



UNIVERSITAS INDONESIA

**ANALISIS PERBANDINGAN GENERATOR SINKRON
MAGNET PERMANEN FLUKS AKSIAL ROTOR CAKRAM
GANDA TIPE U-U DAN TIPE U-S STATOR TANPA INTI**

SKRIPSI

M ARIEF YUNIARDI

0606074060

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
DEPOK
JULI 2010**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : M Arief Yuniardi

NPM : 0606074060

Tanda Tangan :

Tanggal : 2 Juli 2010

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : M. Arief Yuniardi

NPM : 0606074060

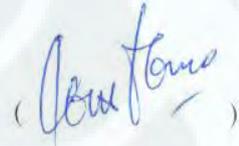
Program Studi : Teknik Elektro

Judul Skripsi : Analisis Perbandingan Generator Sinkron Magnet Permanen Fluks Aksial Rotor Cakram Ganda Tipe U-U dan Tipe U-S Stator Tanpa Inti.

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.



(Agus Utomo)

Penguji : Dr. Ir. Uno Bintang Sudibyo., DEA., I.P.M.



Penguji : Ir. I Made Ardita, MT.



(I Made Ardita)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 25 Juni 2010

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur saya panjatkan kehadirat Allah SWT, karena atas segala rahmat dan hidayat-Nya saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Saya menyadari bahwa skripsi ini tidak akan terselesaikan tanpa bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada :

1. Ir. Agus R Utomo, MT, selaku dosen pembimbing yang telah meluangkan waktunya untuk memberikan arahan, bimbingan dan diskusi sehingga skripsi ini dapat diselesaikan.
2. Kedua orang tua, serta kakak, dan adik-adik saya yang selalu memberi nasehat dan memotivasi saya agar berusaha dan tetap semangat.
3. Seluruh Sivitas Akademik Departemen Teknik Elektro yang tidak dapat saya sebutkan satu persatu.
4. Raja Tinjo beserta keluarganya yang membolehkan saya menginap hingga beberapa minggu di rumahnya dan memberikan pelayanan yang istimewa.
5. M Kahlil Firdausi beserta keluarganya yang membolehkan saya menginap di rumahnya.
6. Teman – teman elektro 2006 yang selalu saling mengingatkan dan memotivasi untuk dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik.
7. Chandra Salim dan teman – teman di Departemen Teknik Fisika ITB yang telah membantu memberikan solusi permasalahan pada perangkat lunak yang kami gunakan.

Akhir kata, semoga Allah SWT berkenan membalas kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini bermanfaat bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

Depok, Juli 2010

M. Arief Yuniardi

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

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

Nama : M. Arief Yuniardi
NPM : 0606074060
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 :

**ANALISIS PERBANDINGAN GENERATOR SINKRON MAGNET
PERMANEN FLUKS AKSIAL ROTOR CAKRAM GANDA TIPE U-U
DAN TIPE U-S STATOR TANPA INTI**

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 2 Juli 2010

Yang menyatakan

M. Arief Yuniardi



ABSTRAK

Nama : M. Arief Yuniardi

Program Studi : Teknik elektro

Judul : Analisis Perbandingan Generator Sinkron Magnet Permanen Fluks Aksial Rotor Cakram Ganda Tipe U-U dan Tipe U-S Stator Tanpa Inti

Aplikasi generator fluks aksial terus mengalami kemajuan. Berbagai tipe di coba untuk meningkatkan efisiensi dan penggunaannya. Salah satunya adalah generator fluks aksial magnet permanen rotor cakram ganda tanpa inti stator. Pada skripsi ini akan dibahas mengenai perbandingan fluks magnet antara rotor tipe UU dan rotor tipe US demikian pula tegangan keluaran yang dihasilkannya. Dikaji pula besar dan bentuk gelombang fluks dan tegangan yang dihasilkan generator tanpa merubah material dan massa dari generator.

Keywords : generator magnet permanen fluks aksial tanpa inti stator, perbandingan fluks magnet, tipe UU, tipe US.

ABSTRACT

Name : M Arief Yuniardi

Study programs: Electrical Engineering

Title : Comparative Analysis of Permanent Magnet Axial Flux Double Disc Rotor Type NN and Type NS Coreless Stator Synchronous Generator

The application Axial flux generator continues to progress. Various types to improve efficiency and usage are being experimented. One of it is the axial flux permanent magnet dual disc rotor without stator core generator. Bachelor thesis the magnetic flux of the type NN and NS type rotor are being compared its resulting output voltage. The value and form of flux and voltage that produced of both types of these generators without changing the material and the mass of the generator.

Keyword: axial flux permanent magnet generator with coreless stator, the magnetic flux ratio, NN type, NS type.



DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINILITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
UCAPAN TERIMA KASIH	iv
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR PERSAMAAN	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penulisan	1
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Sistematika Penulisan	2
BAB II GENERATOR FLUKS AKSIAL	3
2.1 Umum	3
2.2 Konstruksi Generator Fluks Aksial	3
2.2.1 Stator	4
2.2.1.1 Bentuk Torus	4
2.2.1.2 Tanpa Inti Besi	5
2.2.1.3 Jumlah Gulungan	6
2.2.2 Rotor	6
2.2.2.1 Magnet Permanen <i>Embedded Rotor</i>	7
2.2.2.2 Magnet permanen <i>Surface Mounted</i>	7
2.2.2.3 Bentuk Magnet, Tipe Magnet, dan Jumlah Kutub	8
2.2.3 Celah Udara	9
2.3 Perbandingan Generator Fluks Aksial Dengan Generator Fluks Radial	9
2.4 Prinsip Kerja Generator Fluks Aksial	10
2.5 Tipe – Tipe Generator Fluks Aksial	11
2.5.1 Rotor dan Stator Tunggal	11
2.5.2 Rotor Ganda dan Stator Tunggal	12
2.5.3 Stator Ganda dan Rotor Tunggal	13
2.5.4 Rotor dan Stator banyak	14
BAB III PEMODELAN DAN SIMULASI	16
3.1 Generator Fluks Aksial Tipe Rotor Ganda Stator Tunggal Tanpa Inti Besi	16
3.1.1 Desain Rotor	16
3.1.1.1 Desain Rotor dengan Tipe Magnet U-S	17
3.1.1.2 Desain Rotor dengan Tipe Magnet U-U	17
3.1.2 Desain Stator	17
3.2 Persamaan Fluks Magnet Yang Menembus Stator	19
3.3 Persamaan Tegangan Induksi Stator	22
3.4 Torsi	22
3.5 Simulasi	23

BAB IV HASIL SIMULASI DAN ANALISA	24
4.1 Hasil Simulasi Fluks Terhadap Tipe Polaritas Magnet Permanen	24
4.2 Analisa Hasil Simulasi Fluks Terhadap Tipe Polaritas	29
4.3 Hasil Simulasi Tegangan Terhadap Tipe Polaritas	32
4.4 Analisa Hasil Simulasi Tegangan Terhadap Tipe Polaritas.....	34
BAB V KESIMPULAN	35
DAFTAR ACUAN	36
DAFTAR PUSATAKA	37
LAMPIRAN	38

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Prototipe generator fluks aksial	3
Gambar 2.2a Generator tipe stator dengan alur	4
Gambar 2.2b Aliran fluks tipe stator dengan alur	4
Gambar 2.3a Generator tipe stator tanpa alur	5
Gambar 2.3b Aliran fluks tipe stator tanpa alur	5
Gambar 2.4a Stator <i>overlapping</i>	5
Gambar 2.4b Skematik stator <i>overlapping</i>	5
Gambar 2.5a Stator tanpa- <i>overlapping</i>	6
Gambar 2.5b Skematik stator tanpa- <i>overlapping</i>	6
Gambar 2.6 Banyaknya kutub pada stator	6
Gambar 2.7a Rotor <i>Surface mounted</i>	7
Gambar 2.7b Rotor <i>Embedded</i>	7
Gambar 2.8 Tipe – tipe bentuk magnet pada rotor	8
Gambar 2.9a Tipe magnet rotor U-U	8
Gambar 2.9b Tipe magnet rotor U-S	8
Gambar 2.10a Generator konvensional	10
Gambar 2.10b Generator fluks aksial	10
Gambar 2.11 Generator cakram tunggal	12
Gambar 2.12a Bentuk struktur tipe U-U	12
Gambar 2.12b Bentuk struktur tipe U-S	12
Gambar 2.13a Arah fluks pada tipe U-U	13
Gambar 2.13b Arah fluks pada tipe U-S	13
Gambar 2.14 Bentuk struktur generator eksternal stator	13
Gambar 2.15(a) Generator stator ganda	14
Gambar 2.15(b) Arah fluks pada tipe eksternal stator	14
Gambar 2.16 Bentuk generator dengan banyak rotor dan stator banyak	14
Gambar 2.17a Arah fluks pada tipe U-S	15
Gambar 2.17b Arah fluks pada tipe U-U	15
Gambar 3.1 Desain penampang generator	17
Gambar 3.2 Desain penampang kumparan stator	18
Gambar 3.3 Desain stator	18
Gambar 3.4 Penampang atas kumparan stator	21
Gambar 3.5 Penampang samping kumparan stator	21
Gambar 3.6 Spesifikasi parameter simulasi konstanta variabel	23
Gambar 4.1 Hasil simulasi fluks tipe U-S detik 0.000 pada sumbu Z	24
Gambar 4.2 Hasil simulasi fluks tipe U-S detik 0.009 pada sumbu Z	24
Gambar 4.3 Hasil simulasi fluks tipe U-S detik 0.000 pada sumbu normal	25
Gambar 4.4 Hasil simulasi fluks tipe U-S detik 0.009 pada sumbu normal	25
Gambar 4.5 Hasil simulasi fluks tipe U-U detik 0.000 pada sumbu Z	26
Gambar 4.6 Hasil simulasi fluks tipe U-U detik 0.009 pada sumbu Z	26
Gambar 4.7 Hasil simulasi fluks tipe U-U detik 0.000 pada sumbu normal	27
Gambar 4.8 Hasil simulasi fluks tipe U-U detik 0.009 pada sumbu normal	27
Gambar 4.9 Perubahan fluks terhadap sumbu Z tipe U-S	28
Gambar 4.10 Perubahan fluks terhadap sumbu normal tipe U-S	28

Gambar 4.11 Perubahan fluks terhadap sumbu Z tipe U-U.....	29
Gambar 4.12 Perubahan fluks terhadap sumbu normal tipe U-U	29
Gambar 4.13 Grafik tegangan induksi tipe U-S bidang Z	32
Gambar 4.14 Grafik tegangan induksi tipe U-S normal	32
Gambar 4.15 Grafik tegangan induksi tipe U-U bidang Z.....	33
Gambar 4.16 Grafik tegangan induksi tipe U-U bidang normal	33



DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Geometri penyanggah rotor 12 kutub.....	16
Tabel 3.2 Geometri magnet rotor.....	16
Tabel 3.3 Geometri celah udara.....	17
Tabel 3.4 Geometri stator.....	18

DAFTAR PERSAMAAN

Persamaan 2.1 Fluks armatur	10
Persamaan 2.2 Ggl induksi.....	11
Persamaan 3.1 Medan magnet pada magnet permanen rotor.....	19
Persamaan 3.2 Persamaan medan magnet dalam bentuk operator vektor del...19	
Persamaan 3.3 Persamaan medan magnet pada penyanggah rotor	20
Persamaan 3.4 Persamaan medan magnet operator vektor del pada rotor.....	20
Persamaan 3.5 Persamaan medan magnet pada stator	20
Persamaan 3.6 Persamaan medan magnet pada stator operator del.....	20
Persamaan 3.7 Persamaan fluks pada luas permukaan.....	20
Persamaan 3.8 Persamaan perubahan fluks tiap satuan waktu.....	22
Persamaan 3.9 Persamaan perubahan medan magnet pada luas permukaan	22
Persamaan 3.10 Persamaan perubahan fluks pada perubahan sudut	22



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG

Generator fluks aksial merupakan salah satu jenis penggunaan aplikasi dari mesin - mesin listrik yang memiliki arah aliran fluks secara aksial. Tentunya seiring dengan perkembangan zaman, generator – generator ini terus dikembangkan dengan berbagai macam variasi dari tipe – tipe mulai dari bentuk stator, rotor hingga banyaknya jumlah rotor dan stator dalam generator tersebut guna mencari tingkat efisiensi yang tinggi dari sumber daya alam yang tersedia.

Generator fluks aksial tipe rotor ganda stator tunggal dengan stator tanpa inti besi merupakan salah satu tipe pengembangan generator yang biasa digunakan untuk tenaga angin dengan putaran tinggi. Generator ini terdiri dari sebuah stator yang berada tepat di tengah yang diapit oleh kedua rotor. Pada rotor generator ini menggunakan magnet permanen dengan bahan “Neodymium Iron Boron Magnet.” Pada Statornya memiliki bentuk trapezoidal dengan tanpa inti besi di tengahnya.

Pemodelan dan Simulasi ini didesain dengan menggunakan COMSOL 3.5 untuk mengetahui unjuk kerja dari generator yang telah didesain. Melalui simulasi juga dapat mengetahui perbandingan dari beberapa tipe polaritas magnet permanen pada rotor yang telah didesain, sehingga dapat mengetahui desain yang efektif digunakan.

1.2 TUJUAN PENULISAN

Adapun tujuan penulisan skripsi ini adalah sebagai berikut:

1. Membuat desain pemodelan dan simulasi generator fluks aksial rotor ganda stator tunggal tanpa inti besi.
2. Melihat perbandingan yang efektif pada nilai medan magnet yang menembus stator dan tegangan keluaran antara perbedaan polaritas magnet permanen pada rotor.

1.3 BATASAN MASALAH

Untuk mempersempit ruang lingkup masalah dan mempermudah analisis, penulisan skripsi ini memiliki batasan sebagai berikut:

1. Desain pemodelan dan simulasi menggunakan COMSOL versi 3.5.
2. Pengolahan data dan analisis yang tidak memungkinkan diolah oleh COMSOL 3.5 dapat diolah secara manual dengan rumusan yang sudah ada pada jurnal dan thesis acuan melalui bantuan microsoft excel.
3. Desain dan pemodelan yang dibuat adalah sebatas generator fluks aksial dengan rotor ganda eksternal dan stator tunggal internal dengan stator tanpa inti besi.
4. Desain dan pemodelan yang dibuat hanya berdasarkan pada perbedaan fenomena pasangan polaritas magnet permanen tanpa merubah variabel - variabel yang lain.

