



UNIVERSITAS INDONESIA

**SIMULASI OPTIMALISASI SEBARAN KERAPATAN FLUKS
MAGNET PADA JUMLAH KUTUB DAN JARAK ANTAR
MAGNET PERMANEN GENERATOR SINKRON MAGNET
PERMANEN FLUKS RADIAL**

SKRIPSI

**SATRIO WICAKSONO
0906603083**

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



UNIVERSITAS INDONESIA

**SIMULASI OPTIMALISASI SEBARAN KERAPATAN FLUKS
MAGNET PADA JUMLAH KUTUB DAN JARAK ANTAR
MAGNET PERMANEN GENERATOR SINKRON MAGNET
PERMANEN FLUKS RADIAL**

SKRIPSI

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

**SATRIO WICAKSONO
0906603083**

**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 : Satrio Wicaksono

NPM : 0906603083

Tanda Tangan : 

Tanggal : 27 Juni 2012

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Satrio Wicaksono
NPM : 0906603083
Program Studi : Teknik Elektro
Judul Skripsi : **Simulasi Optimalisasi Sebaran Kerapatan Fluks Magnet Pada Jumlah Kutub dan Jarak Antar Magnet Permanen Generator Sinkron Magnet Permanen Fluks Radial**

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 : 27 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, 27 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 : Satrio Wicaksono
NPM : 0906603083
Program Studi : Teknik Elektro
Departemen : Teknik Elektro
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Skripsi

demikian 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 OPTIMALISASI SEBARAN KERAPATAN FLUKS MAGNET
PADA JUMLAH KUTUB DAN JARAK ANTAR MAGNET PERMANEN
GENERATOR SINKRON MAGNET PERMANEN FLUKS RADIAL”**

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 : 27 Juni 2012

Yang menyatakan



(Satrio Wicaksono)

ABSTRAK

Nama : Satrio Wicaksono
Program Studi : Teknik Elektro
Judul : **Simulasi Optimalisasi Sebaran Kerapatan Fluks Magnet Pada Jumlah Kutub dan Jarak Antar Magnet Permanen Generator Sinkron Magnet Permanen Fluks Radial**

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 Simulasi Optimasi Jarak Antar Rotor pada Generator Sinkron Magnet Permanen 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,
jarak antar kutub magnet permanen, distribusi fluks magnet

ABSTRACT

Name : Satrio Wicaksono
Study Program : Electrical Engineering
Title : **Simulation Optimization of Magnetic Flux Density of Number of Poles and Distance Between Permanent Magnet of Synchronous Generator Permanent Magnet Radial Flux**

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.

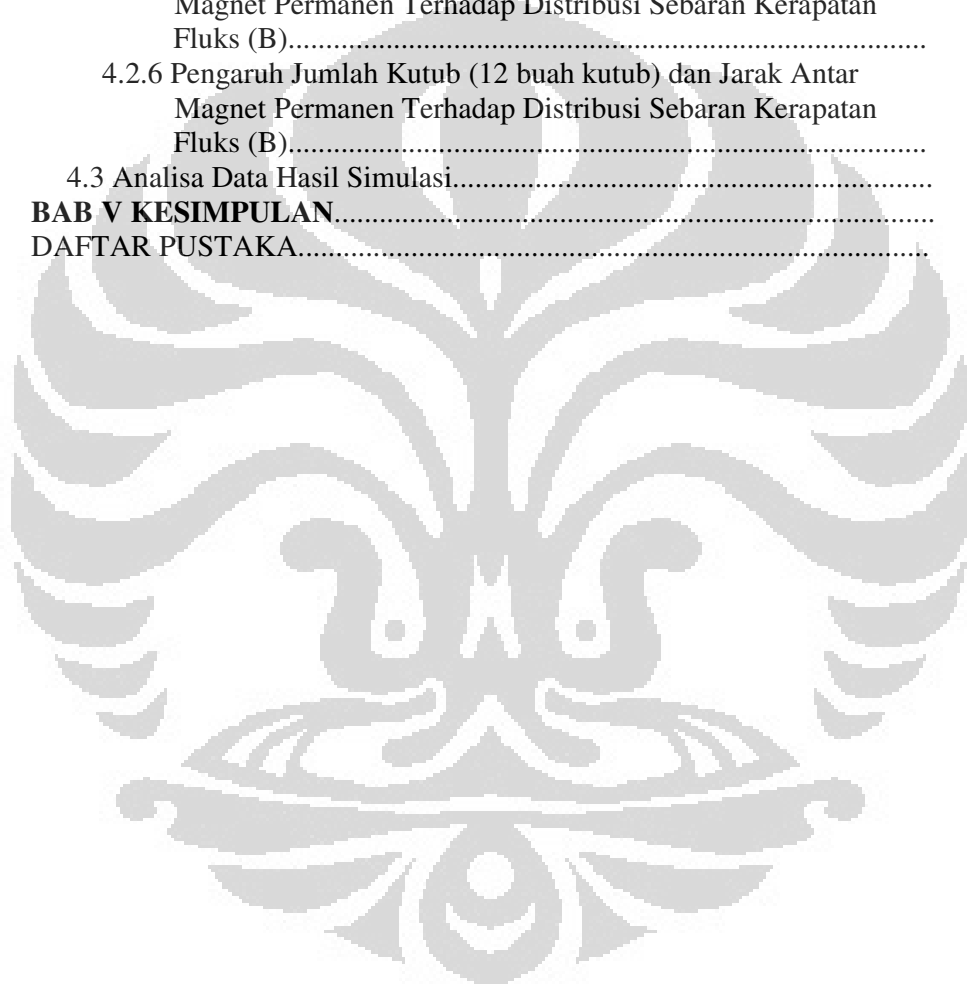
In Simualtion Optimization of Distance Between Rotor of Permanen Magnet Synchronous Generator, impact of distance between permanent magnet polarity was highly correlated to magnet flux distribution itself. In addition, distance between permanent magnet polarity also influencing indirectly into rotor dimension and dimension of sychronized machine thoroughly.

Key word :
rotor, 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.....	x
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang Masalah.....	1
1.2 Tujuan.....	2
1.3 Rumusan Masalah.....	2
1.4 Batasan Masalah.....	2
1.5 Metodologi Penulisan.....	3
1.6 Sistematika Penulisan.....	4
BAB II MESIN SINKRON.....	5
2.1 Prinsip Dasar Mesin Sinkron.....	5
2.1.1 Definisi.....	5
2.1.2 Konstruksi Dasar Mesin Sinkron.....	6
2.1.2.1 Stator/Kumparan Jangkar.....	7
2.1.2.2 Rotor/Kumparan Medan.....	8
2.1.2.3 Arus Penguat/Eksitasi.....	12
2.2 Prinsip Kerja Dan Karakteristik Mesin Sinkron.....	14
2.2.1 Kecepatan Sinkron.....	15
BAB III GENERATOR SINKRON MAGNET PERMANEN FLUKS RADIAL.....	16
3.1 Definisi Generator Sinkron Magnet Permanen Fluks Radial... ..	16
3.2 Struktur dan Material Generator Sinkron MPFR.....	17
3.2.1 Stator.....	18
3.2.2 Rotor.....	18
3.3 Keramik Magnet Permanen Pada Rotor.....	18
3.3.1 Jenis Magnet.....	22
3.4 Kerapatan Fluks Magnet Maksimum.....	23
3.5 Fluks Magnetik Maksimum.....	23
BAB IV SIMULASI DESAIN OPTIMASI JARAK ANTAR MAGNET PERMANEN GSMP FR.....	25
4.1 Algoritma Desain Optimasi Jarak Antar Magnet GSMP FR.....	25
4.2 Pengaruh Jumlah Kutub dan Jarak Antar Magnet Permanen Terhadap Distribusi Kerapatan Fluks (B).....	27
4.2.1 Pengaruh Jumlah Kutub (2 buah kutub) dan Jarak Antar Magnet Permanen Terhadap Distribusi Sebaran Kerapatan Fluks (B).....	27

4.2.2 Pengaruh Jumlah Kutub (4 buah kutub) dan Jarak Antar Magnet Permanen Terhadap Distribusi Sebaran Kerapatan Fluks (B).....	28
4.2.3 Pengaruh Jumlah Kutub (6 buah kutub) dan Jarak Antar Magnet Permanen Terhadap Distribusi Sebaran Kerapatan Fluks (B).....	30
4.2.4 Pengaruh Jumlah Kutub (8 buah kutub) dan Jarak Antar Magnet Permanen Terhadap Distribusi Sebaran Kerapatan Fluks (B).....	32
4.2.5 Pengaruh Jumlah Kutub (10 buah kutub) dan Jarak Antar Magnet Permanen Terhadap Distribusi Sebaran Kerapatan Fluks (B).....	33
4.2.6 Pengaruh Jumlah Kutub (12 buah kutub) dan Jarak Antar Magnet Permanen Terhadap Distribusi Sebaran Kerapatan Fluks (B).....	35
4.3 Analisa Data Hasil Simulasi.....	37
BAB V KESIMPULAN	38
DAFTAR PUSTAKA	39

