



UNIVERSITAS INDONESIA

**RANCANG BANGUN GENERATOR TURBIN ANGIN AXIAL TIGA FASA
UNTUK KECEPATAN ANGIN RENDAH**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana teknik.

(S.T)

MAULANA AKBAR

0706267856

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
KEKHUSUSAN TEKNIK TENAGA LISTRIK
DEPOK
JANUARI 2012**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Maulana Akbar

NPM : 0706267856

Tanda Tangan : 

Tanggal : 12 Januari 2012



LEMBAR PENGESAHAN

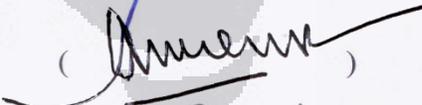
Skripsi ini diajukan oleh

Nama : Maulana Akbar
NPM : 0706267856
Program Studi : Teknik Elektro
Judul Skripsi : Rancang Bangun Generator Turbin Angin Axial Tiga
Fasa Untuk Kecepatan Angin Rendah

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 : Dr. Ing. Eko Adhi Setiawan. ST., MT ()

Penguji : Ir. Amien Rahardjo. MT ()

Penguji : Prof. Dr. Ir Rudy Setiabudy ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 12 Januari 2012

KATA PENGANTAR

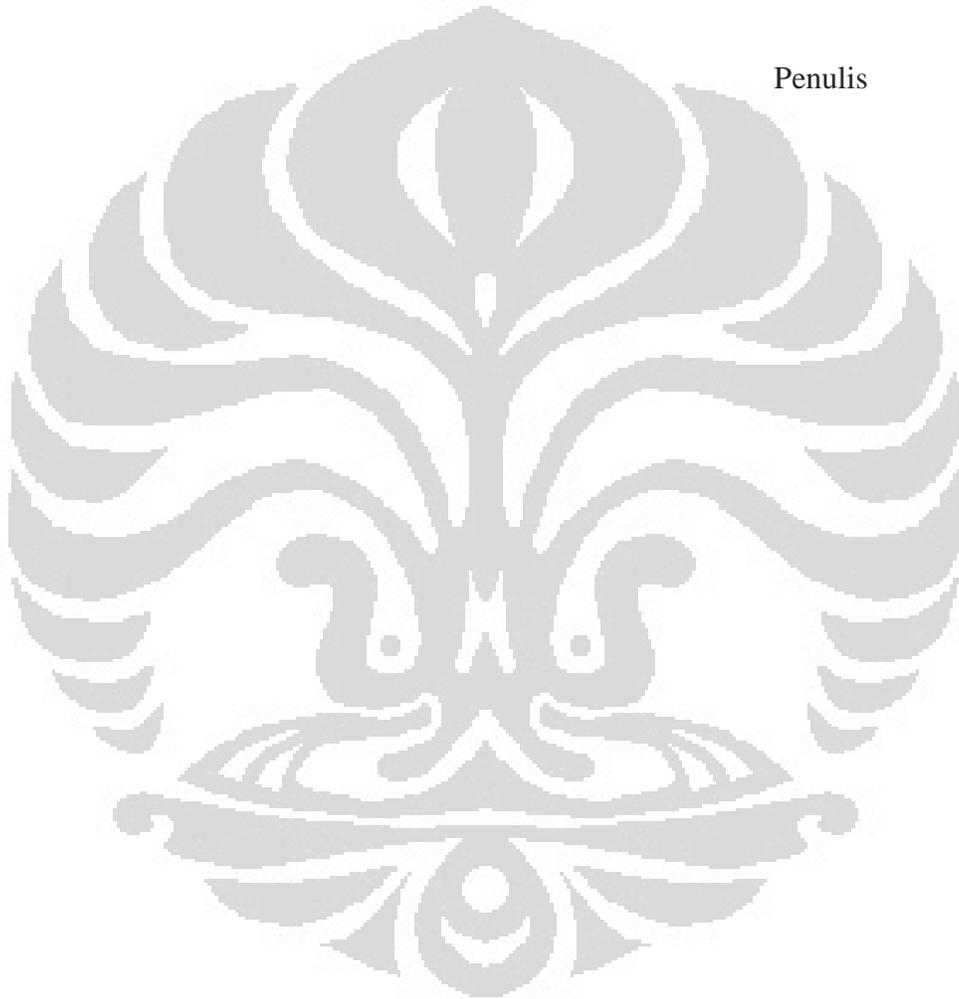
Puji syukur saya panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi ini. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik Jurusan Teknik Elektro pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