1.4 SISTEMATIKA PENULISAN

Skripsi ini terbagi atas 5 bab yang secara garis besar dapat diuraikan sebagai berikut yaitu: bab satu berisikan pendahuluan yang memuat latar belakang, tujuan masalah, batasan masalah, dan sistematika penulisan. Bab dua berisikan tentang teori dasar, konstruksi mesin, tipe dan jenis generator fluks aksial dan prinsip – prinsip dasar generator fluks aksial beserta perbandingan antara generator fluks aksial dengan generator fluks radial. Bab 3 berisikan tentang desain pemodelan generator fluks aksial rotor ganda stator tunggal tanpa inti stator, persamaan fluks yang menembus stator, tegangan yang menginduksi stator, dan torsi elektrik, dan simulasinya. Bab empat berisikan hasil dan analisa simulasi perbandingan dari perbedaan tipe stator yang membandingkan hasil dari fluks dan hasil tegangan yang diperoleh. Bab lima berisikan kesimpulan yang menyimpulkan keseluruhan hasil dari keseluruhan isi skripsi ini.

BAB II

GENERATOR FLUKS AKSIAL

2.1 UMUM

Generator fluks aksial adalah suatu mesin yang dapat mengkonversikan energi mekanik menjadi energi listrik yang menghasilkan arus bolak – balik yang terdiri dari stator dan rotor dengan memiliki arah aliran fluks yang memotong stator secara aksial. Tentunya berbeda dengan generator generator konvensional lainnya yang aliran fluksnya secara radial. Generator fluks aksial ini tentunya memiliki ukuran yang jauh lebih kecil yang biasanya dimanfaatkan untuk pembangkit listrik tenaga angin.

2.2 KONSTRUKSI GENERATOR FLUKS AKSIAL

Seperti halnya dengan generator konvensional pada umumnya, generator fluks aksial ini memiliki konstruksi yang sama dengan memiliki stator, rotor dan celah udara. Hanya saja dengan memiliki perbedaan arah aliran fluks, generator fluks aksial ini memiliki kecenderungan melebar diameternya untuk memperbesar daya keluarannya. Tidak hanya itu, variasi bentuk dan jumlah stator dan rotornya pun dapat dimodifikasi sesuai dengan efisiensi kebutuhan.



Gambar 2.1 Prototipe generator fluks aksial[1]

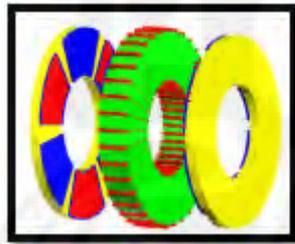
2.2.1 Stator

Melihat dari berbagai bentuk statornya, generator fluks aksial ini dapat dilihat dari berbagai macam variasi diantaranya adalah: Stator dengan inti besi berbentuk torus, stator tanpa inti besi, dan jumlah gulungan.

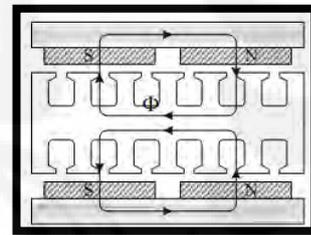
2.2.1.1 Bentuk Torus

Stator dengan bentuk torus biasanya digunakan pada penggerak dengan putaran rendah. Tipe ini memiliki inti besi di tengahnya yang selanjutnya dililitkan oleh kumparan. Tipe ini terdiri dari dua jenis yaitu tipe alur dan tipe tanpa alur.

Pada tipe stator dengan alur ini, dapat dilihat bahwa arah fluks mengalir melewati celah antara sisi – sisi pada statornya. Sehingga celah udara yang dilewati oleh fluks ini lebih panjang jika dibandingkan dengan tipe stator dengan tanpa alur. Tentu saja hal ini akan mempengaruhi dari torsi beban yang ditimbulkan pada generator ini.



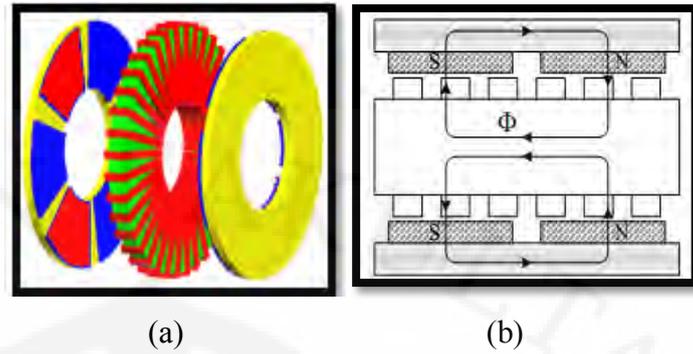
(a)



(b)

Gambar 2.2 (a)Generator tipe alur stator, (b)Aliran fluks tipe alur[2]

Pada stator dengan tipe tanpa alur memiliki bentuk stator yang memiliki kumparan lebar dengan kumparan celah udara AC fasa banyak yang dibungkus oleh inti stator yang dihubungkan secara *back-to-back*.



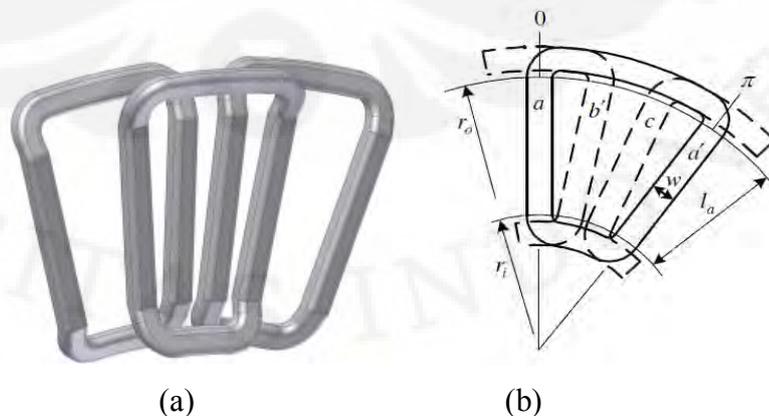
Gambar 2.3 (a) Tipe tanpa alur, (b) Aliran fluks tipe tanpa alur[2]

Pada stator dengan tipe tanpa alur biasanya antara kumparan diisi dengan resin yang berfungsi sebagai ketahanan dan menghasilkan transfer panas yang lebih baik. Tidak hanya itu, celah udara antara kumparan digunakan sebagai penghasil torsi[7].

2.2.1.2 Stator Tanpa Inti Besi

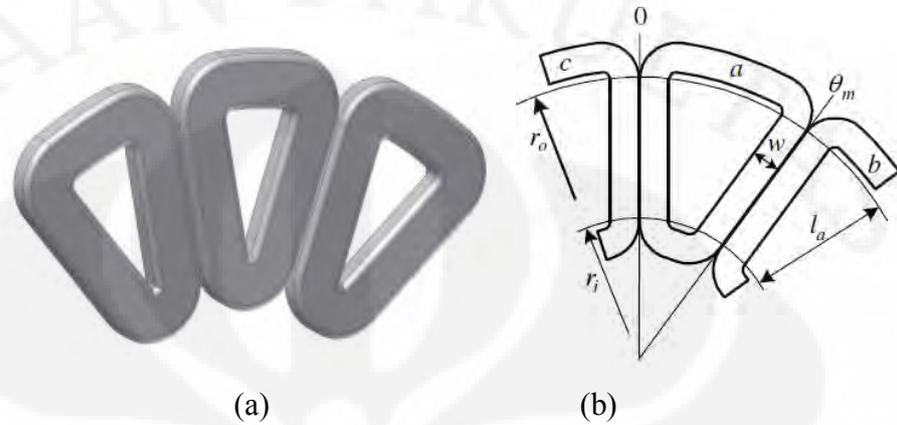
Stator tanpa inti besi biasanya digunakan untuk putaran tinggi dan torsi beban yang rendah. Tentunya hal ini disebabkan oleh tidak adanya inti besi yang terdapat didalamnya. Pada stator tanpa inti besi susunan kumparannya terbagi menjadi 2 macam, ada yang tersusun secara *overlapping* dan tanpa-*overlapping*. Tidak hanya itu, bentuk dari kumparannya dapat divariasikan.

Pada stator yang susunan kumparannya secara *overlapping* susunan kumparannya berada tumpang tindih dengan kumparan yang lainnya. Tentunya dengan susunan fasa yang berbeda pada tiap fasanya.



Gambar 2.4 (a) Stator *overlapping*, (b) Skematik stator *overlapping*[3]

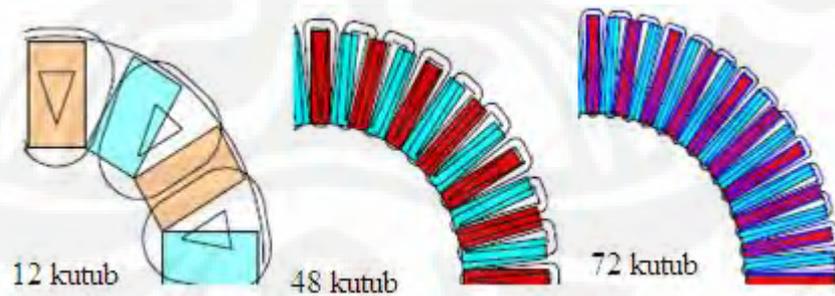
Pada stator dengan susunan kumparannya secara tanpa-*overlapping*, susunan kumparannya berada di sejajar dan berimpit di samping kumparan lainnya. Dengan susunan fasanya saling berurutan sesuai dengan jumlah kumparan pada stator tersebut.



Gambar 2.5 (a)Stator tanpa-*overlapping*, (b)Skematik tanpa-*overlapping*[3]

2.2.1.3 Jumlah Gulungan

Jumlah gulungan pada stator menentukan besarnya tegangan, arus keluaran, dan daya pada generator tersebut. Gulungan pada kumparan tersebut menentukan apakah yang di kuatkan adalah tegangan atau arus tergantung dari hubungan paralel atau seri pada hubungan kumparannya.



Gambar 2.6 Banyaknya kutub pada stator[4]

2.2.2 Rotor

Rotor pada generator jenis ini terdiri dari tatakan penyanggah magnet dan juga magnet permanen yang digunakan untuk menghasilkan medan magnet permanen. Tatakan penyanggahnya biasanya menggunakan inti besi

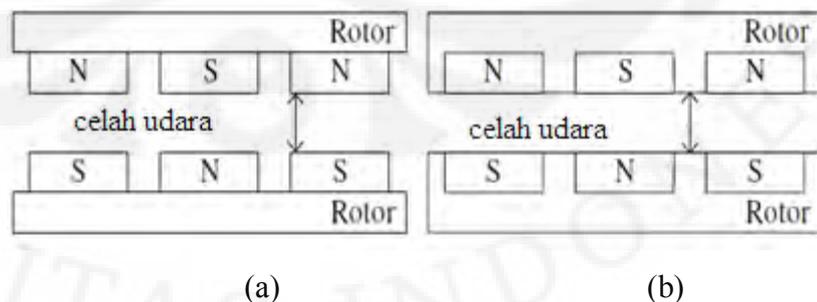
lunak *softcore iron* sedangkan pada magnet permanennya menggunakan “Neodymium Iron Boron” (NdFeB). Magnet permanen menggunakan bahan tersebut yang pada dasarnya merupakan suatu komponen magnet kuat dengan resistansi terhadap suhu tinggi. Desain generator dengan tanpa inti besi di tengah stator, tentunya berhubungan dengan besar dan volume dari magnet permanennya. Tentunya hal ini sesuai dengan besarnya celah udara yang terdapat pada stator dengan alasan menjaga kerapatan fluks magnet pada statornya. Akan tetapi, kekurangan justru akan menjadi lebih mahal untuk biaya konstruksinya karena membutuhkan magnet yang lebih besar.

2.2.2.1 Magnet Permanen *Embedded*[3]

Pada tipe rotor ini, magnet permanen telah memiliki dudukannya sendiri di penyanggah rotornya. Sehingga pada tipe rotor ini tampak jelas celah udara (*air gap*) yang terlihat antara rotor dan statornya.

2.2.2.2 Magnet Permanen *Surface-Mounted*[3]

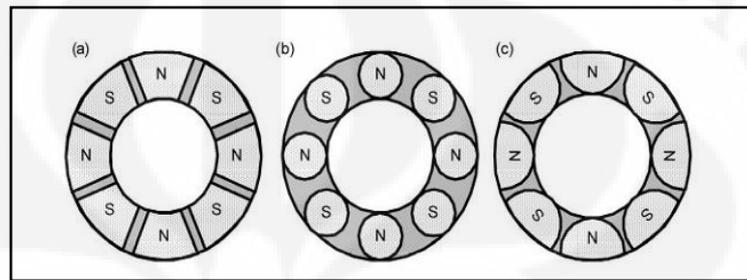
Pada tipe bentuk rotor ini magnet permanen ditempelkan pada permukaan penyanggah magnet. Sehingga terlihat adanya celah udara pada rotor tersebut yang berfungsi sebagai ventilasi pada saat rotor berputar lebih cepat yang dapat mengurangi panas dan mengurangi proses demagnetisasi. Tidak hanya itu, konstruksi dan biaya pada rotor ini lebih mudah dan lebih murah daripada menggunakan rotor dengan magnet permanen “Embedded”.



