



UNIVERSITAS INDONESIA

**SIMULASI OPTIMASI KETEBALAN MAGNET PADA
ROTOR MAGNET PERMANEN FLUKS RADIAL**

SKRIPSI

**GUSTAF BAHTIAR
0906603335**

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



UNIVERSITAS INDONESIA

**SIMULASI OPTIMASI KETEBALAN MAGNET PADA
ROTOR MAGNET PERMANEN FLUKS RADIAL**

SKRIPSI

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

**GUSTAF BAHTIAR
0906603335**

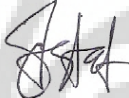
**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
DEPOK
JUNI 2012**

PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Gustaf bahtiar

NPM : 0906603335

Tanda Tangan : 

Tanggal : 28 Juni 2012

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Gustaf Bahtiar
NPM : 0906603335
Program Studi : Teknik Elektro
Judul Skripsi : **Simulasi Optimasi Ketebalan Magnet Pada Rotor
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 :

KATA PENGANTAR

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

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

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

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

Depok, 28 Juni 2012

Penulis

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

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

Nama : Gustaf Bahtiar
NPM : 0906603335
Program Studi : Teknik Elektro
Departemen : Teknik Elektro
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Skripsi

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

**“SIMULASI OPTIMASI KETEBALAN MAGNET PADA ROTOR
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 memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 28 Juni 2012

Yang menyatakan



(Gustaf bahtiar)

ABSTRAK

Nama : Gustaf Bahtiar
Program Studi : Teknik Elektro
Judul : **SIMULASI OPTIMASI KETEBALAN MAGNET
PADA ROTOR MAGNET PERMANEN FLUKS
RADIAL**

Motor induksi adalah jenis motor yang paling banyak digunakan baik di industry maupun untuk dipergunakan pada rumah tangga. Salah satu jenis motor induksi adalah motor induksi satu fasa. Jenis motor induksi satu fasa sangat banyak jenisnya salah satunya adalah motor induksi satu fasa jenis fluks radial..

Pada simulasi optimasi ketebalan magnet pada rotor magnet permanen fluks radial, diperlukan perancangan dengan menggunakan program bantu komputer, untuk mengetahui bahwa ketebalan magnet mempengaruhi distribusi kerapatan fluks.

Kata Kunci :

Rotor, rotor magnet permanen fluks radial, ketebalan kutub magnet permanen, jumlah magnet permanen

ABSTRACT

Name : Gustaf bahtiar
Study Program : Electrical Engineering
Title : **SIMULATION OPTIMIZATION OF MAGNETIC
THICKNESS PERMANENT MAGNET ROTOR RADIAL
FLUX**

Induction motor is a type motor is the most widely used both in industry and for uset at home. One type of induction motor is single phase induction motors. Ther are many type of single phase induction motor, one of them is the type of single phase induction motor rotor cage type.

On the simulation optimization of magnetic thickness permanent magnet rotor radial flux, required design using computer aids program, to know that the thickness of the magnetic flux density affects the distribution

Key Word :

Rotor, radial flux rotor, thickness permanent magnet, number of magnet permanent

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.....	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.....	7
2.1.2.2 Rotor/kumparan medan.....	8
2.1.2.3 Arus Penguat/Eksitasi.....	12
2.2 Prinsip Kerja Mesin Sinkron.....	14
2.2.1 Kecepatan Sinkron.....	15
2.2.2 Generator Sinkron Tanpa Beban.....	15
2.2.3 Generator Sinkron Berbeban.....	17
2.2.4 Reaksi Jangkar.....	17
2.2.4 Reaktansi Sinkron.....	19
BAB III GENERATOR SINKRON MAGNET PERMANEN FLUKS RADIAL.....	21
3.1 Generator Sinkron Magnet Permanen.....	21
3.2 Struktur dan Material Pada rotor MPFR.....	22
3.2.1 Stator pada Pada rotor MPFR.....	23
3.2.2 Rotor pada Pada rotor MPFR.....	23
3.2.3 Keramik Magnet Permanen pada Rotor.....	23
3.2.4 Desain Magnet.....	27
3.3 Kerapatan Fluks Magnet Maksimum.....	28
3.3.1 Fluks Magnetik Maksimum.....	29
BAB IV SIMULASI OPTIMASI KETEBALAN MAGNET PADA ROTOR MAGNET PERMANEN FLUKS RADIAL.....	30
4.1 Diagram Alir Simulasi Optimasi Ketebalan Magnet Pada Rotor Magnet Permanen Fluks Radial.....	30
4.2 Perancangan Rotor Magnet Permanen Fluks Radial.....	33

4.3 Pengaruh Ketebalan Magnet Terhadap Distribusi Kerapatan Fluks (B) Pada Rotor Magnet Permanen Fluks radial.....	33
4.3.1 Simulasi Optimasi Ketebalan Magnet Tebal 1mm Pada Setiap Kutub Terhadap Distribusi Kerapatan Fluks Magnet (B).....	34
4.3.2 Simulasi Optimasi Ketebalan Magnet Tebal 2mm Pada Setiap Kutub Terhadap Distribusi Kerapatan Fluks Magnet (B).....	36
4.3.3 Simulasi Optimasi Ketebalan Magnet Tebal 3mm Pada Setiap Kutub Terhadap Distribusi Kerapatan Fluks Magnet (B).....	39
4.3.4 Simulasi Optimasi Ketebalan Magnet Tebal 4mm Pada Setiap Kutub Terhadap Distribusi Kerapatan Fluks Magnet (B).....	42
4.3.5 Simulasi Optimasi Ketebalan Magnet Tebal 5mm Pada Setiap Kutub Terhadap Distribusi Kerapatan Fluks Magnet (B).....	44
4.3.6 Simulasi Optimasi Ketebalan Magnet Tebal 9mm Pada Setiap Kutub Terhadap Distribusi Kerapatan Fluks Magnet (B).....	47
BAB V KESIMPULAN.....	50
DAFTAR PUSTAKA.....	51

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Konstruksi dasar mesin sinkron.....	6
Gambar 2.2.(a) Laminasi stator, (b) Beberapa kumparan dalam slot.....	7
Gambar 2.3.Rangka stator beserta kumparan jangkarnya.....	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 2.8. Kurva karakteristik dan rangkaian ekivalen generator tanpa beban.....	16
Gambar 2.9. Rangkaian ekivalen dan diagram vektor generator berbeban....	17
Gambar 2.10. Pengaruh reaksi jangkar untuk berbagai macam jenis beban..	19
Gambar 2.11 Kurva pengujian tanpa beban dan hubung singkat generator sinkron.....	20
Gambar 3.1. Bentuk stator pada generator fluks radial.....	22
Gambar 3.2. Bentuk fluks radial.....	22
Gambar 3.3. Prototipe keramik magnet permanen.....	24
Gambar 3.4. Perbedaan kurva karakteristik histerisis magnet induksi dan magnet permanen.....	24
Gambar 3.5. Kurva karakteristik histerisis magnetik beberapa material magnet permanen.....	27
Gambar 3.6. Kurva B-H magnet permanen keramik.....	27
Gambar 3.7. Metode awal penempatan magnet permanen pada rotor.....	28
Gambar 4.1. Diagram Alir Optimasi Ketebalan Magnet.....	31
Gambar 4.2. Hasil Simulasi Mesh dengan ketebalan 4mm dan jumlah 4 kutub.....	33
Gambar 4.3. Distribusi Kerapatan Fluks Magnet Tebal 1mm pada (a) 2 kutub, (b) 4 kutub, (c) 6 kutub, (d) 8 kutub, (e) 10 kutub, (f) 12 kutub.....	35
Gambar 4.4. Grafik Distribusi Kerapatan Fluks Magnet Tebal 1mm pada (a) 2 kutub, (b) 4 kutub, (c) 6 kutub, (d) 8 kutub, (e) 10 kutub, (f) 12 kutub.....	36
Gambar 4.5. Distribusi Kerapatan Fluks Magnet Tebal 2mm pada (a) 2 kutub, (b) 4 kutub, (c) 6 kutub, (d) 8 kutub, (e) 10 kutub, (f) 12 kutub....	38
Gambar 4.6. Grafik Distribusi Kerapatan Fluks Magnet Tebal 2mm pada (a) 2 kutub, (b) 4 kutub, (c) 6 kutub, (d) 8 kutub, (e) 10 kutub, (f) 12 kutub.....	38
Gambar 4.7 Distribusi Kerapatan Fluks Magnet Tebal 3mm pada (a) 2 kutub, (b) 4 kutub, (c) 6 kutub, (d) 8 kutub, (e) 10 kutub, (f) 12 kutub.....	40
Gambar 4.8 Grafik Distribusi Kerapatan Fluks Magnet Tebal 3mm pada (a) 2 kutub, (b) 4 kutub, (c) 6 kutub, (d) 8 kutub, (e) 10 kutub, (f) 12 kutub.....	41
Gambar 4.9 Distribusi Kerapatan Fluks Magnet Tebal 4mm pada (a) 2 kutub, (b) 4 kutub, (c) 6 kutub, (d) 8 kutub, (e) 10 kutub (f) 12 kutub.....	43

Gambar 4.10 Grafik Distribusi Kerapatan Fluks Magnet Tebal 4mm pada (a) 2 kutub, (b) 4 kutub, (c) 6 kutub, (d) 8 kutub, (e) 10 kutub, (f) 12 kutub.....	44
Gambar 4.11 Distribusi Kerapatan Fluks Magnet Tebal 5mm pada (a) 2 kutub, (b) 4 kutub, (c) 6 kutub, (d) 8 kutub, (e) 10 kutub, (f) 12 kutub.....	45
Gambar 4.12 Grafik Distribusi Kerapatan Fluks Magnet Tebal 5mm pada (a) 2 kutub, (b) 4 kutub, (c) 6 kutub, (d) 8 kutub, (e) 10 kutub, (f) 12 kutub.....	46
Gambar 4.13 Distribusi Kerapatan Fluks Magnet Tebal 9mm pada (a) 2 kutub, (b) 4 kutub, (c) 6 kutub, (d) 8 kutub (e) 10 kutub, (f) 12 kutub.....	48
Gambar 4.14 Grafik Distribusi Kerapatan Fluks Magnet Tebal 9mm pada (a) 2 kutub, (b) 4 kutub, (c) 6 kutub, (d) 8 kutub, (e) 10 kutub, (f) 12 kutub.....	48



DAFTAR TABEL

Tabel 3.1. Spesifikasi Beberapa Material Magnet Permanen.....	26
Tabel 4.1. Parameter desain Rotor Magnet Permanen Fluks Radial.....	32



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Perkembangan teknologi yang pesat mendorong penggunaan energi dalam jumlah yang besar. Hal ini mengakibatkan semakin menipisnya cadangan bahan bakar fosil sebagai sumber energi utama. Selain itu penggunaan bahan bakar fosil tersebut juga mengakibatkan pencemaran lingkungan. Permasalahan ini juga berdampak pada bidang energi listrik. Untuk itu diperlukan energi alternatif sebagai penghasil energi listrik. Diantaranya adalah pemanfaatan energi angin dan air, dimana dua sumber energi ini ramah lingkungan, dan bisa diperbaharui. Dari kedua sumber energi tersebut membutuhkan perangkat generator untuk menghasilkan listrik.

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

Pada penulisan skripsi ini, penulis melakukan studi desain generator magnet permanen, terutama studi desain untuk bagian rotornya sehingga mampu menghasilkan persebaran fluks yang optimal. Desain generator magnet permanen yang dibuat adalah generator sederhana yang dapat digunakan dalam skala rumah tangga, dengan menggunakan material - material yang relatif terjangkau dan mudah dicari.

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 Pada Rotor Magnet Permanen Fluks Radial (MPFR). Adapun tujuan lainnya adalah sebagai studi desain rekayasa rotor dan studi optimasi ketebalan magnet dengan berbagai jumlah kutub rotor. Selain itu, skripsi ini juga ditulis untuk memenuhi persyaratan kelulusan untuk menjadi sarjana teknik.

1.3 Rumusan Masalah

Dalam Simulasi Optimasi Ketebalan Magnet Pada Rotor Magnet Permanen Fluks Radial ini akan dibahas tentang hal-hal sebagai berikut :

1. Definisi dan prinsip kerja pada rotor magnet permanen fluks Radial
2. Apa saja bagian – bagian dan material penyusun rotor magnet permanen fluks radial ?
3. Parameter apa yang harus diperhatikan dalam mendesain rotor magnet permanen fluks radial ?
4. Bagaimana menentukan sebaran kerapatan fluks magnet yang optimum berdasarkan ketebalan magnet dan jumlah kutub magnet

1.4 Batasan Masalah

Dalam Simulasi Optimasi Ketebalan Magnet Pada Rotor Magnet Permanen Fluks Radial ini penulis hanya membahas tentang hal-hal sebagai berikut :

1. Tipe generator yang didesain adalah pada rotor magnet permanen fluks radial dengan jumlah kutub sebanyak 2, 4, 6, 8, 10, 12 dengan ketebalan kutub 1 mm, 2 mm, 3 mm, 4 mm, 5 mm, dan 9 mm.
2. Dalam penulisan ini, penulis tidak membahas stator hanya mengembangkan desain rotor.
3. Desain generator berdasarkan desain Rudyana ^[12] acuan ukuran rotor terhadap Chaithongsuk ^[8]

4. Jarak sekitar antara kutub dan lebar celah udara konstan di setiap desain rotor.
5. Desain sistem generator dalam keadaan statis.
6. Material magnet permanent yang digunakan adalah keramik-5

1.5 Metodologi Penulisan

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

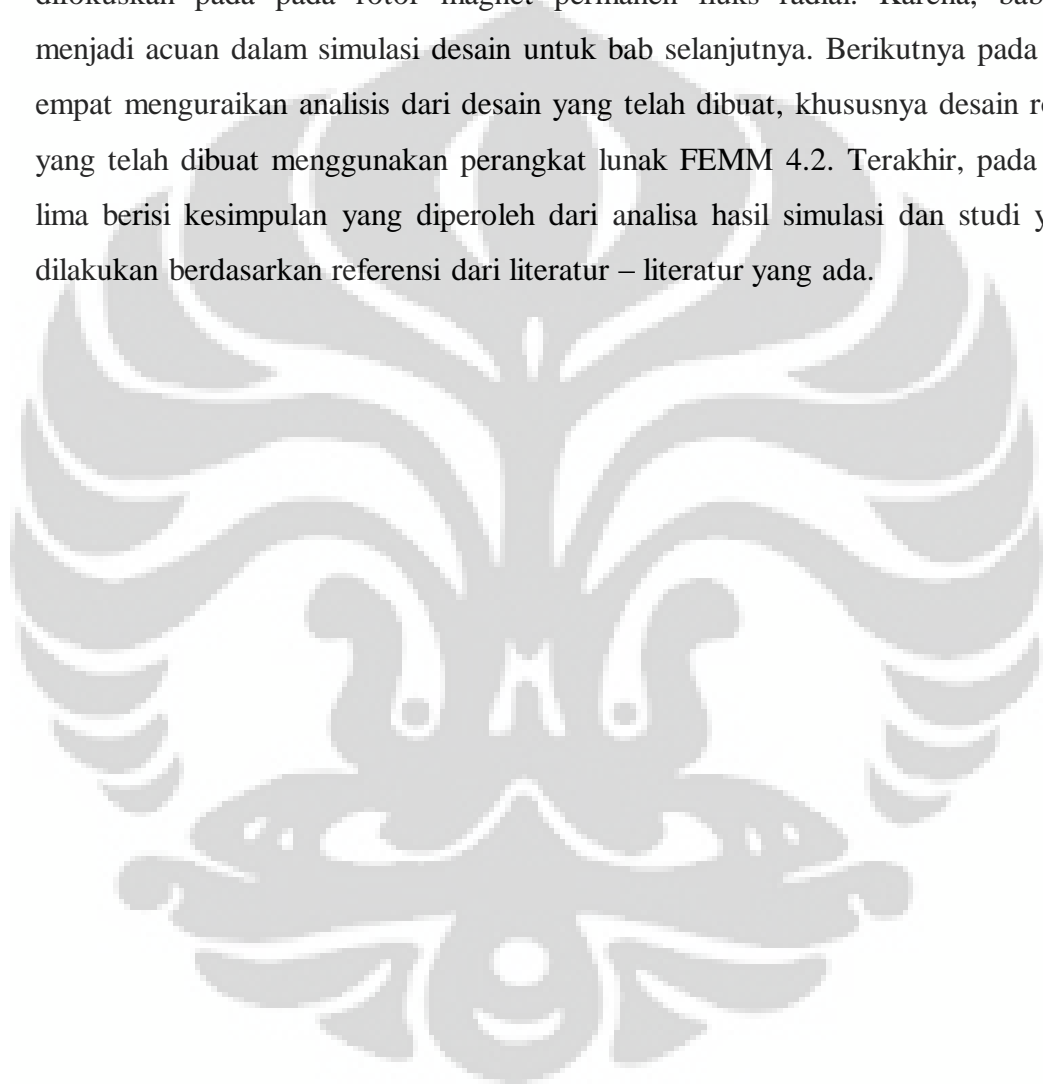
1. Studi Literatur
Membaca literatur berupa buku - buku, karya ilmiah, dan *browsing* internet untuk mendapatkan data - data yang dibutuhkan dalam pembuatan alat dan sebagai dasar penulisan dan penyusunan laporan skripsi.
2. Perencanaan dan Pembuatan desain
Melakukan perencanaan desain rangkaian, desain struktur dan dimensi rotor mengambil pada acuan dari desain Chaithongsuk^[8] dan Rudyana^[12].
3. Simulasi
Simulasi berbasis komputer dengan menggunakan perangkat lunak FEMM 4.2.
4. Analisa hasil simulasi
Melakukan analisa hasil simulasi secara grafis dari data-data yang didapatkan dan membandingkan data-data untuk mendapatkan sebaran fluks yang optimal.
5. Membuat Kesimpulan
Membuat kesimpulan ketebalan magnet optimal yang didapatkan dari hasil simulasi.