- 1) Pak Raharjo selaku pembimbing saya selama proses pembuatan generator ketika di Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN).
- 2) Pak Anton selaku pembimbing lapangan pada bengkel komposit LAPAN yang menyediakan waktu dalam proses pembuatan generator.
- 3) Pak Malik selaku pembimbing lapangan LAPAN yang membantu dalam proses perizinan.
- 4) Rekan-rekan LAPAN yang membantu proses penyusunan skripsi.
- 5) Dr. Ridwan Gunawan selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan skripsi ini;
- 6) Dr. Eko Adhi Setiawan selaku dosen pembimbing kedua yang telah mengarahkan, memberikan semangat dalam proses penyusunan skripsi.
- 7) Hj. Alm. Atmawati yang selalu memberikan semangat dan motivasi dalam penyusunan skripsi serta doa seorang ibu yang tidak dapat terbalaskan.
- 8) Keluarga penulis, Ayah Fuad Hamidy, Ibu Netty Herawaty, Mutiara Sani yang selalu memberikan dukungan material dan moral.
- 9) Rekan-rekan tim generator axial yang telah banyak membantu saya dalam menyelesaikan skripsi ini.
- 10) Rekan-rekan kosan LALOLO yang membantu dalam penyusunan skripsi

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, 12 Januari 2012

Penulis



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

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

Nama : Maulana Akbar

NPM : 0706267856

Program Studi : Teknik Elektro

Departemen : Teknik Elektro

Fakultas : Teknik

Jenis Karya : Skripsi

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

**RANCANG BANGUN GENERATOR TURBIN ANGIN AXIAL TIGA FASA
UNTUK KECEPATAN ANGIN RENDAH**

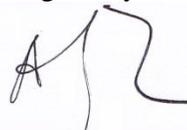
beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalih media/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di: Depok

Pada Tanggal: 1 Januari 2012

Yang Menyatakan



(Maulana Akbar)

ABSTRAK

Nama : Maulana Akbar

Program Studi : Teknik Elektro

Judul : Rancang Bangun Generator Turbin Angin Axial Tiga Fasa Untuk Kecepatan Angin Rendah

Saat ini turbin angin kecepatan rendah sedang mengalami banyak modifikasi guna memaksimalkan kinerja generator sesuai dengan keadaan geografis di Indonesia. Banyak model generator yang dicoba dalam menghasilkan listrik. Pada pembahasan skripsi ini digunakan generator axial karena cocok dengan keadaan angin kecepatan rendah. Model dan modifikasi dari generator ini pun sangat memegang peranan penting terhadap kinerja generator. Desain dari generator ini menggunakan arus 3 fasa dengan stator tanpa inti besi, serta rotor ganda yang mengapit stator. Disamping itu menggunakan 9 magnet permanen jenis strontium ferrite Br 0.8 T dan 9 kumparan pada stator. Desain ini dibuat berbeda dengan generator axial kecepatan rendah lainnya. Oleh karena itu hasil uji dari generator ini akan di analisa sehingga kita dapat mengetahui nilai efisiensi dari generator yang dibuat sesuai desain yang ditentukan.

Kata Kunci :

Generator sinkron axial, turbin angin

ABSTRACT

Name : Maulana Akbar
Study Program : Electrical Engineering
Title : Desain and Build of axial wind turbin three phase generator
for low speed wind

Nowdays the low speed wind turbine is modifying to optimize the performance of generator appropriate with geographic conditions in Indonesia. Various types of generator which used to producing power. In this thesis author uses an axial generator due to appropriate with low speed wind conditions. The model and the modification of this generator hand the important role of generator performance. The design of this generator use 3 phase coreless stator, and the stator is placed between double rotor. In addition, this generator use 9 strontium ferrite Br 0.8 T permanent magnet and 9 coil in the stator. This design is made different from other low speed axial generator. Therefore, assay results from these generators will be analyzed so that we can know the value of the efficiency of the generator which is made according to the specified design.