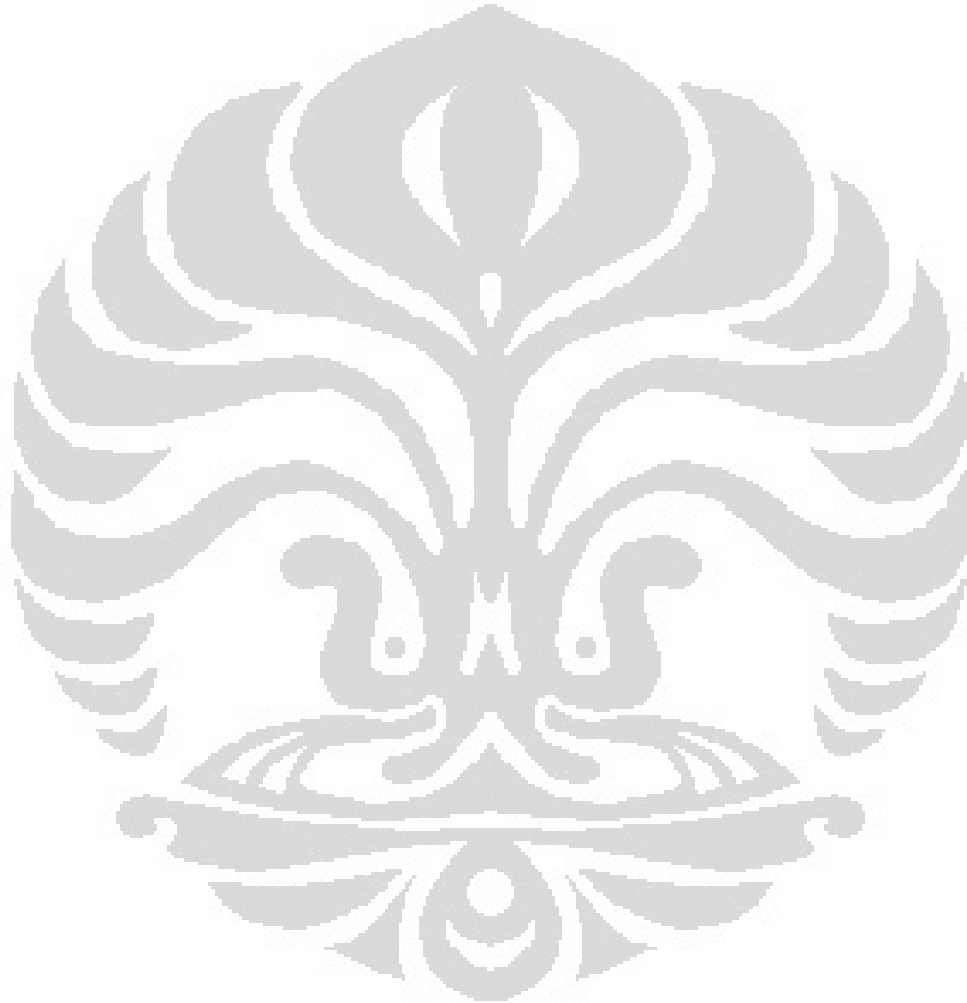


DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Kontruksi dasar mesin sinkron.....	6
Gambar 2.2. (a) Laminasi stator, (b) Beberapa kumparan dalam slot.....	7
Gambar 2.3. Rangka stator beserta kumparan jangkarnya.....	7
Gambar 2.4. Rotor kutub sepatu/kutub menonjol (<i>salient pole</i>).....	10
Gambar 2.5. Rotor kutub sepatu pada generator 4 kutub.....	10
Gambar 2.6. Rotor kutub silinder (<i>non-salient pole/cylindrical rotor</i>).....	11
Gambar 2.7. Rotor kutub silinder pada generator 4 kutub.....	11
Gambar 3.1. (a) Bentuk Stator, (b) bentuk rotor.....	17
Gambar 3.2. Prototipe magnet keramik.....	19
Gambar 3.3. Perbedaan kurva histerisis antar magnet permanen dengan magnet induksi.....	19
Gambar 3.4. Kurva karakteristik histerisis magnetik beberapa material magnet permanen.....	21
Gambar 3.5. Kurva B-H untuk material keramik.....	22
Gambar 3.6. Metode awal penempatan magnet permanen pada rotor.....	23
Gambar 4.1. Algoritma simulasi desain optimasi jarak antar magnet GSMP RS.....	26
Gambar 4.2. Grafik dan Hasil simulasi kerapatan fluks dengan jumlah kutub 2 buah (a) $X_{mp}=1\text{mm}$, (b) $X_{mp}=3\text{mm}$, (c) $X_{mp}=7\text{mm}$, (d) $X_{mp}=15\text{mm}$	28
Gambar 4.3. Grafik dan Hasil simulasi kerapatan fluks dengan jumlah kutub 4 buah (a) $X_{mp}=1\text{mm}$, (b) $X_{mp}=3\text{mm}$, (c) $X_{mp}=7\text{mm}$, (d) $X_{mp}=15\text{mm}$	30
Gambar 4.4. Grafik dan Hasil simulasi kerapatan fluks dengan jumlah kutub 6 buah (a) $X_{mp}=1\text{mm}$, (b) $X_{mp}=3\text{mm}$, (c) $X_{mp}=7\text{mm}$, (d) $X_{mp}=15\text{mm}$	31
Gambar 4.5. Grafik dan Hasil simulasi kerapatan fluks dengan jumlah kutub 8 buah (a) $X_{mp}=1\text{mm}$, (b) $X_{mp}=3\text{mm}$, (c) $X_{mp}=7\text{mm}$, (d) $X_{mp}=15\text{mm}$	33
Gambar 4.6. Grafik dan Hasil simulasi kerapatan fluks dengan jumlah kutub 10 buah (a) $X_{mp}=1\text{mm}$, (b) $X_{mp}=3\text{mm}$, (c) $X_{mp}=7\text{mm}$, (d) $X_{mp}=15\text{mm}$	34
Gambar 4.7. Grafik dan Hasil simulasi kerapatan fluks dengan jumlah kutub 12 buah (a) $X_{mp}=1\text{mm}$, (b) $X_{mp}=3\text{mm}$, (c) $X_{mp}=7\text{mm}$, (d) $X_{mp}=15\text{mm}$	36
Gambar 4.8. Perbandingan nilai sebaran distribusi kerapatan fluks dengan Beberapa variabel jumlah kutub dan jarak antar magnet.....	37

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1. Spesifikasi beberapa material magnet permanen.....	21
Tabel 4.1. Nilai sebaran distribusi kerapatan fluks dengan beberapa variabel jumlah kutub dan jarak antar magnet.....	37



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Kebutuhan terhadap energi listrik semakin lama semakin meningkat. Energi listrik dibangkitkan oleh generator. Ada dua buah jenis generator yang biasa digunakan, yaitu generator sinkron dan asinkron. Generator sinkron merupakan generator dengan kecepatan putar rotor sama dengan kecepatan medan putar stator seperti generator medan magnet permanen. Sedangkan generator asinkron memiliki kecepatan putar rotor yang berbeda dengan kecepatan putar medan stator seperti generator induksi. Generator induksi banyak digunakan pada pembangkit listrik energi terbarukan disebabkan oleh harganya yang lebih murah, tidak membutuhkan sikat, konstruksinya yang sederhana, serta mudah dan murah dalam perawatannya.

Sumber energi yang biasanya digunakan sebagai bahan bakar pada pembangkit listrik adalah minyak bumi dan batubara. Keterbatasan ketersediaan bahan bakar ini serta kepedulian terhadap lingkungan meningkatkan perkembangan teknologi pembangkit listrik energi terbarukan. Namun penggunaan sumber energi terbarukan seperti angin dan air sering mengalami kendala berupa kecepatan alirannya yang bervariasi dan tidak konstan.

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

Dengan adanya studi desain generator ini, diharapkan bisa digunakan sebagai sumber energi listrik alternatif yang dapat digunakan oleh rumah tangga, baik di kota-kota besar maupun di daerah terpencil. Jadi, dapat membantu pemerintah dalam mengatasi krisis energi listrik dan kesulitan pengadaan jaringan energi listrik pada daerah-daerah terpencil.

1.2 Tujuan

Tujuan dari penulisan skripsi ini adalah untuk mengembangkan desain Generator Sinkron Magnet Permanen (GSMP) Fluks Radial. Adapun tujuan lainnya adalah sebagai studi desain rekayasa rotor dan studi optimasi jarak antar magnet permanen dengan berbagai jumlah kutub rotor.

1.3 Rumusan Masalah

Dalam Simulasi Optimasi Jarak Generator Sinkron Magnet Permanen Fluks Radial (GSMP FR) akan dibahas tentang hal-hal sebagai berikut :

1. Definisi dan prinsip kerja generator sinkron magnet permanen rotor sangkar
2. Bagaimana karakteristik dari generator sinkron magnet permanen rotor sangkar?
3. Apa saja bagian – bagian dan material penyusun generator sinkron magnet permanen rotor sangkar?
4. Parameter apa yang harus diperhatikan dalam mendesain rotor generator magnet permanen rotor sangkar?
5. Bagaimana cara mendesain rotor generator sinkron magnet permanen rotor sangkar sehingga menghasilkan desain yang optimum?

1.4 Batasan Masalah

Dalam Simulasi Optimasi Jarak Antar Magnet Permanen Generator Sinkron Magnet Permanen Rotor Sangkar ini penulis hanya membahas tentang hal-hal sebagai berikut :

1. Tipe generator yang didesain adalah generator sinkron magnet permanen rotor sangkar dengan jumlah kutub sebanyak 2, 4, 6, 8, 10 dan 12 buah, dengan jarak masing-masing kutub sejauh 1 mm, 3 mm, 7 mm dan 15 mm.

2. Jenis material magnet yang digunakan adalah *ceramic 5*
3. Lebar celah udara sebesar 1 mm
4. Desain generator menggunakan 1 fasa
5. Stator yang digunakan terdiri dari 100 lilitan dan slot-slotnya sebanyak 12 slot
6. Dalam penulisan ini, penulis tidak membahas stator hanya mengembangkan desain rotor.
7. Studi kasus pengaruh jarak antar magnet permanen pada rotor sangkar terhadap jumlah kutub sehingga bisa didapat desain yang optimum.

1.5 Metodologi Penulisan

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

1. Studi Literatur

Membaca literatur berupa buku - buku, karya ilmiah, dan *browsing* internet untuk mendapatkan data - data yang dibutuhkan dalam pembuatan desain rotor sangkar sebagai dasar penulisan dan penyusunan laporan skripsi.

2. Perencanaan dan Pembuatan Desain

Melakukan perencanaan desain rotor dengan mengacu pada referensi tertentu dan desain material. Kemudian melakukan simulasi berbasis komputer dengan menggunakan perangkat lunak FEMM 4.2.

3. Penyusunan Laporan

Membuat suatu laporan yang berisi penjelasan yang menggambarkan mengenai desain yang dibuat.

1.6 Sistematika Penulisan

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

Selanjutnya pada bab kedua diuraikan landasan teori yang mengacu pada pembahasan. Bab ini membahas mesin sinkron secara garis besar dan lebih dikhususkan ke generator sinkron. Pada bab berikutnya yaitu bab tiga, pembahasan difokuskan pada generator sinkron magnet permanen rotor sangkar. Karena, bab ini menjadi acuan dalam simulasi desain untuk bab selanjutnya. Berikutnya pada bab empat menguraikan analisis dari desain yang telah dibuat, khususnya desain rotor yang telah dibuat menggunakan perangkat lunak FEMM 4.2. Terakhir, pada bab lima berisi kesimpulan yang diperoleh dari analisa hasil simulasi dan studi yang dilakukan berdasarkan referensi dari literatur – literatur yang ada.

BAB II MESIN SINKRON

2.1 Prinsip Dasar Mesin Sinkron

2.1.1 Definisi

Generator sinkron (sering disebut alternator) adalah mesin sinkron yang digunakan untuk mengubah daya mekanik atau gerak menjadi daya listrik. Jika ditinjau dari kebutuhannya, mesin sinkron dapat dibagi menjadi 2 jenis, yaitu :

- Mesin Sinkron 3 phasa
- Mesin Sinkron 1 phasa

Prinsip dasar kerja mesin sinkron adalah jika sebuah kumparan diputar pada kecepatan konstan pada medan magnet homogen, maka akan terinduksi tegangan sinusoidal pada kumparan tersebut dan dari proses inilah generator sinkron dapat menghasilkan tegangan. 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.

Dalam pengoperasiannya, mesin sinkron dapat dioperasikan sebagai mesin tunggal, akan tetapi biasanya mesin ini tergabung dalam suatu sistem interkoneksi sehingga bekerja sejajar sinkron dengan alternator lainnya. Untuk dapat beroperasi dengan baik, alternator harus tetap berada dalam keadaan sinkron dengan sistem lainnya untuk memikul beban keseluruhan.

Untuk mempelajari operasi mesin-mesin sinkron dalam suatu jaringan yang terhubung, harus terlebih dahulu dikenal dan dianalisis karakteristik dan unjuk kerja mesin sinkron baik dalam kondisi *steady state* maupun dalam kondisi transient. Untuk operasi motor, alternator bekerja sebagai suatu alat sinkron yang berputar pada suatu putaran tetap yang ditentukan oleh frekuensi dan jumlah kutub.

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

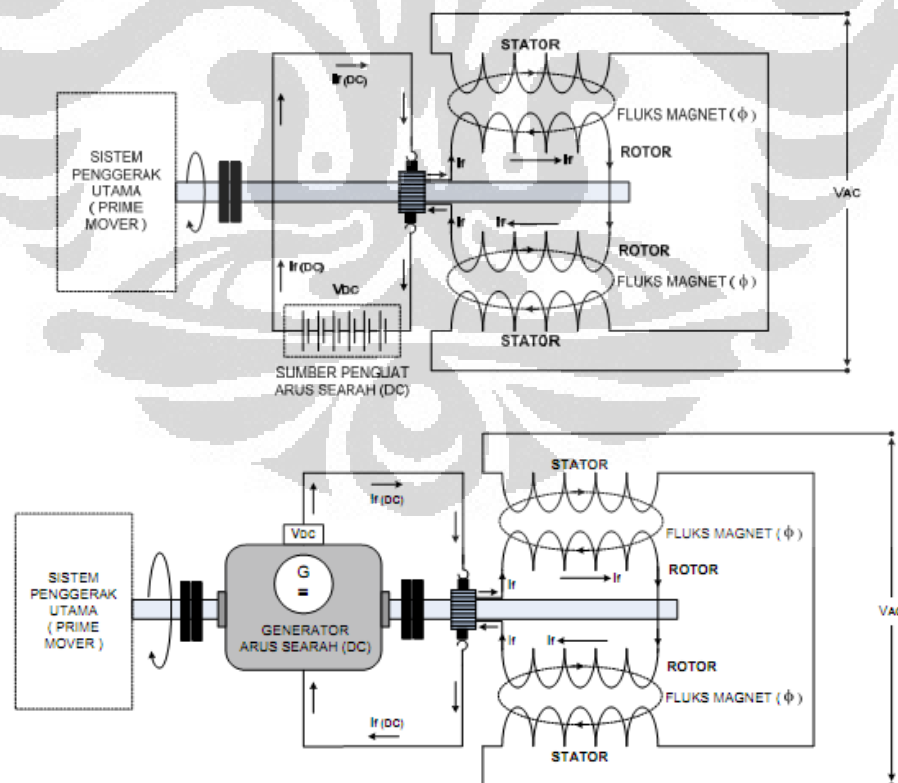
Disebut sebagai kumparan jangkar (angker) yang berfungsi menghasilkan tegangan dan arus bolak-balik (*Alternating Current*).