Gambar 2.7 (a) Rotor *Surface-mounted*, (b) Rotor *Embedded*[3]

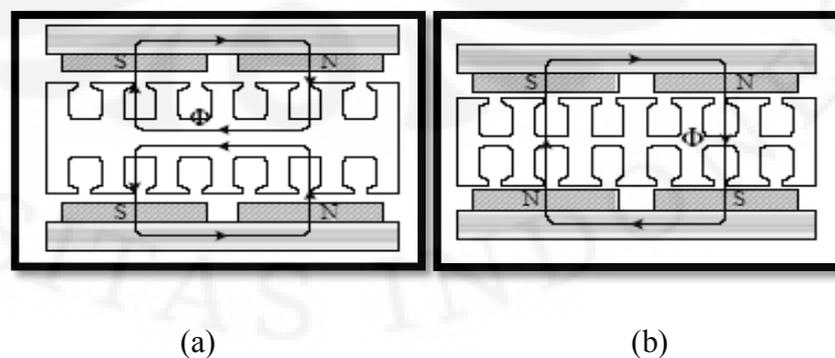
2.2.2.3 Bentuk Magnet, Tipe Magnet, dan Jumlah Kutub

Bentuk magnet permanen pada rotor generator fluk aksial sangat bervariasi diantaranya trapezoid, sirkular, semi sirkular, dan persegi. Tentunya bentuk – bentuk magnet tersebut disesuaikan dengan tipe dari keadaan statornya dengan mempertimbangkan tingkat efisiensi dari proporsionalitas keadaan stator dan rotornya.



Gambar 2.8 Tipe – tipe bentuk magnet pada rotor

Tipe rotor pada magnet permanen ini juga dibedakan menjadi dua macam dengan melihat dari skematik jalannya fluks yang mengalir pada rotornya yaitu: Rotor dengan tipe magnet U-U atau S-S dan juga tipe magnet U-S. Hal tersebut dapat dilihat dari pasangan magnet yang mendukungnya. Jika magnet yang dipasangkan beda kutub, dapat dikatakan rotor tersebut tipe U-S tetapi bila yang dipasangkan kutubnya sama rotor tersebut merupakan tipe U-U. Tentunya jenis tersebut memiliki dua rotor atau lebih.



Gambar 2.9 (a) Tipe magnet rotor U-U, (b) Tipe rotor magnet U-S [7]

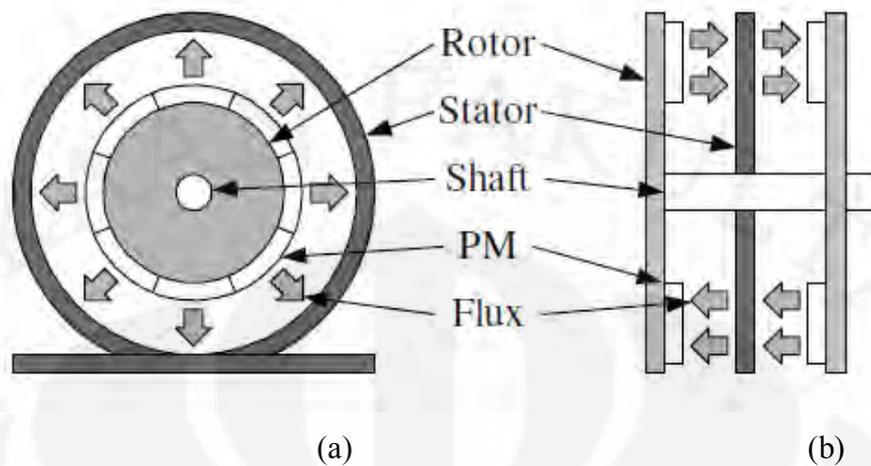
Jumlah kutub magnet pada rotor sangat berpengaruh pada kerapatan fluks yang menginduksi kumparan pada statornya. Hanya saja dengan adanya penambahan banyaknya kutub pada rotornya akan mengakibatkan massa pada rotor akan bertambah sehingga rotor akan lebih berat dan mempengaruhi torsi beban pada generator tersebut.

2.2.3 Celah Udara

Celah udara pada generator merupakan tempat berpindahnya fluks magnet pada magnet permanen dan menginduksi ke kumparan stator. Sehingga pada celah udara ini terjadi mekanisme perpindahan atau konversi energi dari mekanik menjadi elektrik. Tentunya besar atau lebarnya celah udara ini mempengaruhi penginduksian ke kumparan stator. Pada generator fluks aksial celah udara bisa saja lebih dari satu tergantung banyaknya stator atau rotor yang digunakan pada generator tersebut yang tentunya berbeda dengan celah udara pada generator konvensional pada umumnya.

2.3 Perbandingan Generator Fluks Aksial Dengan Generator Fluks Radial

Pada dasarnya perbedaan yang mendasar antara generator fluks aksial dengan generator konvensional dengan fluks radial adalah aliran fluks yang menembus statornya. Pada generator konvensional dengan fluks radial, fluks yang terbentuk oleh rotor baik itu melalui magnet permanen atau pencatutan arus searah agar memotong kumparan di stator dan menimbulkan gaya gerak listrik (GGL) tidak sepenuhnya tertangkap oleh kumparan stator tersebut. Akan tetapi, sebagian lepas dan menjadi rugi – rugi yang terdapat pada generator sinkron. Tentunya hal ini berbeda dengan generator fluks aksial yang arah fluksnya di arahkan secara aksial ke kumparan stator sehingga fluks dapat di tangkap lebih baik oleh stator.



Gambar 2.10 (a)Generator konvensional, (b)Generator fluks aksial[3]

Penggunaan fluks radial mengharuskan konstruksi generator menjadi lebih besar, dan generator menjadi lebih berat. Sehingga untuk beberapa sektor pembangkit. Fluks ini dianggap kurang efektif.

Dengan berkembangnya teknologi tentang Generator sinkron fluks aksial, memungkinkan dimensi dan berat dari generator menjadi jauh lebih berkurang untuk daya yang sama. Desain fluks aksial juga memiliki efisiensi generator lebih tinggi.

2.4 Prinsip Kerja Generator Fluks Aksial

Prinsip kerja dari generator fluks aksial sebenarnya tidak jauh berbeda dengan prinsip kerja pada generator konvensional yang memiliki fluks radial. Hanya saja pada generator fluks aksial memiliki medan magnet tetap yang berasal dari magnet permanen di rotornya sehingga tidak memerlukan pencatuan arus searah pada rotornya. Medan magnet (B_f) dari rotor tersebutlah yang akan menembus bidang kumparan stator sehingga menghasilkan fluks pada stator, dengan persamaan sebagai berikut:

$$\Phi_a = B_f \cdot A \cos \Theta \quad (2.1)$$

Keterangan:

A =Luas bidang yang ditembus oleh medan magnet

$\cos \Theta$ = sudut antara B_f dengan bidang normal (neutral plane)

Besar nilai fluks (Φ_a) akan berubah-ubah karena adanya perubahan Θ . Sudut Θ berubah karena medan B_f yang bergerak menembus stator dan menghasilkan sudut tembus terhadap bidang normal stator yang berbeda-beda. Perubahan fluks terhadap waktu akan menghasilkan ggl induksi dengan persamaan.

$$E_a = -N \frac{d\Phi_a}{dt} \quad (2.2)$$

Tanda negatif pada persamaan 2.3 menunjukkan bahwa arah gaya gerak listrik berlawanan dengan tegangan sumber. Dari persamaan 2.3 terlihat bahwa nilai GGL yang dihasilkan tergantung dari nilai perubahan fluks terhadap waktu.

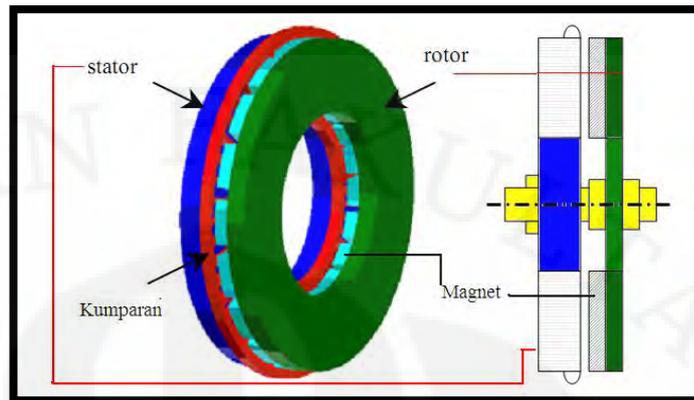
Penempatan kumparan pada stator menentukan tegangan output dari generator. Tiap pasang kumparan pada stator akan memiliki sudut fasa tertentu sehingga jika kita menempatkan 1 pasang kumparan saja, kita akan mendapatkan tegangan output dengan 1 fasa saja. Namun jika menempatkan 3 pasang kumparan pada stator dengan beda sudut 120 derajat, maka akan diperoleh tegangan keluaran dengan fasa yang berbeda 120 derajat juga.

2.5 Tipe – Tipe Generator Fluks Aksial

Apabila melihat dari jumlah stator dan rotor yang digunakan untuk meningkatkan daya keluaran pada generator, generator fluks aksial dapat dibedakan menjadi beberapa tipe diantaranya: generator fluks aksial rotor tunggal stator tunggal, generator fluks aksial rotor ganda dan stator tunggal (eksternal rotor), generator fluks aksial stator ganda dan rotor tunggal (internal rotor), dan generator fluks aksial rotor dan stator banyak.

2.5.1 Rotor dan Stator Tunggal (cakram tunggal)

Generator dengan rotor dan stator tunggal terdiri dari sebuah stator dan sebuah rotor. Generator ini terdiri dari 3 jenis yaitu *stator* yang memiliki alur, *stator* tanpa alur, dan *saliant pole stator*. Rotornya terdiri dari sebuah piringan besi kuat yang tertanam magnet di dalamnya. Sedangkan statornya terdiri dari kumparan jenis cincin yang tertanam di *epoxy* seperti material dan lempeng besi.



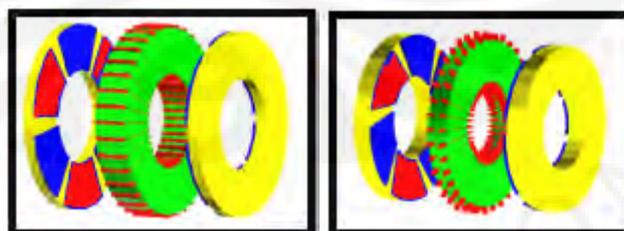
Gambar 2.11 Generator cakram tunggal

Generator ini biasa digunakan pada torsi kecil. Sehingga sangat efektif, bila digunakan pada generator angin dengan kapasitas penggerak yang kecil.

2.5.2 Rotor Ganda dan Stator Tunggal

Pada aplikasi generator dengan *double stage* ini biasanya digunakan pada torsi tinggi, sehingga dapat digunakan dengan tenaga berkapasitas besar.

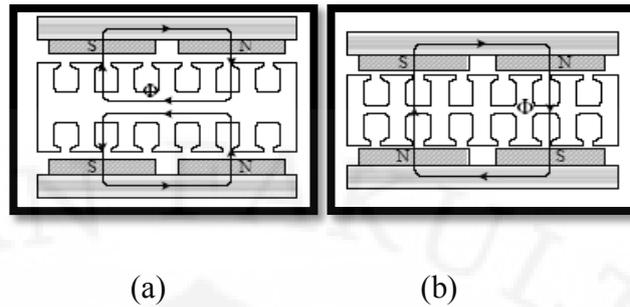
Pada generator dengan tipe yang memiliki 2 rotor dan 1 stator ini juga dibedakan menjadi dua tipe berdasarkan arah fluksnya yaitu tipe U-U dan tipe U-S. Tidak hanya melihat dari pergerakan fluksnya, dapat melihat perbandingan pula dari ukuran diameter stator dari kedua tipe tersebut. Pada diameter tipe U-S lebih besar daripada tipe U-U, ini disebabkan lilitan pada tipe U-U lebih pendek daripada tipe U-S.



(a)

(b)

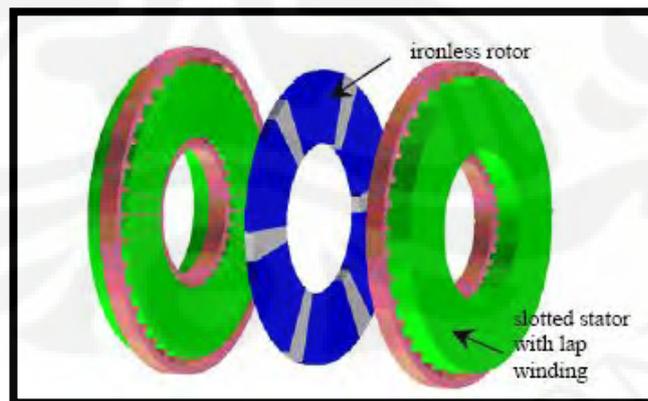
Gambar 2.12 (a) Bentuk Struktur Tipe U-U, (b) Bentuk Struktur Tipe U-S[7]



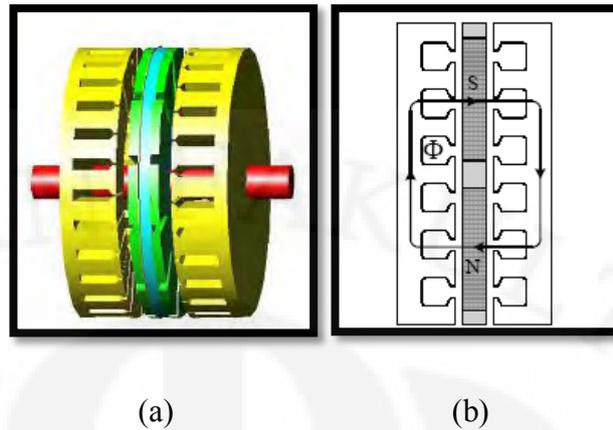
Gambar 2.13 (a)Arah fluks pada tipe U-U, (b)Arah fluks pada tipe U-S[7]

2.5.3 Stator Ganda dan Rotor Tunggal

Pada generator yang memiliki 2 stator dan sebuah rotor atau dikenal sebagai tipe stator eksternal memiliki perbedaan yang jelas dengan konstruksi pada rotor eksternal atau tipe yang memiliki 2 rotor dan sebuah stator. Pada Tipe ini pun juga memiliki perbedaan konstruksi rotor dengan tipe rotor eksternal. Tidak ada variasi tipe U-U atau U-S pada rotornya, tetapi variasi bentuk terjadi pada konstruksi statornya. Hanya saja pada tipe eksternal stator, konstruksi rotornya tidak semudah dengan pada tipe rotor eksternal. Akan tetapi, dengan alasan pergerakan fluks utamanya yang tidak melewati rotornya. Sehingga pada tipe ini sangat efektif bila digunakan pada mesin dengan momen inersia yang kecil yang memiliki sedikit besi pada bagian rotornya.