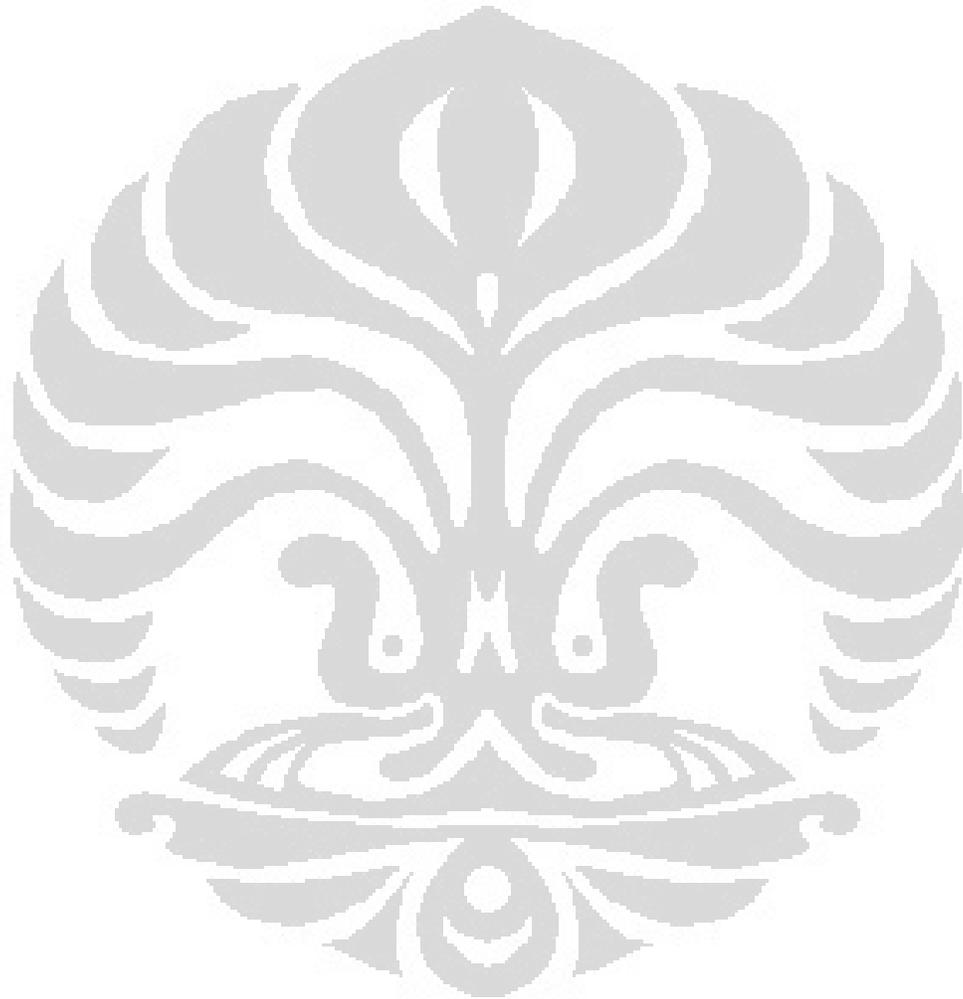
Keywords : Generator Sinkron axial, turbin angin

DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	vi
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT.....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL.....	xiv
BAB 1	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian.....	4
1.3 Batasan Masalah.....	4
1.4 Metodologi Penelitian	4
1.5 1.5 Sistematika Penulisan.....	5
BAB 2	6
2.1 Energi Angin	6
2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Angin.....	7
2.2.1 Subsistem konversi	8
2.3 Generator Sinkron Flux Axial	10
2.3.1 Generator sinkron Konvensional	10

