal juga dengan generator piringan dan merupakan alternatif yang menarik selain generator silindris radial karena bentuknya yang pipih, ringkas dan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

3.2 Topologi dan Geometri

Bila dilihat secara konstruksi, generator 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 (Gambar 3.1a)
 - Dengan stator tanpa slot
 - Dengan stator kutub tonjol atau kutub sepatu
- ❖ Generator MPFA dua sisi
 - Dengan stator internal (Gambar 3.1b)
 - Dengan slot stator
 - Dengan stator tanpa slot
 - Dengan stator inti besi
 - Dengan stator tanpa inti (Gambar 3.1d)
 - Keduanya tanpa inti rotor dan stator
 - Dengan stator kutub menonjol
 - Dengan rotor internal (Gambar 3.1c)
 - Dengan slot stator
 - Dengan stator tanpa slot
 - Dengan stator kutub menonjol
- ❖ Generator MPFA multi piringan

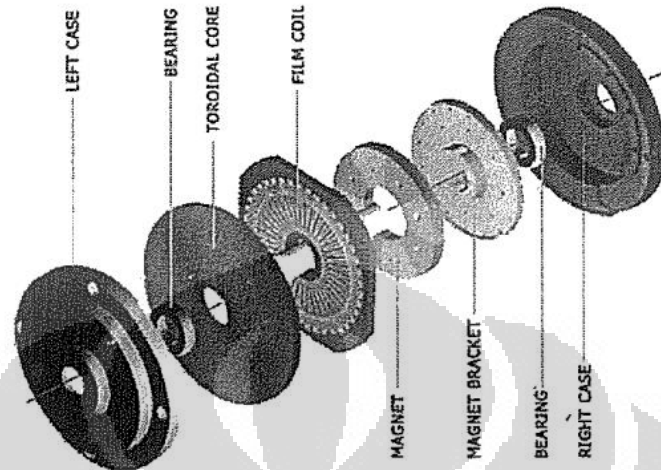


Gambar 3.1. Topologi dasar generator MPFA (a) generator sisi tunggal dengan slot (b) generator dua sisi tanpa slot dengan stator internal diapit dua rotor magnet permanen (c) generator dua sisi dengan slot stator dan rotor magnet permanen internal (d) generator dua sisi dengan stator internal tanpa inti. 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 efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan generator konvensional.

3.3 Struktur dan Material Generator Sinkron MPFA

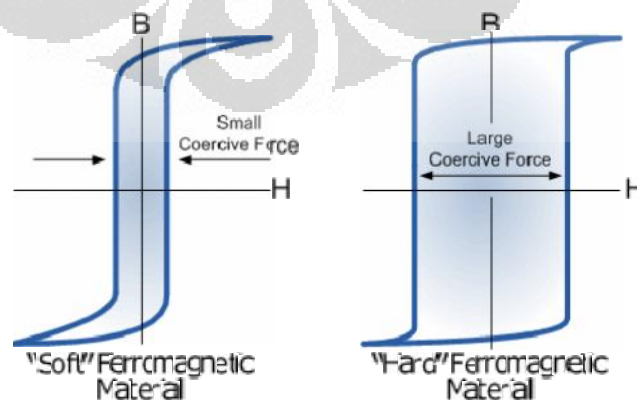
Susunan generator sinkron MPFA dapat dilihat pada Gambar 3.2



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 [6]

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 histeresis 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 kepadatan fluks magnetik (B) dengan intensitas medan magnet (H) tidak linear.

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

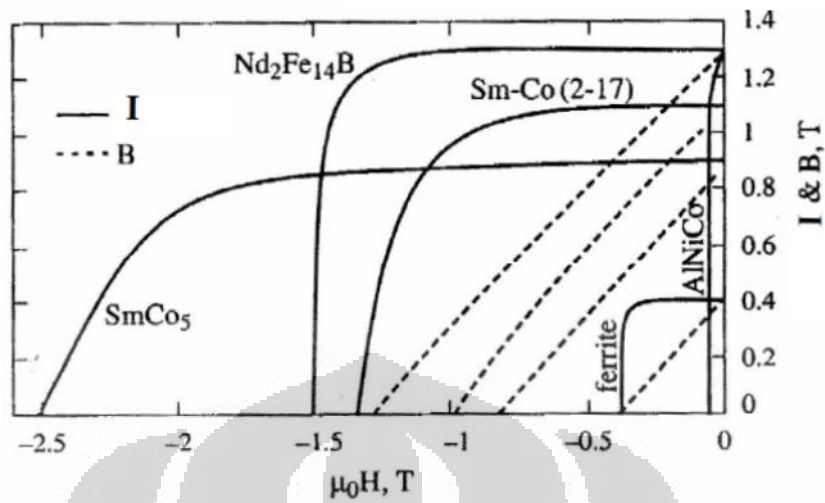
1. Alnico, merupakan material campuran dari aluminium, nikel, kobalt, dan besi
2. Keramik, merupakan material campuran dari ferit dan bahan lainnya, contohnya barium ferit ($BaO \times 6Fe_2O_3$) dan strontium ferit ($SrO \times 6Fe_2O_3$)
3. Magnet dari material bumi langka seperti samarium kobalt (SmCo)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

Berikut adalah tabel spesifikasi beberapa bahan magnet permanen :

Tabel 3.1. Spesifikasi material magnet permanen

Material Magnet	Energi Maksimum <i>Bh_{max} (MGOe)</i>	Kepadatan Fluks Magnet <i>Br(G)</i>	Daya Tarik <i>H_c(Koe)</i>	Temperatur Kerja °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 (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

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



Gambar 3.4. Kurva karakteristik histerisis magnetik beberapa material magnet permanen ^[10]

3.3.2 Kumbaran Pada Stator

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

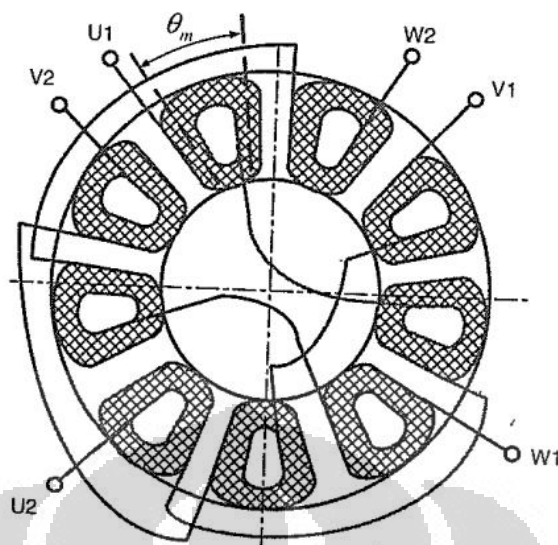
$$\sigma = \frac{\sigma_{20}}{1 + \alpha(\theta - 20^\circ)} \quad (3.1)$$