Gambar 2.14 Bentuk struktur generator eksternal stator

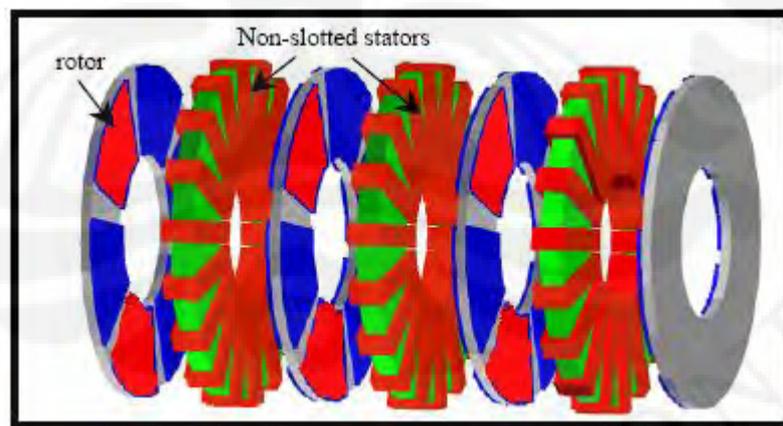


Gambar 2.15 (a) Generator stator ganda (b)Arah fluks pada tipe eksternal stator

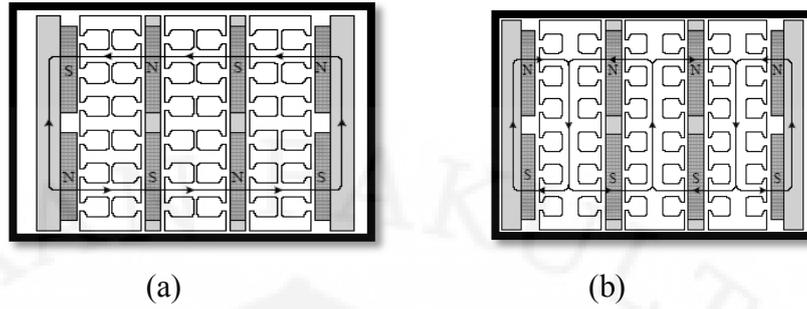
2.5.4 Rotor dan Stator banyak

Pada generator tipe ini memiliki lebih dari dua stator atau dua rotor. Dengan alasan kebutuhan akan tenaga yang lebih besar (torsi), generator ini didesain. Hanya saja pada generator ini cukup besar jika dibandingkan pada dua tipe sebelumnya telah dibahas di atas. Tidak hanya itu, pada generator ini juga memiliki transfer panas yang tidak begitu baik dibandingkan dengan kedua tipe sebelumnya.

Pada generator ini juga memiliki dua tipe yaitu tipe U-U dan tipe U-S.



Gambar 2.16 Bentuk generator dengan rotor dan stator banyak



Gambar 2.18 (a)Arah fluks pada tipe U-S, (b)Arah fluks pada tipe U-U

BAB III

PEMODELAN DAN SIMULASI

3.1 Generator Fluks Aksial Tipe Rotor Ganda Stator Tunggal Tanpa Inti Besi

Beracuan pada generator fluks aksial dengan tipe torus dan rotor ganda yang memiliki perbedaan tipe bentuk magnet berdasarkan arah aliran fluks yang mengalir, desain pemodelan dan simulasi pada generator fluks aksial mengacu pada variabel tipe jenis magnet yang berdasarkan arah aliran fluksnya. Dengan menggunakan beberapa variabel yang dijadikan tetap pada ukuran, berat, dan kecepatan putar, akan dibandingkan besarnya fluks yang membus stator dan tegangan induksi.

3.1.1 Desain Rotor[1]

Rotor yang digunakan adalah menggunakan rotor ganda 6 pasang kutub magnet dengan dua tipe magnet berbentuk trapezoid dengan ukuran sebagai berikut:

Tabel 3.1 Geometri penyanggah rotor 12 kutub

	meter	Keterangan	Bidang
ryo	0,18	jari-jari penyanggah rotor bagian luar	x/y
ryi	0,1	jari-jari penyanggah bagian dalam	x/y
ty	0,00635	tebal penyanggah	z

Tabel 3.2 Geometri magnet rotor

ro	0,1524	jari-jari magnet bagian luar	x/y
rin	0,1016	jari-jari magnet bagian dalam	x/y
wo	0,0254	lebar magnet bagian luar	x/y

wi	0,0254	lebar magnet bagian dalam	x/y
tm	0,0127	tebal magnet	z

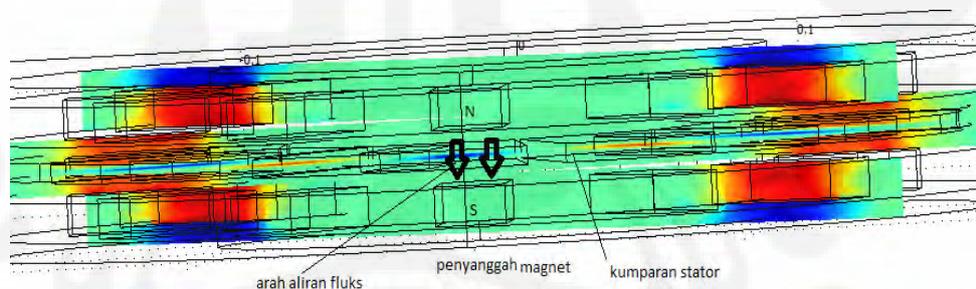
Tabel 3.3 Geometri celah udara

ta	0,018	jarak antara 2 rotor	z
-----------	-------	----------------------	---

Pada magnet tersebut menggunakan bahan “Neodinium Iron Boron” (NdFeB), $B_r = 1,27$ T, dan $H_c = 905$ kA/m. Sedangkan pada penyanggah magnetnya digunakan inti besi lunak (soft iron)[6].

3.1.1.1 Desain Rotor Dengan Tipe Magnet U-S

Pada desain rotor dengan tipe magnet U-S, digunakan ukuran dan bahan yang sama dengan spesifikasi secara umum pada kondisi rotor yang telah disebutkan. Hanya saja untuk nilai polaritas yang diberikan berbeda untuk tiap pasang kutubnya.



Gambar 3.1 Desain penampang generator

3.1.1.2 Desain Rotor Dengan Tipe Magnet U-U

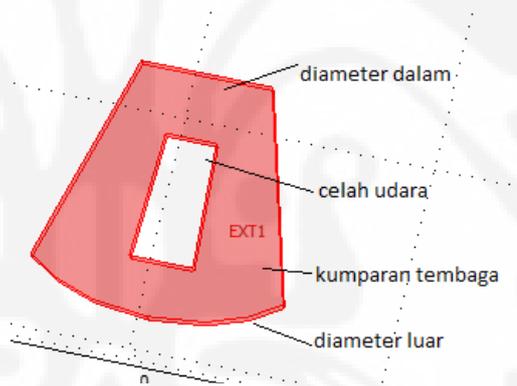
Pada desain dengan tipe U-U, nilai polaritas antara magnet yang atas sama dengan nilai polaritas yang bawah.

3.1.2 Desain Stator

Statornya menggunakan bahan tembaga (Cu) dengan bentuk trapezoid 3 fasa, dengan tipe lilitan tanpa-*overlapping*, tanpa inti besi di tengahnya. Berikut data ukuran geometrinya:

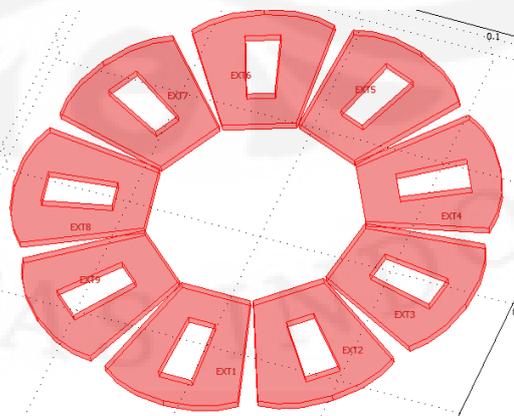
Tabel 3.4 Geometri stator

Js	0,006	jarak magnet dengan stator	x/y
ts	0,006	tebal stator	x/y
rco	0,1524	jari-jari stator bagian luar	x/y
rci	0,1016	jari-jari stator bagian dalam	x/y
wco	0,0254	lebar stator bagian luar	x/y
wci	0,02032	lebar stator bagian dalam	x/y
N	100	jumlah lilitan di stator	
Ns	9	banyaknya kumparan	
Nph	3	jumlah fasa pada stator	



Gambar 3.2 Desain penampang kumparan stator

Ukuran pada desain dan satuan pada desain divisualisasikan dengan desain dan ukuran sebenarnya yaitu dalam satuan internasional (SI).



Gambar 3.3 Desain stator

3.2 Persamaan Fluks Magnet Yang Menembus Stator

Generator ini menggunakan magnet permanen sehingga besarnya medan magnet pada rotornya memiliki besaran tetap. Akan tetapi, karena generator ini berputar akan ada medan magnet yang memotong kumparan stator dengan besaran yang berubah-ubah sesuai dengan besaran luasan stator yang ditembusnya.

Pada desain ini terbagi atas beberapa bagian yang terdiri dari rotor (magnet permanen dan penyanggahnya), stator (kumparan tembaga), dan udara (termasuk celah udara antara rotor dan stator).

Pada bagian rotor besarnya medan magnet ditentukan oleh magnet permanen yang didefinisikan oleh:

$$B = \mu_0 \mu_r H + B_r \quad (3.1)$$

Bila di jabarkan persamaannya menjadi:

$$-\nabla \cdot (\mu_0 \mu_r \nabla V_m - B_r) = 0 \quad (3.2)$$

μ_0 = permeabilitas ruang hampa yang besarnya $4\pi \times 10^{-7}$ H/m

μ_r = permeabilitas relatif suatu bahan

H = Intensitas medan magnet atau vektor potensial magnetik ($-\nabla V_m$) (A/m)

B_r = kerapatan fluks sisa

B = kerapatan fluks

Pada bagian magnet permanen tentunya menggunakan suatu bahan Neodinium Iron Boron (NdFeB) yang memiliki besaran nilai B_r dan H secara konstan yang merupakan nilai karakteristik suatu bahan tersebut.

Sedangkan pada penyanggah rotor, digunakan suatu bahan yang tidak menimbulkan rugi – rugi pada magnet permanen yang di sanggahnya. Pada desain yang menggunakan perangkat lunak ini, penyanggah rotor hanya di modelkan dengan Inti besi lunak tanpa rugi - rugi. Hal ini dilakukan dengan asumsi bila

menggunakan bahan seperti logam yang memiliki rugi – rugi, kondisi yang terjadi dalam pengambilan data tidak akan ideal. Sehingga nantinya akan merusak presisi data yang diperoleh. Oleh karena itu, inti besi lunak tanpa rugi - rugi sebagai permodelan pada penyanggah rotor dengan mempertimbangkan beberapa parameter – parameter seperti konduktifitas dan resitifitas bahan tersebut. Berikut persamaan kerapatan medan magnet yang dihasilkan oleh penyanggah rotor tersebut:

$$B = f(H) \quad (3.3)$$

Dengan persamaannya menjadi:

$$-\nabla B = 0 \quad (3.4)$$

Pada statornya merupakan terbuat dari tembaga yang nantinya akan ditembus oleh medan magnet dari rotor. Dengan persamaan;

$$B = \mu_0 \mu_r H \quad (3.5)$$

Yang pada persamaannya menjadi

$$-\nabla \cdot \mu_0 \mu_r \nabla \cdot V_m = 0 \quad (3.6)$$

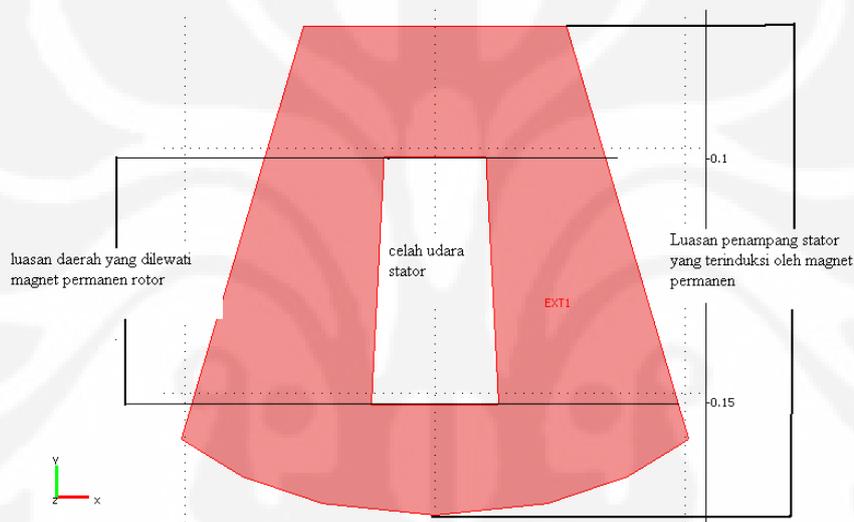
Pada perangkat lunak yang digunakan telah tersedia bahan pembuat stator yaitu tembaga, sehingga parameter – parameter pada karakteristik bahan tersebut telah didefinisikan nilai – nilainya.