2.3.2	Konstruksi Generator Sinkron	10
2.3.3	Prinsip Kerja Generator Sinkron	12
2.3.4	Kecepatan Putar Generator Sinkron	13
2.3.5	Rangkaian Ekuivalent Generator Sinkron	14
2.4	Generator Axial	14
2.4.1	Konstruksi Generator Aksial	14
2.4.2	Tipe-Tipe Generator Axial.....	16
2.4.3	Prinsip Kerja Generator Aksial.....	19
2.4.4	Generator axial tanpa beban	20
2.4.5	Generator axial berbeban	21
2.5	Perbandingan Antara Generator Aksial Dengan Generator Radial.....	22
BAB 3	24
3.1	Proses Pembuatan Generator Axial berdasarkan simulasi	25
3.1.1	Stator.....	25
3.1.2	Rotor	32
BAB 4	40
4.1	Hasil Percobaan.....	40
4.1.1	Tegangan Generator Terhadap Kecepatan Generator.....	40
4.1.2	Arus Generator Terhadap Kecepatan Generator.....	41
4.1.3	Daya Generator Terhadap Kecepatan Generator	42
4.2	Analisa.....	44
4.2.1	Tegangan Generator Terhadap Kecepatan Generator.....	44
4.2.2	Arus Generator terhadap Kecepatan Generator	46
4.2.3	Daya Generator Terhadap Kecepatan Generator	47

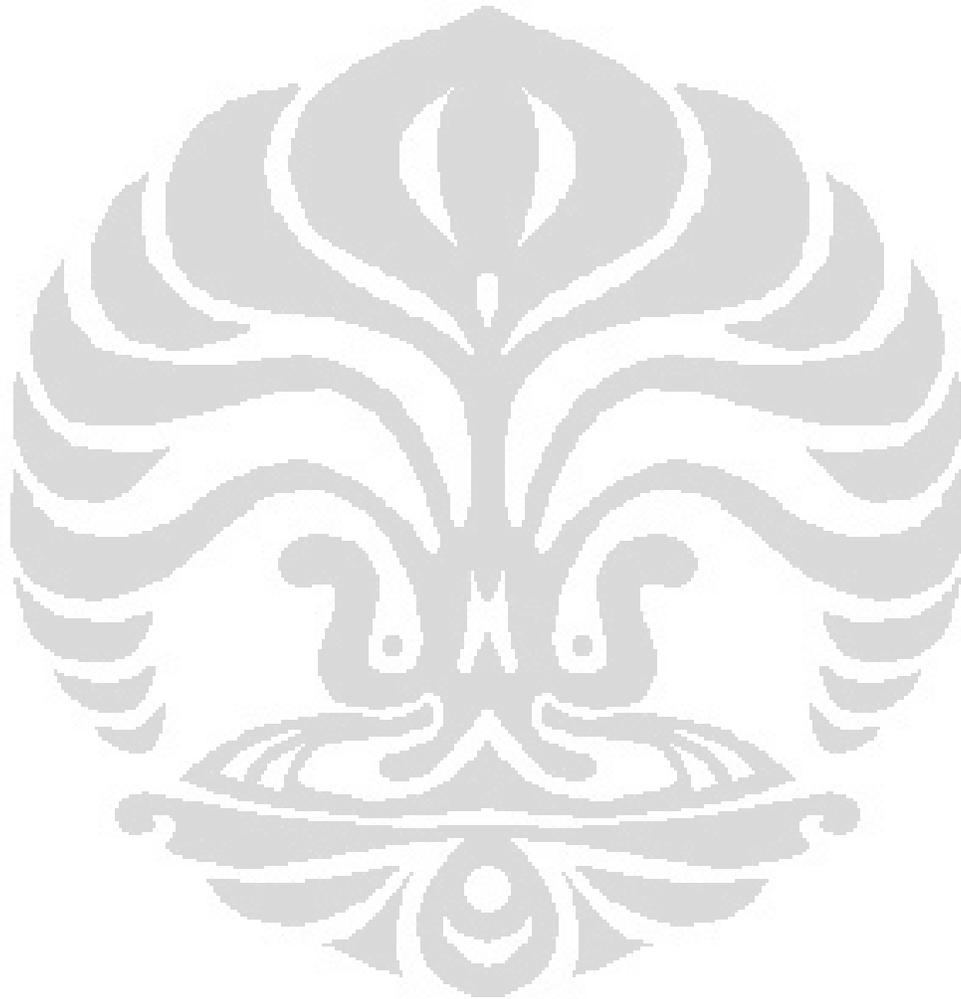
BAB 5	49
DAFTAR ACUAN	50
DAFTAR PUSTAKA	51
LAMPIRAN.....	52