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 pada rotor. Pada bab berikutnya yaitu bab tiga, pembahasan difokuskan pada pada rotor magnet permanen fluks radial. 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

Pada rotor (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 fasa
- Mesin Sinkron 1 fasa

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

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

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 untuk 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]

2.1.2 Kontruksi Dasar Mesin Sinkron

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

1. Stator

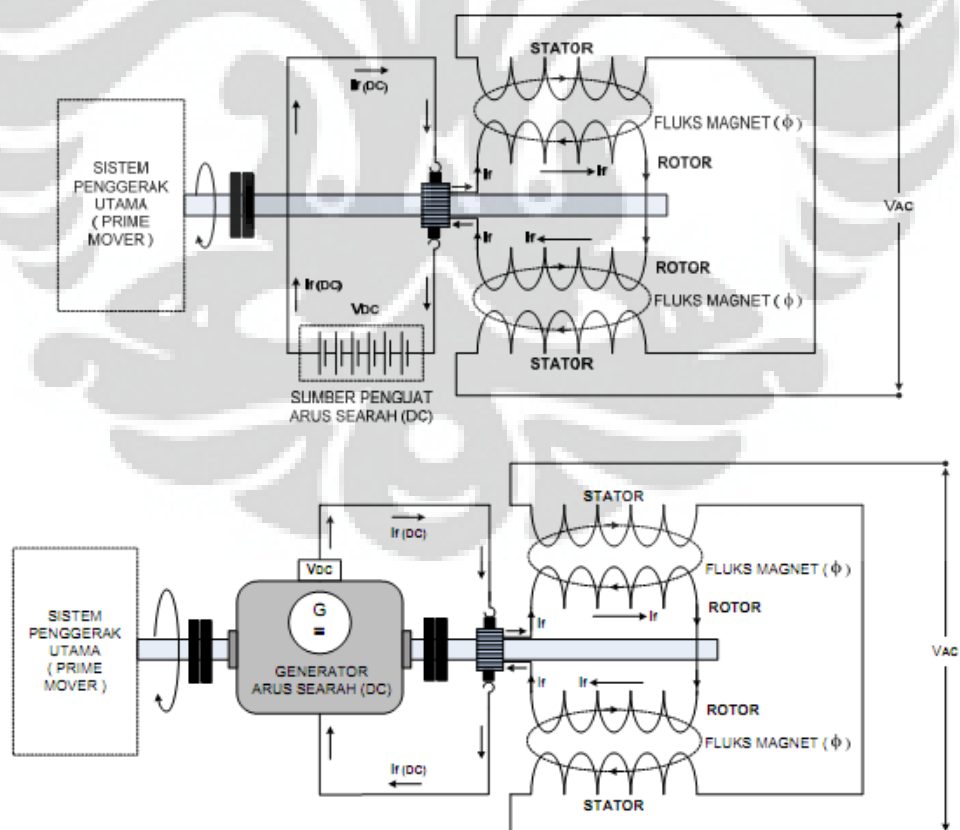
Disebut sebagai kumparan jangkar (angker) yang berfungsi menghasilkan tegangan dan arus bolak-balik (*Alternating Current*).

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).

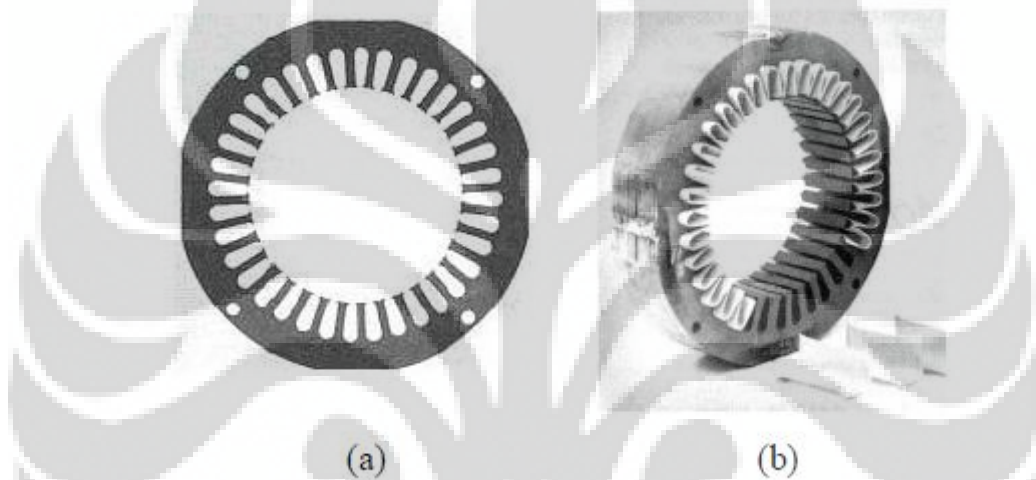


Gambar 2.1. Kontruksi dasar mesin sinkron ^[1]

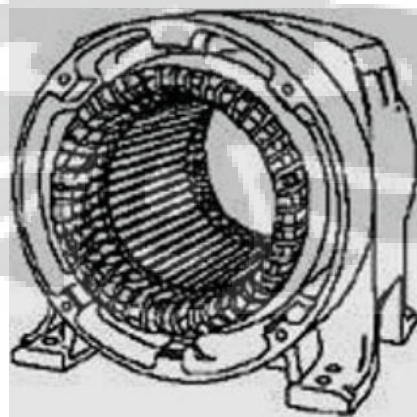
2.1.2.1 Stator

Stator adalah bagian utama dari generator yang diam, yang berfungsi sebagai tempat untuk menerima induksi magnet dari rotor. Stator merupakan suatu kerangka yang dilaminasi yang biasanya terbuat dari besi tuang atau *aluminium alloy*. Stator mempunyai bentuk alur yang tirus (*tapered*) dengan gigi yang sejajar (*parallel sided*).

Dengan terdiri dari sejumlah slot yang nantinya akan menempatkan belitan stator. Slot-slot tersebut ditempatkan pada suatu rangka besi. Rangka tersebut mempunyai sirip-sirip besi yang akan berfungsi sebagai pendingin motor.



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 rotor, 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.

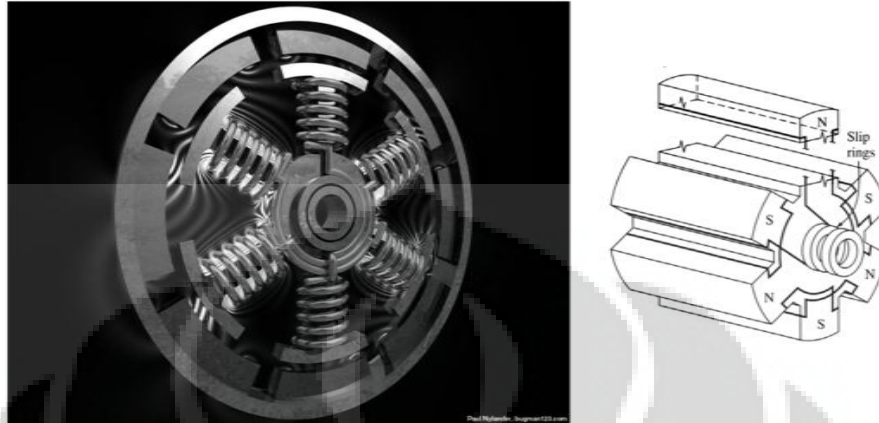
Rotor kutub sepatu umumnya digunakan pada rotor dengan kecepatan putar rendah-sedang (120-400rpm) dan berkutub banyak (≥ 4). Oleh sebab itu pada rotor tipe ini biasanya dikopel dengan mesin diesel atau turbin air pada sistem pembangkit listrik.

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

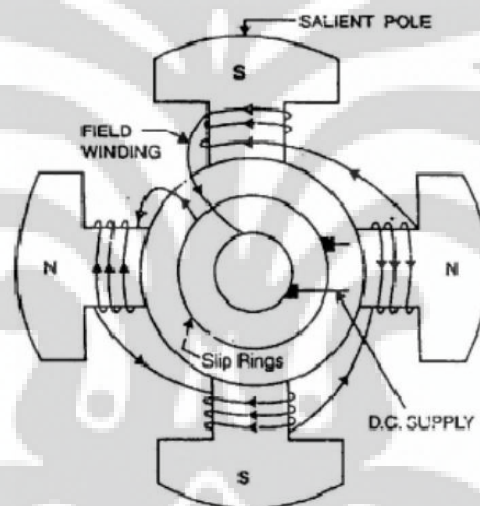
Rotor kutub sepatu cocok digunakan untuk putaran rendah-sedang karena :

- 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 pinggirannya seperti halnya stator. Kumputan medan pada rotor kutub silinder diletakkan di dalam slot ini. Disekitar daerah pusat kutub umumnya tidak mempunyai slot.

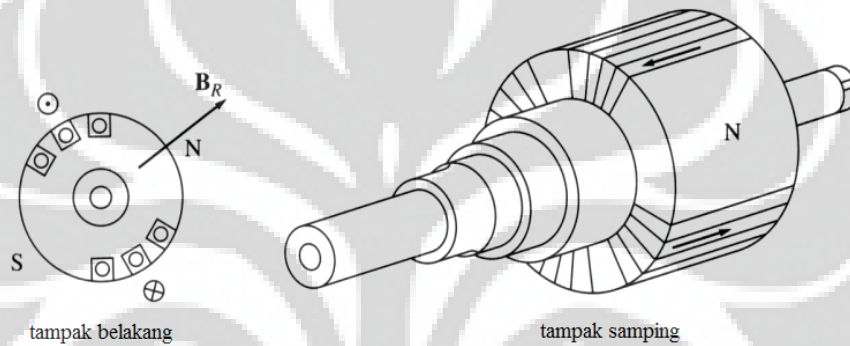
Rotor kutub silinder biasanya digunakan pada generator putaran tinggi (1500 atau 3000rpm) dan berkutub sedikit (≤ 4). Rotor kutub

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.

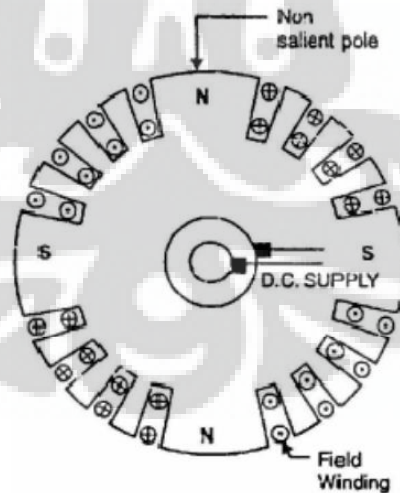
Rotor kutub silinder cocok digunakan pada putaran tinggi karena :

- 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 pada rotor, 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. Pada rotor dan generator arus searah tersebut terkopel dalam satu poros, sehingga putaran generator arus searah sama dengan putaran pada rotor.

Tegangan yang dihasilkan oleh generator arus searah ini diberikan ke belitan rotor pada rotor 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 pada rotor.

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 pada rotor.
- 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 pada rotor. Sistem eksitasi statis atau *self excitation* tidak memerlukan generator tambahan sebagai sumber eksitasi pada rotor. 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 rotor, maka sistem eksitasi statis dilengkapi dengan *field flashing*. Hal ini dibutuhkan karena pada rotor 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 pada rotor disearahkan oleh penyearah berupa dioda yang disebut *rotating rectifier*, yang diletakkan pada bagian poros ataupun pada bagian dalam dari rotor pada rotor, sehingga *rotating rectifier* tersebut ikut berputar sesuai dengan putaran rotor.

Untuk menghindari adanya kontak geser pada bagian rotor pada rotor, 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.

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]

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

2.2.2 Generator Sinkron Tanpa Beban

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$E_{eff} = Kn\phi \tag{2.3}$$

Dimana :

E = Gaya gerak listrik (volt)

N = Jumlah lilitan

K = Konstanta

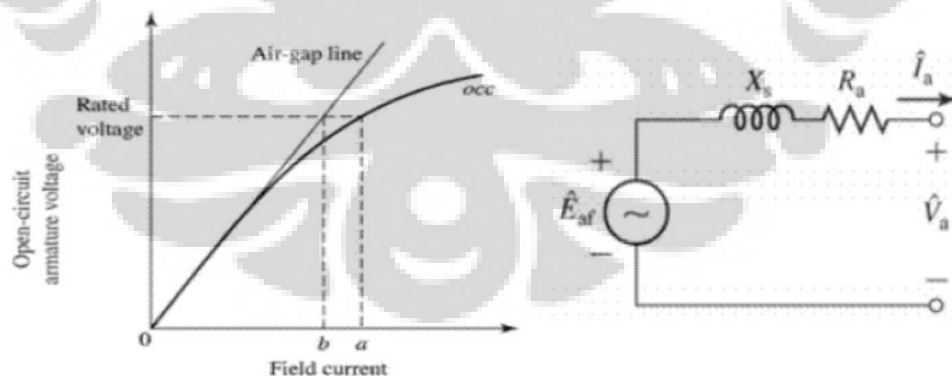
n = Putaran sinkron (rpm)

ϕ = Fluks magnetik (Weber)

F = Frekuensi sinkron (Hz)

$\frac{d\phi}{dt}$ = Laju fluks magnet (W/s) ^[13]

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



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

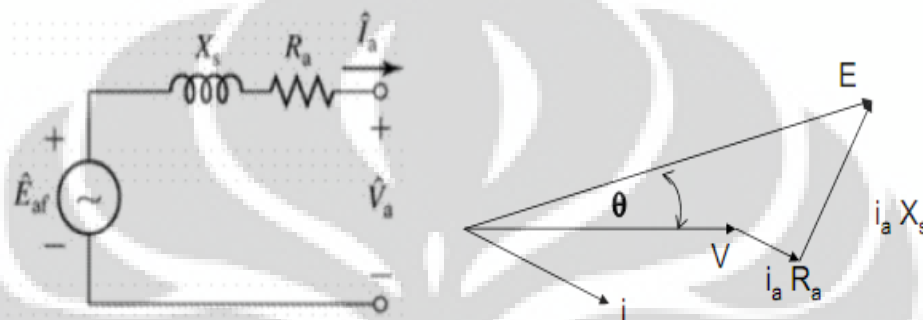
$b - a$ = Tahanan arus beban pada daerah jenuh (*saturated*)

R_a = Resistansi jangkar (stator)

X_s = Reaktansi sinkron ^[1]

2.2.3 Generator Sinkron Berbeban

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



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

Persamaan tegangan dari model rangkaian pada Gambar 2.9. adalah :