Dimana : α = koefisien temperatur dari resistansi elektrik, untuk kawat tembaga $\alpha = 0.00393$ 1/°C dan untuk kawat aluminium $\alpha = 0.00403$ 1/°C

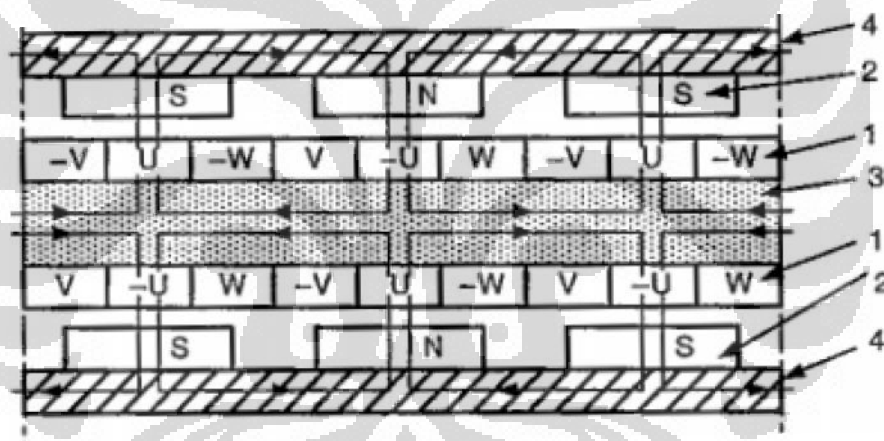
Kenaikan temperatur maksimum untuk lilitan pada generator MPFA ditentukan oleh temperatur maksimum material selubung lilitan itu sendiri, dan dapat dirumuskan sebagai :

$$\mathcal{G}_{maks} = \mathcal{G}_c + \Delta\mathcal{G} \quad (3.2)$$

Dimana : $\Delta\mathcal{G}$ = kenaikan temperatur maksimum yang dibolehkan



Gambar 3.5. Diagram koneksi lilitan sembilan kumparan dengan tipe tiga fasa dari sebuah generator sinkron 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

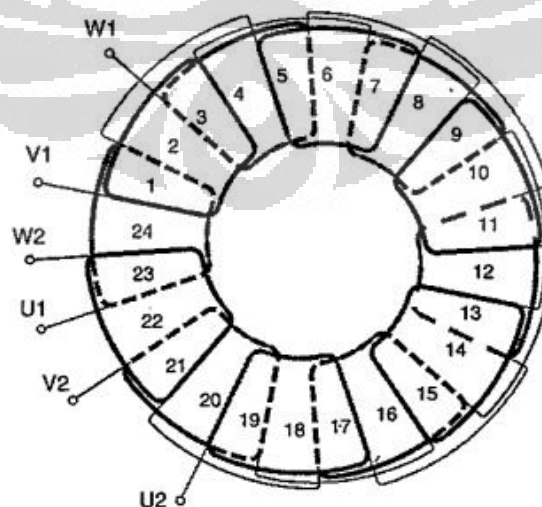
permanen dan rotor besi dapat diabaikan. Desain generator semacam ini mampu menghasilkan efisiensi yang cukup tinggi saat daya putaran roda penggerak nol.

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 terlaminasi. 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.

3.4.2 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 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 3.7.

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 sinkron MPFA tiga fasa dengan delapan kutub dan dua rotor eksternal ^[8]

3.5 Karakteristik Generator Sinkron MPFA

3.5.1 Kemampuan Daya Putar (Torsi)

Karena dimensi dari generator MPFA merupakan fungsi radius, maka torsi elektro magnetik yang dihasilkan melebihi kontinum jari-jari, bukan berupa jari-jari konstan sebagaimana mesin silindris. *Pole pitch* $\tau(r)$ dan *pole width* $b_p(r)$ dari generator MPFA merupakan fungsi dari jari-jari r sehingga :

$$\tau(r) = \frac{2\pi r}{2p} = \frac{\pi r}{p} \quad (3.3)$$

$$b_p(r) = \alpha_i \tau(r) = \alpha_i \frac{\pi r}{p} \quad (3.4)$$

Dimana α_i merupakan perbandingan (rasio) antara B_{avg} terhadap nilai puncak B_{mg} dari kerapatan fluks magnetik di celah udara :

$$\alpha_i = \frac{B_{avg}}{B_{mg}} \text{ atau } \alpha_i = \frac{B_p(r)}{\tau(r)} \quad (3.5)$$

Parameter α_i umumnya tidak tergantung dari jari-jari.

Kerapatan arus juga merupakan fungsi dari jari-jari r . Sehingga nilai puncak dari kerapatan arus adalah :

$$A_m(r) = \frac{m_1 \sqrt{2} N_1 I_a}{p \tau(r)} = \frac{m_1 \sqrt{2} N_1 I_a}{\pi r} \quad (3.6)$$

Diasumsikan kerapatan fluks magnetik pada celah udara B_{mg} tidak tergantung dari jari-jari, $dS = 2\pi r dr$ dan $B_{avg} = \alpha_i B_{mg}$ berdasarkan persamaan (3.3), maka torsi elektro magnetik adalah :

$$dT_d = r dF_x = r [k_{w1} A(r) B_{avg} dS] = 2\pi \alpha_i k_{w1} A(r) B_{mg} r^2 dr \quad (3.7)$$

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

3.5.2 Fluks Magnetik

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

$$\begin{aligned}
 B_{avg} &= \frac{1}{\pi / p - 0} \int_0^{\pi/p} B_{mg} \sin(p\alpha) = -\frac{p}{\pi} B_{mg} \left[\frac{1}{p} \cos \cos(p\alpha) \right]_0^{\pi/p} \\
 &= -\frac{1}{\pi} B_{mg} [\cos \cos \pi - \cos \cos 0] = \frac{2}{\pi} B_{mg}
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

Dimana : B_{mg} = nilai puncak kerapatan fluks magnet pada celah udara.