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

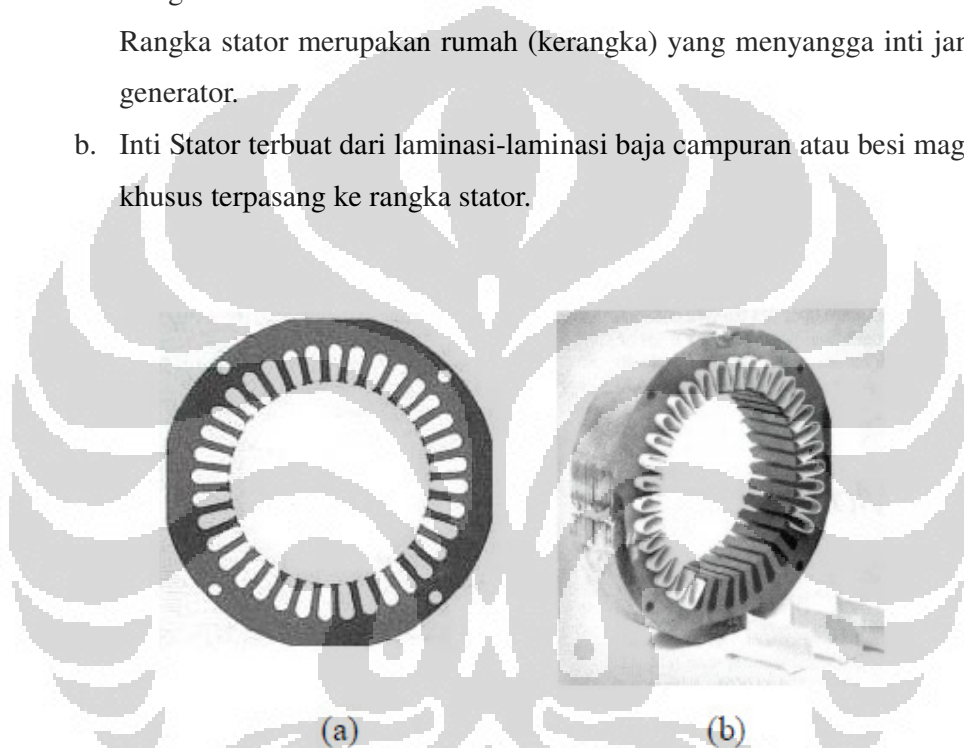
Stator (armature) adalah bagian yang berfungsi sebagai tempat untuk menerima induksi magnet dari rotor. Arus AC yang menuju ke beban disalurkan melalui stator. Komponen ini berbentuk sebuah rangka silinder dengan lilitan kawat konduktor yang sangat banyak.

Stator terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu :

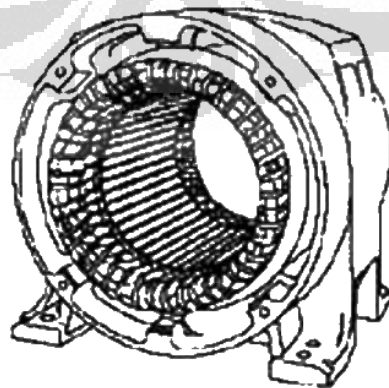
a. Rangka stator

Rangka stator merupakan rumah (kerangka) yang menyangga inti jangkar generator.

b. Inti Stator terbuat dari laminasi-laminasi baja campuran atau besi magnetic khusus terpasang ke rangka stator.



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. Kumputaran rotor (kumputaran medan)

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

3. Poros rotor

Merupakan tempat meletakkan kumputaran 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. Kumputaran pada setiap kutub dihubungkan secara seri. Ketika kumputaran ini disuplai oleh eksiter, maka kutub yang berdekatan akan membentuk kutub berlawanan.

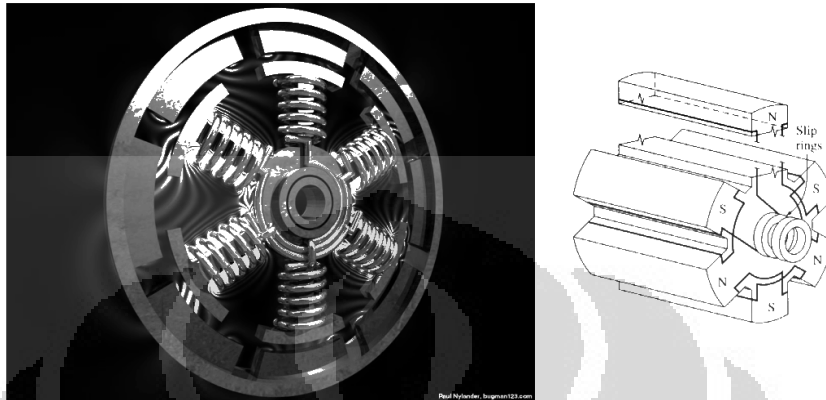
Rotor kutub sepatu umumnya digunakan pada generator sinkron dengan kecepatan putar rendah-sedang (120-400rpm) dan berkutub banyak (≥ 4). Oleh sebab itu generator sinkron tipe ini biasanya dikopel dengan mesin diesel atau turbin air pada sistem pembangkit listrik.

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

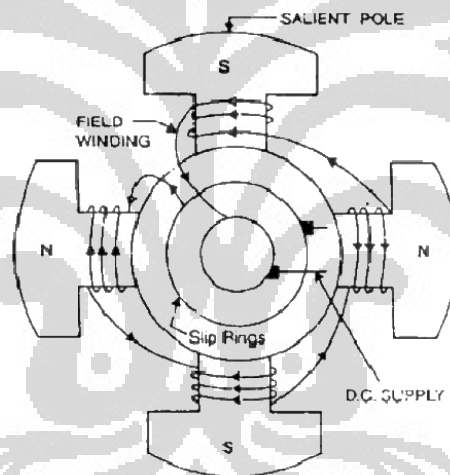
Rotor kutub sepatu cocok digunakan untuk putaran rendah-sedang karena :

- 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.

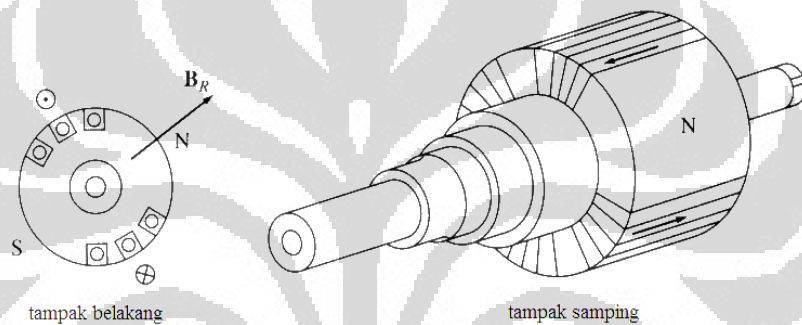
Rotor kutub silinder biasanya digunakan pada generator putaran tinggi (1500 atau 3000rpm) dan berkutub sedikit (≤ 4). Rotor kutub

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.

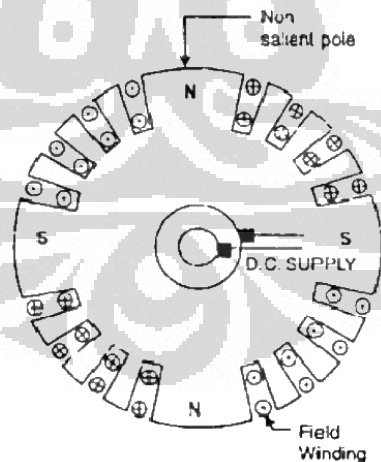
Rotor kutub silinder cocok digunakan pada putaran tinggi karena :

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

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



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



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

2.1.2.3 Arus Penguat (Eksitasi)

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

Ada 2 jenis sistem eksitasi dengan menggunakan sikat, yaitu :

1. Sistem eksitasi konvensional (menggunakan generator arus searah)

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

Tegangan yang dihasilkan oleh generator arus searah ini diberikan ke belitan rotor generator sinkron melalui sikat karbon dan 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]}

BAB III

GENERATOR SINKRON MAGNET PERMANEN FLUKS RADIAL

3.1 Definisi Generator Sinkron Magnet Permanen Fluks Radial

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

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

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

Adapun keuntungan yang dimiliki oleh generator sinkron magnet permanen adalah sebagai berikut :

- Untuk jenis rotor sangkar, mempunyai konstruksi yang sederhana
- Biaya dan waktu perawatan yang rendah
- Pengaturan *starting* yang sederhana

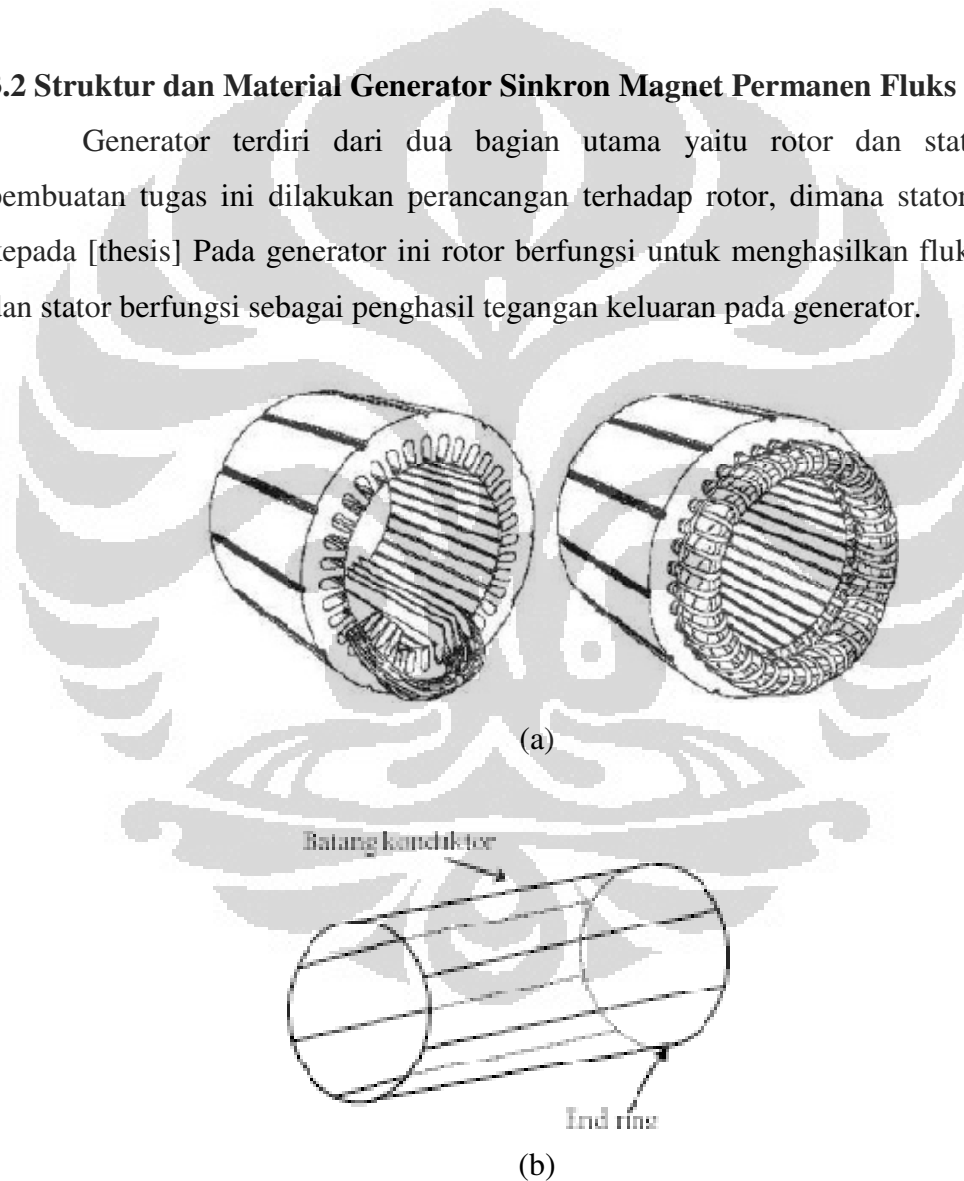
Secara garis besar, generator sinkron magnet permanen dibagi menjadi dua jenis bila dilihat dari fluks magnet yang dihasilkan, yaitu :

- Generator sinkron magnet permanen fluks radial (GSMPFR)
- Generator sinkron magnet permanen fluks aksial (GSMPFA)

Pada tulisan ini, hanya akan dibahas mengenai generator magnet permanen dengan fluks radial yang memiliki rotor dan stator berbentuk silindris.