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

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]

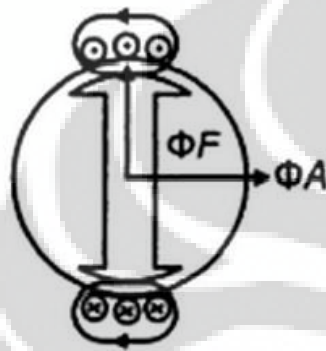
2.2.4 Reaksi Jangkar

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).

$$\phi_R = \phi_A + \phi_F ; \text{jumlah secara vektor}$$

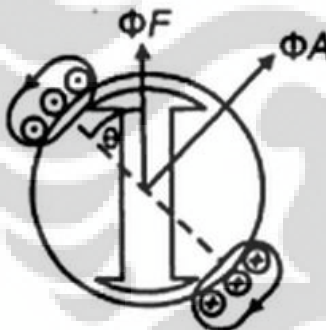
Pengaruh yang ditimbulkan dapat berupa distorsi, penguatan (*magnetizing*) dan pelemahan (*demagnetizing*) fluks arus medan. Adanya interaksi ini dikenal sebagai reaksi jangkar. Pengaruh reaksi jangkar untuk berbagai macam jenis beban adalah sebagai berikut :



Arus jangkar (I) sefasa dengan GGL (E)

Jenis beban : tahanan (resistif)

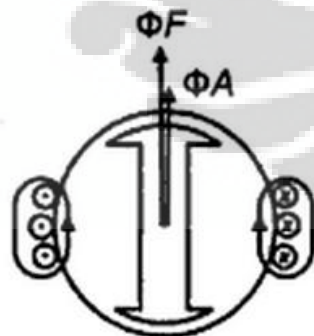
ϕ_A tegak lurus terhadap ϕ_F , pengaruh reaksi jangkar terhadap fluks medan hanya sebatas mendistorsi saja tanpa mempengaruhi kekuatannya (*cross magnetizing*)



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

Jenis beban : kapasitif

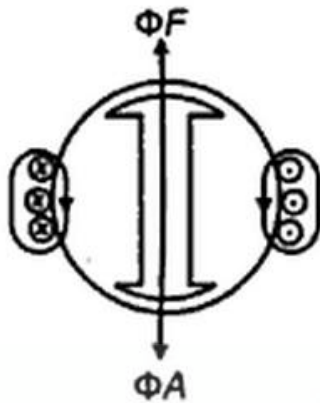
ϕ_A terbelakang dengan sudut ($90^\circ - \theta$)



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

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

ϕ_A memperkuat ϕ_F , terjadi pengaruh penguatan



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

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

ϕ_A memperlemah ϕ_F , terjadi pengaruh pelemahan

Gambar 2.10. Pengaruh reaksi jangkar untuk berbagai macam jenis beban ^[11]

Untuk beban tidak murni (induktif/kapasitif), pengaruh reaksi jangkar akan menjadi sebagian dikuatkan dan sebagian dilemahkan. Saat beban kapasitif, maka reaksi jangkar akan sebagian terdistorsi dan sebagian dikuatkan. Sementara saat beban induktif, maka reaksi jangkar akan sebagian terdistorsi dan sebagian dilemahkan. Namun pada prakteknya beban umumnya induktif. ^{[13][11]}

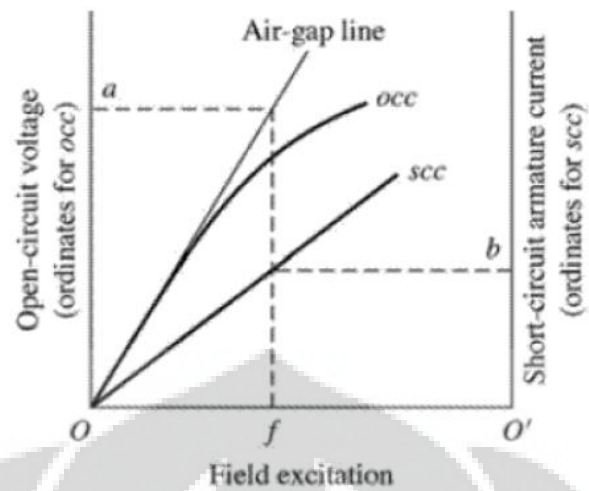
2.2.5 Reaktansi Sinkron

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][11]}



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][14]

BAB III

GENERATOR SINGKRON MAGNET PERMANEN FLUKS RADIAL

3.1. Generator Sinkron Magnet Permanen

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

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

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

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

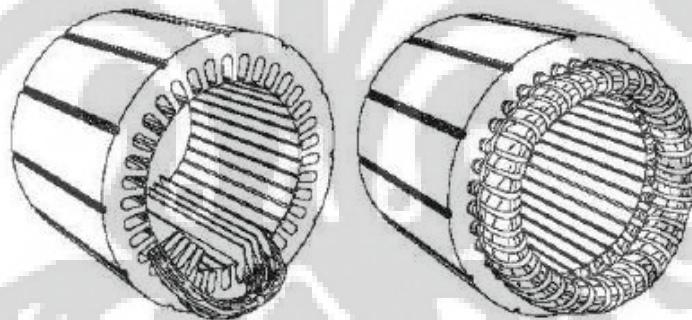
Secara garis besar, pada rotor magnet permanen dapat dibagi menjadi dua jenis bila dilihat dari fluks magnet yang dihasilkan, yaitu :

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

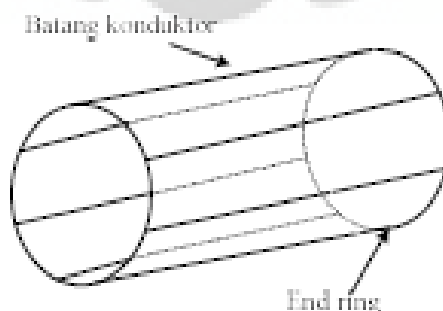
Pada tulisan ini, hanya akan dibahas mengenai generator magnet permanen dengan fluks radial yang memiliki rotor dan stator berbentuk silindris.

3.2 Struktur dan Material Pada rotor MPFR

Generator terdiri dari dua bagian utama yaitu rotor dan stator. Pada pembuatan tugas ini dilakukan perancangan terhadap rotor, dimana stator merujuk kepada desain yang sudah ada ^[8]. Pada generator ini rotor berfungsi untuk menghasilkan fluks magnet dan stator berfungsi sebagai penghasil tegangan keluaran pada generator.



Gambar 3.1 Bentuk Stator pada generator fluks radial



Gambar 3.2 Bentuk fluks radial ^[5]

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. ^[5]

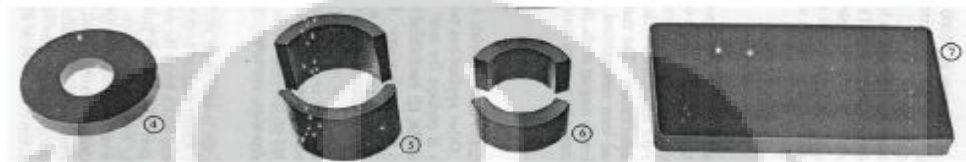
3.2.2 Rotor

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 berjenis keramik.

Yoke merupakan penampang magnet permanen dan sebagai pelindung keseluruhan mesin.

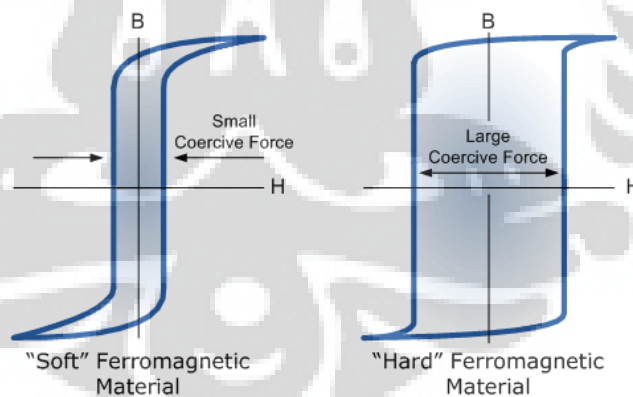
3.2.3 Keramik magnet Permanen pada Rotor

Keramik magnet merupakan salah satu bahan magnet permanen yang tersusun dari senyawa anorganik bukan logam yang pengolahannya melalui perlakuan dengan temperature 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. ^[3]



Gambar 3.3 Prototype keramik magnet permanen

Seperti telah diketahui, penggunaan magnet permanen pada pada rotor 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 3.4 Perbedaan kurva histerisis magnet induksi dan magnet permanen [6]

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 3.4. 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 :

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H \quad [11] \quad (3.1)$$

Dimana :

B = Kerapatan fluks magnetik (T)

μ_0 = permeabilitas udara ($4\pi \times 10^{-7}$)

μ_r = permeabilitas relatif

H = Intensitas medan magnet (A/m)

Intensitas medan magnet itu sendiri besarnya dipengaruhi oleh kuat arus (I) dan jarak sekitarnya (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 sekitar magnet (A/m) ^[10]

Dari persamaan (3.2) nampak bahwa jarak sekitar 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)

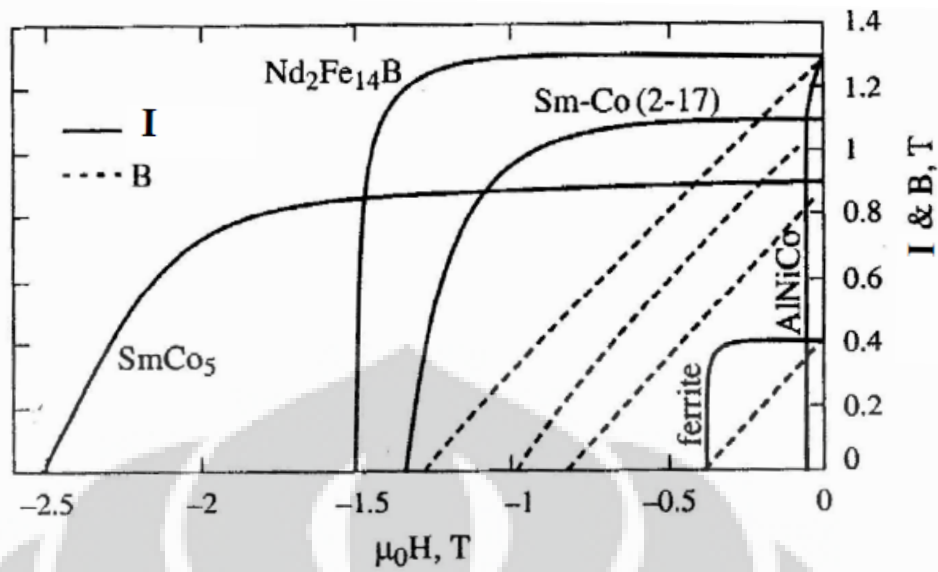
Berikut adalah tabel spesifikasi beberapa bahan magnet permanen :

Tabel 3.1. Spesifikasi Beberapa Material Magnet Permanen ^[9]

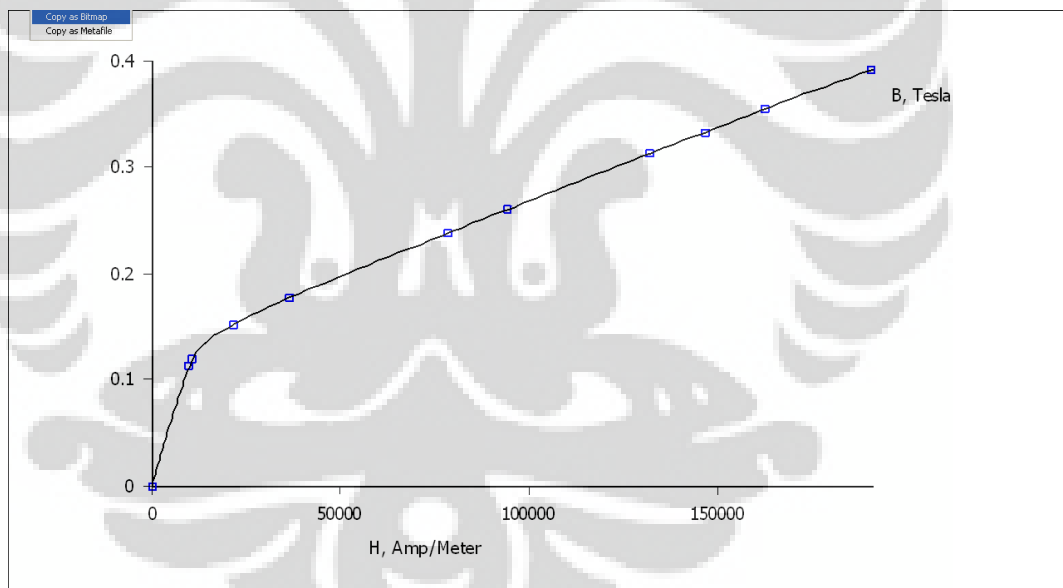
Material Magnet	Energi Maksimum <i>Bh_{max} (MGOe)</i>	Kepadatan Fluks Magnet <i>Br(G)</i>	Daya Tarik <i>H_c(Koe)</i>	Temperatur Kerja °C
Keramik 5	3.4	3950	2400	400
Alnico 5	3.9	10900	620	540
Alnico cetak 8	5.3	8200	1650	540
Samarium kobalt 20 (1.5)	20	9000	8000	260
Samarium kobalt 28 (2.17)	28	10500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

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

Sedangkan kurva histerisis beberapa bahan magnet dapat dilihat pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5. Kurva karakteristik histerisis magnetik beberapa material magnet permanen ^[7]



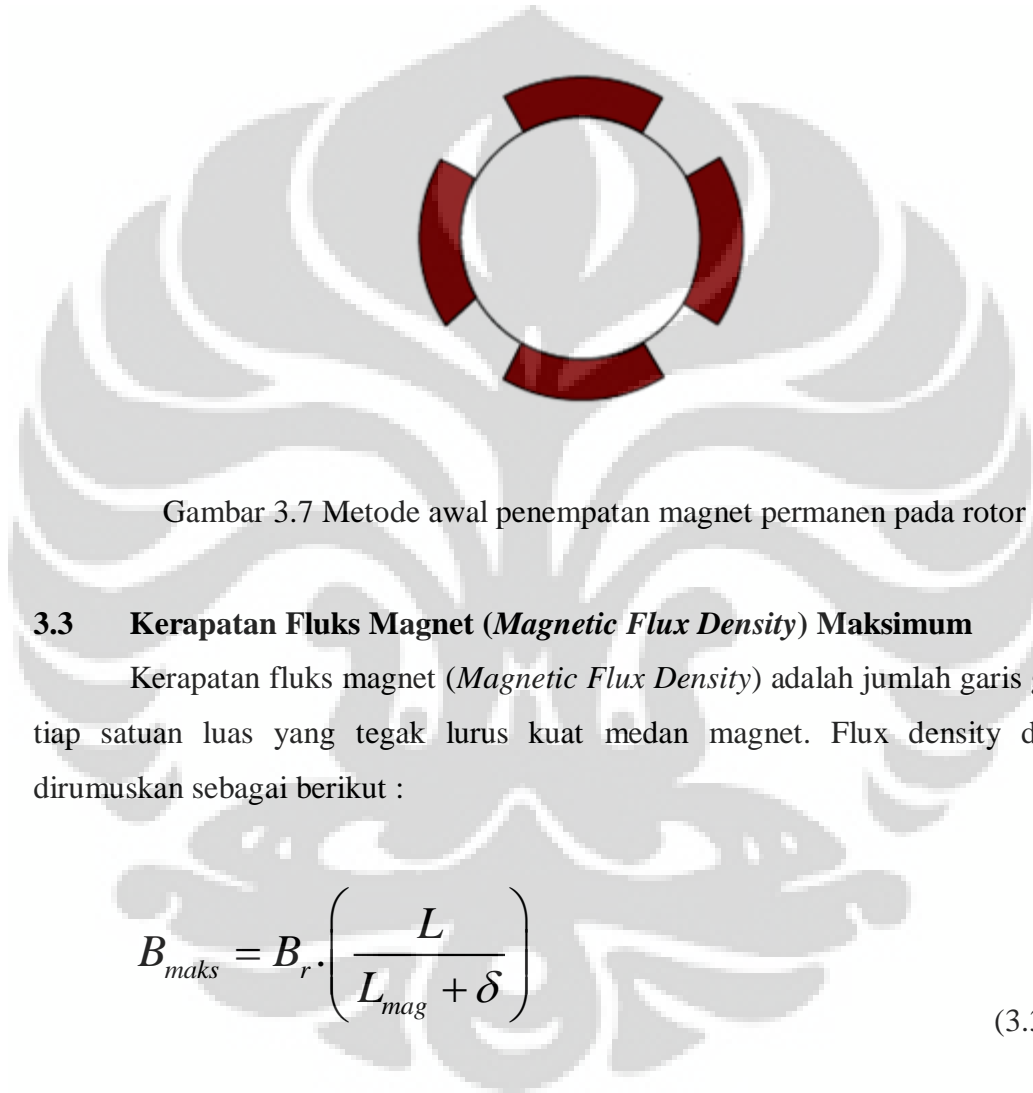
Gambar 3.6 Kurva B-H magnet permanen keramik