Ada dua cara untuk menentukan besarnya fluks yang menembus stator yaitu dengan dengan mencari fluks yang menembus pada luas permukaan tiap – tiap sisi pada kumparan dan bisa juga dengan menghitung dari volume sebuah ruang yang selanjutnya tanpa mengubah besaran fluks tersebut dapat dibagi dengan tebal untuk mendapatkan fluks rata – rata yang tertembus. Tentunya dengan mengacu pada persamaan[5]:

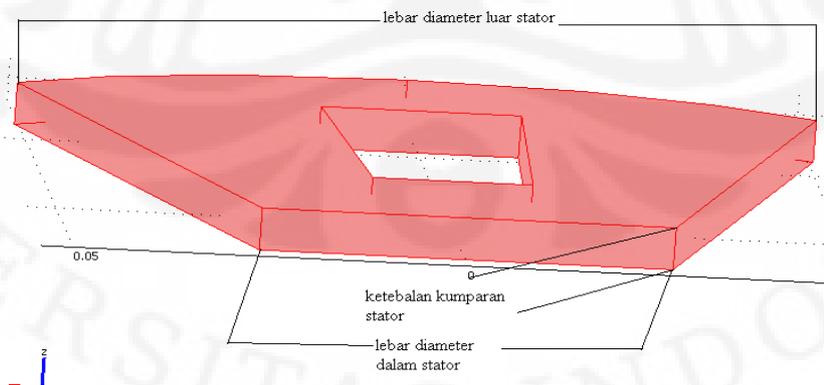
$$\Phi = \int_s B \cdot dS \text{ Wb} \quad (3.7)$$

Pada pembahasan ini cara yang digunakan adalah dengan menghitung fluks yang menembus ruang, cara tersebut digunakan dengan asumsi bahwa medan

magnet yang menembus hanya bergantung pada geometri dari luasan penampang kumparan yang ditembus oleh medan magnet yang dihasilkan oleh magnet permanen. Oleh karena itu, agar dapat mengetahui medan magnet yang menembus sebuah kumparan yang merata pada stator tersebut, dapat diambil sebuah daerah yang berupa volume atau pada perangkat lunak ini disebut sebagai daerah “subdomain” yang selanjutnya untuk mengetahui tiap – tiap lapisan daerah yang tertembus oleh medan magnet dapat dibagi oleh ketebalan kumparan. Sehingga tanpa merubah satuan besarnya fluks yang menembus penampang stator, dapat diketahui nilai besaran rata – rata fluks tersebut pada suatu ketebalan.



Gambar 3.4 Penampang atas kumparan stator



Gambar 3.5 Penampang samping kumparan stator

3.3 Persamaan Tegangan Induksi Stator

Tegangan yang menginduksi stator didapatkan oleh suatu perubahan medan magnet yang menembus suatu luasan bidang pada stator dalam satuan waktu.

$$E = -NN \frac{\delta\Phi}{\delta t} \quad (3.8)$$

$$E = -NN \cdot A \frac{\delta B}{\delta t} \quad (3.9)$$

$$E = -NN \frac{\delta\Phi}{\delta t} = -NN \frac{\delta\Phi}{\delta\theta} \cdot \frac{\delta\theta}{\delta t} = -NN \frac{\delta\Phi}{\delta\theta} \omega \quad (3.10)$$

E = tegangan induksi stator

NN = banyaknya lilitan

B = kerapatan medan magnet

A = luasan yang ditembus medan magnet

ω = kecepatan putar generator

φ = fluks magnet

$\delta\theta$ = perubahan sudut pada generator

Dapat dilihat bahwa besarnya tegangan yang menginduksi stator bergantung pada perubahan fluks tiap satuan perubahan waktu. Karena generator ini berputar pada kecepatan tertentu perubahan fluks akan terjadi seiring dengan perpindahan sudut.

Metodelogi menentukan besarnya tegangan pada generator ini didapatkan melalui besarnya perubahan fluks pada tiap satuan waktunya yang telah diselesaikan dalam perangkat lunak tersebut. Sehingga yang didapat adalah besarnya fluks pada tiap waktu tertentu dan ditentukan perubahan fluksnya dalam suatu konstanta waktu.

3.4 Torsi[3]

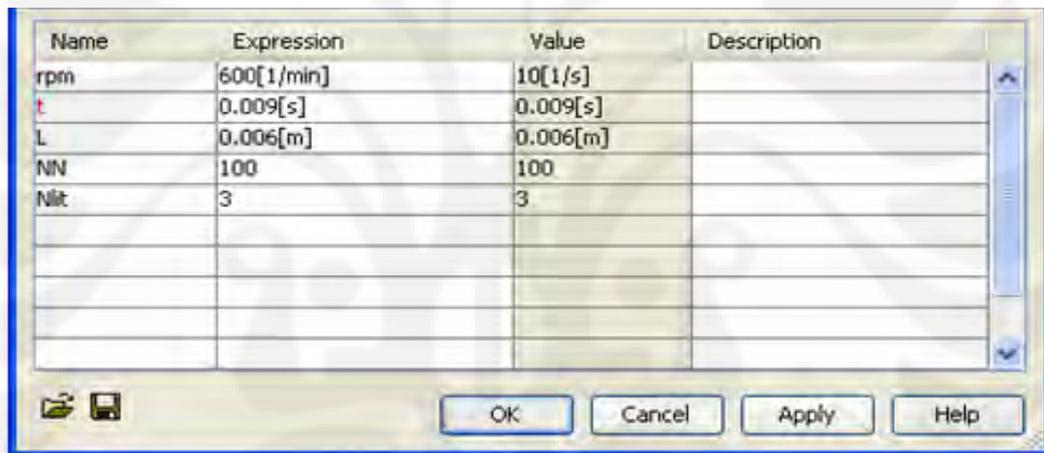
Torsi pada generator fluks aksial terbagi menjadi dua macam yaitu torsi elektromagnetik dan riak torsi (*ripple torque*). Torsi elektromagnetik terjadi akibat adanya interaksi dari gaya magnetik yang terjadi secara tangensial antara rotor dan stator. Sedangkan pada riak torsi terdiri atas *cogging* torsi dan *mutual* riak torsi. *Cogging* torsi terbentuk akibat adanya interaksi fluks rotor dengan *slot* pada stator. Oleh karena itu, pada generator fluks aksial tanpa inti besi di statornya tidak terjadi *cogging* torsi karena tidak memiliki alur stator sehingga sangat baik digunakan pada angin dengan kecepatan rendah. *Mutual* torsi terjadi akibat karena

adanya tonjolan magnet pada rotor (*saliency magnetic*) yang berakibat pada harmonik.

3.5 Simulasi

Simulasi bertujuan untuk melihat unjuk kerja dari desain pemodelan generator yang telah di desain dengan melihat parameter fluks magnet yang menginduksi kumparan stator dengan menggunakan perangkat lunak COMSOL 3.5 yang di lakukan di Labolatorium Teknik Fisika Institut Teknologi Bandung.

Untuk mensimulasikan unjuk kerja generator yang telah didesain adalah perlu adanya variabel tetap yang perlu di definisikan pada perangkat lunak ini, berikut variabel yang didefinisikan pada perangkat lunak ini:



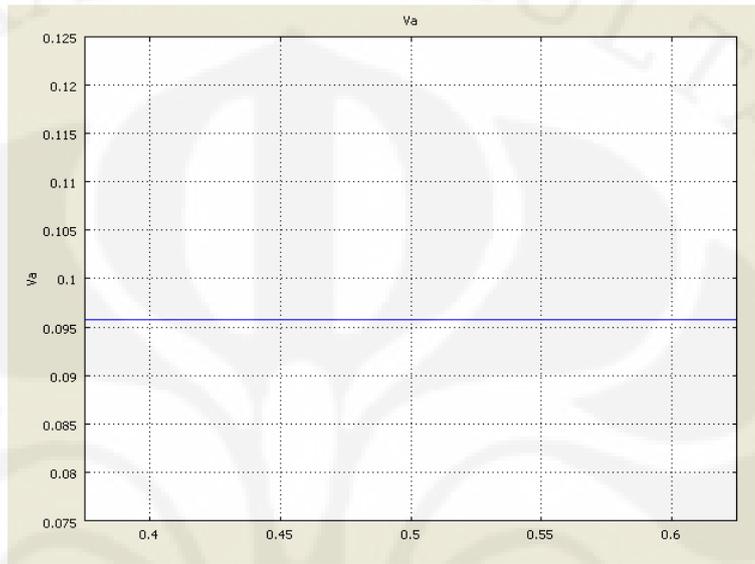
Name	Expression	Value	Description
rpm	600[1/min]	10[1/s]	
t	0.009[s]	0.009[s]	
L	0.006[m]	0.006[m]	
NN	100	100	
Nit	3	3	

Gambar 3.6 Spesifikasi parameter simulasi konstanta variabel

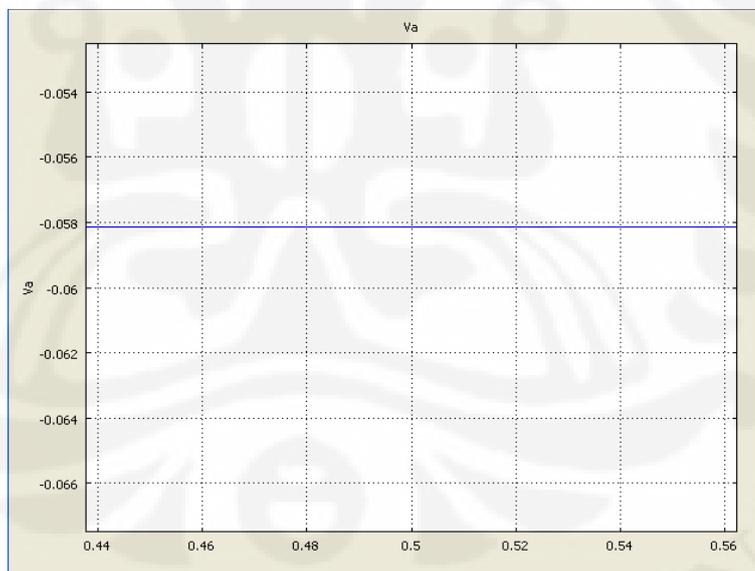
BAB IV

HASIL SIMULASI DAN ANALISA

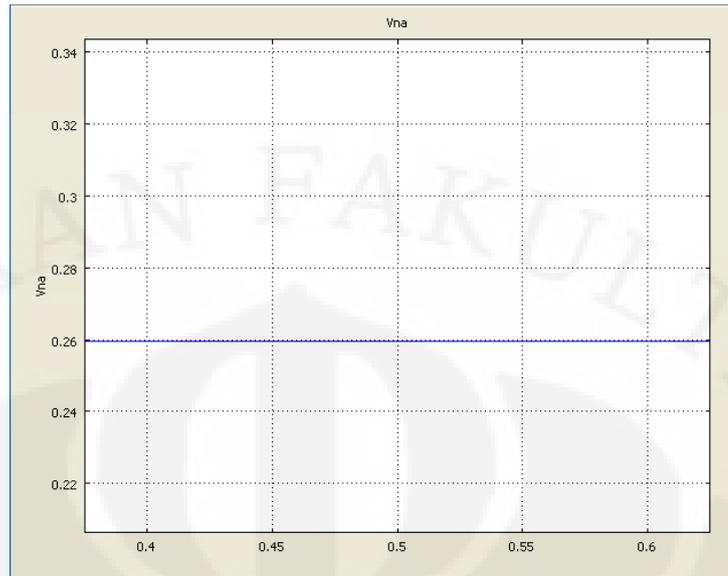
4.1 Hasil Simulasi Fluks Terhadap Tipe Polaritas Magnet Permanen



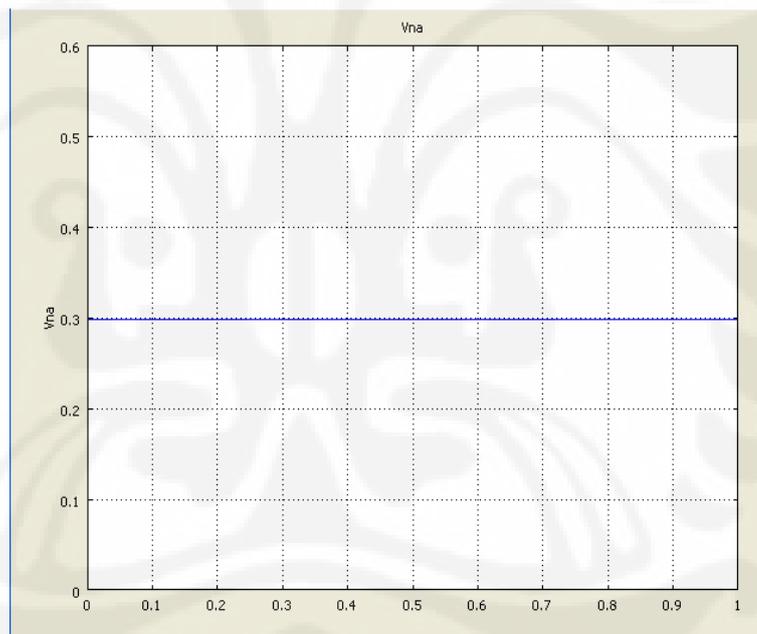
Gambar 4.1 Hasil simulasi fluks tipe U-S detik 0.000 pada sumbu Z



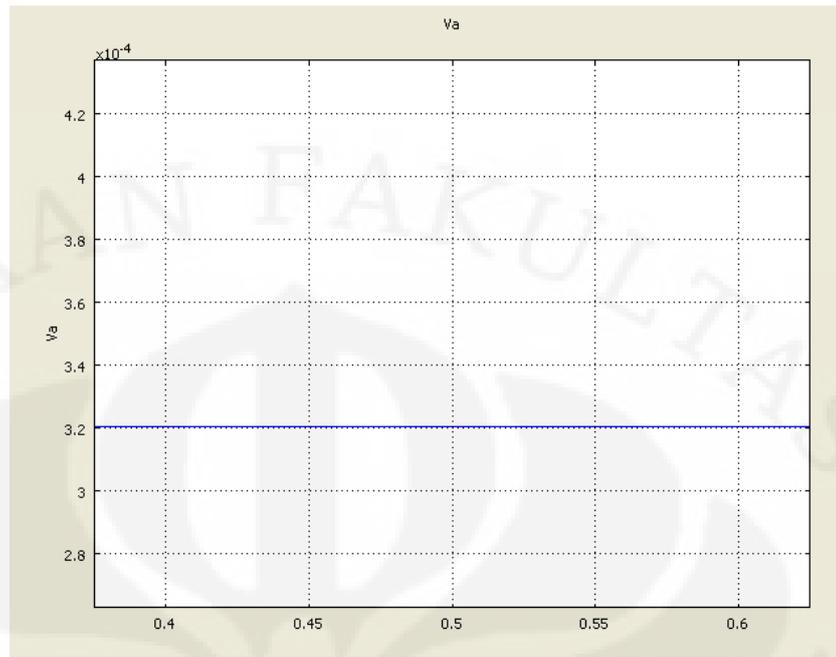
Gambar 4.2 Hasil simulasi fluks tipe U-S detik 0.009 pada sumbu Z