3.2 Struktur dan Material Generator Sinkron Magnet Permanen Fluks Radial

Generator terdiri dari dua bagian utama yaitu rotor dan stator. Pada pembuatan tugas ini dilakukan perancangan terhadap rotor, dimana stator merujuk kepada [thesis] Pada generator ini rotor berfungsi untuk menghasilkan fluks magnet dan stator berfungsi sebagai penghasil tegangan keluaran pada generator.



Gambar 3.1 (a) Bentuk Stator, (b) bentuk rotor

3.2.1 Stator

Stator adalah bagian utama dari motor yang diam. Stator merupakan suatu kerangka yang dilaminasi terbuat dari besi tuang. Stator mempunyai bentuk alur yang tirus (tapered) dengan gigi yang sejajar (parallel sided). Alur pada stator adalah kumparan utama dan kumparan bantu berada. Dengan terdiri dari sejumlah slot yang nantinya untuk menempatkan belitan stator. Slot-slot tersebut ditempatkan dalam suatu rangka besi. Rangka tersebut mempunyai sirip-sirip besi yang berguna sebagai pendingin.

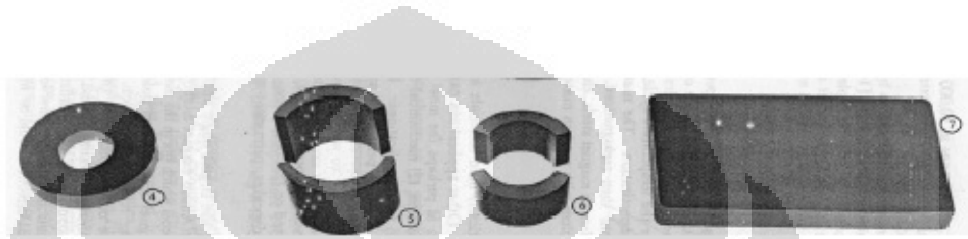
3.2.2 Rotor

Rotor merupakan bagian yang berputar pada generator. Rotor terdiri dari magnet dan yoke. Pada perancangan ini rotor berfungsi sebagai kumparan medan, dan untuk menghasilkan medan magnetik digunakan magnet permanen. Magnet permanen yang digunakan adalah magnet batang berjenis keramik (Fe).

Yoke merupakan penampang magnet permanen dan sebagai pelindung keseluruhan mesin.

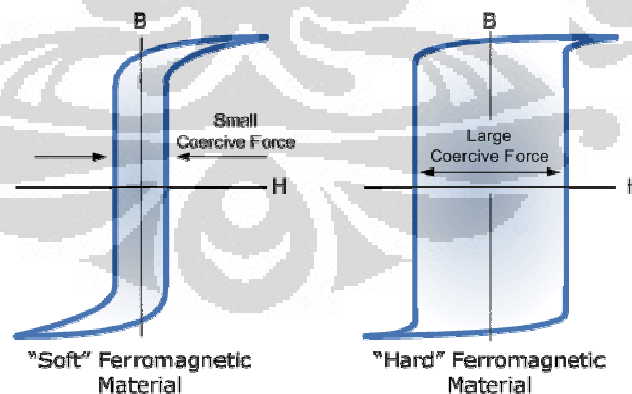
3.3 Keramik Magnet Permanen Pada Rotor

Keramik magnet merupakan salah satu bahan magnet permanen yang tersusun dari senyawa anorganik bukan logam yang pengolahannya melalui perlakuan dengan temperatur tinggi. Kegunaannya adalah untuk dibuat berbagai keperluan teknis khususnya dibidang kelistrikan, elektronika, mekanik dengan memanfaatkan magnet keramik sebagai magnet permanen, dimana material ini dapat menghasilkan medan magnet tanpa harus diberi arus listrik yang mengalir dalam sebuah kumparan atau solenoid untuk mempertahankan medan magnet yang dimilikinya. Disamping itu, magnet permanen juga dapat memberikan medan yang konstan tanpa mengeluarkan daya yang kontinyu.



Gambar 3.2 Prototipe magnet keramik

Seperti telah diketahui, penggunaan magnet permanen pada generator sinkron MPFR 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 kerapatan fluks magnetik (B) dengan intensitas medan magnet (H) tidak linear.

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

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

Dimana :

B = Kerapatan fluks magnetik (T)

μ_0 = Konstanta magnetik ($4\pi \times 10^{-7}$)

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

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

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

Dimana :

H = Intensitas medan magnet (A/m)

I = Kuat arus (Ampere)

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

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

1. Alnico, merupakan material campuran dari aluminium, nikel, kobalt, dan besi
2. Keramik, merupakan material campuran dari ferit dan bahan lainnya, contohnya barium ferit ($\text{BaO} \times 6\text{Fe}_2\text{O}_3$) dan strontium ferit ($\text{SrO} \times 6\text{Fe}_2\text{O}_3$)

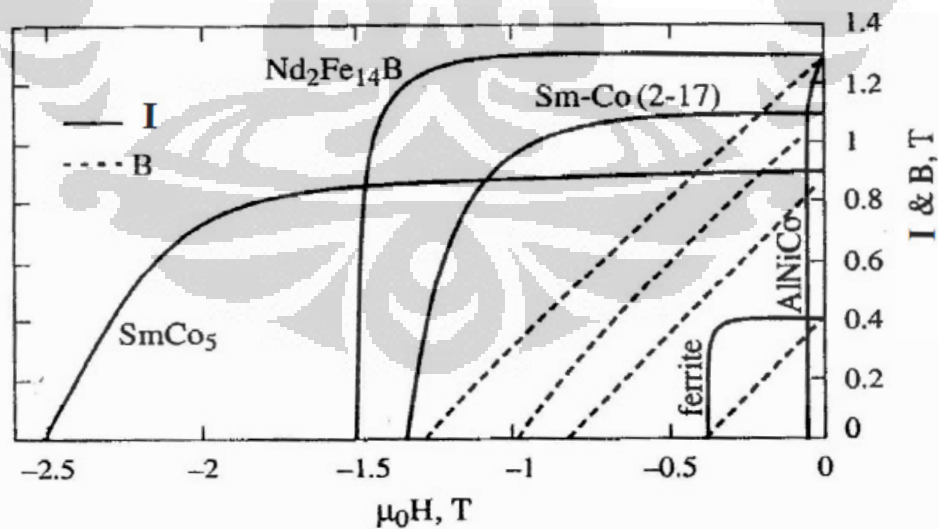
3. Magnet dari material bumi langka seperti samarium kobalt (SmCo) dan besi-boron-neodimium (NdFeB)

Berikut adalah tabel spesifikasi beberapa bahan magnet permanen :

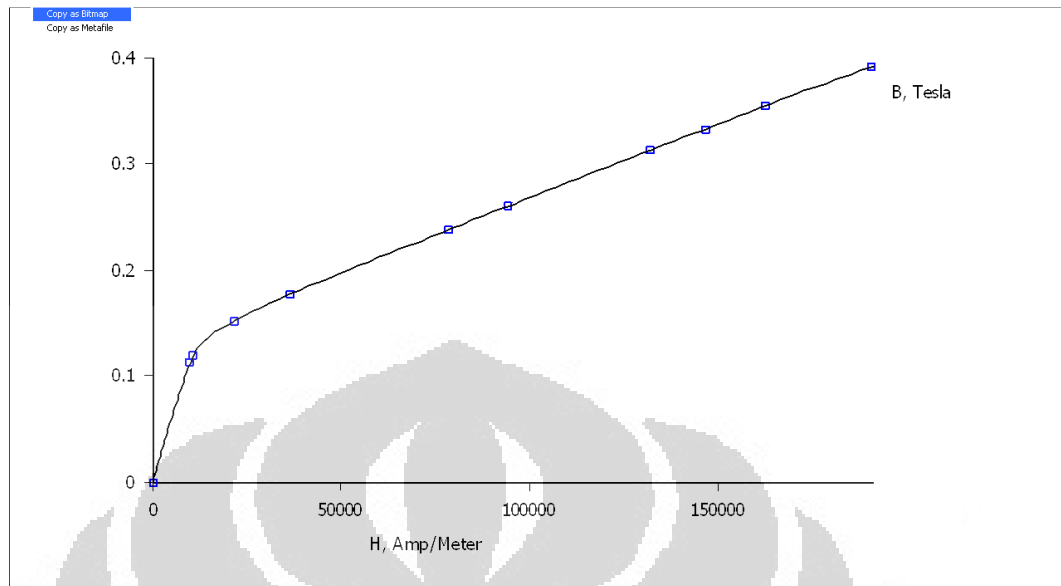
Tabel 3.1. Spesifikasi Beberapa Material Magnet Permanen [11]

Material Magnet	Energi Maksimum B_{hmax} (MGOe)	Kepadatan Fluks Magnet	Daya Tarik H_c (Koe)	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	28	10500	9500	350
Neodimium	45	13500	10800	80
Neodimium	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 [11]

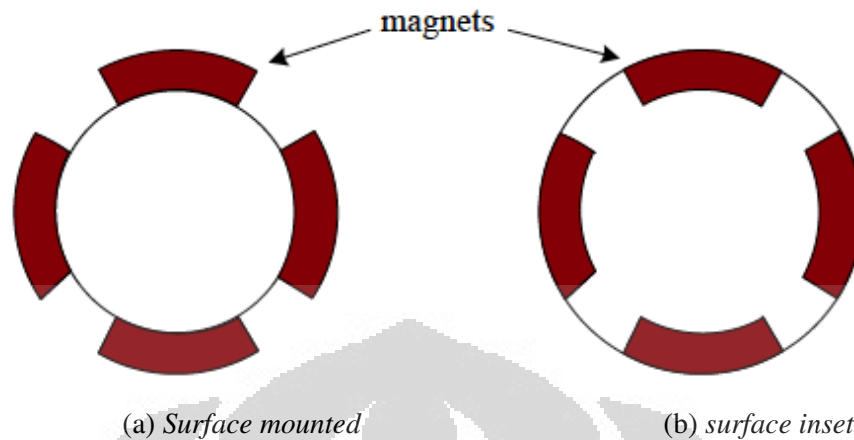


Gambar 3.5 Kurva B-H untuk material keramik

3.3.1. Jenis Magnet

Desain rotor pada GMPFR memiliki 2 (dua) jenis yaitu *surface mounted* dan *surface inset* seperti yang terlihat pada gambar 3.6 *Surface mounted* adalah jenis rotor yang penempatan magnet permanennya berada di luar permukaan yoke pada rotor, sedangkan *surface inset* merupakan jenis rotor yang penempatan magnet permanennya berada di dalam rotor. Pada penelitian ini jenis rotor yang digunakan berbentuk *surface mounted* dengan variasi pada jumlah magnet permanennya.

Surface mounted untuk jenis ini digunakan karena dalam perancangan rotor jenis ini lebih mudah dikonfigurasi.