3.2.4 Desain Magnet

Desain rotor pada GMPFR memiliki 2 (dua) jenis yaitu *surface mounted* dan *surface inset* seperti yang terlihat pada gambar 3.7 *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 karena strukturnya relatif sederhana untuk diproduksi dan dirakit. ^[10]



Gambar 3.7 Metode awal penempatan magnet permanen pada rotor ^[8]

3.3 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. Flux density dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$B_{maks} = B_r \cdot \left(\frac{L}{L_{mag} + \delta} \right) \quad (3.3)$$

dimana,

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

B_r = Kerapatan fluks magnet (*Tesla*)

L_{mag} = Tebal magnet (*meter*)

δ = Jarak sekitar rotor dan stator (*meter*)

3.3.1 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 (*meter²*) ^[11]

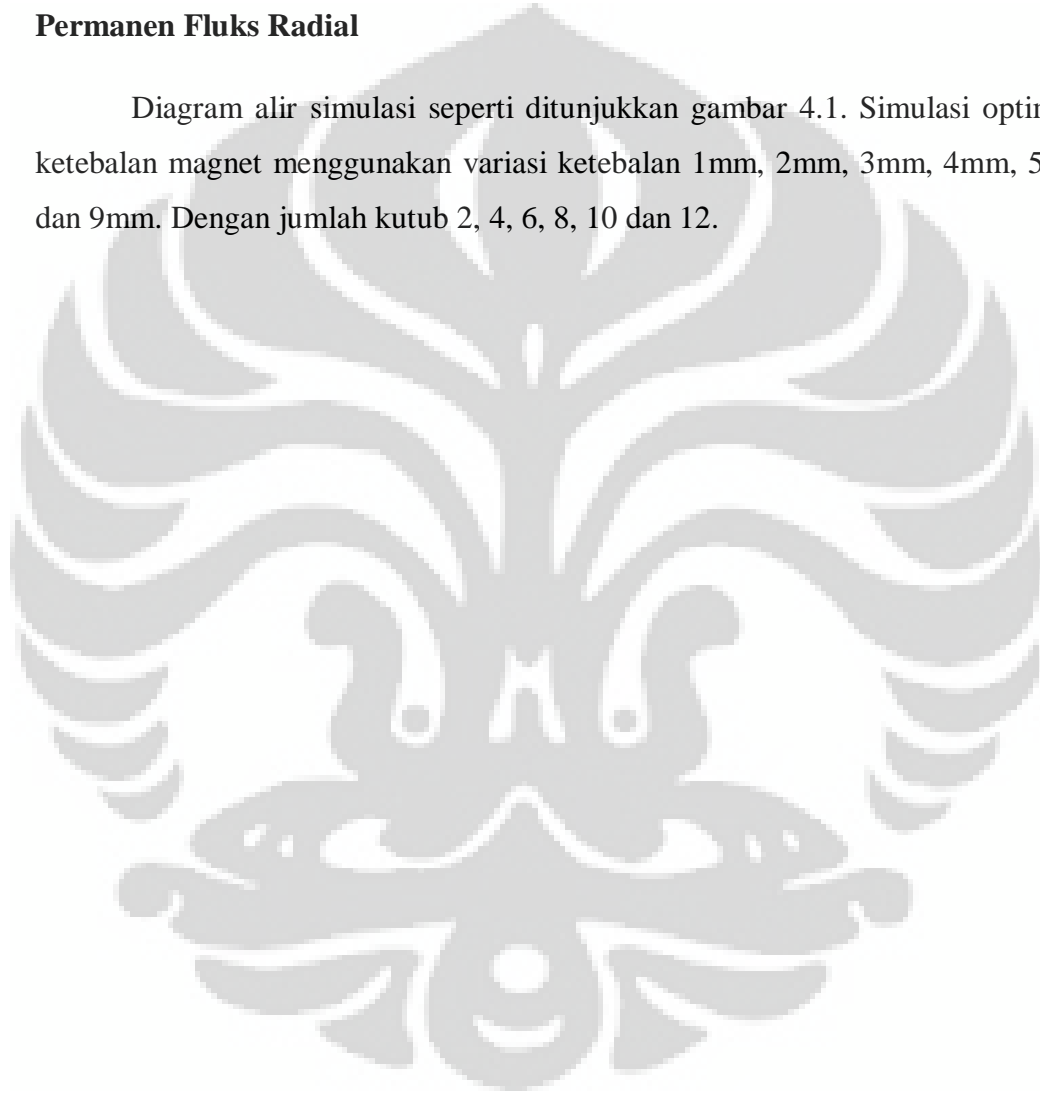


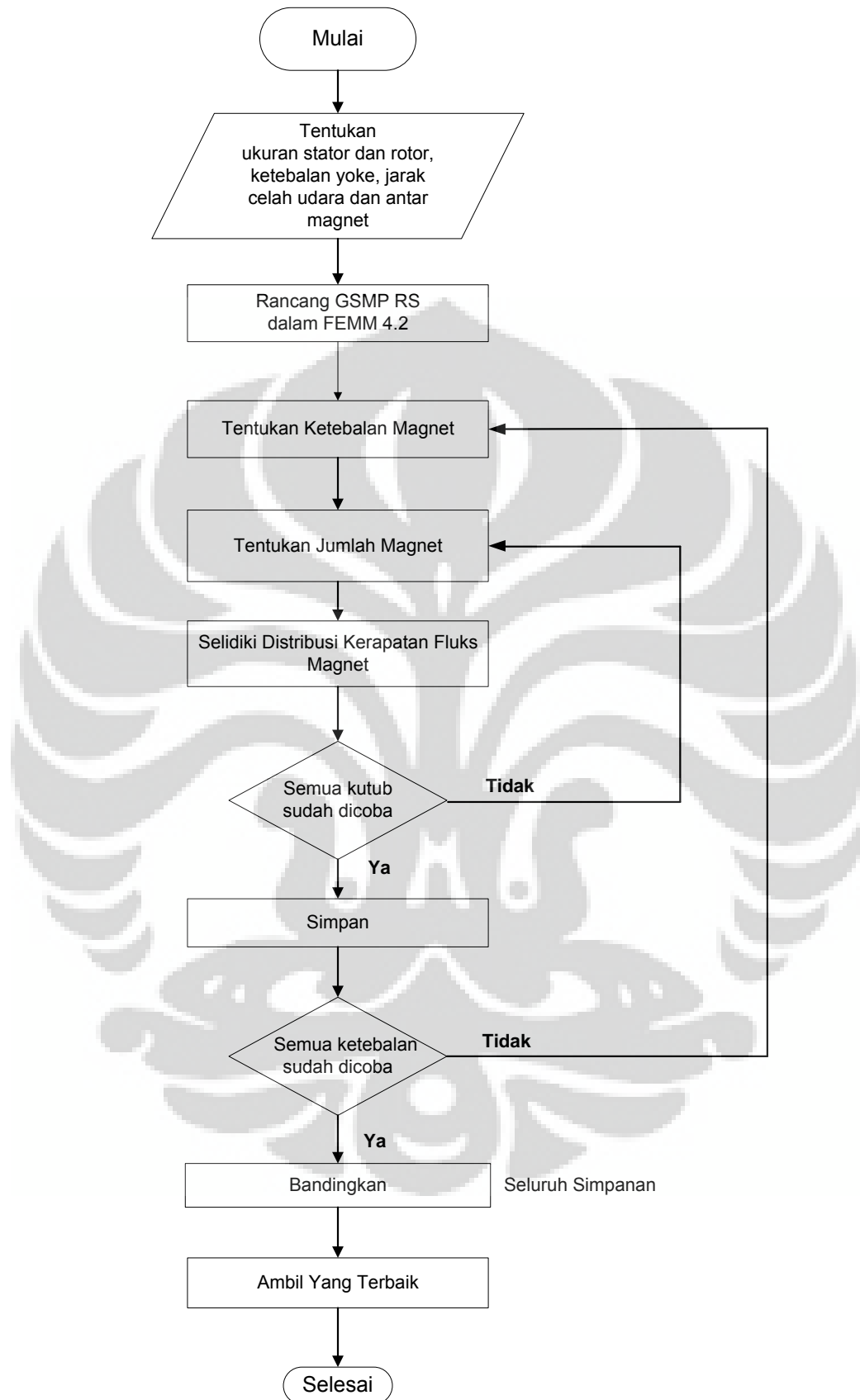
BAB IV

SIMULASI OPTIMASI KETEBALAN MAGNET PADA ROTOR MAGNET PERMANEN FLUKS RADIAL

4.1 Diagram Alir Simulasi Optimasi Ketebalan Magnet Pada Rotor Magnet Permanen Fluks Radial

Diagram alir simulasi seperti ditunjukkan gambar 4.1. Simulasi optimasi ketebalan magnet menggunakan variasi ketebalan 1mm, 2mm, 3mm, 4mm, 5mm dan 9mm. Dengan jumlah kutub 2, 4, 6, 8, 10 dan 12.





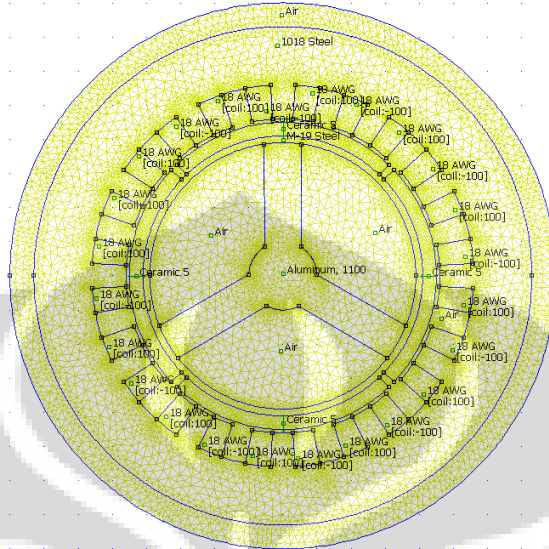
Gambar 4.1 Diagram Alir Optimasi Ketebalan Magnet

Sebelum merancang dalam FEMM 4.2, terlebih dahulu menentukan ukuran diameter stator dan rotor, ketebalan yoke, jarak sekitar antara kutub, dan jarak sekitar celah udara antara magnet dengan stator. Setelah mendapatkan ukuran tersebut, dirancang ke FEMM 4.2. Dalam optimasi ketebalan magnet, jumlah kutub dimulai dari 2 kutub dengan ketebalan 1mm. Disimulasikan dan dianalisa distribusi kerapatan fluks untuk ketebalan 1mm pada semua kutub. Kemudian, simpan yang distribusi kerapatan fluksnya optimal. Setelah dapat data dari ketebalan 1mm untuk semua kutub, simulasi dan analisa pada ketebalan magnet yang lain untuk semua kutub. Simpan yang distribusi kerapatan fluksnya optimal di setiap ketebalan dan tentukan pada ketebalan dan jumlah kutub berapa yang paling optimal.

Tabel 4.1 Parameter desain Rotor Magnet Permanen Fluks Radial

Desain	Parameter konstan	Parameter berubah
Diameter stator	146 mm	
Diameter rotor	90 mm	
Jumlah slot	12 slot	
Jumlah lilitan	100	
Celah udara	1 mm	
Jarak sekitar Antar Magnet	2 mm	
Tebal Magnet		1 mm, 2mm, 3mm, 4mm, 5mm, 9mm
Tebal yoke	2 mm	
Jumlah kutub MP		2, 4, 6, 8, 10 dan 12
Diameter kaki	2 mm	

4.2 Perancangan Rotor Magnet Permanent Fluks Radial



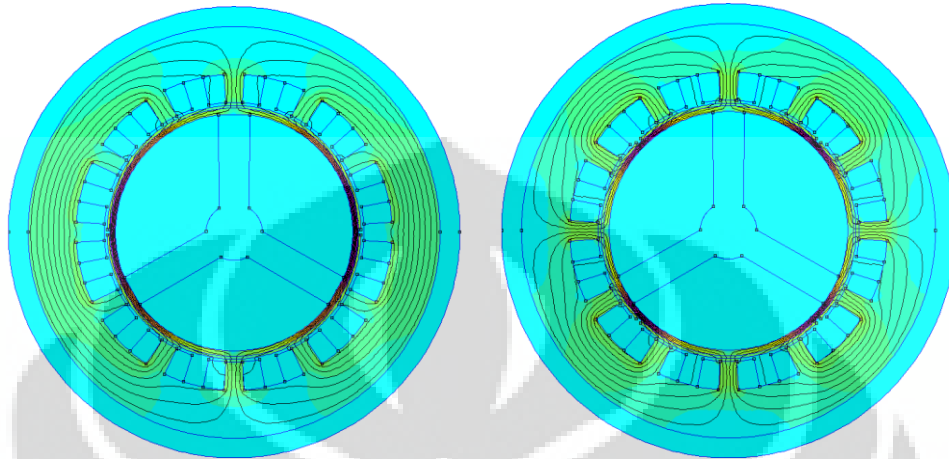
Gambar 4.2 Hasil Simulasi Mesh dengan ketebalan 4mm dan jumlah 4 kutub

Pada stator jumlah slot sebanyak 12. Kemudian antara slot dan magnet permanent keramik-5 ada jarak sekitar celah udara 1mm. Setelah magnet permanent ada material yoke m-19 steel tebal 2mm. Material kaki berbentuk segitiga sama sisi dengan bahan aluminium dan sekitar kaki udara.

4.3 Pengaruh Ketebalan Magnet Terhadap Distribusi Kerapatan Fluks (B) Pada Rotor Magnet Permanen Fluks radial

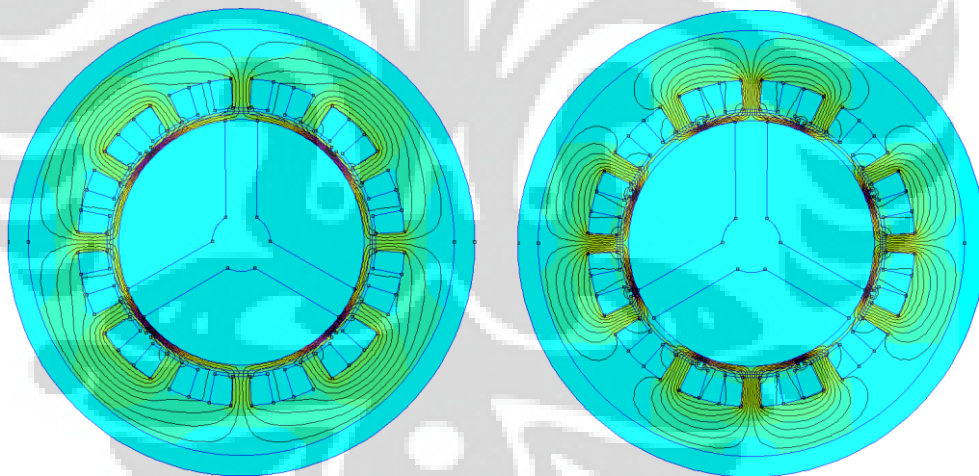
Dengan memasukkan parameter-parameter spesifikasi generator dan mensimulasikan dengan perangkat lunak FEMM 4.2. Ketebalan magnet dapat mempengaruhi distribusi kerapatan fluks (B) pada rotor magnet permanen fluks radial.