DAFTAR GAMBAR

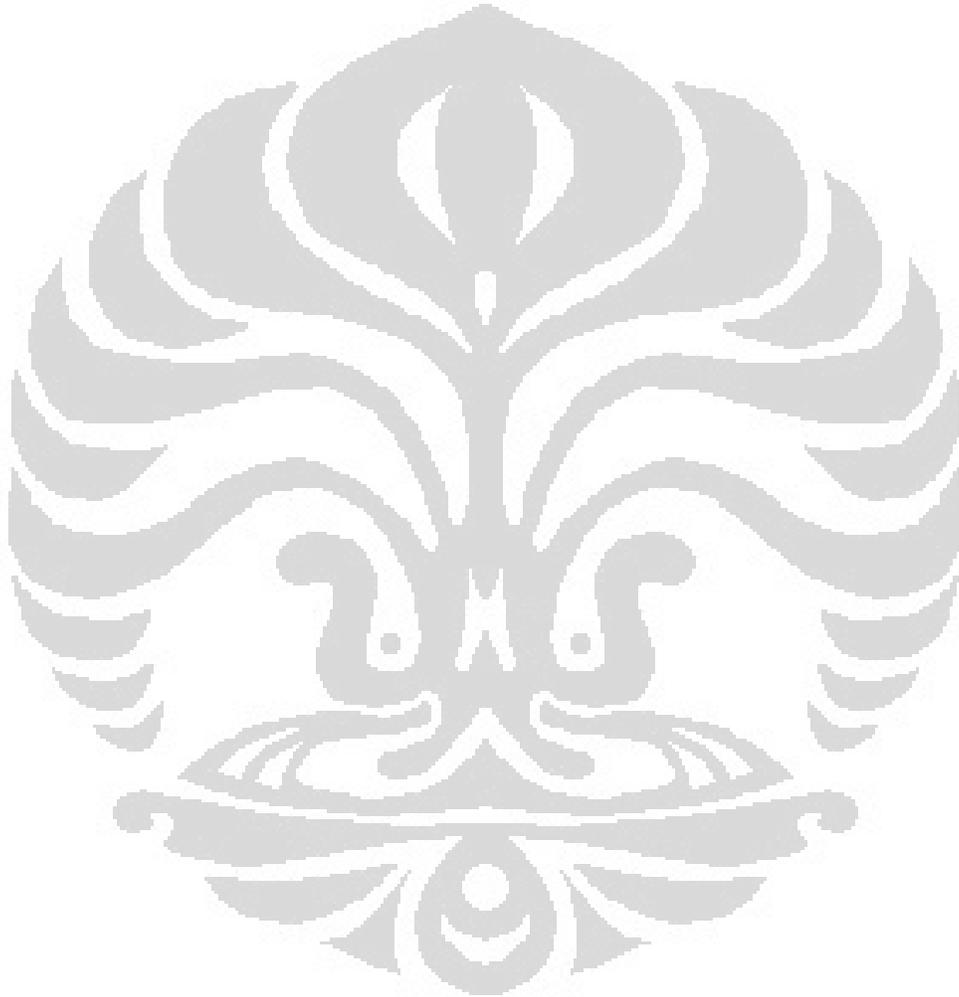
Gambar 2.1 Skema Pemanfaatan PLTB.....	7
Gambar 2.2 (a) Turbin Angin Poros Horizontal, (b) Turbin Angin Poros Vertikal	9
Gambar 2.3 Rotor <i>Salient</i> (kutub sepatu) Pada Generator	11
Gambar 2.4 Generator Non Silient (rotor silinder)	11
Gambar 2.5 Hubungan Kumputan 3 fasa Dengan Tegangan.....	13
Gambar 2.6 Generator Axial	15
Gambar 2.7 a) Stator <i>Overlapping</i> , (b) Stator <i>Non-Overlapping</i>	15
Gambar 2.8 Generator Axial Cakram Tunggal	17
Gambar 2.9(a)Generator Axial Stator Ganda. (b) Arah Fluks Pada Tipe Eksternal Stator	18
Gambar 2.10 Arah Fluks Pada Tipe N-S Generator Axial Multi Stage.....	18
Gambar 2.11 Stator Generator Axial Multi Stage.....	19
Gambar 2.12 Perbandingan Arah Fluks Radial vs Axial	22
Gambar 3.1 Diagram alir pembuatan generator 3 fasa flux axial	24
Gambar 3.2 Distribusi Kumputan Stator.....	26
Gambar 3.3 Model Stator Generator Axial	26
Gambar 3.4 Mal Yang digunakan Untuk Melilit Kumputan Stator.....	27
Gambar 3.5 Mempersiapkan Mal Untuk Proses Melilit Kumputan Stator.....	28
Gambar 3.6(a) Alat Lilit Kumputan, (b) Proses Melilit Kumputan.....	29
Gambar 3.7 Proses Pembuatan Kumputan Stator	30
Gambar 3.8 Kumputan Sator Setelah disusun Berdasarkan Posisi Magnet.....	31
Gambar 3.9 Model Rotor Pada COMSOL.....	33
Gambar 3.10 Dudukan Magnet Permanen Menggunakan Bahan Mika	34
Gambar 3.11 Cetakan Pengecoran	35
Gambar 3.12 Pembersihan cetakan rotor	36
Gambar 3.13 proses penanaman magnet permanen pada permukaan rotor	36
Gambar 3.14(a) pengisian cetakan lower. (b) penggabungan upper dan lower.....	37
Gambar 3.15 Rotor Setelah Dilakukan Proses Pencetakan.....	37
Gambar 3.16 Pemasangan poros stator	38
Gambar 3.17 Proses penanaman kumputan stator	38
Gambar 3.18 Generator telah selesai dibuat	39
Gambar 4.1 Grafik Generator Terhadap Kecepatan Generator	40
Gambar 4.2 Grafik Tegangan Generator Berbeban Terhadap Kecepatan Generator .	41
Gambar 4.3 Grafik Arus Generator Tanpa Beban Terhadap Kecepatan Generator	41
Gambar 4.4 Grafik Arus Generator Berbeban Terhadap Kecepatan Generator	42
Gambar 4.5 Grafik Daya Generator Tanpa Beban Terhadap Kecepatan Generator ...	42