Gambar 3.6 Metode awal penempatan magnet permanen pada rotor [isbn]

3.4 Kerapatan Fluks Magnet (*Magnetic Flux Density*) Maksimum

Kerapatan fluks magnet (*Magnetic Flux Density*) adalah jumlah garis gaya tiap satuan luas yang tegak lurus kuat medan magnet. Kerapatan fluks maksimum dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$B_{max} = Br \cdot \frac{t}{t + \delta} \quad (3.3)$$

Dimana :

Br = kerapatan fluks magnet

t = tebal magnet (*meter*)

δ = lebar celah udara (*meter*) [16]

3.5 Fluks Magnetik Maksimum

Fluks magnetik adalah ukuran total medan magnetik yang menembus bidang. secara matematis fluks magnetik didefinisikan sebagai perkalian skalar antara induksi magnetik (B) dengan luas bidang (A) yang tegak lurus pada induksi magnetik tersebut.

$$\phi_{maks} = B_{maks} \cdot A_{mag} \quad (3.4)$$

Dimana,

Φ_{maks} = Fluks magnet maksimum (*Weber*)

B_{maks} = Kerapatan fluks magnet (*Tesla*)

A_{mag} = Luas magnet (m^2) [16]

Sedangkan untuk rumus untuk mencari luas magnet adalah :

$$A = \frac{\pi (r_o^2 - r_i^2) - \tau f (r_o - r_i) Nm}{Nm} \quad (3.5)$$

Dimana :

r_o = radius luar magnet (*meter*)

r_i = radius dalam magnet (*meter*)

τf = jarak antar magnet (*meter*)

Nm = Jumlah kutub magnet [16]

BAB IV

SIMULASI DESAIN OPTIMASI JARAK ANTAR MAGNET PERMANEN GSMP FLUKS RADIAL

Parameter yang dioptimasi pada skripsi ini adalah jarak antar magnet permanen (X_{mp}). Adapun spesifikasi dari desain rotor generator sinkron sebagai berikut :

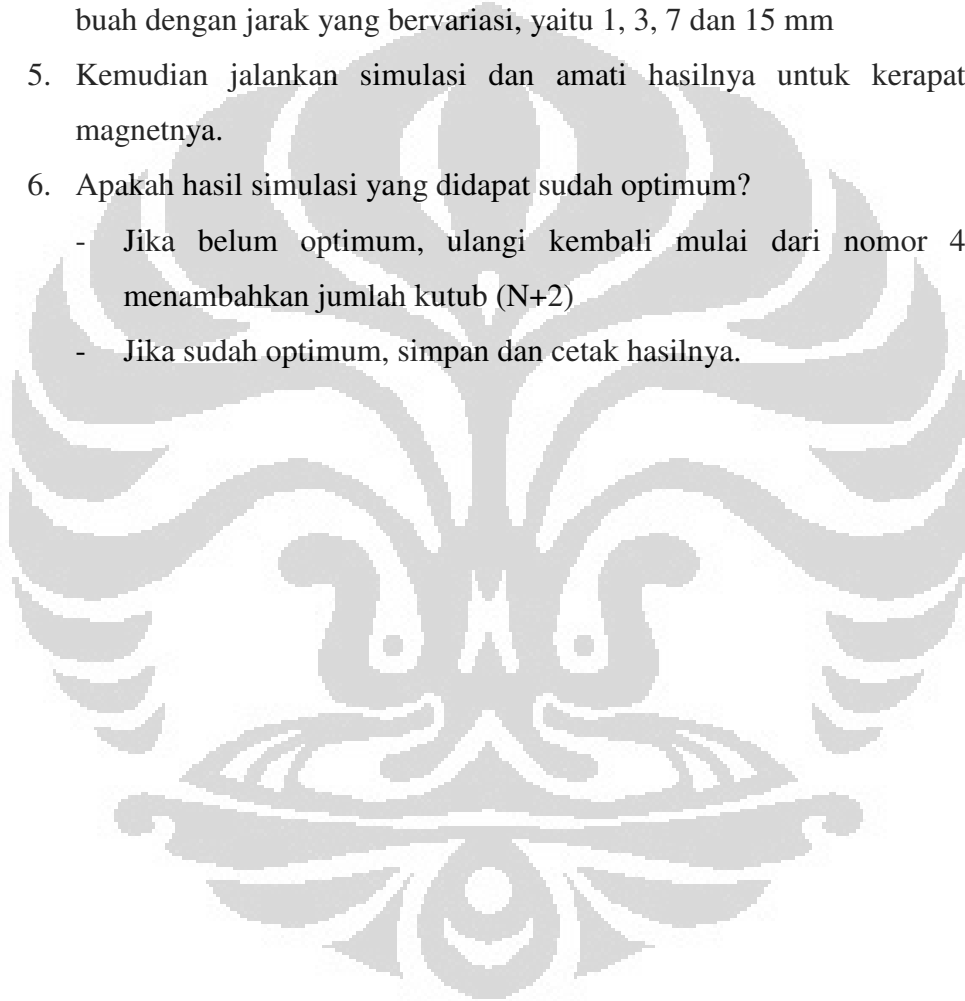
Jumlah Kutub Magnet Permanen	: 2, 4, 6, 8, 10 dan 12 buah
Jarak Antar Magnet Permanen	: 1, 3, 7, dan 15 mm
Material Magnet Permanen	: Keramik
Bentuk Magnet Permanen	: Lingkaran
Diameter Magnet Permanen	: 90 mm
Jumlah fasa	: 1 fasa
Lebar Celah Udara	: 1 mm

4.1 Algoritma Desain Optimasi Jarak Antar Magnet GSMP Fluks Radial

Untuk melakukan simulasi desain optimasi jarak antar magnet pada generator sinkron ini digunakan perangkat lunak FEMM 4.2. Pada simulasi ini ditentukan jumlah kutub magnet permanen sebanyak 6 variabel, yaitu 2, 4, 6, 8, 10 dan 12 buah kutub. Sedangkan untuk jarak antar magnet permanen ditentukan sebanyak 4 variabel, yaitu 1, 3, 7 dan 15 mm. Algoritma dari simulasi ini dapat dilihat dibawah ini :

1. Langkah pertama tentukan desain generator sinkron :
 - Stator 12 slot dengan 100 lilitan
 - Rotor berbentuk lingkaran
 - Kaki generator berbentuk segitiga sama sisi
2. Setelah itu, tentukan spesifikasi dari rotor :
 - Material magnet yang digunakan pada rotor adalah jenis keramik 5
 - Diameter rotor dibuat tetap yaitu 90 mm

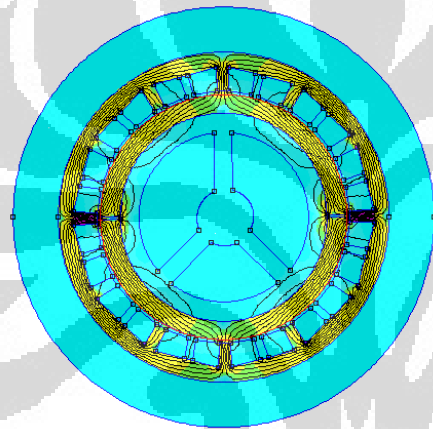
- Lebar celah udara dibuat tetap sebesar 1 mm
 - Jumlah kutub awal ditentukan, yaitu 2 buah kutub
3. Setelah ditentukan desain generator dan spesifikasi dari rotornya, langkah selanjutnya adalah membuat model simulasi dengan menggunakan perangkat lunak FEMM 4.2
 4. Desain awal yang dibuat adalah generator dengan jumlah kutub sebanyak 2 buah dengan jarak yang bervariasi, yaitu 1, 3, 7 dan 15 mm
 5. Kemudian jalankan simulasi dan amati hasilnya untuk kerapatan fluks magnetnya.
 6. Apakah hasil simulasi yang didapat sudah optimum?
 - Jika belum optimum, ulangi kembali mulai dari nomor 4 dengan menambahkan jumlah kutub ($N+2$)
 - Jika sudah optimum, simpan dan cetak hasilnya.



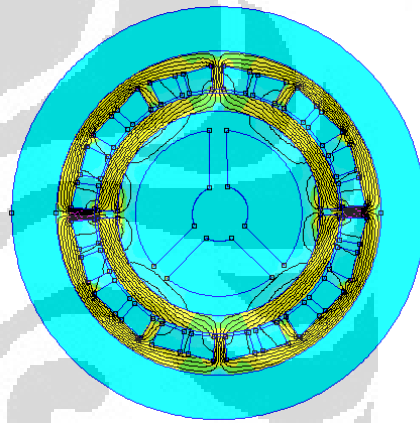
4.2 Pengaruh Jumlah Kutub dan Jarak Antar Magnet Permanen Terhadap Distribusi Kerapatan Fluks (B)

Pengaruh jumlah kutub dan jarak antar magnet terhadap distribusi kerapatan fluks dapat dilihat pada gambar-gambar dibawah. Pada gambar-gambar tersebut ditentukan jumlah kutub sebanyak 2, 4, 6, 8, 10 dan 12 buah dengan jarak antar magnet yang bervariasi, yaitu 1, 3, 7 dan 15 mm.

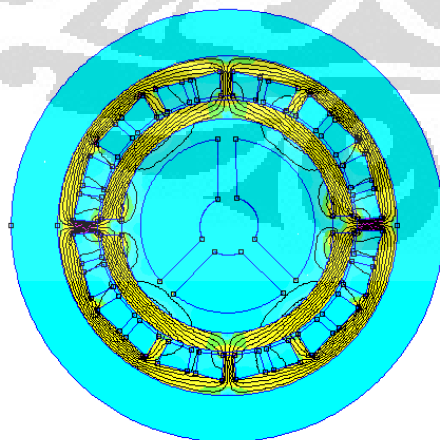
4.2.1. Pengaruh Jumlah Kutub (2 buah kutub) dan Jarak Antar Magnet Permanen Terhadap Distribusi Sebaran Kerapatan Fluks (B)



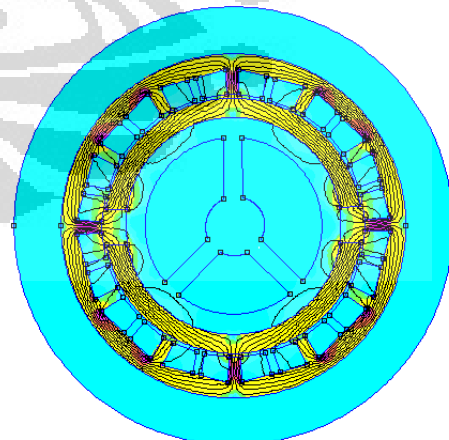
(a) $X_{mp} = 1\text{ mm}$



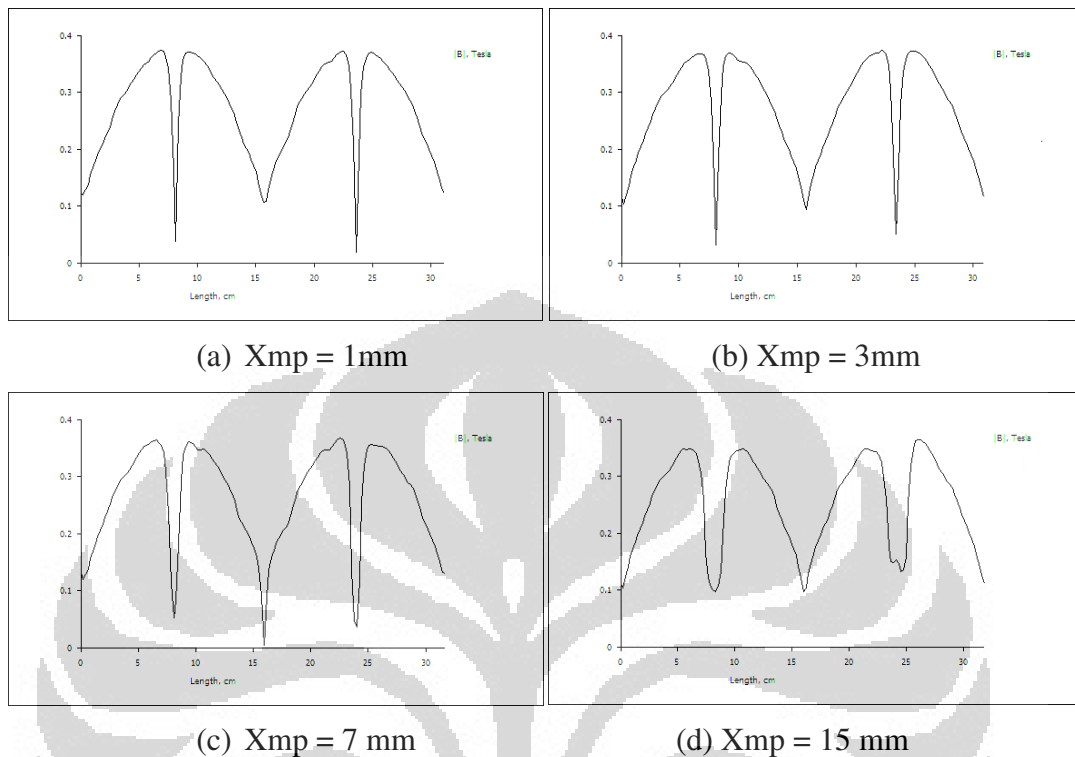
(b) $X_{mp} = 3\text{ mm}$



(c) $X_{mp} = 7\text{ mm}$



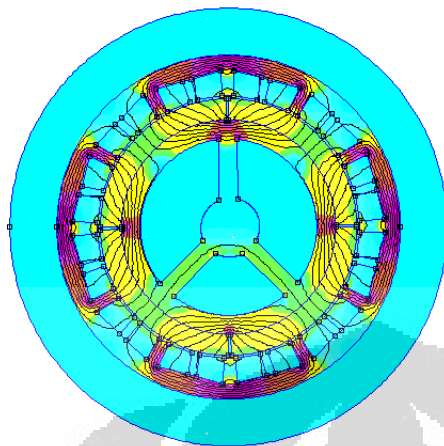
(d) $X_{mp} = 15\text{ mm}$



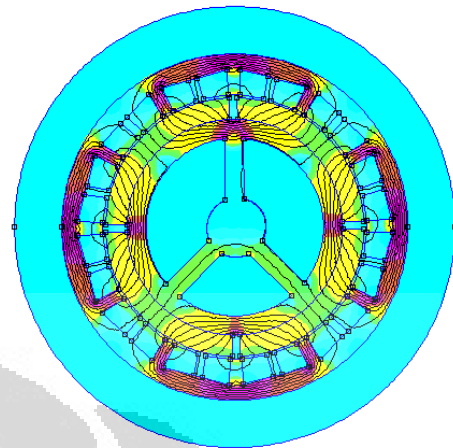
Gambar 4.2 Grafik dan Hasil Simulasi Kerapatan Fluks Dengan Jumlah Kutub 2 buah
(a) $X_{mp}=1\text{ mm}$, (b) $X_{mp}=3\text{ mm}$, (c) $X_{mp}=7\text{ mm}$ dan (d) $X_{mp}=15\text{ mm}$

Dari grafik diatas terlihat bahwa pada jumlah kutub magnet permanen sebanyak 2 buah, sebaran distribusi fluks magnet berkisar antara 0,372 sampai 0,364 T. Sebaran fluks magnet hanya terlihat kuat di ujung-ujung pertemuan antar kutub.