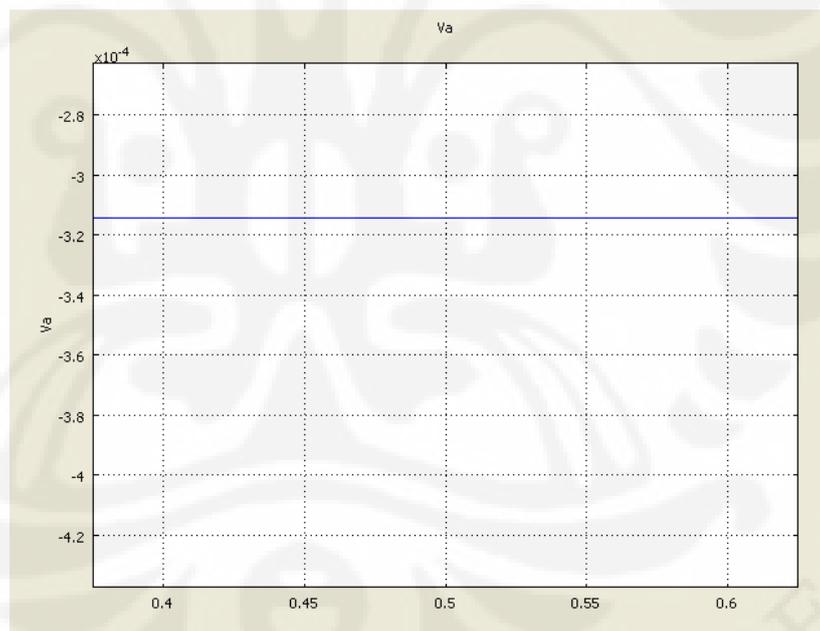
Gambar 4.3 Hasil simulasi fluks tipe U-S detik 0.000 pada sumbu normal



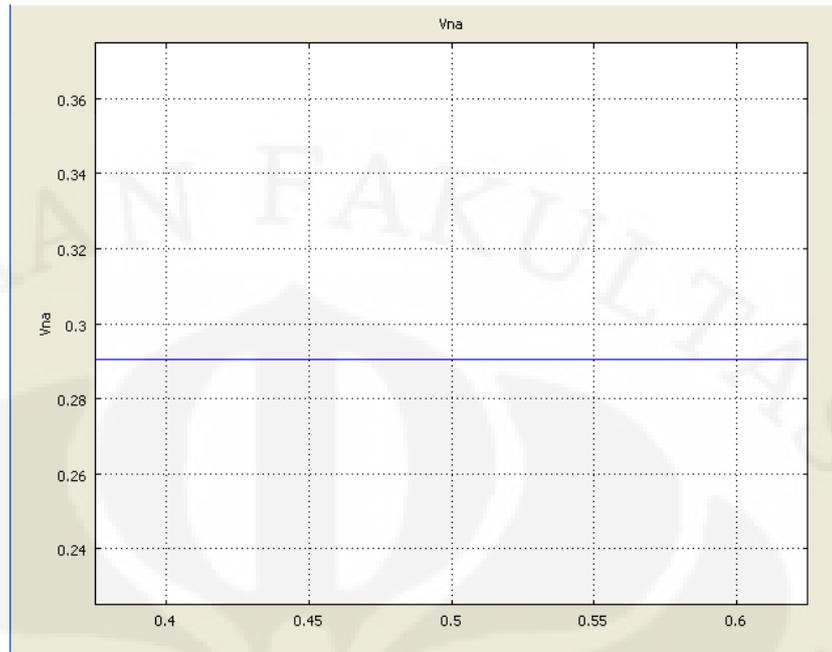
Gambar 4.4 Hasil simulasi fluks tipe U-S detik 0.009 pada sumbu normal



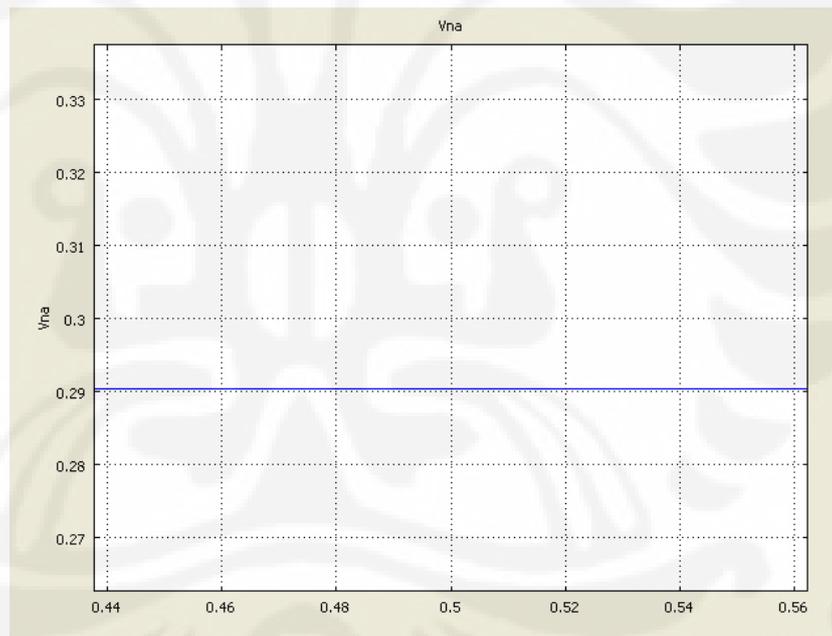
Gambar 4.5 Hasil simulasi fluks tipe U-U detik 0.000 pada sumbu Z



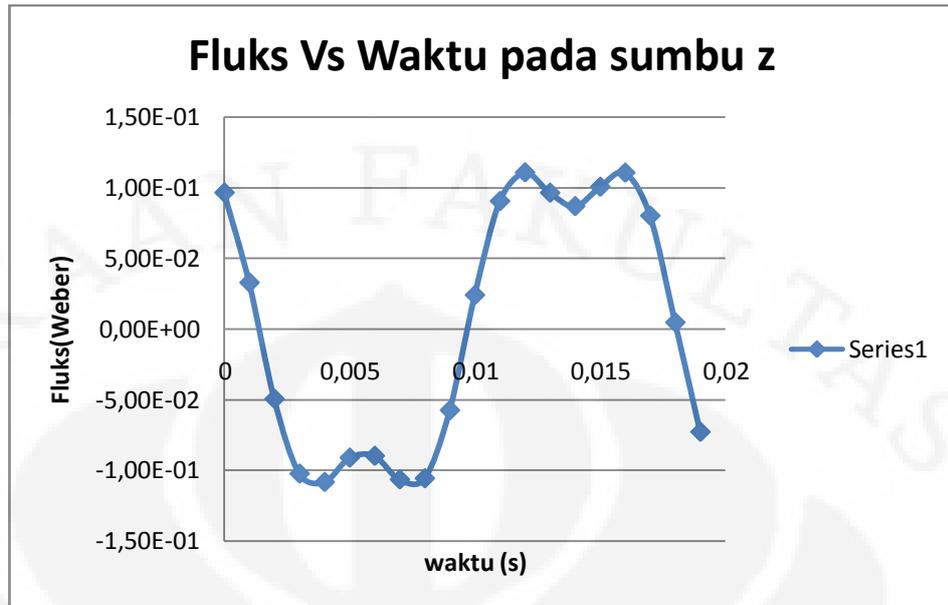
Gambar 4.6 Hasil simulasi fluks tipe U-U detik 0.009 pada sumbu Z



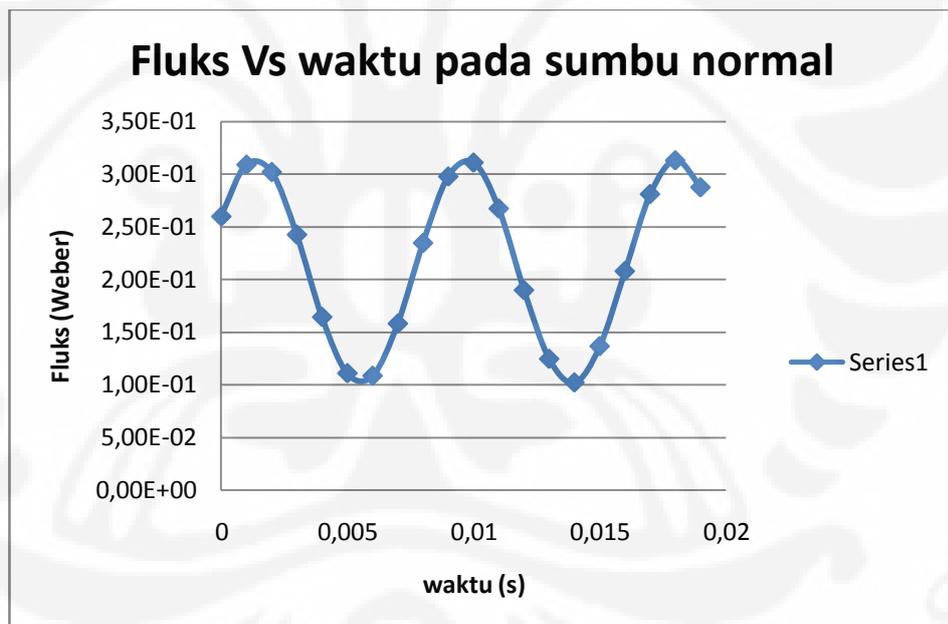
Gambar 4.7 Hasil simulasi fluks tipe U-U detik 0.000 pada sumbu normal



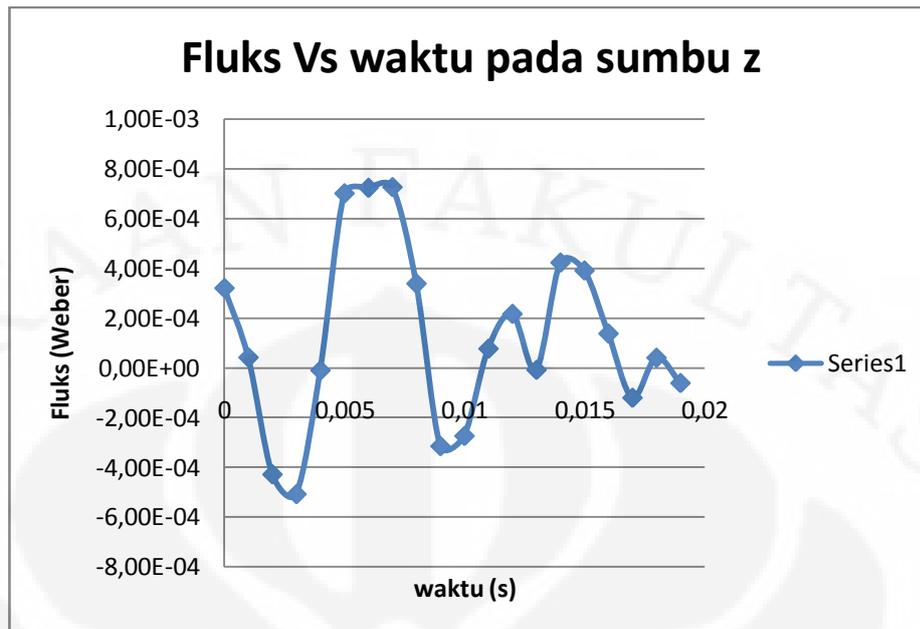
Gambar 4.8 Hasil simulasi fluks tipe U-U detik 0.009 pada sumbu normal



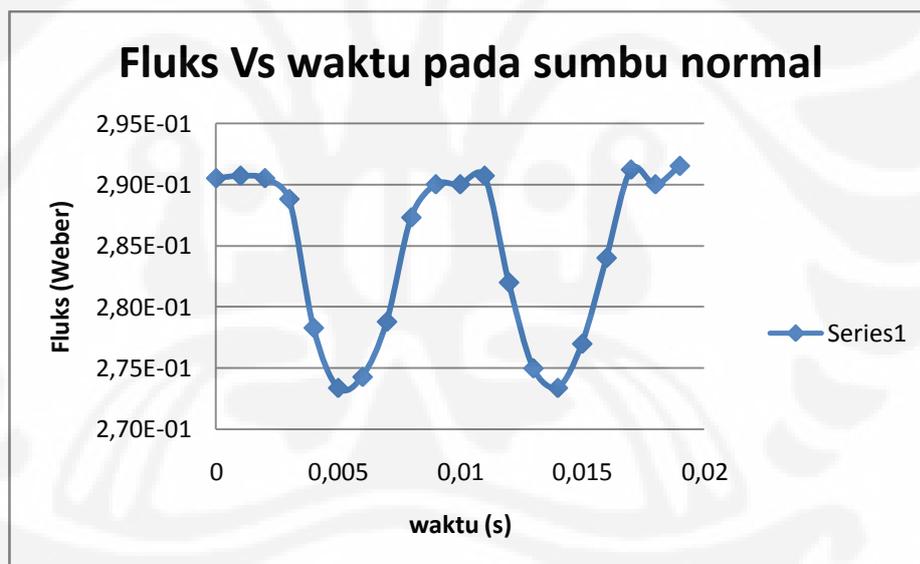
Gambar 4.9 Perubahan fluks terhadap sumbu Z tipe U-S



Gambar 4.10 Perubahan fluks terhadap sumbu normal tipe U-S



Gambar 4.11 Perubahan fluks terhadap sumbu Z tipe U-U



Gambar 4.12 Perubahan fluks terhadap sumbu normal tipe U-U

4.2 Analisa Analisa Hasil Fluks Terhadap Tipe Polaritas Magnet Permanen

Berdasarkan gambar 4.1 dan gambar 4.2 atau gambar 4.3 dan gambar 4.4 terlihat bahwa besarnya fluks yang menembus stator pada satu titik yang sama akan berubah – ubah seiring dengan berputarnya rotor. Hal ini tentunya sesuai dengan prinsip kerja dari sebuah mesin induksi.