4.3.1 Simulasi Optimasi Ketebalan Magnet Tebal 1mm Pada Setiap Kutub Terhadap Distribusi Kerapatan Fluks Magnet (B)



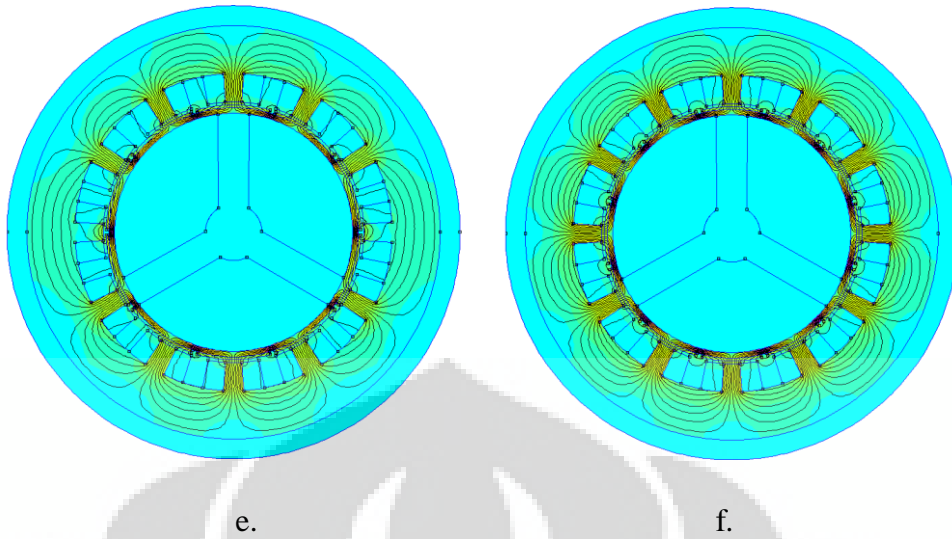
a.

b.

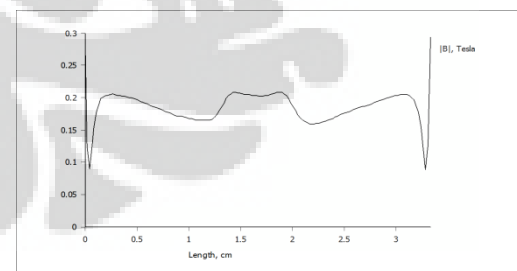
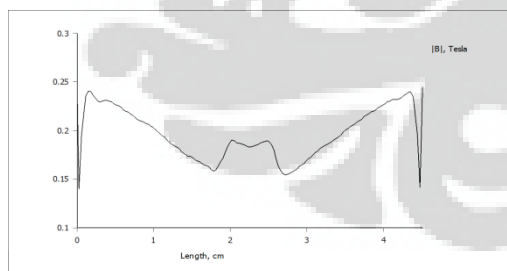
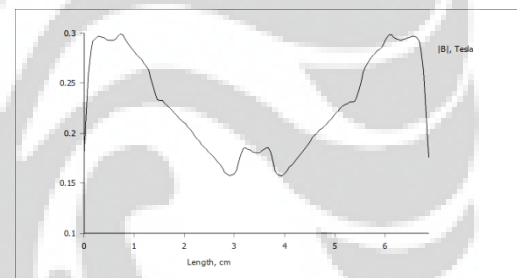
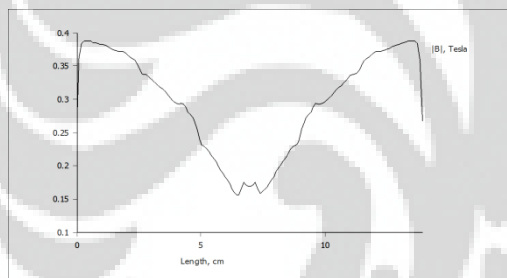


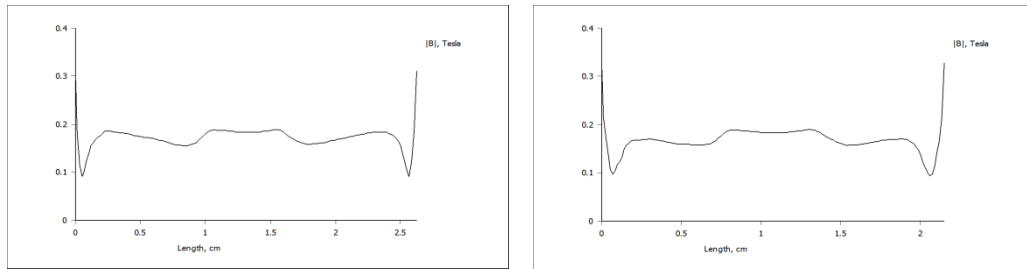
c.

d.



Gambar 4.3 Distribusi Kerapatan Fluks Magnet Tebal 1 mm pada (a) 2 kutub, (b) 4 kutub, (c) 6 kutub, (d) 8 kutub, (e) 10 kutub, (f) 12 kutub





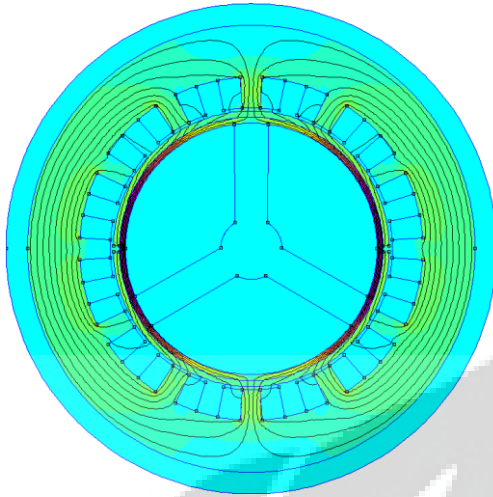
e.

f.

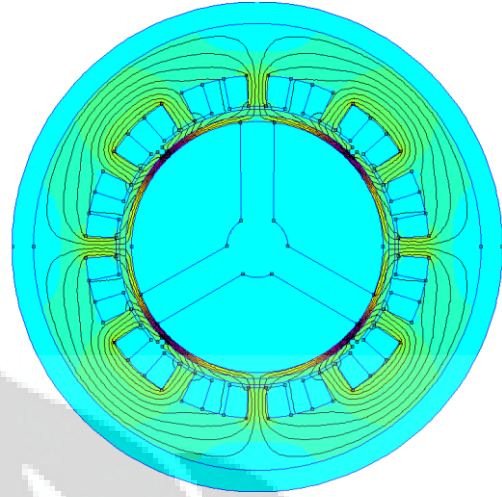
Gambar 4.4 Grafik Distribusi Kerapatan Fluks Magnet Tebal 1mm pada (a) 2 kutub, (b) 4 kutub, (c) 6 kutub, (d) 8 kutub, (e) 10 kutub, (f) 12 kutub

Pada ketebalan 1mm dengan jumlah 2 kutub distribusi kerapatan fluks lebih terpusat di bagian sisi magnet 0.38692 T dan berangsur turun hingga 0.156023 T pada jarak sekitar 6.5 cm. Bagian tengah magnet distribusi kerapatan fluksnya 0.169408 T. Pada 4 kutub distribusi kerapatan fluks lebih terpusat di bagian sisi magnet 0.296486 T dan berangsur turun hingga 0.157055 T pada jarak sekitar 2.9 cm. Bagian tengah magnet distribusi kerapatan fluksnya 0.180479 T. Pada 6 kutub distribusi kerapatan fluks lebih terpusat di bagian sisi magnet 0.240341 T dan berangsur turun hingga 0.15817 T pada jarak sekitar 1.8 cm. Bagian tengah magnet distribusi kerapatan fluksnya 0.182338 T. Pada 8 kutub distribusi kerapatan fluks relatif merata. Bagian sisi magnet 0.20605 T dan bagian tengah magnet 0.201589 T. Pada 10 kutub distribusi kerapatan fluks magnet relatif merata. Bagian sisi magnet 0.184011 T dan bagian tengah magnet 0.183267 T. Pada 12 kutub distribusi kerapatan fluks magnet relatif merata. Bagian sisi magnet 0.169882 T dan bagian tengah magnet 0.183267 T.

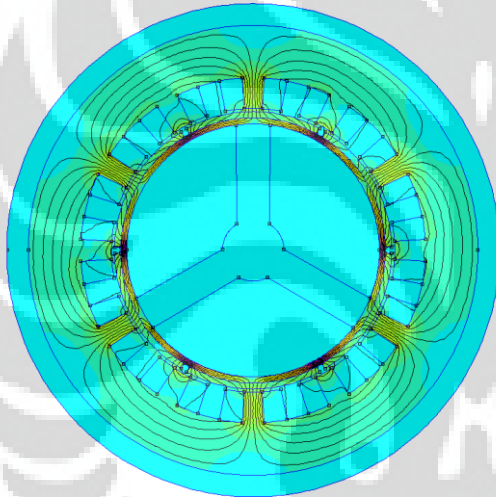
4.3.2 Simulasi Optimasi Ketebalan Magnet Tebal 2mm Pada Setiap Kutub Terhadap Distribusi Kerapatan Fluks Magnet (B)



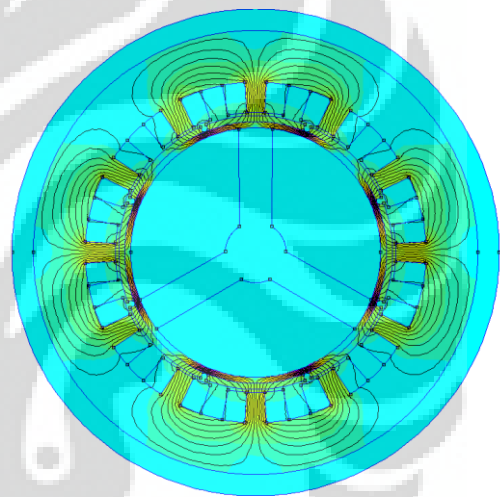
a.



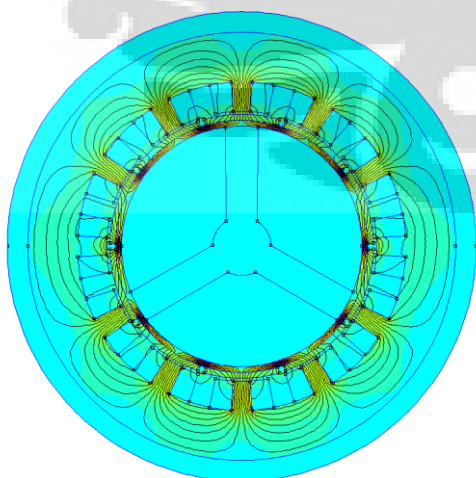
b.



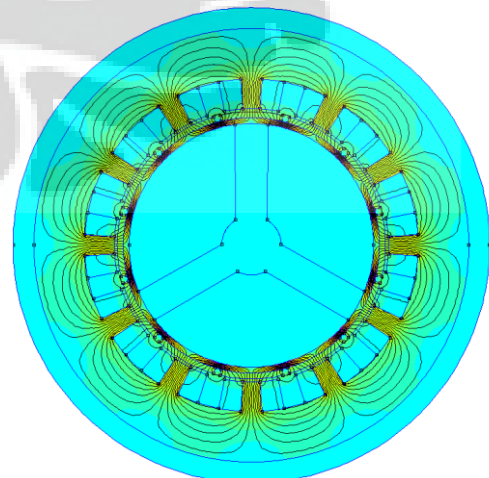
c.



d.

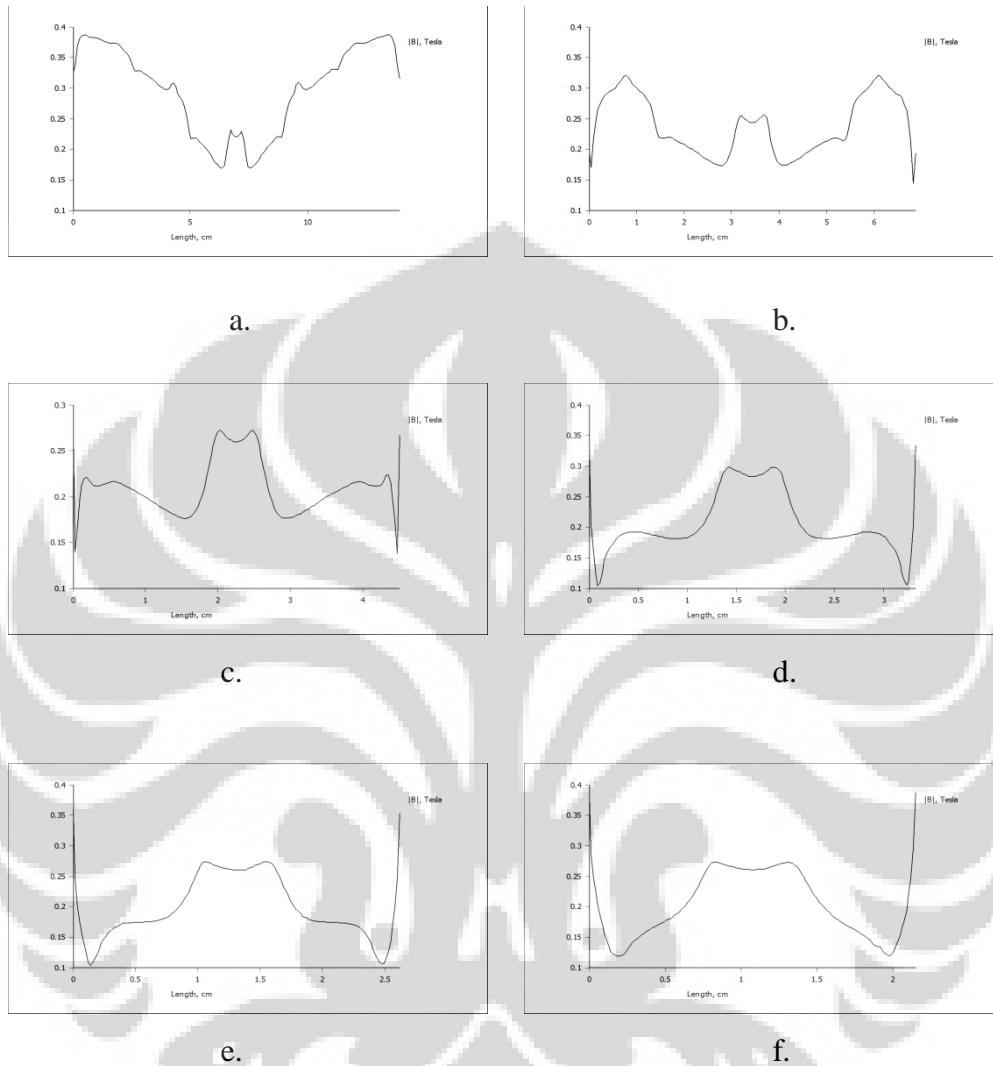


e.



f.