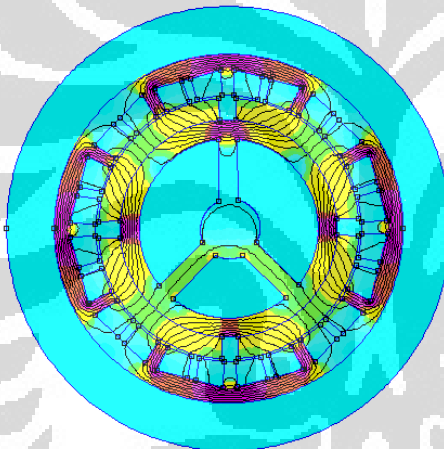
4.2.2 Pengaruh Jumlah Kutub (4 buah kutub) dan Jarak Antar Magnet Permanen Terhadap Distribusi Sebaran Kerapatan Fluks (B)



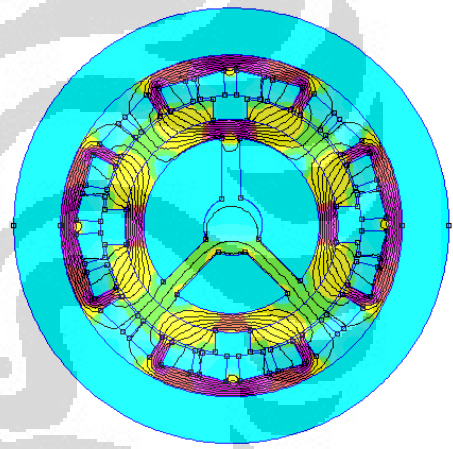
(a) $X_{mp} = 1\text{mm}$



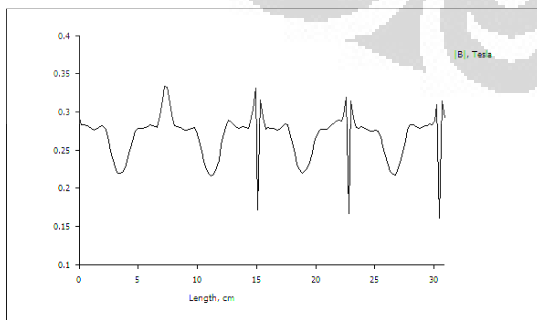
(b) $X_{mp} = 3\text{mm}$



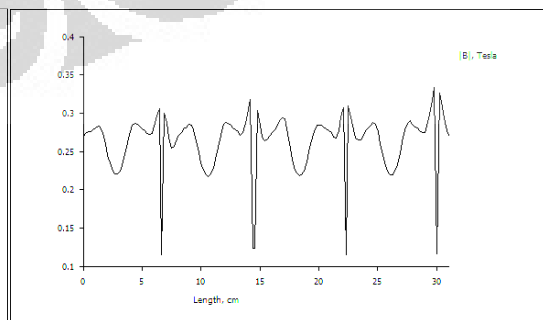
(c) $X_{mp} = 7\text{mm}$



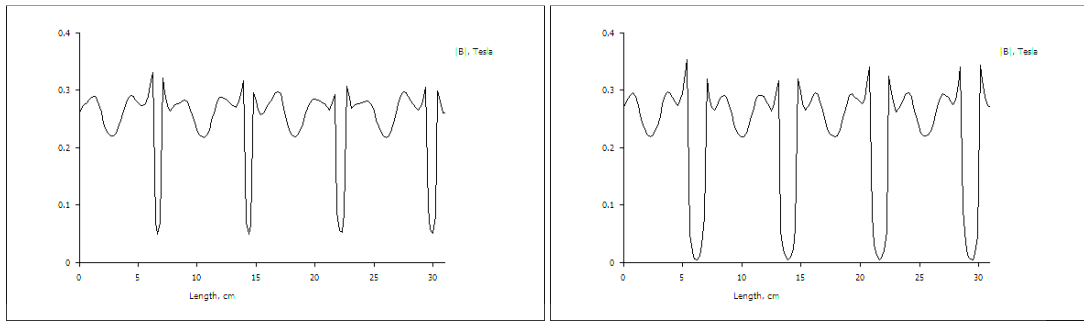
(d) $X_{mp} = 15\text{mm}$



(a) $X_{mp} = 1\text{mm}$



(b) $X_{mp} = 3\text{mm}$

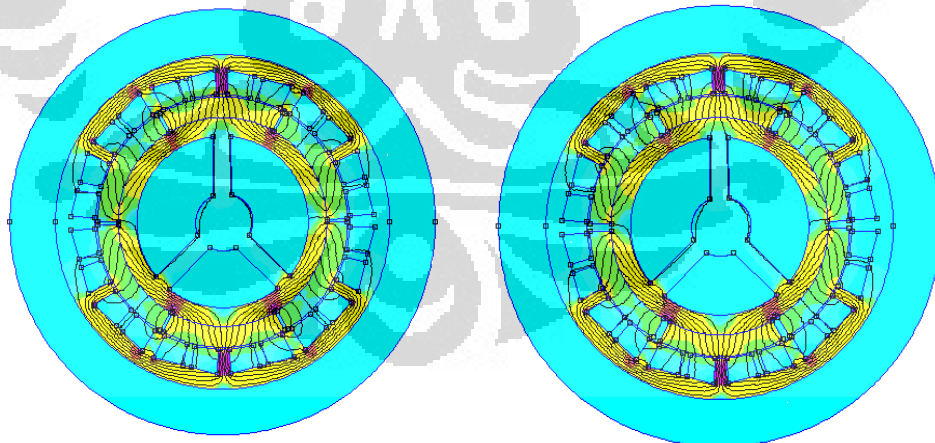
(c) $X_{mp} = 7 \text{ mm}$ (d) $X_{mp} = 15 \text{ mm}$

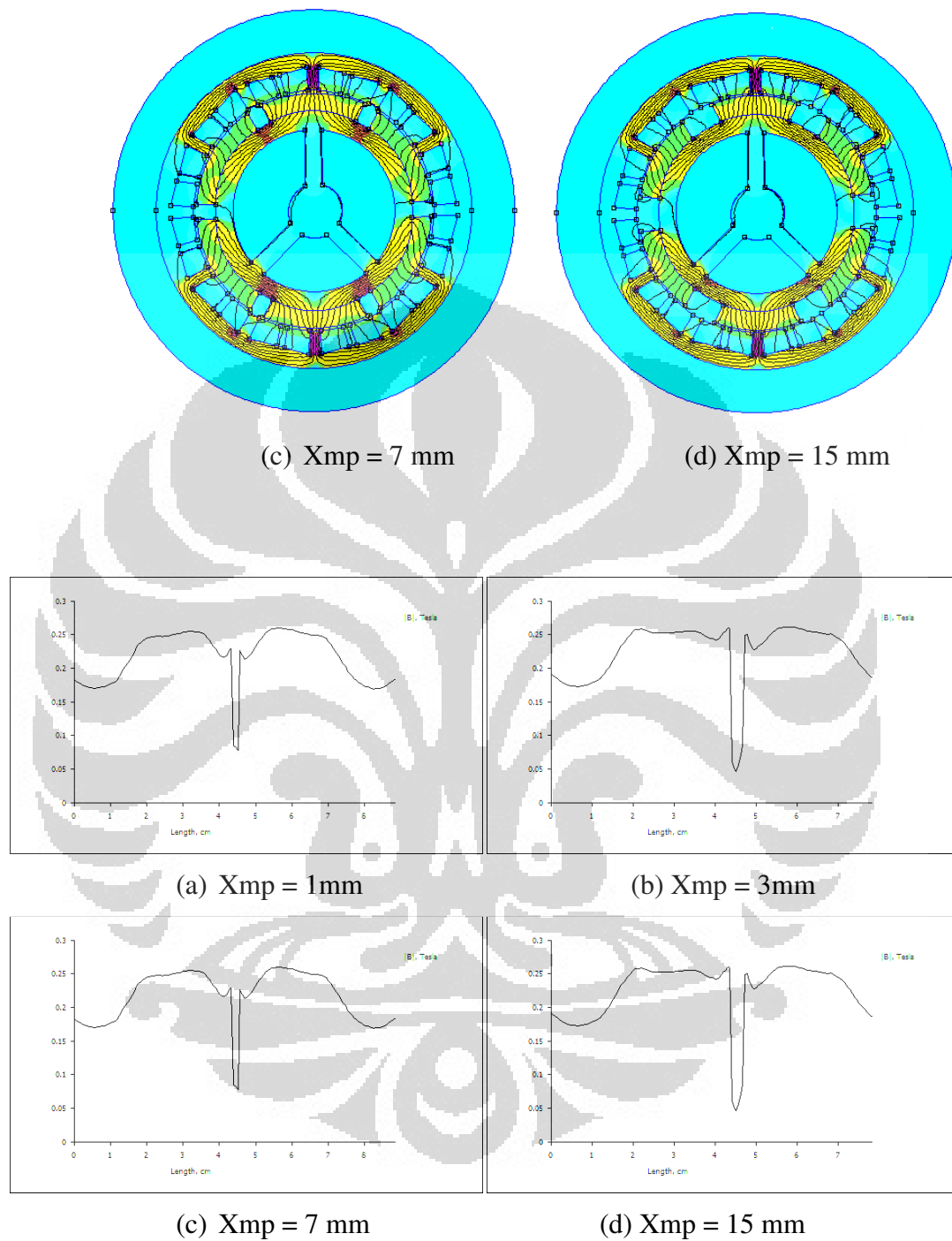
Gambar 4.3 Grafik dan Hasil Simulasi Kerapatan Fluks Dengan Jumlah Kutub 4 buah

(a) $X_{mp}=1\text{mm}$, (b) $X_{mp}=3\text{mm}$, (c) $X_{mp}=7\text{mm}$ dan (d) $X_{mp}=15\text{mm}$

Sebaran distribusi magnet permanen pada 4 kutub terlihat lebih rendah jika dibandingkan dengan yang 2 kutub, nilai sebaran distribusi fluks magnet berkisar antara 0,333 sampai 0,343 T.