Akan tetapi, bila membandingkan gambar 4.1, gambar 4.2 dengan gambar 4.5, gambar 4.6 terlihat bahwa fluks yang menembus stator memiliki nilai yang besarnya jauh berbeda. Pada gambar 4.1 dan gambar 4.2 merupakan hasil dari simulasi generator fluks aksial tanpa inti besi stator tipe U-S sedangkan pada gambar 4.5 dan gambar 4.6 merupakan generator fluks aksial tanpa inti besi stator tipe U-U. Perbedaan nilai fluks ini berkaitan dengan tipe magnet yang membentuk rotornya. Sehingga terjadi perbedaan aliran fluks yang mengalir atau melewati stator. Pada tipe U-S, medan magnet yang dihasilkan oleh magnet permanen yang melewati stator langsung menembus kumparan stator sehingga fluks yang dihasilkan bernilai besar. Dapat dilihat pada gambar 4.1 pada saat 0 sekon bernilai sebesar 0.0964 Weber sedangkan pada saat 0.009 sekon bernilai sebesar -0.0577 Weber.

Berbeda dengan pada tipe U-U, medan magnet yang dihasilkan oleh magnet permanen tidak menembus stator tetapi hanya melewati permukaan kumparan stator saja. Dapat dilihat dari gambar 4.5 pada saat 0 sekon fluks yang menembus sumbu z bernilai 0.00032 Weber sedangkan pada gambar 4.6 yang menunjukkan waktu saat 0.009 sekon bernilai -0.000314 Weber. Karena statornya merupakan stator tanpa inti besi yang terlalu banyak celah udara, akibatnya fluks tidak dapat mengalir secara maksimal di dalam stator sehingga pada simulasi menunjukkan nilai fluks pada tipe U-U jauh lebih kecil daripada tipe U-S.

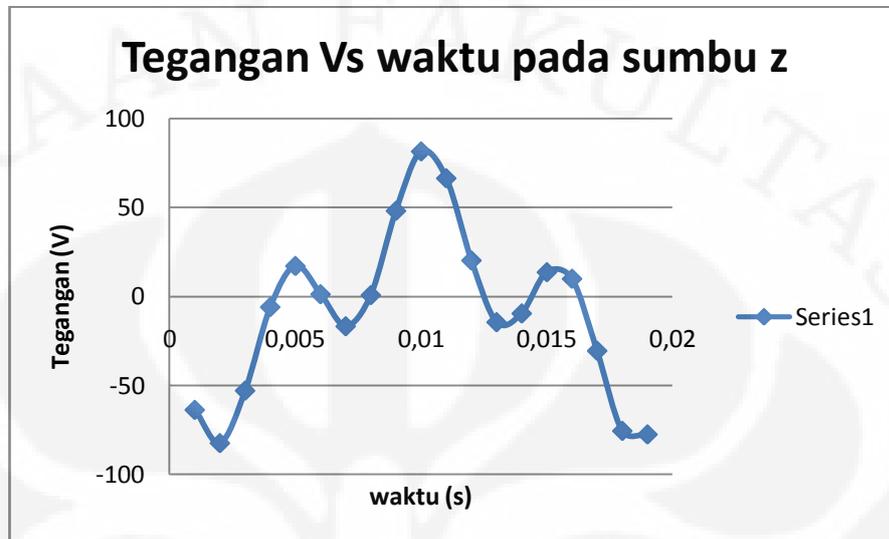
Pada gambar 4.1, gambar 4.2 dengan gambar 4.3, gambar 4.4 atau gambar 4.5, gambar 4.6 dengan gambar 4.7, gambar 4.8 terlihat bahwa pada gambar 4.1, gambar 4.2, gambar 4.5, dan gambar 4.6 merupakan besarnya fluks magnet yang menembus stator dengan sumbu Z sedangkan gambar 4.3, gambar 4.4, gambar 4.7, dan gambar 4.8 merupakan besarnya fluks yang menembus dengan sumbu normal. Terlihat bahwa pada fluks yang menembus dengan sumbu normal bernilai jauh lebih besar daripada fluks yang menembus pada sumbu Z terlebih lagi pada tipe U-U yang nilainya sangat kecil. Fluks yang terukur pada perangkat lunak sumbu Z merupakan besaran vektor sedangkan pada sumbu normal merupakan besaran skalar. Oleh karena itu, dapat dilihat pula bahwa nilai – nilai dari data

pada fluks yang menembus sumbu normal yang telah diperoleh tidak ada yang bernilai negatif.

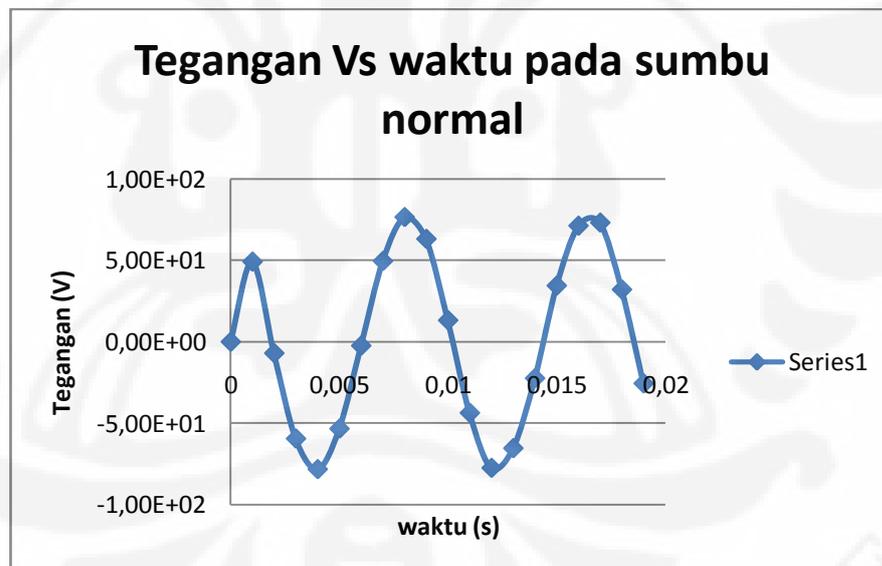
Berdasarkan gambar 4.9 dengan gambar 4.11 merupakan grafik perubahan fluks terhadap satuan waktu yang terdapat pada sumbu z. Terlihat bahwa pada gambar 4.9 yang menunjukkan grafik perubahan fluks pada tipe U-S yang mengalami perubahan grafik terjadi secara halus dan membentuk suatu sinusoid dengan menunjukkan amplitudo yang cukup besar walaupun terjadi sedikit riak pada gelombang puncaknya. Akan tetapi, berbeda dengan gambar 4.11 yang menunjukkan grafik perubahan fluks pada tipe U-U untuk tiap satuan waktu pada sumbu Z yang menunjukkan grafik perubahan yang tidak begitu halus dan tidak menunjukkan perubahan fluks yang secara teratur. Pada tipe U-S fluks dapat berubah – ubah dan perubahan secara teratur membentuk gelombang sinusoid karena fluks tersebut menembus bidang Z. Sedangkan pada tipe U-U fluks tidak menembus bidang Z, sehingga perubahan yang terjadi pada sumbu Z tidak teratur dan hanya berupa riak – riak saja.

Pada gambar 4.10 dan gambar 4.12 menunjukkan grafik perubahan fluks terhadap satuan waktu pada sumbu normal. Pada gambar 4.10 menunjukkan perubahan fluks pada tipe U-S sedangkan pada gambar 4.12 menunjukkan grafik perubahan fluks tipe U-U. pada kedua gambar ini terlihat perubahan cukup bagus yang berupa gelombang sinusoid. Dilihat dari nilai puncaknya pada kedua tipe ini tentunya tidak jauh berbeda yang berkisar antara 0.29 – 0.3 Weber. Dapat dilihat pula bahwa perubahan fluks yang terjadi pada tipe U-U dengan membandingkan antara yang menembus sumbu Z dengan sumbu normal sangat berbeda. Pada yang menembus sumbu normal perubahan cukup bagus dan teratur membentuk sinusoid. Hal ini tentunya berkaitan dengan arah fluks pada tipe U-U yang perubahannya lebih bagus bila ditinjau dari kesejajaran pada sumbu X dan sumbu Y, bukan sumbu Z.

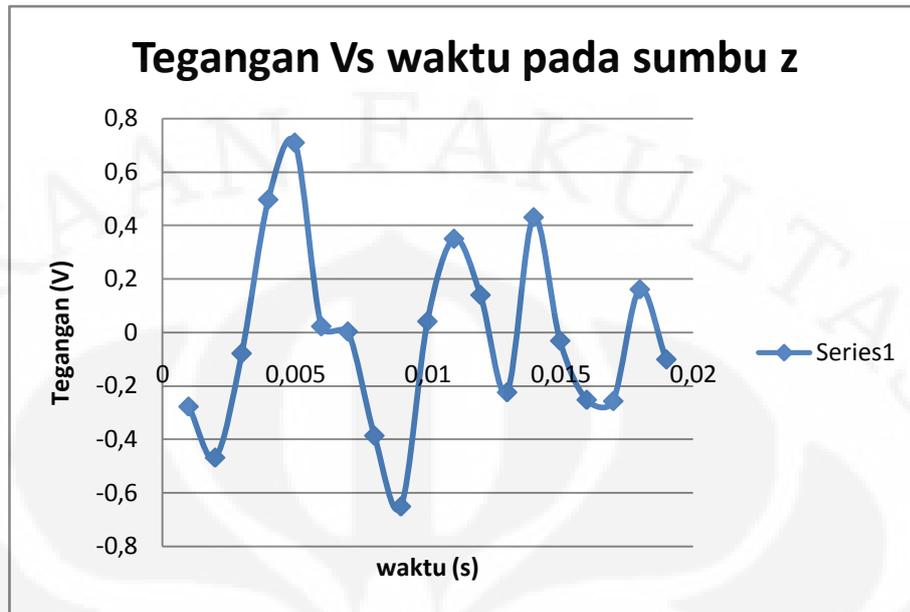
4.3 Hasil Simulasi Tegangan Terhadap Tipe Polaritas Magnet Permanen



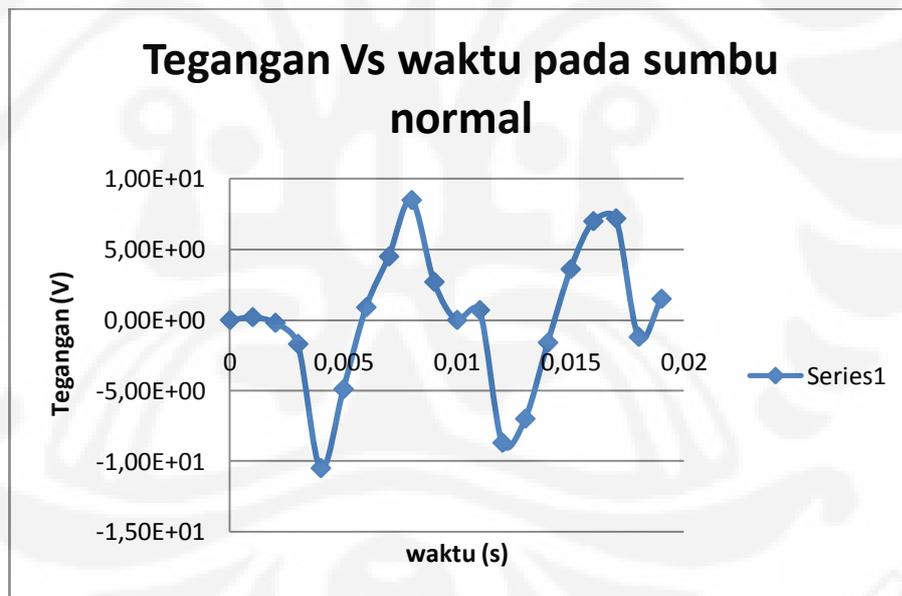
Gambar 4.13 Grafik tegangan induksi tipe U-S bidang Z



Gambar 4.14 Grafik tegangan induksi tipe U-S normal



Gambar 4.15 Grafik tegangan induksi tipe U-U bidang Z



Gambar 4.16 Grafik tegangan induksi tipe U-U bidang normal

4.4 Analisa Tegangan Terhadap Tipe Polaritas Magnet Permanen

Berdasarkan gambar 4.13 dengan gambar 4.15, menunjukkan grafik perubahan tegangan terhadap satu satuan waktu. Gambar 4.13 menunjukkan grafik perubahan tegangan tipe U-S sedangkan pada gambar 4.15 grafik perubahan tegangan tipe U-U. Pada gambar 4.13 grafik yang terbentuk sinusoid walaupun terjadi riak pada grafik tersebut pada satu waktu tertentu hingga mencapai sekitar 20 Volt. Hal ini berkaitan dengan pengaruh harmonik yang terjadi pada statornya. Pada gambar 4.13 menunjukkan amplitude yang cukup besar yaitu mencapai 80 volt. Sedangkan pada gambar 4.15 menunjukkan bahwa grafik yang terjadi tidak sinusoid. Perubahan yang terjadi tidak mengalami keteraturan dan berupa riak – riak saja dengan amplitude yang sangat kecil dengan amplitude puncak mencapai 0,8 Volt. Tentunya dapat dilihat bahwa perubahan tegangan pada tipe U-U sangat kecil. Hal ini berkaitan dengan pengaruh dari sedikitnya fluks yang menembus sumbu Z begitu juga dengan perubahannya yang mengakibatkan grafik menjadi tidak terlalu halus perubahannya dan tidak membentuk sinusoid.

Pada gambar 4.14 dan gambar 4.16 menunjukkan grafik perubahan tegangan terhadap satuan waktu dengan sumbu normal. Pada gambar 4.14 menunjukkan grafik perubahan tegangan pada tipe U-S sedangkan pada gambar 4.16 menunjukkan grafik perubahan tegangan tipe U-U. Dengan mengacu pada gambar tersebut, terlihat bahwa perubahan tegangan pada sumbu normal pada tipe U-S sinusoid. Tidak hanya itu, tegangan puncak pada grafik ini mencapai 80 Volt yang tidak jauh berbeda dengan perubahan tegangan apabila dilihat dari sumbu Z. Hanya saja pada grafik ini tidak menunjukkan adanya riak pada gelombang yang dibentuknya. Berbeda dengan grafik yang menunjukkan perubahan pada tipe U-S, pada tipe U-U grafik pada gambar ini menunjukkan bentuk gelombang yang mengalami perubahan tetapi tidak mengalami keteraturan. Walaupun pada amplitudonya menunjukkan adanya tegangan puncak mencapai 10 Volt. Hal ini disebabkan adanya perubahan fluks yang terjadi pada sumbu X sesuai dengan arah aliran fluksnya, bukan pada sumbu Z yang telah dibahas sebelumnya yang tidak mengalami perubahan fluks secara signifikan.