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

$$\Phi_f = \alpha_i B_{mg} \frac{\pi}{2p} (R_{out}^2 - R_{in}^2) \tag{3.9}$$

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

Dengan menggunakan rasio diameter dalam terhadap diameter luar sebagai berikut :

$$k_d = \frac{R_{in}}{R_{out}} = \frac{D_{in}}{D_{out}} \tag{3.10}$$

Maka persamaan (3.9) menjadi :

$$\Phi_f = \alpha_i B_{mg} \frac{\pi}{8p} D_{out}^2 (1 - k_d^2) \tag{3.11}$$

3.5.3 Torsi Elektromagnetik dan EMF

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

$$dT_d = 2\alpha_i m_1 I_a N_1 k_w B_{mg} r dr \tag{3.12}$$

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

$$\begin{aligned}
 T_d &= 1/4 \alpha_i m_1 I_a N_1 k_w B_{mg} (D_o^2 - D_i^2) \\
 T_d &= 1/4 \alpha_i m_1 I_a N_1 k_w B_{mg} D_{out}^2 (1 - k_d^2) I_a
 \end{aligned} \tag{3.13}$$

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

$$T_d = 2 \frac{p}{\pi} m_1 N_1 k_{w1} \Phi_f I_a \quad (3.14)$$

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

$$T_d = \frac{m_1}{\sqrt{2}} m_1 N_1 k_{w1} \Phi_f I_a = k_t I_a \quad (3.15)$$

dimana k_t adalah konstanta torsi.

EMF saat tanpa beban dapat ditemukan dengan mendiferensiasikan gelombang fluks harmonik pertama $\Phi_{f1} = \Phi_f \sin \omega t$ dan mengalikannya dengan $N_1 k_{w1}$:

$$e_f = N_1 k_{w1} \frac{d\Phi_{f1}}{dt} = 2\pi f N_1 k_{w1} \Phi_f \cos \omega t \quad (3.16)$$

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

$$E_f = \pi \sqrt{2} f N_1 k_{w1} \Phi_f = \pi \sqrt{2} p N_1 k_{w1} \Phi_f n_s = k_E n_s \quad (3.17)$$

dimana konstanta EMF (konstanta jangkar) adalah :

$$k_E = \pi \sqrt{2} p N_1 k_{w1} \Phi_f \quad (3.17)$$

3.6 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 :

$$Z_L = R_L + j\omega L_L - j \frac{1}{\omega C} \quad (3.18)$$

dimana :

Z_L = impedansi beban

R_L = resistansi beban

L_L = induktansi beban

Arus input pada lilitan stator (jangkar) adalah :

$$I_a = \frac{E_f}{\sqrt{(R_1 + R_L)^2 + \left[\omega L_s + \omega L_L - \frac{1}{\omega C} \right]^2}} \quad (3.19)$$

dimana :

I_a = arus pada stator (beban)

E_f = gaya EMF per fasa

R_l = resistansi pada salah satu fasa

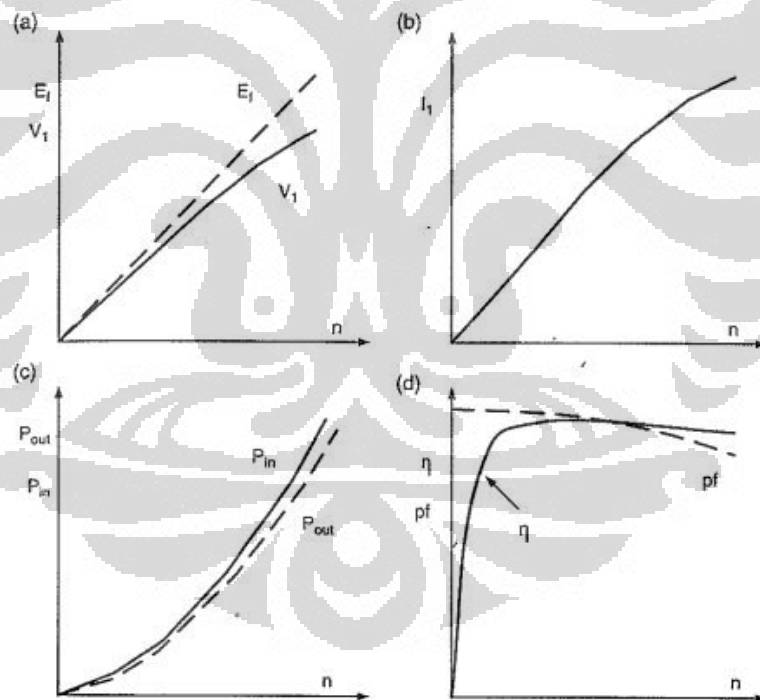
L_s = induktansi pada stator

Tegangan yang dihasilkan pada terminal output adalah :

$$V_1 = I_a \sqrt{R_L^2 + \left(\omega L_L - \frac{1}{\omega C} \right)^2} \quad (3.20)$$

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 η dan faktor daya $pf = \cos \phi$ terhadap kecepatan n dari generator sinkron MPFA untuk beban induktif $Z_L = R_L + j\omega L_L$ dapat dilihat pada Gambar 3.8. [8]



Gambar 3.8 Karakteristik generator sinkron MPFA tunggal untuk beban induktif $Z_L = R_L + j\omega L_L$: (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 η dan faktor daya $pf = \cos \phi$ terhadap kecepatan n [8]

3.6 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 :

$$B_v = \mu_o H \quad (3.21)$$

Sedangkan nilai kerapatan fluks pada material dihitung dengan persamaan :

$$B = \mu_o \mu_r H \quad (3.22)$$

dimana :

B_v = kerapatan fluks pada ruang hampa udara (T)

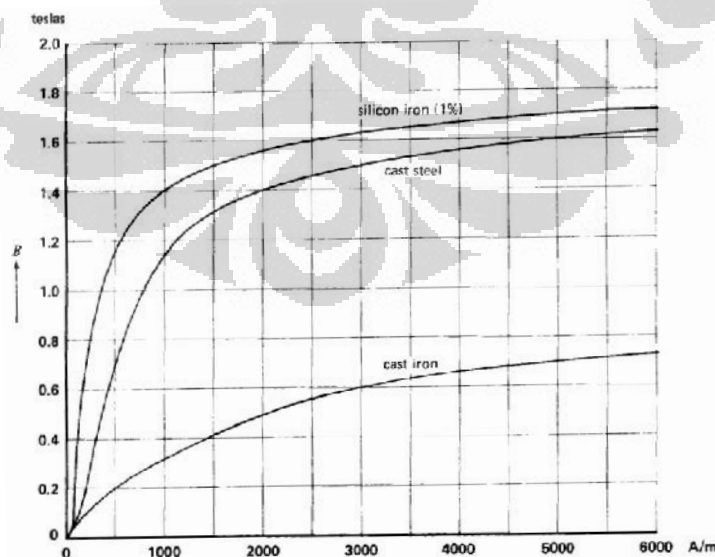
B = kerapatan fluks (T)