Gambar 4.6 Grafik Daya Generator Berbeban Terhadap Kecepatan Generator..... 43
Gambar 4.7 Grafik Frekuensi Generator Tanpa Beban Terhadap Kecepatan Putar Generator..... 43
Gambar 4.8 Grafik Frekuensi Generator Berbeban Terhadap Kecepatan Putar Generator..... 44



DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Ukuran Stator Generator	32
Tabel 3.2 Ukuran Geometri model rotor.....	33



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada zaman ini, kita di hadapkan dengan kenyataan krisis energi. Kenaikan harga minyak yang terus melaju membuat kita semua khawatir akan semakin sulitnya dalam memenuhi kebutuhan hidup kita dan hal ini pun mengakibatkan terjadinya krisis ekonomi global. Pada tanggal 2 November 2007, harga minyak bumi melonjak hingga harga 96 dollar US per barel di New York Merchantile Exchange (NYME), hal ini mengisyaratkan bahwa prediksi harga mencapai 100 dollar AS per barel. Harga tersebut telah melebihi harga-harga tertinggi minyak bumi dalam sejarah yang terjadi pada tahun 1980 akibat konflikiran-irak.

Kita tidak dapat memungkiri bahwa kita ketergantungan terhadap minyak bumi sebagai sumber energi. Hal ini pun didukung dengan bertambahnya jumlah penduduk yang berarti semakin bertambahnya kebutuhan suatu negara dalam memenuhi kebutuhan rakyatnya. Salah satunya dengan cara meningkatkan di bidang industri. Banyak negara pun berlomba-lomba dalam meningkatkan di bidang ini dan semakin memicu bertambahnya kebutuhan terhadap minyak bumi. Belum lagi meningkatnya berbagai bencana di seluruh dunia yang mengganggu distribusi minyak bumi dan turunnya cadangan minyak bumi di berbagai negara juga mendorong kenaikan harga minyak bumi.