4.2.3 Pengaruh Jumlah Kutub (6 buah kutub) dan Jarak Antar Magnet Permanen Terhadap Distribusi Sebaran Kerapatan Fluks (B)

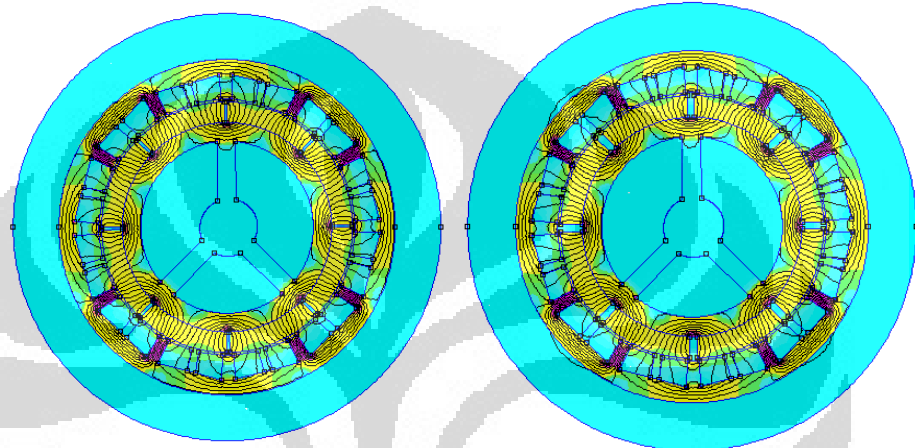
(a) $X_{mp} = 1 \text{ mm}$ (b) $X_{mp} = 3 \text{ mm}$



Gambar 4.4 Grafik dan Hasil Simulasi Kerapatan Fluks Dengan Jumlah Kutub 6 buah
 (a) $X_{mp}=1\text{mm}$, (b) $X_{mp}=3\text{mm}$, (c) $X_{mp}=7\text{mm}$ dan (d) $X_{mp}=15\text{mm}$

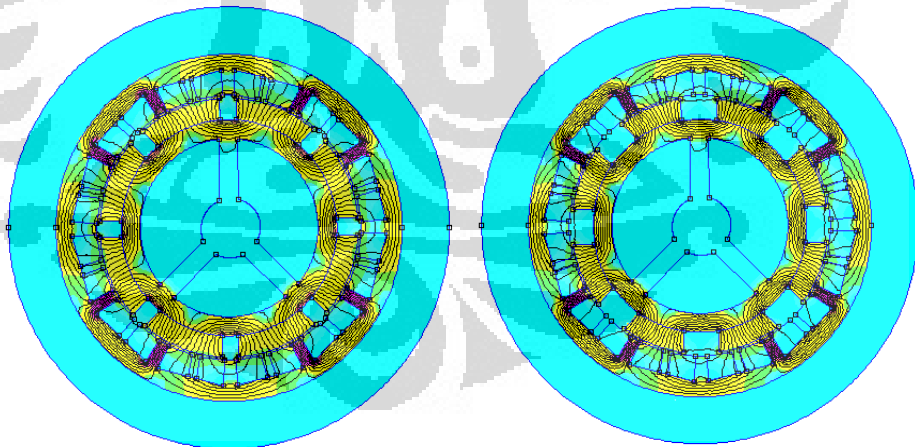
Jika dibandingkan dengan jumlah kutub sebelumnya, pada jumlah kutub 6 buah ini, nilai sebaran distribusi magnet turun jauh, berkisar antara 0,255 – 0,257 T.

4.2.4 Pengaruh Jumlah Kutub (8 buah kutub) dan Jarak Antar Magnet Permanen Terhadap Distribusi Sebaran Kerapatan Fluks (B)



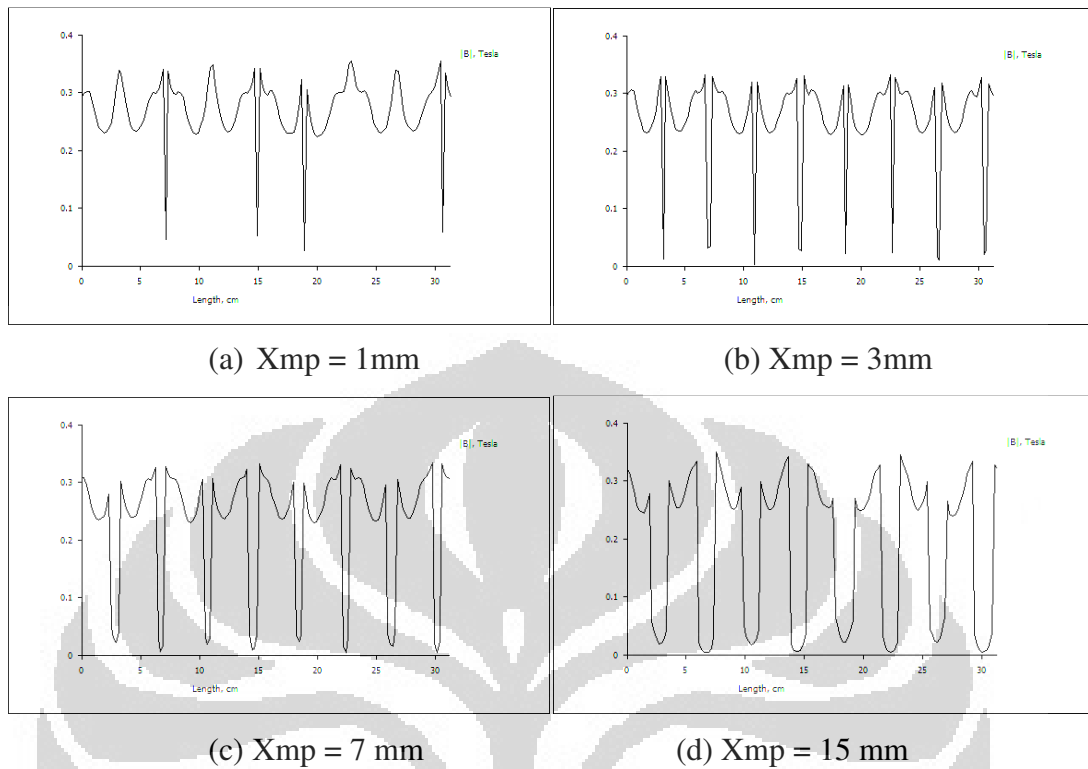
(a) $X_{mp} = 1\text{ mm}$

(b) $X_{mp} = 3\text{ mm}$



(c) $X_{mp} = 7\text{ mm}$

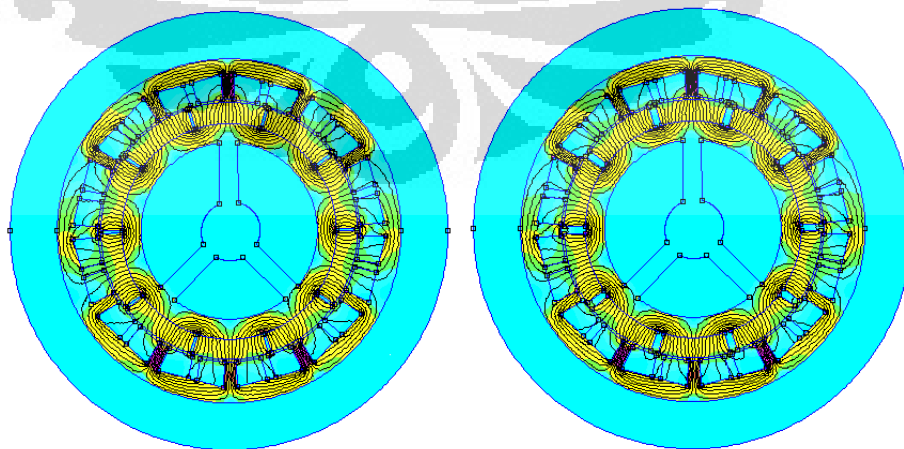
(d) $X_{mp} = 15\text{ mm}$



Gambar 4.5 Grafik dan Hasil Simulasi Kerapatan Fluks Dengan Jumlah Kutub 8 buah

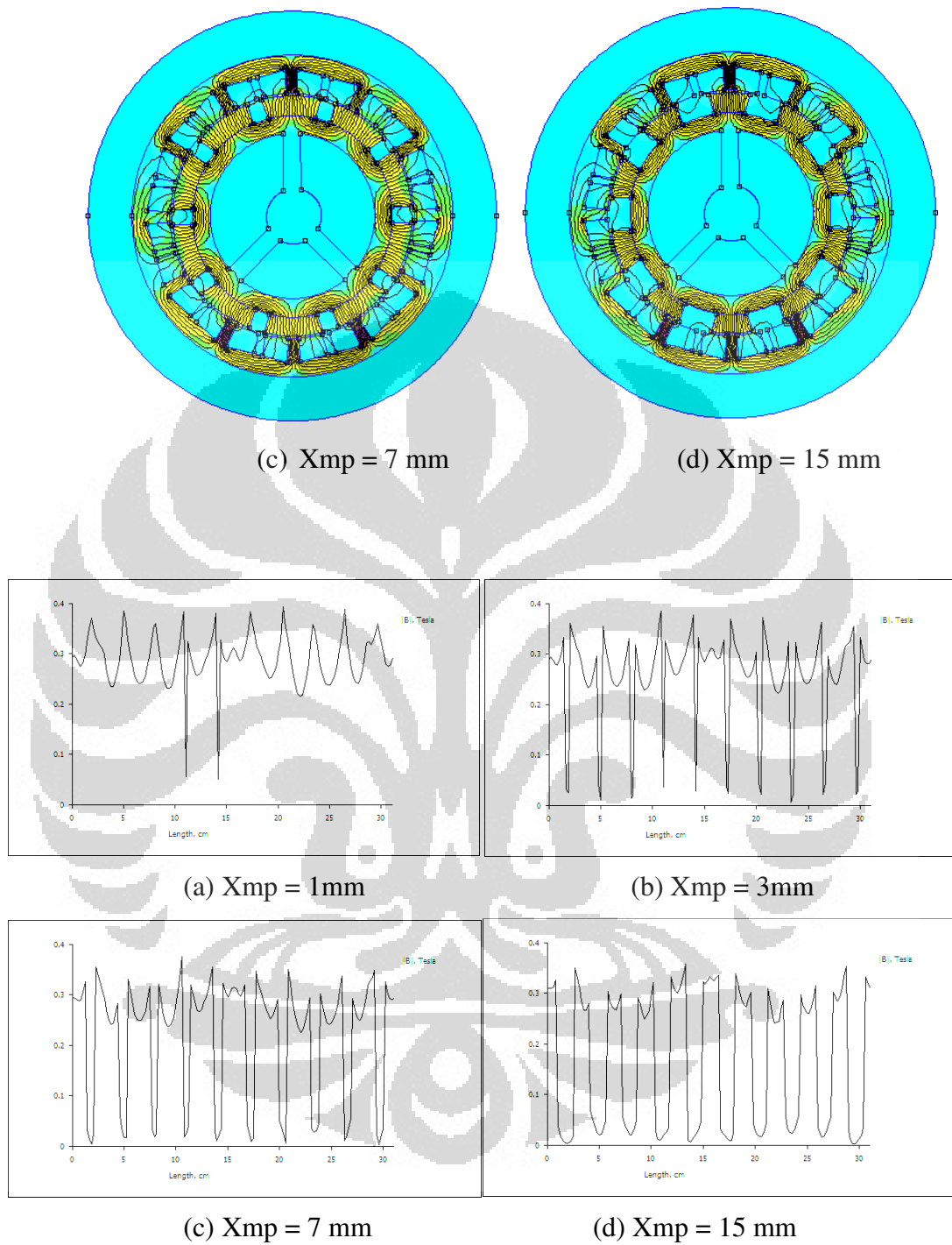
(a) $X_{mp}=1\text{mm}$, (b) $X_{mp}=3\text{mm}$, (c) $X_{mp}=7\text{mm}$ dan (d) $X_{mp}=15\text{mm}$

4.2.5 Pengaruh Jumlah Kutub (10 buah kutub) dan Jarak Antar Magnet Permanen Terhadap Distribusi Sebaran Kerapatan Fluks (B)



(a) $X_{mp} = 1\text{ mm}$

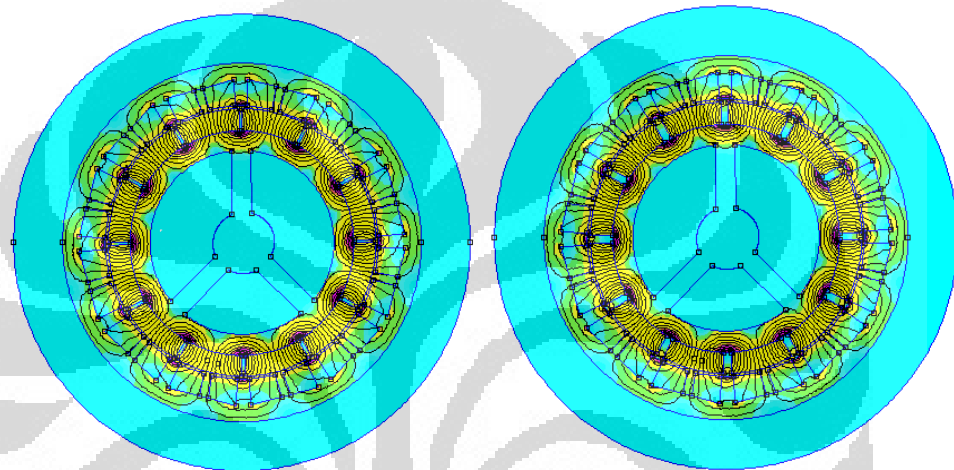
(b) $X_{mp} = 3\text{ mm}$



Gambar 4.6 Grafik dan Hasil Simulasi Kerapatan Fluks Dengan Jumlah Kutub 10 buah
 (a) $X_{mp}=1\text{mm}$, (b) $X_{mp}=3\text{mm}$, (c) $X_{mp}=7\text{mm}$ dan (d) $X_{mp}=15\text{mm}$