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

μ_r = *relative permeability* dari material

H = intensitas medan magnet (A/m)

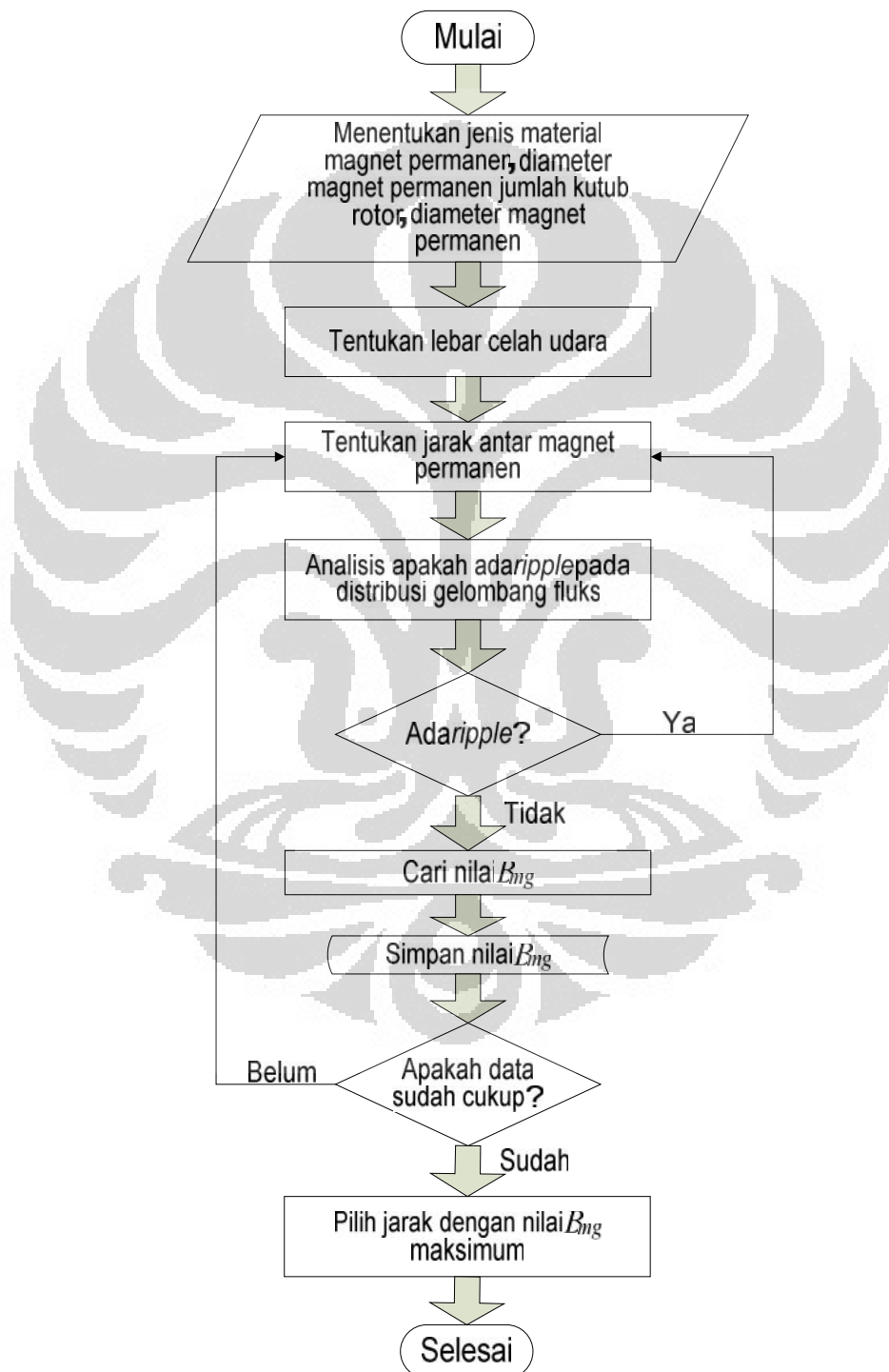
Relative permeability μ_r adalah perbandingan kerapatan fluks pada material terhadap kerapatan fluks yang dihasilkan pada ruang hampa udara pada intensitas medan magnet yang sama. Nilai μ_r tidak konstan, tetapi bervariasi terhadap kerapatan fluks pada material. Konsekuensinya hubungan antara B dan H tidak linear, sehingga persamaan 3.22 jarang digunakan dalam prakteknya. Hubungan B dan H biasanya digambarkan dengan kurva. [2]



Gambar 3.9. Kurva B - H saturasi dari 3 material magnet [2]

BAB IV SIMULASI DESAIN ROTOR GENERATOR SINKRON MPFA JENIS CAKRAM

Parameter yang dioptimasi pada skripsi ini adalah jarak antar magnet permanen (X_{mp}).