Gambar 4.5 Distribusi Kerapatan Fluks Magnet Tebal 2mm pada (a) 2 kutub, (b) 4 kutub, (c) 6 kutub, (d) 8 kutub, (e) 10 kutub, (f) 12 kutub

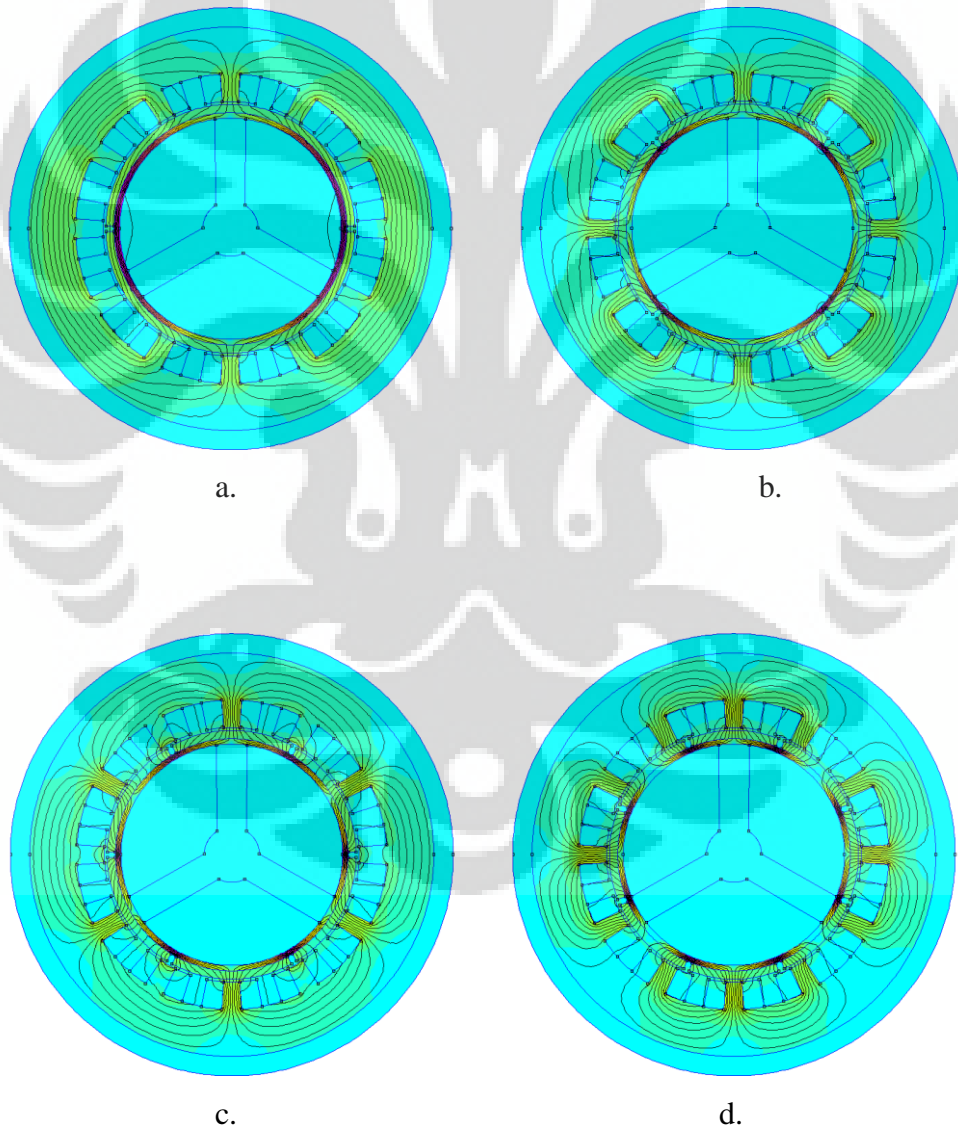


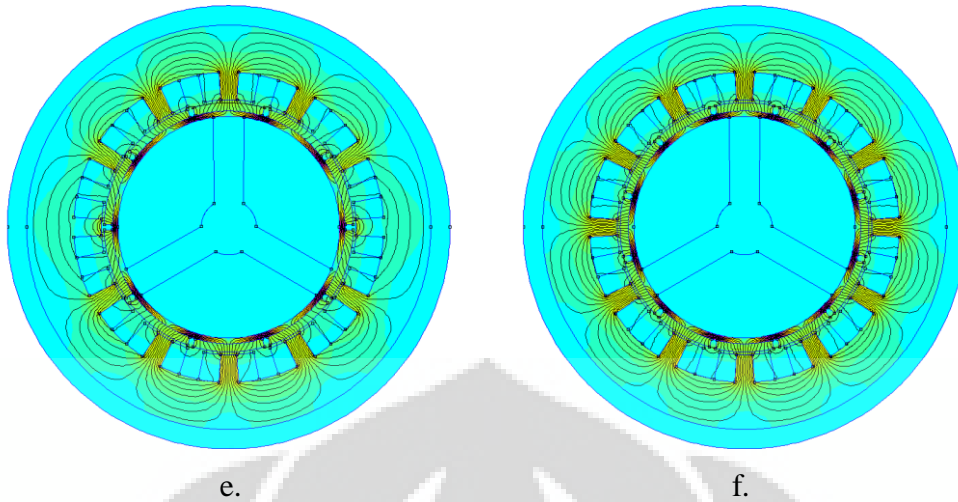
Gambar 4.6 Grafik Distribusi Kerapatan Fluks Magnet Tebal 2mm pada (a) 2 kutub, (b) 4 kutub, (c) 6 kutub, (d) 8 kutub, (e) 10 kutub, (f) 12 kutub

Pada ketebalan 2mm jumlah 2 kutub distribusi kerapatan fluks lebih terpusat di bagian sisi magnet 0.386363 T dan berangsur turun hingga 0.16885 T pada jarak sekitar 6.3 cm. Bagian tengah magnet distribusi kerapatan fluksnya 0.220719 T. pada 4 kutub distribusi kerapatan fluksnya lebih terpusat di bagian sisi magnet 0.319436 T dan bagian tengah magnet 0.243585 T. Pada 6 kutub distribusi kerapatan fluks lebih terpusat di bagian tengah magnet 0.259304 T dan bagian sisi magnet 0.220263 T. Pada 8 kutub distribusi kerapatan fluks lebih

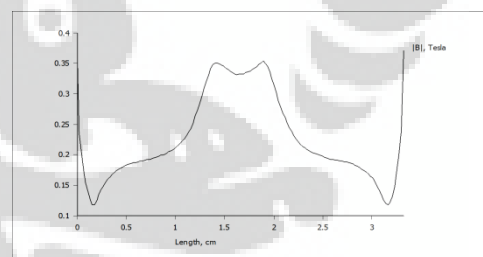
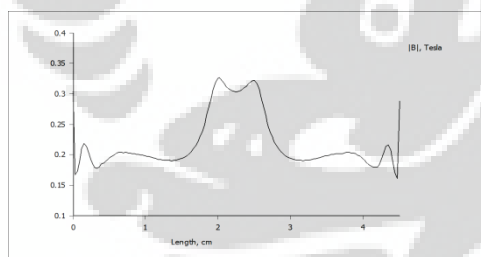
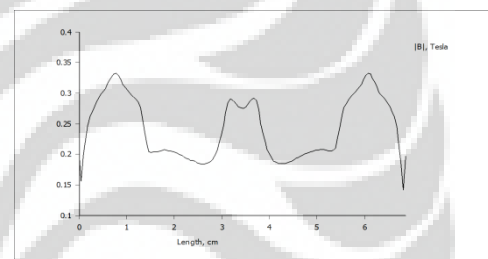
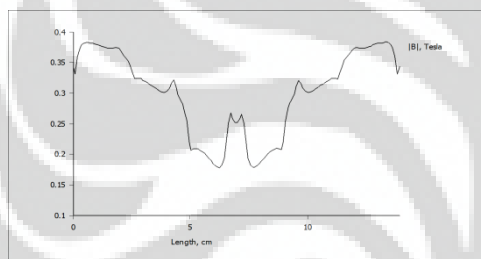
terpusat di bagian tengah magnet 0.282068 T dan bagian sisi magnet 0.104712 T sampai 0.191717 dari jarak sekitar 0.08 cm sampai 0.4 cm. Pada 10 kutub distribusi kerapatan fluks lebih terpusat di bagian tengah magnet 0.260317 T dan bagian sisi magnet 0.103039 T sampai 0.173312 T dari jarak sekitar 0.13 cm sampai 0.4 cm. Pada 12 kutub distribusi kerapatan fluks lebih terpusat di bagian tengah magnet 0.260317 T dan bagian sisi magnet 0.118665 T.

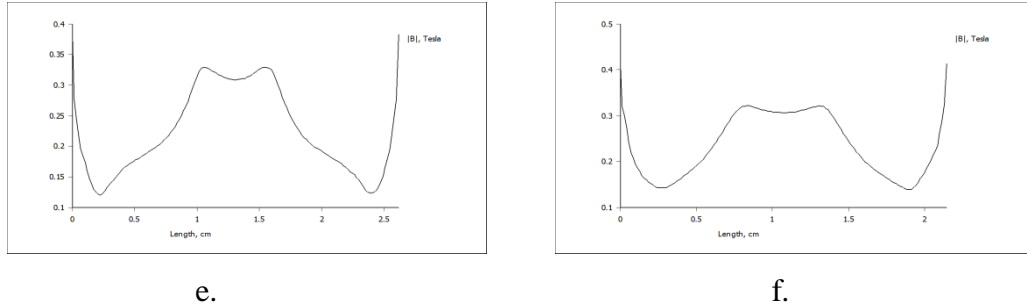
4.3.3 Simulasi Optimasi Ketebalan Magnet Tebal 3mm Pada Setiap Kutub Terhadap Distribusi Persebaran Kerapatan Fluks Magnet (B)





Gambar 4.7 Distribusi Kerapatan Fluks Magnet Tebal 3mm pada (a) 2 kutub, (b) 4 kutub, (c) 6 kutub, (d) 8 kutub, (e) 10 kutub, (f) 12 kutub

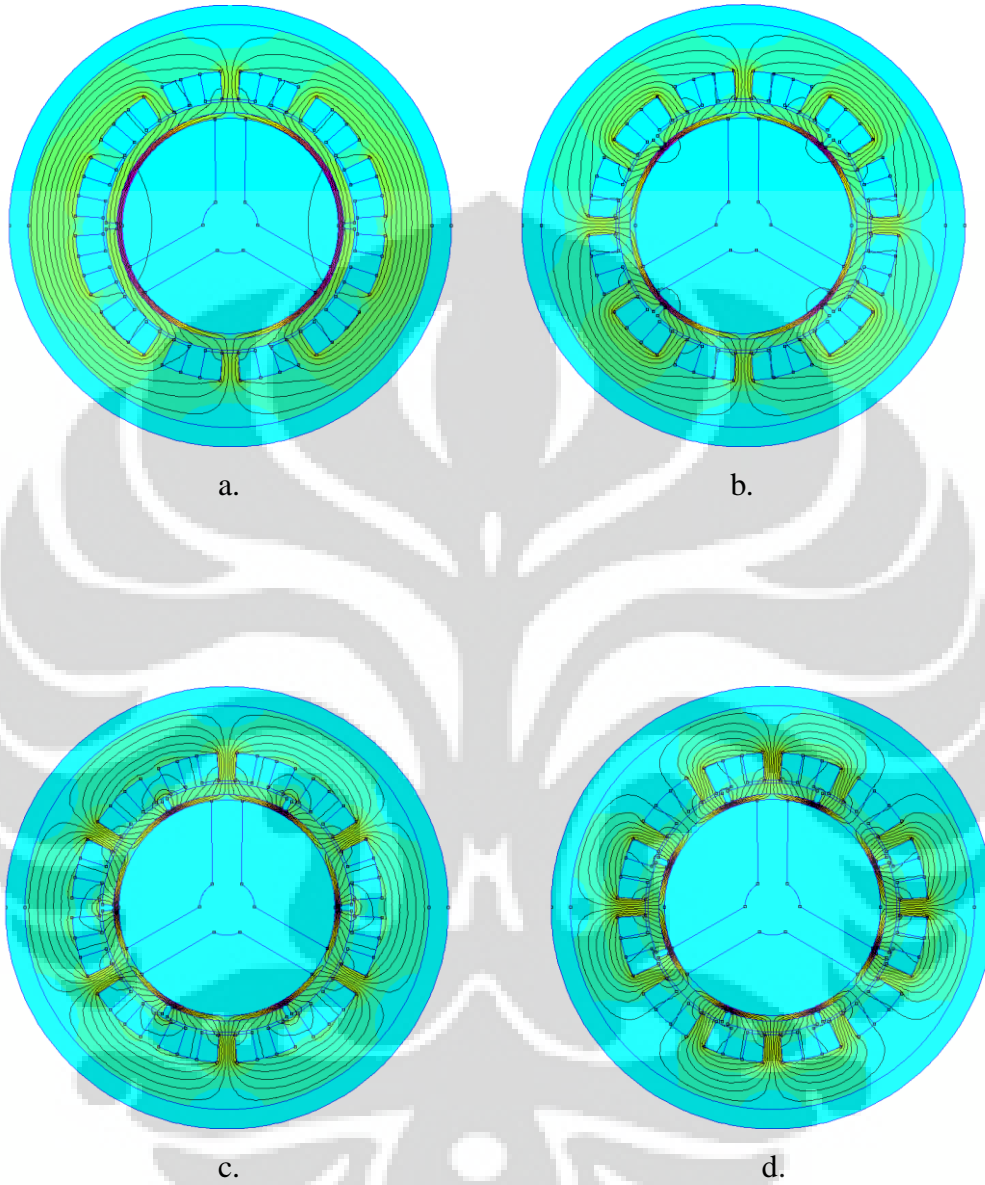


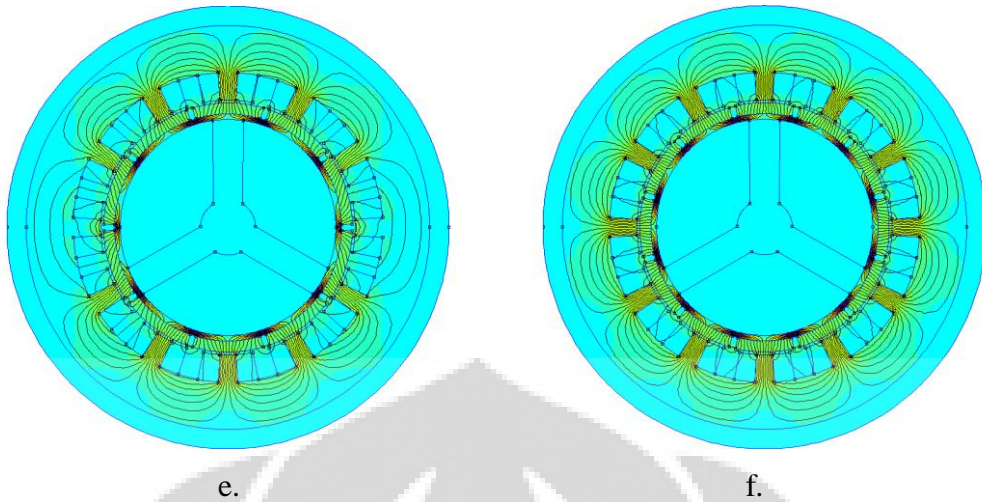


Gambar 4.8 Grafik Distribusi Kerapatan Fluks Magnet Tebal 3mm pada (a) 2 kutub, (b) 4 kutub, (c) 6 kutub, (d) 8 kutub, (e) 10 kutub, (f) 12 kutub

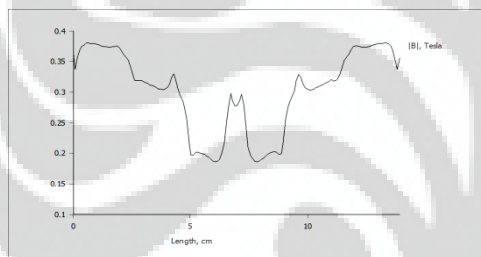
Pada ketebalan 3mm jumlah 2 kutub distribusi kerapatan fluks lebih terpusat di bagian sisi magnet 0.381901 T dan berangsur turun hingga 0.178889 T pada jarak sekitar 6.2 cm dan ada fluks bocor di pertemuan antar magnet 0.0108316 T. Bagian tengah magnet distribusi kerapatan fluksnya 0.251951 T. Pada 4 kutub distribusi kerapatan fluks lebih terpusat di bagian sisi magnet 0.331706 T dan bagian tengah magnet 0.27426 T. Pada 6 kutub distribusi kerapatan fluks lebih terpusat di bagian tengah magnet 0.303262 T dan bagian sisi magnet 0.203429 T. Pada 8 kutub distribusi kerapatan fluks lebih terpusat di bagian tengah magnet. Bagian sisi magnet distribusi kerapatan fluksnya 0.11754 T dan berangsur naik pada tengah magnet 0.331706 T pada jarak sekitar 1.66 cm dan turun kembali 0.11754 T. Pada 10 kutub distribusi kerapatan fluks bagian sisi magnet 0.120886 T dan berangsur naik di bagian tengah magnet 0.308201 T pada jarak sekitar sekitar 1.3 cm dan turun kembali 0.124223 T. Pada 12 kutub distribusi kerapatan fluks bagian sisi magnet 0.14364 T dan berangsur naik hingga tengah magnet 0.30632 T pada jarak sekitar 1.03 cm dan turun kembali 0.139003 T.