Krisis energi dan masalah lingkungan yang terjadi membuat manusia berusaha mencari sumber energi alternatif yang bersifat terbarukan dan member dampak minimal terhadap lingkungan. Contoh lainnya krisis energi listrik, yang pernah terjadi menjelang akhir abad ke-20 membuktikan bahwa suplai energi listrik tidak dapat mengimbangi tingginya laju permintaan. Sehingga kita memiliki tiga ancaman serius, yakni menipisnya cadangan minyak bumi karena jika tidak ditemukannya sumur minyak baru maka sumber minyak akan habis, perkembangan perekonomian mengakibatkan kenaikan/ketidakstabilan harga akibat laju permintaan

yang lebih besar dari produksi minyak, dan polusi gas rumah kaca (terutama CO₂) akibat pembakaran bahan bakar fosil. Untuk itu, diperlukan penggunaan sumber energi baru yang terbarukan dan ramah lingkungan. Indonesia memiliki potensi sumber energi alternatif dan terbarukan dalam jumlah besar. Beberapa diantaranya seperti bioethanol sebagai pengganti bensin, biodiesel untuk pengganti solar, tenaga panas bumi, mikrohidro, tenaga surya, tenaga angin, bahkan sampah/limbah pun bisa digunakan untuk membangkitkan listrik. Untuk memperoleh energi tersebut harus mengeluarkan biaya yang besar dan harus menggunakan teknologi tinggi apalagi penggunaan tenaga nuklir beresiko tinggi terhadap dampak lingkungan sekitar. Kita dapat menyimpulkan bahwa jika kita tergantung dengan tenaga nuklir sebagai energi alternatif maka akan banyak dibangun reaktor-reaktor yang sangat memungkinkan terjadinya kebocoran pada reaktor tersebut. Dan dari segi biaya pun tenaga nuklir sangat mahal dan mental negara kita pun belum siap untuk menerima teknologi nuklir. Sehingga dengan mempertimbangkan Indonesia yang kaya akan dengan potensi alamnya maka sangat dikhawatirkan jika teknologi nuklir dapat merusak lingkungan sekitar. Oleh karena itu, kita harus memanfaatkan potensi alam yang dimiliki Indonesia dan harus disesuaikan dengan keadaan geografis negara Indonesia.

Salah satunya adalah pembangkit listrik tenaga angin. Hal ini sangat memungkinkan karena energi angin adalah sumber yang tak terbatas, dan konstruksinya pun tidak memerlukan biaya yang tinggi. Energi angin disinyalir sebagai jenis pembangkitan energi dengan laju pertumbuhan tercepat. Berdasarkan data dari (World Wind Energi Association), sampai dengan tahun 2007 perkiraan energi listrik yang dihasilkan oleh turbin angin mencapai 93,85 GigaWatts, menghasilkan lebih dari 1% dari total kelistrikan secara global. Potensi energi angin di Indonesia umumnya berkecepatan lebih dari 5 meter per detik (m/detik). Dimana nilai ini masih kurang efektif untuk menghasilkan daya, oleh karena itu sangat dibutuhkan teknologi tenaga angin yang dapat memanfaatkan kecepatan angin yang rendah dan dapat menghasilkan energi listrik yang bisa digunakan sesuai dengan keadaan yang ada di Indonesia. Pada tahun 2010 diharapkan total kapasitas pembangkit listrik tenaga angin secara global mencapai 170 GigaWatt.

UNIVERSITAS INDONESIA

Indonesia adalah negara kepulauan yang mempunyai garis pantai terpanjang di dunia yaitu $\pm 80.791,42$ km dimana merupakan wilayah potensial untuk pengembangan pembangkit listrik tenaga angin. Di Indonesia juga terdapat banyak desa terpencil yang terletak di tepi sungai. Misalnya desa-desa yang terletak di pedalaman Sumatra, Kalimantan, dan Sulawesi yang pada umumnya tidak ada jalan darat menuju kesana. Sehingga tidak terjangkau jaringan listrik kepedesaan tersebut. Hal ini pun dapat menambahnya factor terhambatnya perkembangan Indonesia. Karena pada desa-desa tersebut pada umumnya memiliki potensi agri bisnis yang dapat dikembangkan untuk menunjang perekonomian daerah. Sehingga kita tidak boleh menunggu jaringan PLN didirikan di daerah tersebut.