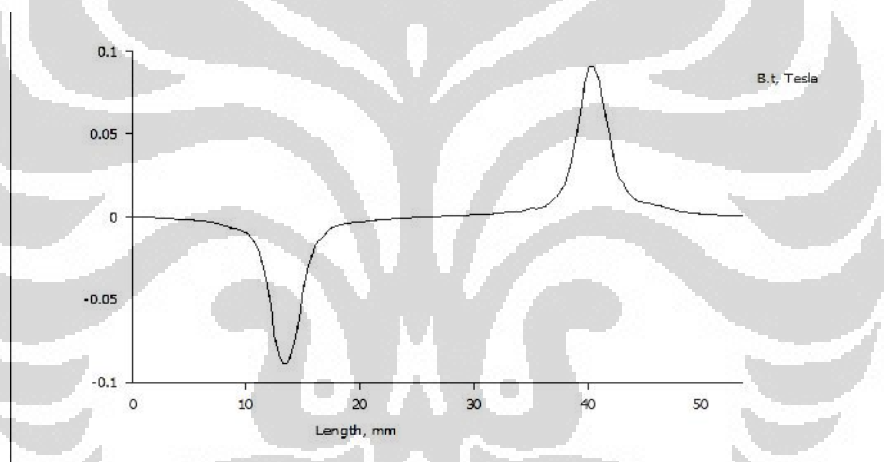


Gambar 4.1. Algoritma studi desain rotor GSMPPFA

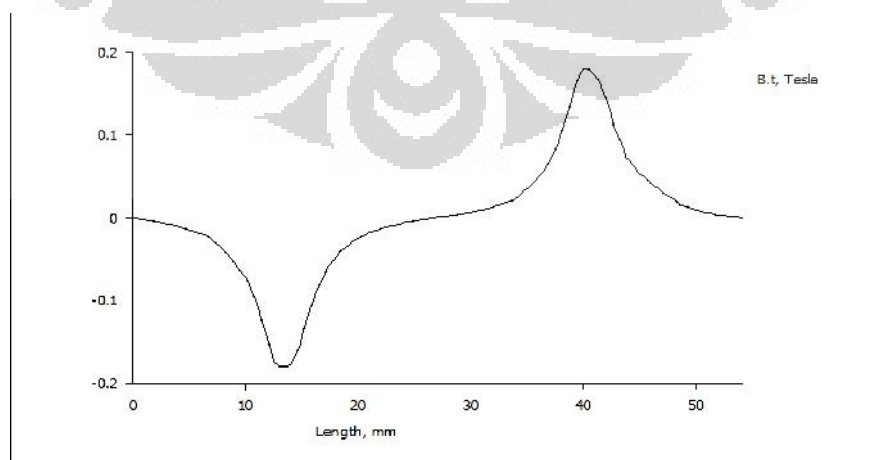
Analisis dilakukan dengan metode pendekatan matematis dan gambar. Pendekatan gambar menggunakan perangkat lunak FEMM 4.2 untuk membantu analisis parameter terhadap distribusi kerapatan fluks dan optimasinya pada rotor generator sinkron MPFA jenis cakram.

4.1 Pengaruh Jenis Material Magnet Permanen Terhadap Distribusi Kerapatan Fluks (B) Pada Celah Udara (*air gap*)

Pengaruh jenis material magnet permanen terhadap distribusi kerapatan fluks bisa dilihat pada Gambar 4.2 dan Gambar 4.3. Dengan menggunakan ukuran dan jarak antar magnet yang sama, nilai kerapatan fluks dengan menggunakan magnet permanen *Alnico 5* (Gambar 4.2) lebih rendah dibandingkan menggunakan magnet permanen *Ceramic 5* (Gambar 4.3).

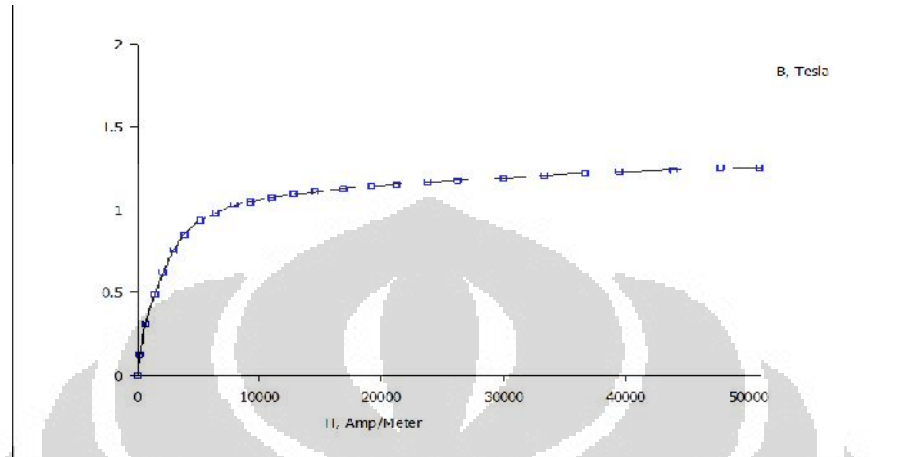


Gambar 4.2 Distribusi kerapatan fluks material magnet permanen *Alnico 5*

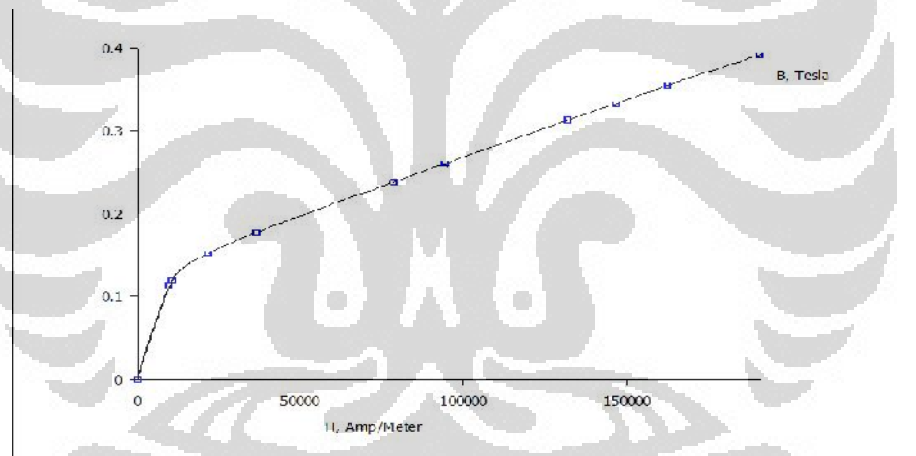


Gambar 4.3 Distribusi kerapatan fluks material magnet permanen *Ceramic 5*

Perbedaan distribusi fluks ini disebabkan oleh nilai $B-H$ dari masing-masing magnet permanen. Selain itu jenis material magnet yang berbeda juga mempengaruhi bentuk gelombang distribusi kerapatan fluks. Hal ini juga dipengaruhi oleh nilai $B-H$



Gambar 4.4 Kurva $B-H$ magnet permanen *Alnico 5*



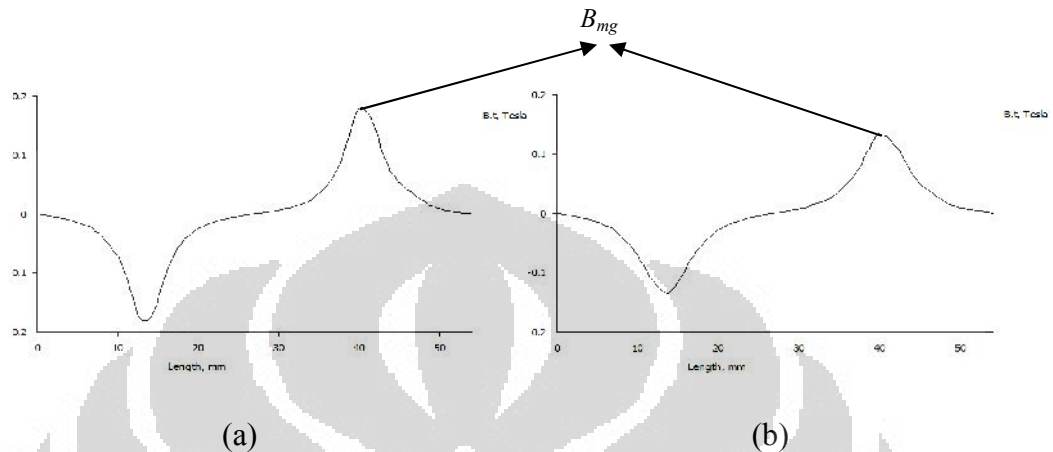
Gambar 4.5 Kurva $B-H$ magnet permanen *Ceramic 5*

4.2 Pengaruh Lebar Celah Udara (g) Terhadap Distribusi Kerapatan Fluks (B) Pada Celah Udara (*air gap*)

Lebar celah udara sangat berpengaruh terhadap besarnya nilai puncak kerapatan fluks pada celah udara (B_{mg}). Berdasarkan Persamaan 3.17 maka semua parameter yang mempengaruhi nilai B_{mg} juga mempengaruhi besarnya tegangan yang dihasilkan generator.