BAB V

KESIMPULAN

1. Perbedaan tipe pasangan polaritas magnet pada rotor untuk generator fluks aksial hanya akan merubah aliran fluks yang menembus stator. Perubahan aliran fluks pada generator fluks aksial magnet permanen tanpa inti stator mempengaruhi besarnya fluks yang menembus stator dan perubahan fluks tiap satuan waktu.
2. Pada tipe U-S fluks yang menembus stator bernilai lebih besar daripada tipe U-U. Perubahan fluks pada tipe U-S bernilai jauh lebih besar daripada perubahan fluks pada tipe U-U.
3. Tegangan induksi yang dihasilkan pada tipe U-S lebih besar daripada tegangan yang dihasilkan pada tipe U-U.
4. Bentuk gelombang keluaran dari fluks yang dihasilkan pada tipe U-U lebih banyak riak daripada tipe U-S. Bentuk gelombang keluaran tegangan pada tipe U-S lebih mulus daripada gelombang keluaran tegangan tipe U-U.



DAFTAR ACUAN

- [1] Price, Garrison F., Todd D. Batzel, Mihai Comanescu, and Bruce A. Muller *Design and Testing of a Permanent Magnet Axial Flux Wind Power Generator*, Pennsylvania State University, Altoona College, 2008
- [2] Aydin, Metin, Surong Huang, and Thomas A Lipo, *Design and 3D Electromagnetic Field Analysis of Non-Slotted and Slotted Torus Type Axial Flux Surface Mounted Permanent Magnet Disc Machine*, University of Wisconsin-Madison College of Engineering, 2001
- [3] Rossouw, Francois G, *Analysis and Design of Axial Flux Permanent Magnet Wind Generator System for Direct Battery Charging application*, Departement of Electrical and Electronic Engineering Stellenbosch University, 2009
- [4] Kobayashi, Hideki, Yuhito Doi, and Koji Miyata, Takehisa Minowa, *Design of The Axial Flux Permanent Magnet Coreless Generator for The Multi-Megawatts Wind Turbine*, Magnetic Material R&D Center, Shin-Etsu Chemical Co.Ltd
- [5] Hayt, William H & John A. Buck, *Elektromagnetika*, Marieta GA, 2004.
- [6] Thompson, Marc T. *Practical Issues In the Use of NdFeB Permanent Magnets in Maglev, Motor, Bearing, and Eddy Current Brake*, Proceeding of The IEEE, 2009
- [7] Aydin, Metin, Surong Huang, and Thomas A Lipo, *Torus Concept Machine : Pre – Prototyping Design Assesment for Two Major Topologies*, University of Wisconsin-Madison College of Engineering, 2001

DAFTAR PUSTAKA

- Chapman, Stephen J., *Electric Machinery and Power System Fundamentals*, McGraw-Hill, New York, 2002.
- Muljadi, E., dkk, *Axial Flux, Modular, Permanent-Magnet Generator with a Toroidal Winding for Wind Turbine Application*, IEEE Industry Applications Conference, 1998.
- Price, Garrison F., Todd D. Batzel, Mihai Comanescu, and Bruce A. Muller *Design and Testing of a Permanent Magnet Axial Flux Wind Power Generator*, Pennsylvania State University, Altoona College, 2008
- Kierstead, H, R-J Wang and M J Kamper, *Design Optimization Of A Single-Side Axial Flux Permanent Magnet In-Wheel Motor With Non-overlap concentrated Winding*, University of Stellenbosch, Department of Electrical and Electronic Engineering, Stellenbosch, South Africa.
- Aydin, Metin, Surong Huang, and Thomas A Lipo, *A New Axial Flux Surface Mounted Permanent Magnet Machine Capable of Field Control*, University of Wisconsin-Madison College of Engineering, 2001.
- Beque, Ing. S., ing. J. Dills, Dr. ir. M Van Dessel, *Optimisation of A Direct Drive Low Speed Permanen Magnet Wind Generator*, De Nayer Instituut, dept. Industriële Wetenschappen.
- Rahman, M.A & Gordon R. Slemon, *Promising Application of Neodymium Boron Iron Magnets In Electrical Machines*, University of Newfoundland, Engineering and Applied Science and University of Toronto, Applied Science and Engineering, IEEE Transaction on Magnetic, 1985.
- Lukaniszyn, Marian, Rafal Wrobel, & Marius Jagiela, *Field Circuit Analysis of Construction Modification of A Torus Type PMDC Motor*, Departemen of Electrcal Engineering and Automatic Control, Technical University of Opole, Opole, polandia, COMPEL; The International Journal for Computation and Mathematic In Electrical and Electronic Engineering, 2003.



Lampiran

Fluks Bz tipe N-S

No	t	ϕ_1	ϕ_2	ϕ_3
1	0	9.64E-02	-8.65E-02	9.58E-02
2	0.001	3.27E-02	-9.87E-02	1.10E-01
3	0.002	-4.97E-02	-1.11E-01	9.38E-02
4	0.003	-1.03E-01	-8.60E-02	8.96E-02
5	0.004	-1.09E-01	-1.41E-02	1.03E-01
6	0.005	-9.13E-02	6.66E-02	1.10E-01
7	0.006	-9.00E-02	1.08E-01	7.32E-02
8	0.007	-1.07E-01	1.05E-01	-4.95E-03
9	0.008	-1.06E-01	8.80E-02	-8.05E-02
10	0.009	-5.77E-02	9.25E-02	-1.11E-01
11	0.01	2.39E-02	0.11	-1.01E-01
12	0.011	9.04E-02	0.1008	-8.67E-02
13	0.012	1.11E-01	0.0422	-9.62E-02
14	0.013	9.63E-02	-0.0415	-1.11E-01
15	0.014	8.68E-02	-0.0994	-9.12E-02
16	0.015	1.01E-01	-0.1094	-2.35E-02
17	0.016	1.11E-01	-0.0926	5.90E-02
18	0.017	8.00E-02	-0.0884	1.06E-01
19	0.018	4.49E-03	-0.1054	1.06E-01
20	0.019	-7.30E-02	-0.1087	8.92E-02

Fluks B normal tipe N-S

No	t	ϕ_1	ϕ_2	ϕ_3
1	0	2.60E-01	1.01E-01	2.60E-01
2	0.001	0.3092	0.13	0.1815
3	0.002	3.02E-01	1.99E-01	1.20E-01
4	0.003	0.2427	0.2741	0.1034
5	0.004	1.64E-01	3.12E-01	1.43E-01
6	0.005	0.111	0.2928	0.2174
7	0.006	1.09E-01	2.25E-01	2.88E-01
8	0.007	0.1582	0.15	0.3134
9	0.008	2.35E-01	1.04E-01	2.81E-01
10	0.009	2.98E-01	1.15E-01	2.08E-01
11	0.01	3.11E-01	1.74E-01	1.37E-01
12	0.011	2.68E-01	2.53E-01	1.02E-01
13	0.012	1.90E-01	3.06E-01	1.24E-01
14	0.013	0.1246	3.05E-01	0.19
15	0.014	1.02E-01	2.50E-01	2.67E-01
16	0.015	0.1367	1.73E-01	0.3112
17	0.016	2.08E-01	1.15E-01	2.99E-01
18	0.017	0.2812	1.06E-01	0.2348
19	0.018	3.13E-01	1.51E-01	1.58E-01
20	0.019	0.2877	2.26E-01	0.1071

Fluks Bz tipe N-N

No	t	ϕ_1	ϕ_2	ϕ_3
1	0	3.20E-04	2.91E-04	-3.85E-04
2	0.001	4.18E-05	2.70E-05	-2.00E-04
3	0.002	-4.27E-04	1.23E-04	2.71E-05
4	0.003	-5.07E-04	5.14E-05	1.54E-04
5	0.004	-1.00E-05	1.67E-04	2.50E-04
6	0.005	7.00E-04	4.53E-04	1.44E-04
7	0.006	7.22E-04	3.25E-04	6.65E-05
8	0.007	7.25E-04	2.86E-04	2.07E-04
9	0.008	3.38E-04	-3.58E-04	4.39E-04
10	0.009	-3.14E-04	-3.81E-04	5.84E-04
11	0.01	-2.73E-04	-9.78E-05	1.91E-04
12	0.011	7.69E-05	3.30E-04	-2.72E-05
13	0.012	2.16E-04	-1.20E-05	6.00E-06
14	0.013	-8.25E-06	-7.33E-04	-3.62E-05
15	0.014	4.22E-04	-7.52E-04	-1.43E-05
16	0.015	3.90E-04	-4.78E-04	6.78E-05
17	0.016	1.38E-04	5.60E-04	-1.37E-04
18	0.017	-1.20E-04	1.25E-03	-2.40E-04
19	0.018	4.06E-05	1.02E-03	-2.16E-04
20	0.019	-6.10E-05	3.46E-04	-4.17E-04

Fluks Bnormal tipe N-N

No	t	ϕ_1	ϕ_2	ϕ_3
1	0	2.91E-01	2.73E-01	2.90E-01
2	0.001	0.2907	0.2762	0.2812
3	0.002	2.91E-01	2.83E-01	2.76E-01
4	0.003	0.2888	0.2904	0.2737
5	0.004	2.78E-01	2.90E-01	2.76E-01
6	0.005	0.2734	0.2908	0.2854
7	0.006	2.74E-01	2.87E-01	2.92E-01
8	0.007	0.2788	0.2779	0.2902
9	0.008	2.87E-01	2.74E-01	2.87E-01
10	0.009	2.90E-01	2.75E-01	2.84E-01
11	0.01	2.90E-01	2.80E-01	2.77E-01
12	0.011	2.91E-01	2.90E-01	2.73E-01
13	0.012	2.82E-01	2.91E-01	2.75E-01
14	0.013	0.275	2.90E-01	0.2815
15	0.014	2.73E-01	2.89E-01	2.91E-01
16	0.015	0.277	2.80E-01	0.2904
17	0.016	2.84E-01	2.75E-01	2.91E-01
18	0.017	0.2912	2.74E-01	0.2883
19	0.018	2.90E-01	2.78E-01	2.79E-01
20	0.019	0.2915	2.86E-01	0.2746

Tegangan Vz Tipe N-S

No	t	V1	V2	V3
1	0	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
2	0.001	-63.7	-12.2	13.7
3	0.002	-82.4	-12.7	-15.7
4	0.003	-52.9	25.4	-4.2
5	0.004	-5.9	71.9	13.1
6	0.005	17.2	80.7	7.3
7	0.006	1.3	41.6	-36.8
8	0.007	-16.7	-3.5	-78.15
9	0.008	0.8	-16.7	-75.55
10	0.009	48.2	4.5	-30.3
11	0.01	81.6	17.5	10.2
12	0.011	66.5	-9.2	13.9
13	0.012	20.3	-58.6	-9.5
14	0.013	-14.4	-83.7	-15
15	0.014	-9.5	-57.9	20
16	0.015	13.7	-10	67.7
17	0.016	10	16.8	82.5
18	0.017	-30.5	4.2	47.4
19	0.018	-75.514	-17	-0.5
20	0.019	-77.486	-3.3	-16.7

Tegangan Vnormal Tipe N-S

No	t	V1	V2	V3
1	0	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
2	0.001	49.2	28.9	-78.2
3	0.002	-7	68.6	-61.9
4	0.003	-59.5	75.5	-16.2
5	0.004	-78.3	38	39.4
6	0.005	-53.4	-19.3	74.6
7	0.006	-2.4	-67.8	70.1
8	0.007	49.6	-75	25.9
9	0.008	76.6	-46.2	-32.2
10	0.009	63.2	10.8	-73.4
11	0.01	13.2	59.1	-71.1
12	0.011	-43.7	78.8	-35
13	0.012	-77.5	53.3	22.5
14	0.013	-65.4	-0.7	65.8
15	0.014	-22.4	-54.7	77.3
16	0.015	34.5	-77.9	43.9
17	0.016	71.3	-57.3	-12.7
18	0.017	73.2	-9.2	-63.7
19	0.018	32.1	44.9	-77.3
20	0.019	-25.6	75.1	-50.4

Tegangan Vz Tipe N-N

No	t	V1	V2	V3
1	0	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
2	0.001	-0.27818	-0.2637	0.18533
3	0.002	-0.46923	0.09648	0.22714
4	0.003	-0.07914	-0.07203	0.12721
5	0.004	0.49655	0.115484	0.09565
6	0.005	0.71	0.28639	-0.10641
7	0.006	0.02228	-0.12861	-0.07709
8	0.007	0.00272	-0.03903	0.14071
9	0.008	-0.38697	-0.64396	0.23191
10	0.009	-0.65215	-0.02252	0.14471
11	0.01	0.04089	0.282985	-0.39297
12	0.011	0.350121	0.427815	-0.21804
13	0.012	0.139509	-0.342	0.033182
14	0.013	-0.22465	-0.72117	-0.04218
15	0.014	0.430545	-0.01901	0.021862
16	0.015	-0.03187	0.27421	0.082147
17	0.016	-0.25281	1.03797	-0.2047
18	0.017	-0.25762	0.6908	-0.10313
19	0.018	0.16055	-0.2278	0.0245
20	0.019	-0.10155	-0.6769	-0.2017

Tegangan Vnormal Tipe NN

No	t	V1	V2	V3
1	0	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
2	0.001	0.2	2.8	-8.8
3	0.002	-0.2	6.6	-5.3
4	0.003	-1.7	7.6	-2.2
5	0.004	-10.5	-0.4	2.7
6	0.005	-4.9	0.8	9
7	0.006	0.9	-4.2	6.1
8	0.007	4.5	-8.7	-1.3
9	0.008	8.5	-3.9	-2.9
10	0.009	2.7	0.9	-2.9
11	0.01	0	5.1	-7
12	0.011	0.7	9.5	-4.1
13	0.012	-8.7	1	1.5
14	0.013	-7	-0.5	6.7
15	0.014	-1.6	-1.3	9.6
16	0.015	3.6	-8.7	-0.7
17	0.016	7	-5.3	0.8
18	0.017	7.2	-0.4	-2.9
19	0.018	-1.2	3.8	-8.9
20	0.019	1.5	7.8	-4.8