4.3.4 Simulasi Optimasi Ketebalan Magnet Tebal 4mm Pada Setiap Kutub Terhadap Distribusi Kerapatan Fluks Magnet (B)

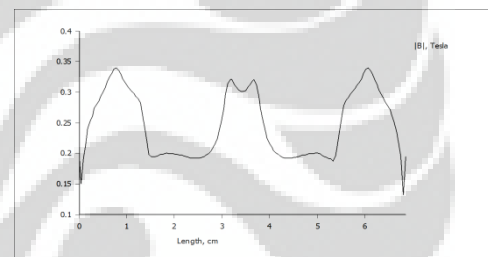




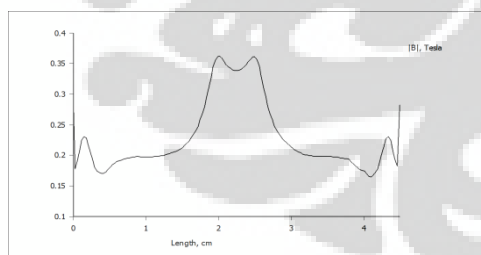
Gambar 4.9 Distribusi Kerapatan Fluks Magnet Tebal 4mm pada (a) 2 kutub, (b) 4 kutub, (c) 6 kutub, (d) 8 kutub, (e) 10 kutub (f) 12 kutub



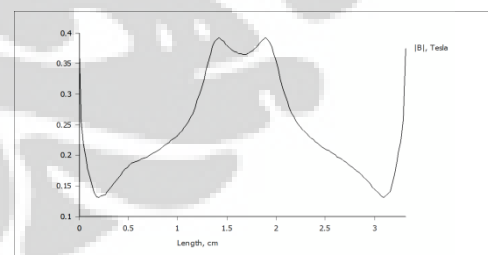
a.



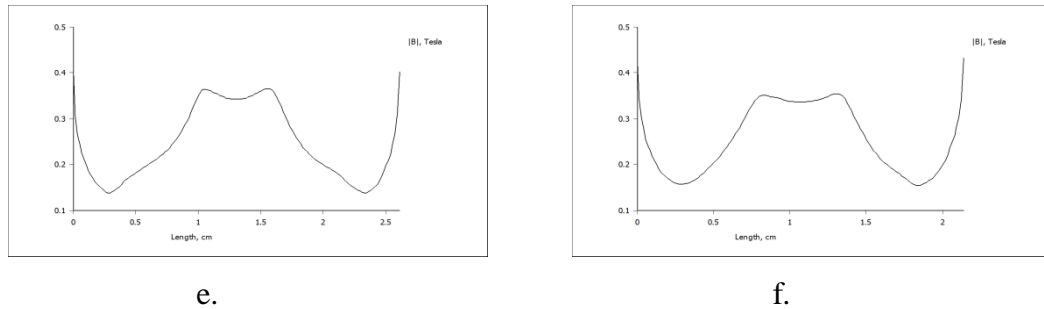
b.



c.



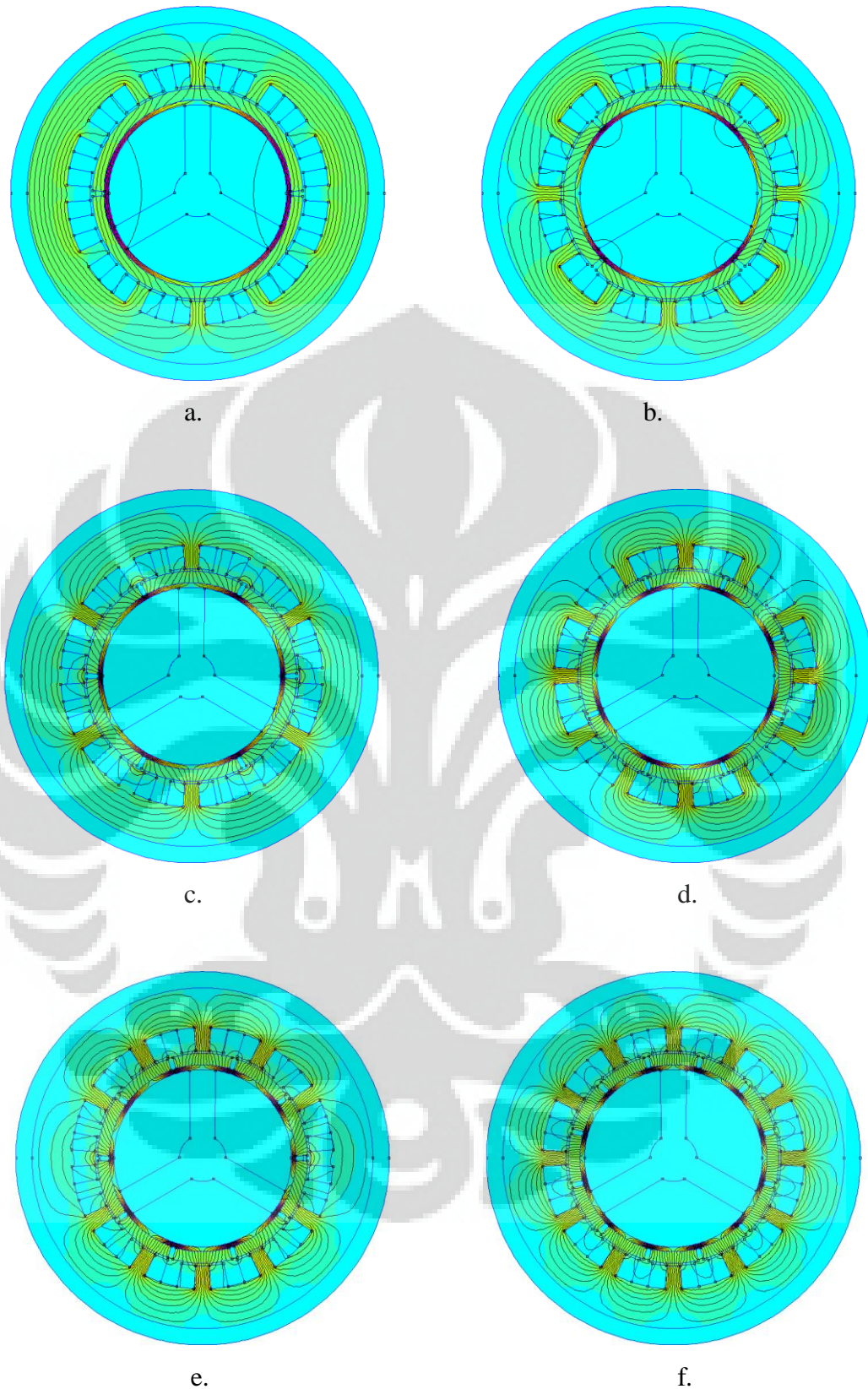
d.



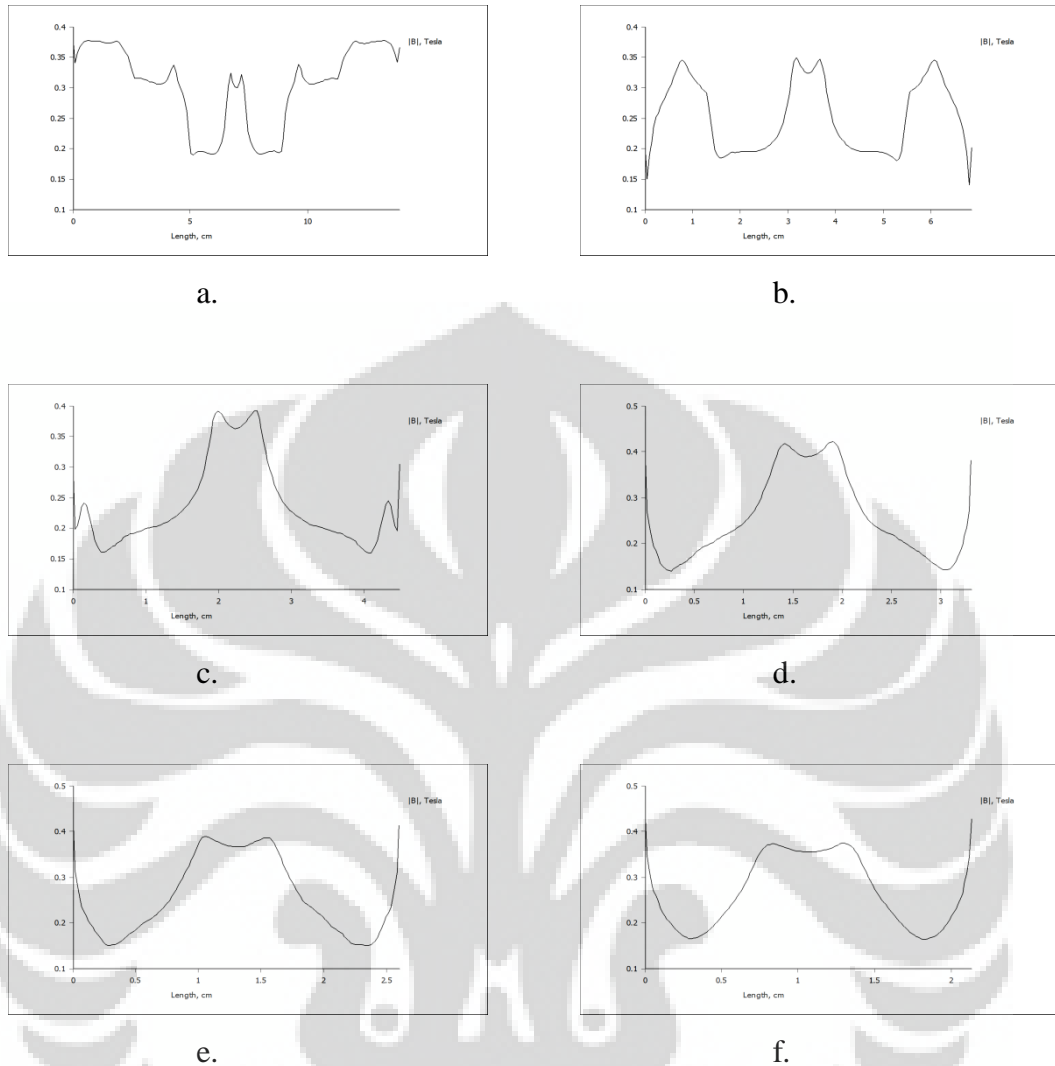
Gambar 4.10 Grafik Distribusi Kerapatan Fluks Magnet Tebal 4mm pada (a) 2 kutub, (b) 4 kutub, (c) 6 kutub, (d) 8 kutub, (e) 10 kutub, (f) 12 kutub

Pada ketebalan 4mm jumlah 2 kutub distribusi kerapatan fluks lebih terpusat di bagian sisi magnet 0.380228 T dan bagian tengah magnet 0.27709 T. Terdapat fluks bocor di pertemuan antar magnet 0.0172114 T. Pada 4 kutub distribusi kerapatan fluks di bagian sisi magnet 0.338956 T dan bagian tengah magnet 0.301031 T. Terdapat fluks bocor di pertemuan antar magnet 0.0294469 T. Pada 6 kutub distribusi kerapatan fluks di bagian sisi 0.190145 T dan bagian tengah magnet 0.338398 T. pada 8 kutub distribusi kerapatan fluks 0.130925 T dan berangsur naik pada tengah magnet 0.364611 T dan turun kembali 0.131483 T. pada 10 kutub distribusi kerapatan fluks magnet bagian sisi magnet 0.138259 T dan berangsur naik hingga tengah magnet 0.342758 T dan turun kembali 0.137515 T. Pada 12 kutub distribusi kerapatan fluks magnet di bagian sisi magnet 0.15685 T dan berangsur naik hingga tengah magnet 0.335321 T dan turun kembali 0.153875 T.

4.3.5 Simulasi Optimasi Ketebalan Magnet Tebal 5mm Pada Setiap Kutub Terhadap Distribusi Kerapatan Fluks Magnet (B)



Gambar 4.11 Distribusi Kerapatan Fluks Magnet Tebal 5mm pada (a) 2 kutub, (b) 4 kutub, (c) 6 kutub, (d) 8 kutub, (e) 10 kutub, (f) 12 kutub

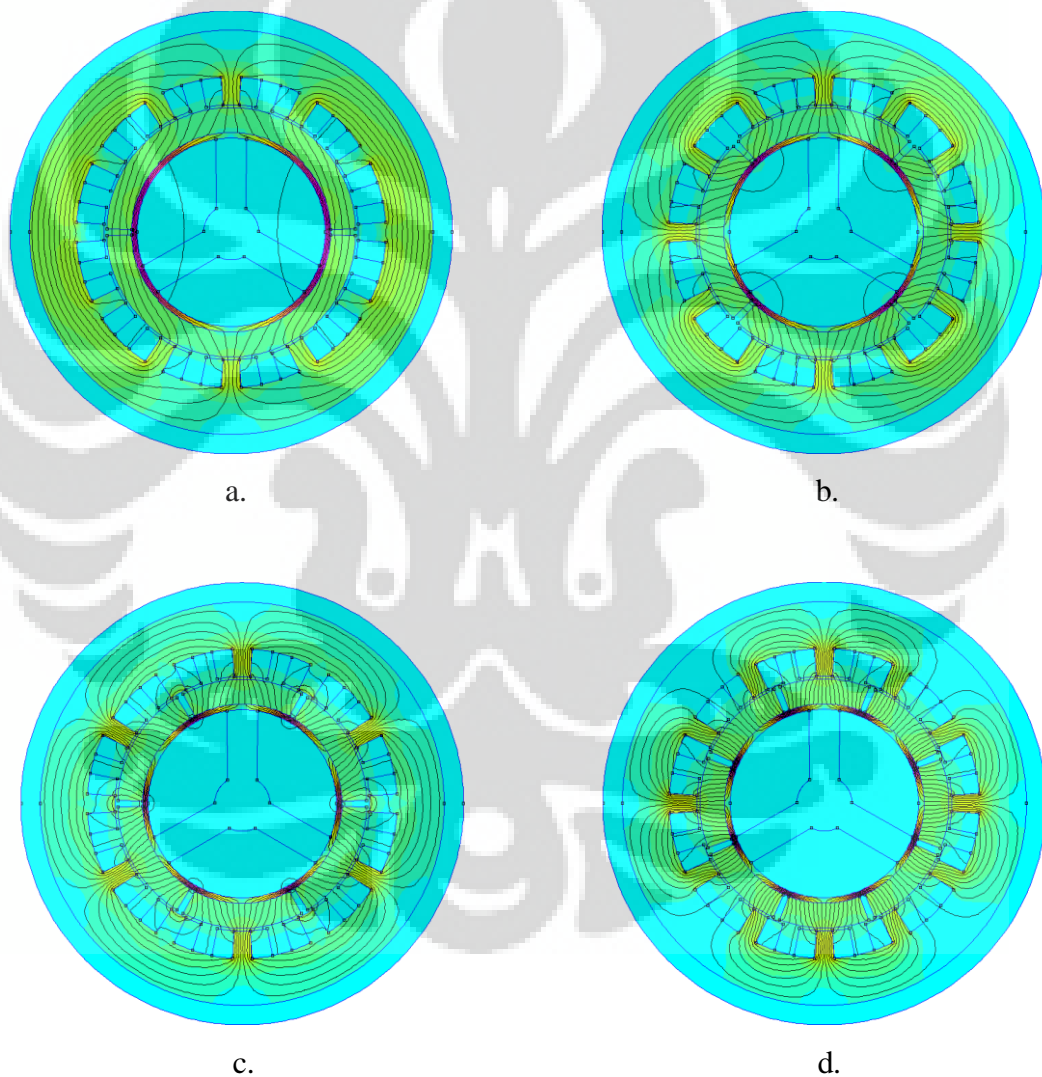


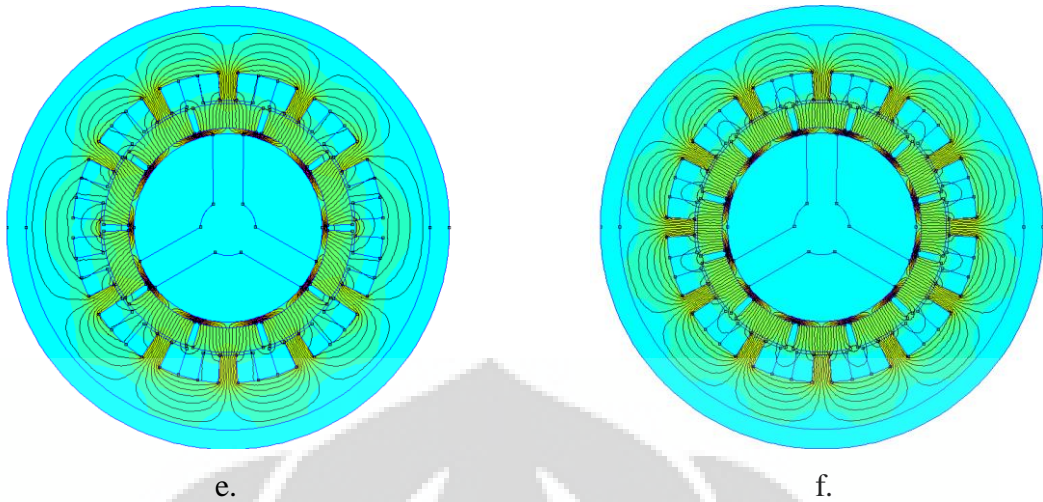
Gambar 4.12 Grafik Distribusi Kerapatan Fluks Magnet Tebal 5mm pada (a) 2 kutub, (b) 4 kutub, (c) 6 kutub, (d) 8 kutub, (e) 10 kutub, (f) 12 kutub