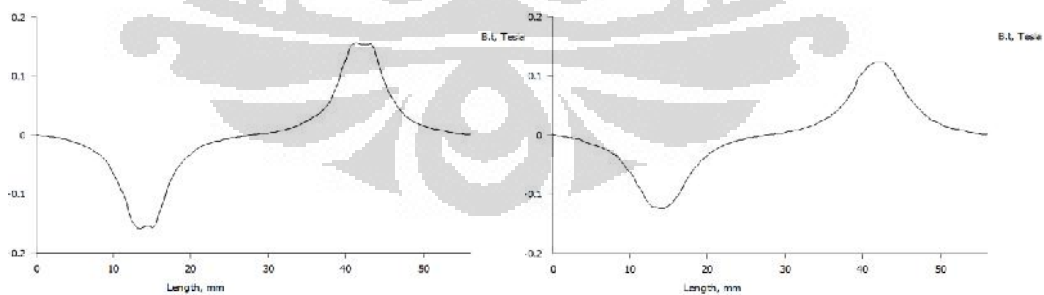
Nilai $|B_{mg}|$ yang dihasilkan ketika lebar celah udara 1 mm (Gambar 4.6a) adalah 0.180502 T. Nilai $|B_{mg}|$ yang dihasilkan ketika lebar celah udara 2 mm

(Gambar 4.6b) adalah 0.135415 T. Maka semakin besar lebar celah udara, maka semakin kecil B_{mg} . Sebaliknya semakin sempit lebar celah udara, maka semakin besar B_{mg} . Magnet permanen yang digunakan pada simulasi FEMM 4.2 adalah *Ceramic 5*, jarak antar magnet 2mm.



Gambar 4.6 Perbandingan pengaruh lebar celah udara (g) terhadap nilai kerapatan fluks ; (a) $g = 1\text{mm}$; (b) $g = 2\text{mm}$

Selain itu, lebar celah udara juga mempengaruhi bentuk gelombang distribusi fluks. Seperti pada Gambar 4.6. Ketika lebar celah udara 1mm, pada puncak gelombang distribusi fluksnya terdapat *ripple* (Gambar 4.6a), sedangkan ketika lebar celah udara 2mm, tidak ada *ripple* pada gelombang distribusi fluksnya (Gambar 4.6b). Magnet permanen yang digunakan pada simulasi FEMM 4.2 adalah *Ceramic 5*, jarak antar magnet 3mm.



Gambar 4.7 Perbandingan pengaruh lebar celah udara (g) terhadap distribusi kerapatan fluks ; (a) $g = 1\text{mm}$; (b) $g = 2\text{mm}$

4.3 Pengaruh Jarak Antar Magnet Permanen (X_{mp}) Terhadap Distribusi Kerapatan Fluks (B) Pada Celah Udara (*air gap*)

Jarak antar magnet permanen pada rotor sangat berpengaruh terhadap nilai B_{mg} yang dihasilkan. Pada tabel 4.1 bisa dilihat semakin besar jarak antar magnet, nilai B_{mg} yang dihasilkan semakin kecil. Sebaliknya, semakin dekat jarak antar magnet, nilai B_{mg} yang dihasilkan semakin besar. Tapi hal ini tidak berlaku untuk jarak antar magnet kurang dari 1mm, nilainya bergantung dari karakteristik jenis material.

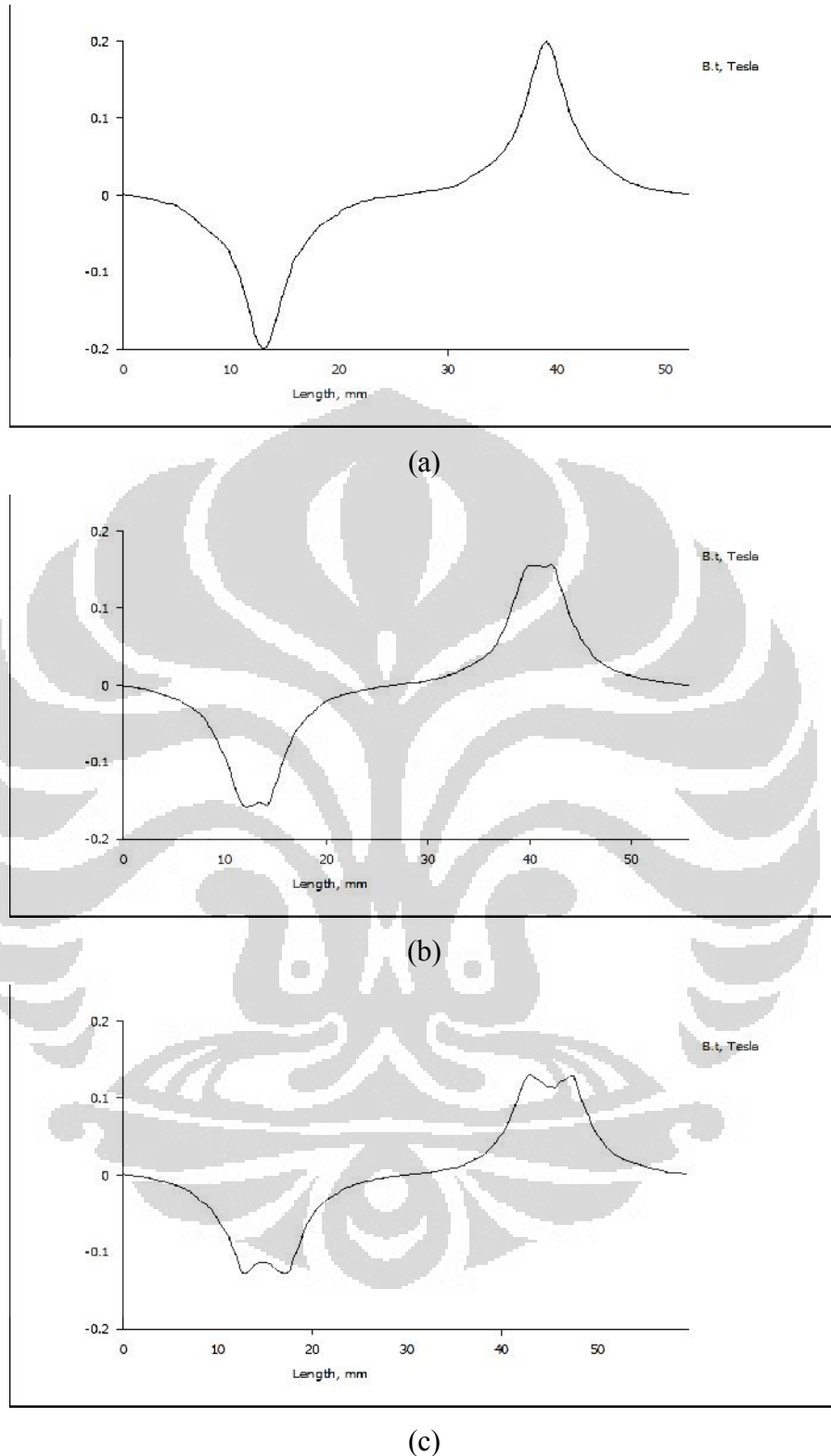
Berdasarkan persamaan 3.8, maka semakin besar nilai B_{mg} , maka semakin besar pula kerapatan fluks rata-ratanya.