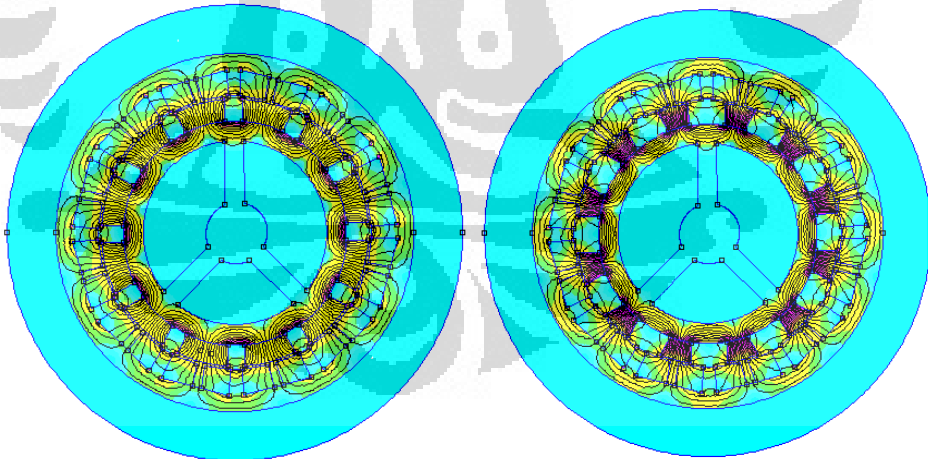
Pada grafik dan hasil simulasi 10 kutub ini, terlihat pada jarak 1mm sebaran distribusi fluks magnet paling merata disemua kutubnya dengan nilai fluks magnetnya mendekati nilai fluks magnet dari bahan keramik yaitu sebesar 0,45 T yang mendekati nilai ideal.

4.2.6 Pengaruh Jumlah Kutub (12 buah kutub) dan Jarak Antar Magnet Permanen Terhadap Distribusi Sebaran Kerapatan Fluks (B)



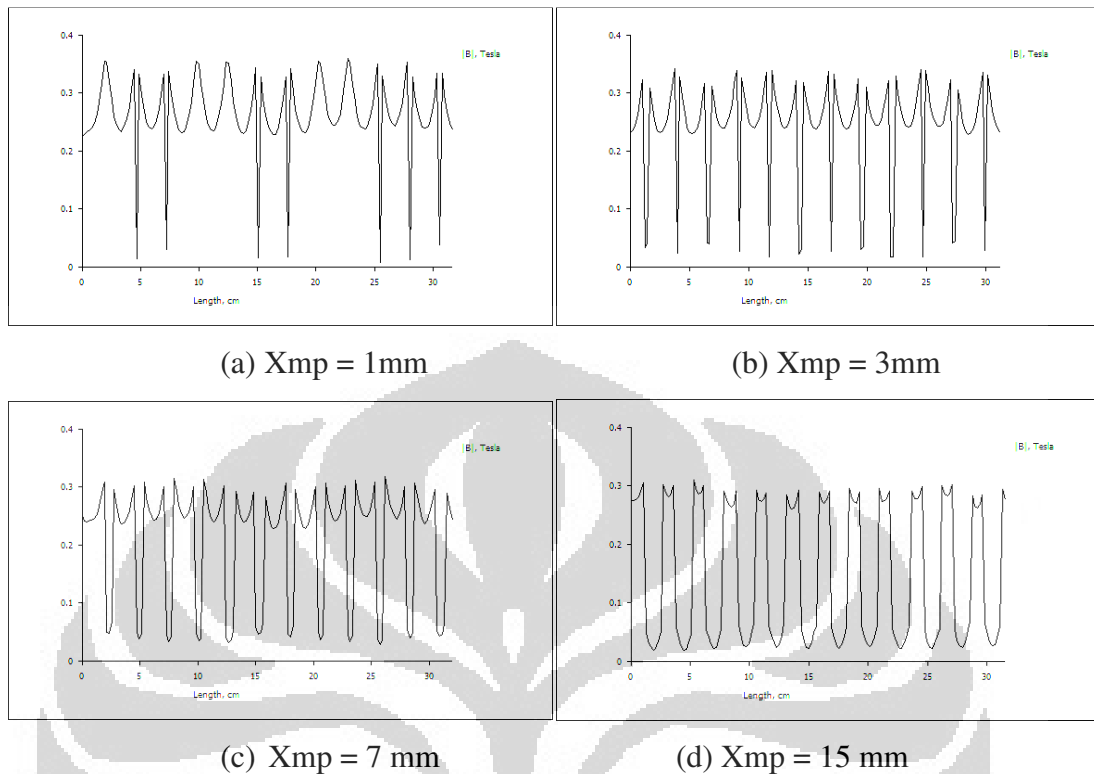
(a) $X_{mp} = 1\text{mm}$

(b) $X_{mp} = 3\text{mm}$



(c) $X_{mp} = 7\text{mm}$

(d) $X_{mp} = 15\text{mm}$



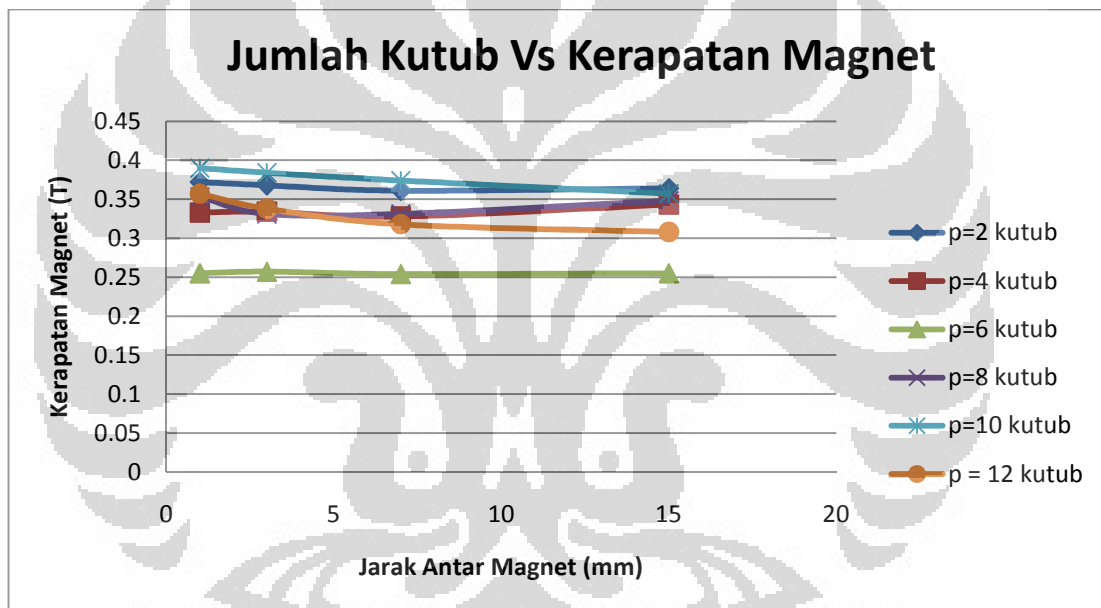
Gambar 4.7 Grafik dan Hasil Simulasi Kerapatan Fluks Dengan Jumlah Kutub 12 buah
(a) $X_{mp}=1\text{mm}$, (b) $X_{mp}=3\text{mm}$, (c) $X_{mp}=7\text{mm}$ dan (d) $X_{mp}=15\text{mm}$

Berdasarkan grafik dan hasil simulasi pada 12 kutub, nilai sebaran distribusi pada masing-masing jarak terlihat nilai fluks magnetnya sudah turun jika dibandingkan dengan nilai fluks magnet pada 10 kutub.

Setelah didapatkan hasil dari simulasi menggunakan perangkat lunak FEMM 4.2, maka selanjutnya akan dibandingkan hasil-hasil simulasi tersebut untuk menentukan pada jumlah kutub dan jarak berapakah akan didapat distribusi kerapatan fluks yang paling optimum. Berikut ini tabel dan grafik perbandingan untuk masing-masing variabel jumlah kutub dan jarak antar magnet permanen.

Tabel 4.1 Nilai sebaran distribusi kerapatan fluks dengan beberapa variabel jumlah kutub dan jarak antar magnet

p = 2 kutub		p = 4 kutub		p = 6 kutub		p = 8 kutub		p = 10 kutub		p = 12 kutub	
Xmp (mm)	B (T)	Xmp (mm)	B (T)	Xmp (mm)	B (T)	Xmp (mm)	B (T)	Xmp (mm)	B (T)	Xmp (mm)	B (T)
1	0.372	1	0.333	1	0.255	1	0.353	1	0.39	1	0.357
3	0.368	3	0.334	3	0.257	3	0.331	3	0.384	3	0.338
7	0.361	7	0.328	7	0.254	7	0.331	7	0.374	7	0.318
15	0.364	15	0.343	15	0.255	15	0.348	15	0.357	15	0.308



Gambar 4.8 Perbandingan nilai sebaran distribusi kerapatan fluks dengan beberapa variabel jumlah kutub dan jarak antar magnet

4.3 Analisa Data Hasil Simulasi

Dari tabel dan grafik diatas terlihat bahwa pada 10 kutub dengan jarak antar magnet sejauh 1mm, distribusi sebaran fluks magnet paling merata dibandingkan dengan kutub-kutub yang lain dengan variabel jarak yang berbeda-beda.

BAB V KESIMPULAN

Pada studi kasus simulasi optimasi jarak antar magnet permanen generator sinkron rotor sangkar ini bisa diambil kesimpulan :

1. Nilai kerapatan fluks akan cenderung lebih besar pada titik pertemuan antar kutub. Semakin dekat jarak pertemuan antar kutub magnet permanen, maka makin besar pula nilai kerapatan fluks untuk masing-masing jumlah kutub.
2. Pada studi kasus ini, jarak antar kutub yang optimum adalah ketika jumlah kutub sebanyak 10 buah dengan jarak antar magnet sejauh 1 mm yang memberikan luasan magnet sebesar $2,788 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ dengan B_{max} sebesar 0,212 Tesla, sehingga menghasilkan ϕ_{max} sebesar $5,912 \times 10^{-4} \text{ Wb}$, sebab distribusi sebaran medan magnet merata dibandingkan dengan jumlah kutub yang lainnya.

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 11 Juni 2012
- [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 11 Juni 2012.
- [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 Juni 2012.
- [10] *Ampere Circuital Law (with Maxwell correction) in Macroscopic equations*,
http://en.wikipedia.org/wiki/Maxwell%27s_equations diakses pada tanggal 10 Juni 2012.
- [11] *MMC Lecture7-Hard Magnetic Materials*,
<http://www.scribd.com/doc/55083001/MMC-Lecture7>
diakses pada tanggal 12 Juni 2012.

- [12] Sadeghierad, M., et al, "High Speed of Axial-Flux Permanent Magnet Generator with Coreless Stator". *Can J. Elect. Comput. Eng.*, Vol. 34, No. 1/2, Winter/Spring, (2009) : 63 – 67.
- [13] Aliansyah, Eduward. *Studi Analisa Daya Keluaran Generator Sinkron Tiga Phasa Dengan Rotor Silinder*, Medan: Universitas Sumatera Utara, 2008.
- [14] *Generator Listrik Sederhana*,
<http://tonytaufik.wordpress.com/generator-listrik-sederhana/>
diakses pada tanggal 12 Juni 2012
- [15] Del Ferraro, Luca, R. Terrigi, dan F.G Capponi. "Coil and Magnet Shape Optimization of an Ironless AFPM Machine by Means of 3D FEA". *Journal of IEEE*, (2007) : 927 – 931.
- [16] Nurhadi, Arif, Ir. Tejo Sukmadi, MT, Karnoto, ST. MT. "PERANCANGAN GENERATOR PUTARAN RENDAH MAGNET PERMANEN JENIS FE FLUKS AKSIAL". Januari 2012.