Pada ketebalan 5mm jumlah 2 kutub distribusi kerapatan fluks bagian sisi magnet 0.376881 T dan bagian tengah magnet 0.301031 T. Terdapat fluks bocor di pertemuan antar magnet 0.0154539 T. Pada 4 kutub distribusi kerapatan fluks bagian sisi magnet 0.345091 T dan bagian tengah magnet 0.32334 T. Terdapat fluks bocor di pertemuan antar magnet 0.0284514 T. Pada 6 kutub distribusi kerapatan fluks di bagian sisi magnet 0.1616 T dan berangsur naik pada tengah magnet 0.326238 T kemudian turun kembali pada sisi magnet 0.160485 T. Pada 8 kutub distribusi kerapatan fluks di bagian sisi magnet 0.14049 T dan berangsur naik pada tengah magnet 0.388863 T kemudian turun kembali pada sisi magnet

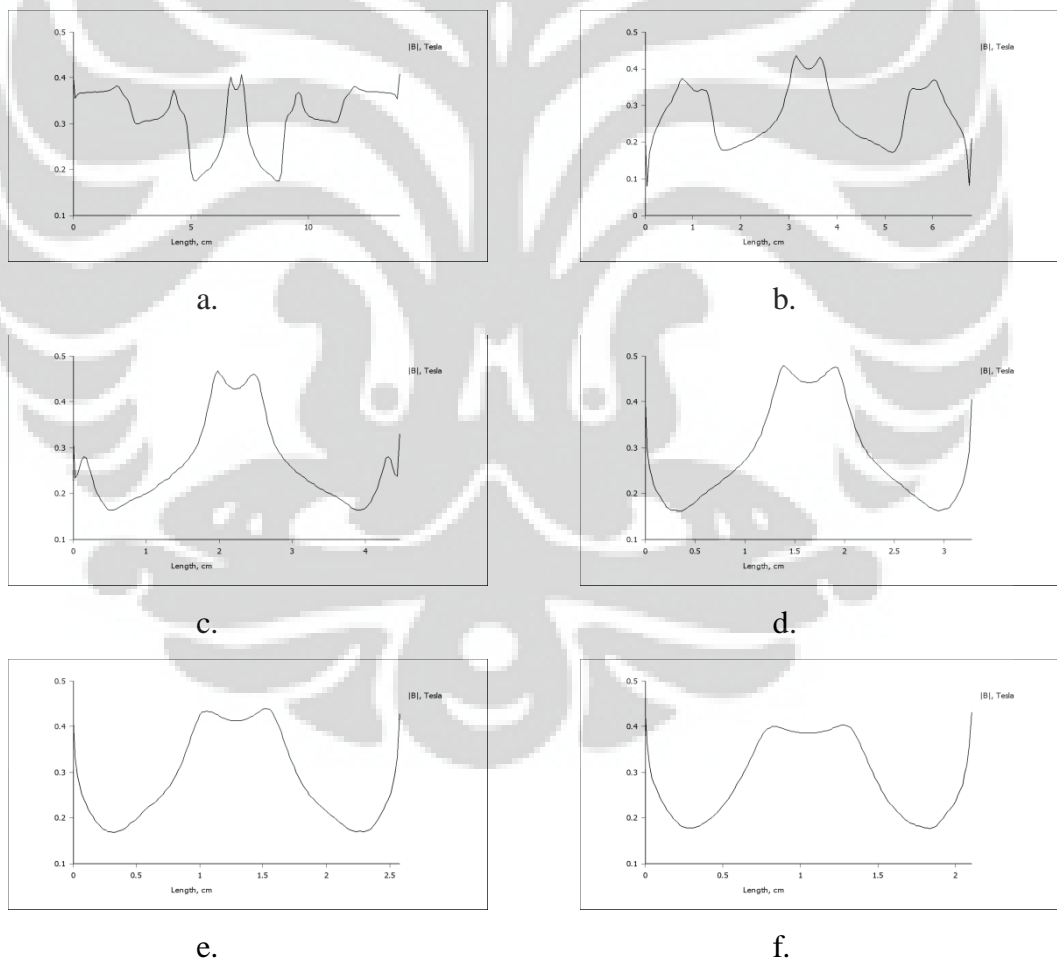
0.14364 T. Pada 10 kutub distribusi kerapatan fluks di bagian sisi magnet 0.150901 T dan berangsur naik pada tengah magnet 0.36654 T kemudian turun kembali pada sisi magnet 0.150901 T. Pada 12 kutub distribusi kerapatan fluks di bagian sisi magnet 0.16503 T dan berangsur naik pada tengah magnet 0.355399 T dan turun kembali pada sisi magnet 0.164286 T.

4.2.6 Simulasi Optimasi Ketebalan Magnet Tebal 9mm Pada Setiap Kutub Terhadap Distribusi Kerapatan Fluks Magnet (B)



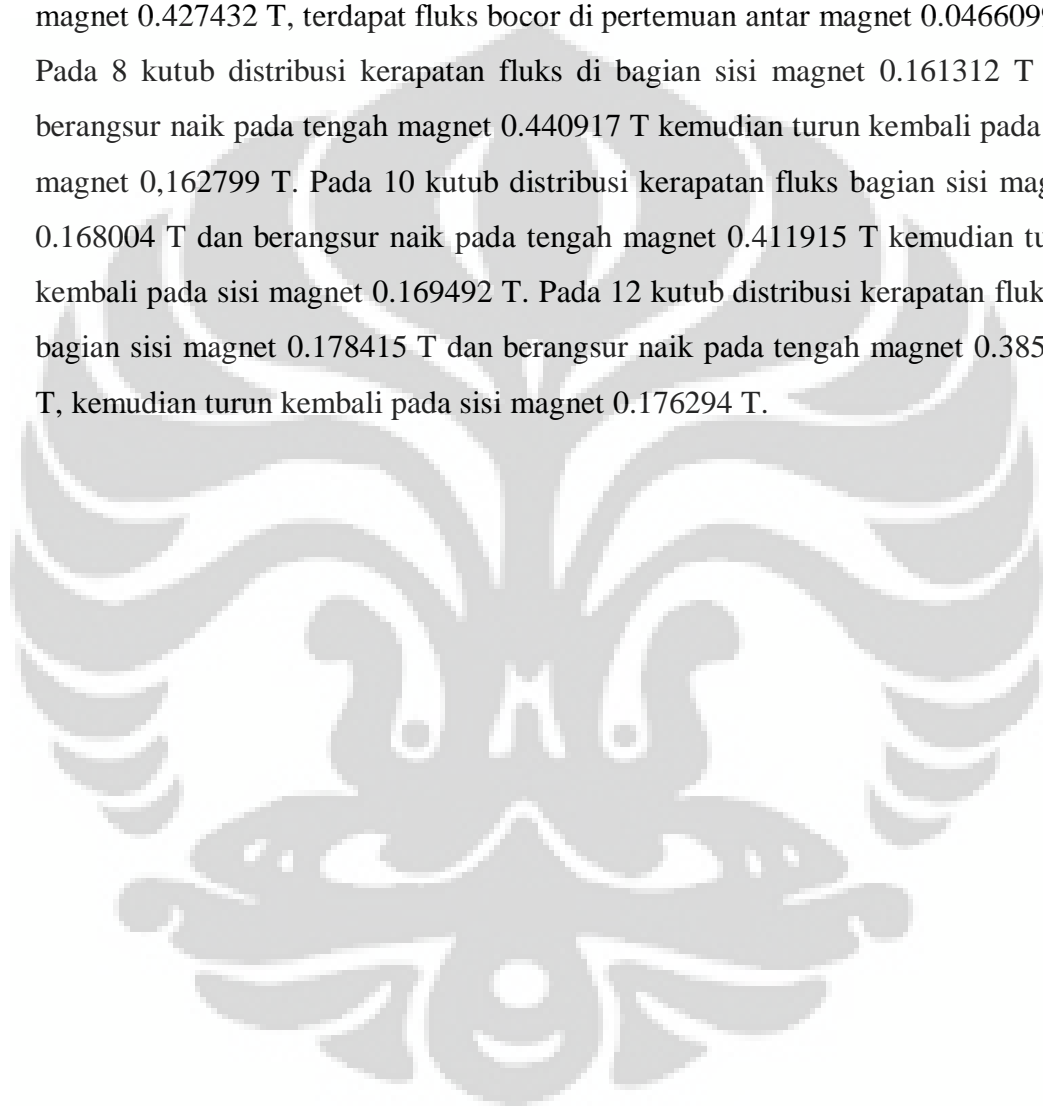


Gambar 4.13 Distribusi Kerapatan Fluks Magnet Tebal 9mm pada (a) 2 kutub, (b) 4 kutub, (c) 6 kutub, (d) 8 kutub (e) 10 kutub, (f) 12 kutub



Gambar 4.14 Grafik Distribusi Kerapatan Fluks Magnet Tebal 9mm pada (a) 2 kutub, (b) 4 kutub, (c) 6 kutub, (d) 8 kutub, (e) 10 kutub, (f) 12 kutub

Pada ketebalan 12mm jumlah 2 kutub distribusi kerapatan fluks di bagian sisi magnet 0.36581 T, bagian tengah magnet 0.374734 T dan terdapat fluks bocor di pertemuan antar magnet 0.0280728 T. Pada 4 kutub distribusi kerapatan fluks di bagian sisi magnet 0.373163 T, bagian tengah magnet 0.39919 T dan terdapat fluks bocor di pertemuan antar magnet 0.036383 T. Pada 6 kutub distribusi kerapatan fluks di bagian sisi magnet 0.164286 T dan berangsur naik pada tengah magnet 0.427432 T, terdapat fluks bocor di pertemuan antar magnet 0.0466099 T. Pada 8 kutub distribusi kerapatan fluks di bagian sisi magnet 0.161312 T dan berangsur naik pada tengah magnet 0.440917 T kemudian turun kembali pada sisi magnet 0,162799 T. Pada 10 kutub distribusi kerapatan fluks bagian sisi magnet 0.168004 T dan berangsur naik pada tengah magnet 0.411915 T kemudian turun kembali pada sisi magnet 0.169492 T. Pada 12 kutub distribusi kerapatan fluks di bagian sisi magnet 0.178415 T dan berangsur naik pada tengah magnet 0.385415 T, kemudian turun kembali pada sisi magnet 0.176294 T.



BAB V

KESIMPULAN

Pada studi kasus simulasi optimasi ketebalan magnet permanen pada rotor magnet permanen fluks radial dapat diambil kesimpulan :

1. Pada ketebalan 1mm distribusi kerapatan fluks magnet merata pada kutub 10. Karena selisih kerapatan fluks bagian sisi magnet dan tengah magnet lebih rendah dari jumlah kutub yang lain sekitar 0.000744 T.
2. Pada ketebalan 2mm distribusi kerapatan fluks magnet merata pada kutub 6. Karena selisih kerapatan fluks bagian sisi magnet dan tengah magnet lebih rendah dari jumlah kutub yang lain sekitar 0.039041 T
3. Pada ketebalan 3mm distribusi kerapatan fluks magnet merata pada kutub 4. Karena selisih kerapatan fluks bagian sisi magnet dan tengah magnet lebih rendah dari jumlah kutub yang lain sekitar 0.057446 T.
4. Pada ketebalan 4mm distribusi kerapatan fluks magnet merata pada kutub 4. Karena selisih kerapatan fluks bagian sisi magnet dan tengah magnet lebih rendah dari jumlah kutub yang lain sekitar 0.037925 T.
5. Pada ketebalan 5mm distribusi kerapatan fluks magnet merata pada kutub 4. Karena selisih kerapatan fluks bagian sisi magnet dan tengah magnet lebih rendah dari jumlah kutub yang lain sekitar 0.021751 T
6. Pada ketebalan 9mm distribusi kerapatan fluks magnet merata pada kutub 2. Karena selisih kerapatan fluks magnet bagian sisi magnet dan tengah magnet lebih rendah dari jumlah kutub yang lain 0.008924 T.
7. Distribusi kerapatan fluks yang optimal pada ketebalan 1mm dengan jumlah kutub 10, dengan kerapatan fluks sekitar 0.18 T dan fluks $2.42 \cdot 10^{-4}$ Weber.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Utomo, Agus R., *Mesin Sinkron*, Diktat Kuliah Teknik Tenaga Listrik, Departemen Teknik Elektro, Universitas Indonesia.
- [2] *Pertemuan I Ciri Utama Mesin Sinkron*
<http://ml.scribd.com/doc/95643280/14058-1-882326842821>.
- [3] Muljadi, *Pembuatan Nano Partikel Ba-hexa Ferrite ($BaO.6Fe_2O_3$) Magnet Permanent dan Karakterisasinya*, Laporan Akhir Program Insentif Peneliti dan Perekayasa LIPI, 2010
- [4] *Bab II Pada rotor*
<http://repository.usu.ac.id/bitstream/123456789/22352/4/Chapter%20II.pdf>
diakses pada tanggal 10 Mei 2012
- [5] Susila, Anton. *Perancangan Motor Induksi Satu Fasa Jenis Fluks radial (Squirrel Cage)*. Semarang : Universitas Diponegoro, 2004
- [6] *Electronics Tutorial About Magnetic Hysteresis*,
<http://www.electronics-tutorials.ws/electromagnetism/magnetic-hysteresis.html> diakses pada tanggal 20 Mei 2012.
- [7] *MMC Lecture7-Hard Magnetic Materials*,
<http://www.scribd.com/doc/55083001/MMC-Lecture7>
diakses pada tanggal 20 Mei 2012.
- [8] Chaithonsuk, Miss Sisuda., *Design and Construction of Permanent Magnet Synchronous Motor*, Thesis for Master of Electrical engineering, Institute of Technology North Bangkok, 2006
- [9] *Permanent Magnet Selection and Design Handbook*
<http://www.rare-earth-magnets.com/Permanent-Magnet-Selection-and-Design-Handbook.pdf>
diakses pada tanggal 24 Mei 2012
- [10] Parviainen, Asko., *Design of Axial-Flux Permanent-Magnet Low Speed Machines and Performance Comparison Between Radial-Flux and Axial Flux Machines*, Thesis for the degree of doctor of science, 2005
- [11] Zuhail, *Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya*, PT Gramedia Pustaka Utama, Jakarta, 1995
- [12] Rudyana, K. *Perancangan Generator DC Magnet Permanent Barium Ferrite Putaran Rendah untuk Aplikasi Listrik Tenaga Angin Menggunakan Finite Element Metode Magnetic (FEMM) software*, Institut Teknologi November, 2010

- [13] Pane, Ennopati. *Studi Sistem Eksitasi Dengan Menggunakan Permanent Magnet Generator (Aplikasi Pada Generator Sinkron di PLTD PT. Manunggal Wiratama*, Medan: Universitas Sumatera Utara, 2009.
- [14] Tcheslavski, Gleb V., *Lecture 7: Synchronous Machines*, <http://ee.lamar.edu/gleb/Index.htm> diakses pada tanggal 12 September 2011.