Tabel 4.1. Pengaruh jarak antar magnet permanen dan lebar celah udara terhadap nilai puncak kerapatan fluks pada celah udara

Jarak antar magnet (mm)	B_{mg} (T)			
	g = 2mm		g = 1mm	
	Ceramic 5	Alnico 5	Ceramic 5	Alnico 5
0	0,136002	0,041985	0,198367	0,075932
1	0,138127	0,058556	0,197914 T	0,110357
2	0,130956	0,053011	0,179049	0,089852
3	0,12295	0,048327	0,153703	0,069099

Selain itu jarak antar magnet juga sangat berpengaruh terhadap distribusi kerapatan fluks pada celah udara. Semakin besar jarak antar magnet permanen maka pada puncak-puncak kurva, kerapatan fluks terjadi *ripple*. Sebaliknya, semakin dekat jarak antar magnet maka *ripple* pada tegangan keluaran generator semakin sedikit.

Untuk mendapatkan jarak antar magnet permanen yang optimum maka dipilih jarak antar magnet permanen yang mempunyai nilai B_{mg} maksimum dan *ripple* pada puncak gelombang distribusi fluks minimum.

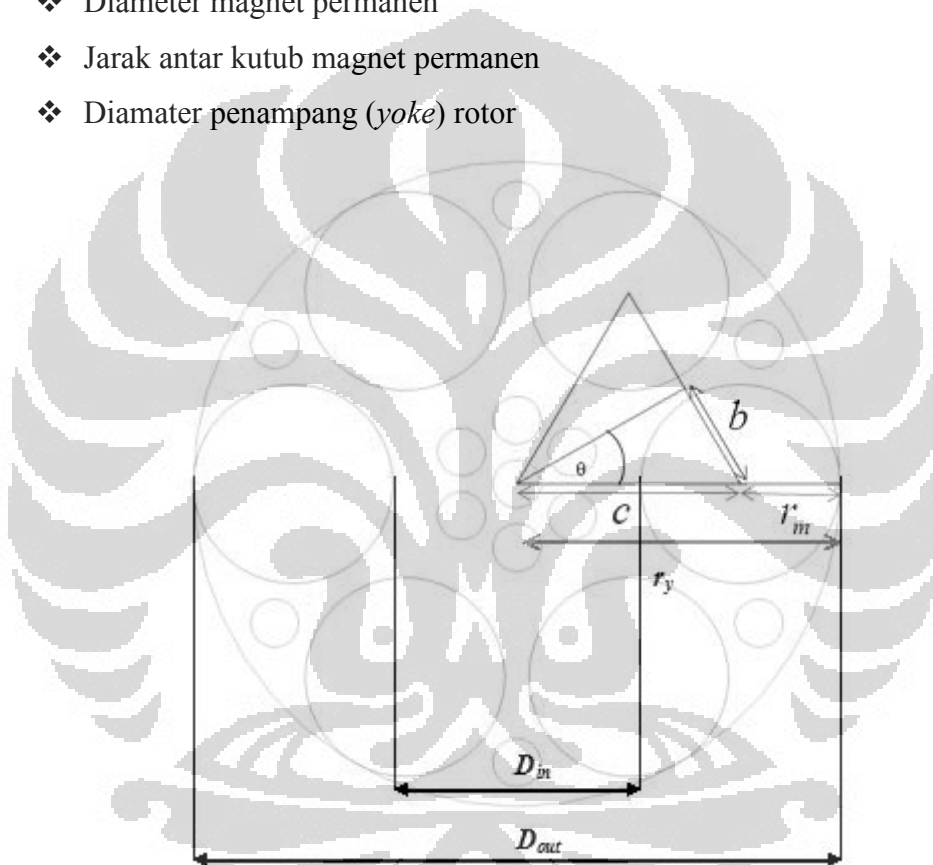


Gambar 4.8 Perbandingan pengaruh jarak antar magnet (X_{mp}) terhadap distribusi kerapatan fluks ; (a) $X_{mp} = 1\text{ mm}$; (b) $X_{mp} = 3\text{ mm}$; (c) $X_{mp} = 5\text{ mm}$

4.4 Optimasi Dimensi Rotor

Dimensi generator yang lebih kecil juga membutuhkan ruangan yang lebih kecil. Sehingga ruangan (*space*) yang digunakan juga lebih kecil sehingga lebih efisien dan ekonomis. Salah satu hal yang mempengaruhi dimensi generator sinkron MPFA adalah ukuran rotor. Ukuran rotor sendiri juga dipengaruhi oleh beberapa hal :

- ❖ Diameter magnet permanen
- ❖ Jarak antar kutub magnet permanen
- ❖ Diamater penampang (*yoke*) rotor



Gambar 4.9 Penampang (*yoke*) rotor magnet permanen bentuk lingkaran

Dari Gambar 4.19 diketahui r_m = jari-jari magnet, jumlah magnet ($2p$) dan jarak antar kutub magnet permanen (x).

$$\theta = \frac{\left(\frac{360}{2p}\right)}{2} \Leftrightarrow \theta = \frac{90}{p}; \quad p = \text{jumlah magnet} \quad (4.1)$$

$$b = \frac{2r_m + x}{2}; \quad x = \text{jarak antar kutub magnet} \quad (4.2)$$

$$c = \frac{b}{\sin \theta} \Leftrightarrow c = \frac{2r_m + x}{\sin\left(\frac{90}{p}\right)} \quad (4.3)$$

$$r_y = c + r_m \quad (4.4)$$

Nilai c disubstitusikan ke persamaan 4.4, sehingga didapatkan jari-jari minimum dari yoke rotor.

$$r_y = \frac{(2r_m + x)}{2 \sin\left(\frac{90}{p}\right)} + r_m \quad (4.5)$$

$$D_y = 2 \left(\frac{(2r_m + x)}{2 \sin\left(\frac{90}{p}\right)} + r_m \right); \quad D_y = 2r_y \quad (4.6)$$

$$D_{out} = D_y; \quad D_{in} = D_y - 4r_m \quad (4.7)$$

Dimana :

D_y = diameter penampang (*yoke*) rotor

D_{out} = diameter luar magnet permanen pada rotor

D_{in} = diameter dalam magnet permanen pada rotor

r_y = jari-jari yoke

r_m = jari-jari magnet

$2p$ = jumlah kutub magnet

p = jumlah pasangan kutub magnet

x = jarak antar kutub magnet permanen (X_{mp})

4.5 Pengaruh Jarak Antar Magnet Permanen (X_{mp}) Terhadap Nilai Eksitasi Fluks Magnet (Φ_f)

Berdasarkan persamaan 3.11, selain mempengaruhi nilai B_{mg} dan dimensi rotor, jarak antar magnet juga mempengaruhi nilai eksitasi fluks magnet. Pada tabel 4.2 dapat dilihat perbandingan beberapa jarak antar magnet. Nilai B_{mg} didapatkan dengan simulasi perangkat lunak FEMM 4.2. Magnet permanen yang digunakan adalah jenis *Ceramic 5* dengan tebal 3mm dan diameter 25mm.

Tabel 4.2. Pengaruh jarak antar magnet permanen terhadap nilai eksitasi fluks magnet (Φ_f)

X_{mp} (mm)	D_{out} (m)	D_{in} (m)	$k_d = \frac{D_{in}}{D_{out}}$	B_{mg} (T)	$B_{avg} = \frac{2}{\pi} B_{mg}$ (T)	$\alpha_i = \frac{B_{avg}}{B_{mg}}$	$D_{out}^2 (1 - k_d^2)$	$\frac{\pi}{8p}$	Φ_f (Wb)
0	0,075	0,025	0,333333	0,136002	0,086582	0,63662	0,527344	0,1309	0,00005667
1	0,077	0,027	0,350649	0,138127	0,087934	0,63662	0,549678	0,1309	0,00005986
2	0,079	0,029	0,367089	0,130956	0,083369	0,63662	0,571613	0,1309	0,00005893
3	0,081	0,031	0,382716	0,12295	0,078272	0,63662	0,593049	0,1309	0,00005738

4.6 Studi Kasus Rotor Generator Sinkron MPFA

Pada studi kasus desain rotor generator sinkron magnet permanen fluks aksial jenis cakram ini digunakan magnet permanen berbentuk lingkaran, diameter 25mm dan tebal 3mm dengan permukaan datar. Jumlah magnet permanen yang digunakan sebanyak 6 buah (3 pasang). Material yang digunakan adalah jenis magnet permanen *Ceramic 5*.

Dengan menggunakan perangkat lunak FEMM 4.2 diperoleh jarak antar magnet optimum adalah $X_{mp} = 1\text{mm}$. Dengan menggunakan persamaan 4.6 diperoleh diameter minimum penampang (yoke) rotor adalah :

$$D_y = 2 \left(\frac{(2r_m + x)}{2 \sin(\frac{90}{p})} + r_m \right) = 2 \left(\frac{(2(12,5) + 1)}{2 \sin(\frac{90}{3})} + 12,5 \right) = 77\text{mm}$$

$$D_{out} = 77\text{mm}; \quad D_{in} = 77 - 4(12,5) = 27\text{mm}$$

Dengan menggunakan persamaan 3.9 maka diperoleh eksitasi fluks magnet pada tiap kutubnya sebesar :

$$\Phi_f = \alpha_i B_{mg} \frac{\pi}{8p} D_{out}^2 (1 - k_d^2) = (0,63662)(0,138127) \frac{\pi}{8,3} 0,077^2 (1 - 0,350649^2)$$

$$\Phi_f = 0,00005986\text{Wb}$$

KESIMPULAN

Pada studi desain rotor generator sinkron magnet permanen fluks aksial jenis cakram ini bisa diambil kesimpulan :

1. Puncak gelombang distribusi kerapatan fluks akan mengalami *ripple* karena pengaruh lebar celah udara (*air gap*) dan jarak antar magnet permanen.
2. Jarak optimum antar magnet permanen tergantung pada jenis material magnet permanen dan lebar celah udara.
3. Jarak optimum antar magnet permanen adalah ketika nilai B_{mg} nya maksimum dan *ripple* pada puncak gelombang distribusi fluks minimum.
4. Dalam studi kasus ini, untuk magnet permanen jenis *Ceramic 5*, tebal 3mm, diameter 25mm, lebar celah udara (*air gap*) 2mm dan jumlah magnet permanen 6 buah (3 pasangan kutub) maka didapatkan :
 - jarak antar magnet optimum $X_{mp} = 1\text{mm}$
 - diameter luar magnet permanen pada rotor $D_{out} = 77\text{mm}$
 - diameter dalam magnet permanen pada rotor $D_{in} = 27\text{mm}$
 - eksitasi fluks magnet pada tiap kutub $\Phi_f = 0,00005986\text{Wb}$

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 Pembangunan 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] *MMC Lecture7-Hard Magnetic Materials*,
<http://www.scribd.com/doc/55083001/MMC-Lecture7>
diakses pada tanggal 12 September 2011.
- [11] Aliansyah, Eduward. *Studi Analisa Daya Keluaran Generator Sinkron Tiga Phasa Dengan Rotor Silinder*, Medan: Universitas Sumatera Utara, 2008.
- [12] *Generator Listrik Sederhana*,
<http://tonytaufik.wordpress.com/generator-listrik-sederhana/>
diakses pada tanggal 12 September 2011.