Oleh karena itu, solusi yang sangat memungkinkan adalah dengan memanfaatkan angin sebagai sumber tenaga listrik yang dapat memasok energi listrik pada daerah terpencil sekalipun. Pada umumnya Pembangkit Listrik Tenaga Angin atau yang dikenal sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) dapat dimaksimalkan pemberdayaannya disekitar pantai di Indonesia karena pantai adalah tempat dimana perbedaan tekanan dan temperature yang sangat senjang sehingga dapat kita maksimalkan sebagai pemberdayaan PLTB. Namun, tidak semua pantai dan daerah dapat dijadikan PLTB karena perlu dipilih daerah yang memiliki topografi dan keadaan angin yang stabil. Perkembangan PLTB di Indonesia cukup pesat diantaranya terdapat di beberapa lokasi yaitu pulau Selayar, Sulawesi utara, Nusa Penida, Bali, dan Bangka Belitung. Sebelumnya sudah terdapat lima unit kincir angin pembangkit listrik berkapasitas 80 kilowatt yang sudah terpasang. Sampai saat ini, kapasitas total yang terpasang di seluruh Indonesia kurang dari 800 kilowatt. Meskipun PLTB menghasilkan energi tidak sebesar energi nuklir atau batubara, tetapi PLTB sangat ramah lingkungan dan yang terpenting dapat menjangkau setiap daerah terpencil sekalipun. Sangat diharapkan PLTB dapat dikembangkan sehingga meratanya pertumbuhan ekonomi daerah dan menjadi energi alternative yang digunakan dalam menghadapi masalah krisis energi. PLTB memiliki beberapa bagian yang sangat penting. Salah satunya adalah generator. Dalam teknologi turbin angin, generator yang cocok digunakan adalah generator flux axial. Generator axial

mempunyai densitas energi yang tinggi dan perawatannya pun sederhana sehingga generator ini cocok digunakan sebagai generator pada turbin angin.

Dalam penulisan ini generator flux axial akan disimulasikan menggunakan Finite Element Metode (FEM) yang akan diberikan beberapa variable sehingga kita dapat mengetahui tingkat efisiensi dan mendapatkan desain yang sesuai. Desain ini akan dibuat dan akan diuji kembali, dimana hasil ujinya akan dibandingkan dengan hasil uji menggunakan simulasi.

1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penulisan skripsi ini adalah

1. Merancang Generator turbin angin axial 3 fasa untuk kecepatan rendah dengan performa optimal yang sesuai dengan keadaan di Indonesia.
2. Mengetahui kinerja generator turbin angin flux axial 3 fasa

1.3 Batasan Masalah

Berikut ini permasalahan yang akan dibahas dalam skripsi ini adalah :

1. Pembahasan mengenai Generator fluks axial 3 fasa dengan rotor ganda eksternal dan stator internal tanpa inti besi
2. Pembahasan tentang tenaga angin.
3. Pembahasan mengenai unjuk kerja generator fluks axial 3 fasa
4. Pembahasan mengenai prinsip kerja generator fluks axial 3 fasa

1.4 Metodologi Penelitian

Metode yang digunakan dalam penulisan skripsi ini adalah

1. Studi literatur dengan mencari sumber-sumber yang terkait berupa penelitian, buku, dan tulisan-tulisan lainnya yang dapat digunakan untuk merancang model generator dan hasil simulasi.
2. Simulasi dari model yang dibuat dengan FEM (Finite Element Methode).

3. Membuat alat berdasarkan model yang dibuat.
4. Analisis yang dibuat menggunakan metode analisis grafis perbandingan antara simulasi dan alat.

1.5 1.5 Sistematika Penulisan

Dalam penulisan skripsi ini dibagi dalam 5 bab. Setiap bab mempunyai pokok bahasan tertentu sebagai bagian dari tujuan pembahasan skripsi ini. Bab satu adalah pendahuluan yang berisi tentang pengantar dan pendahuluan yang menjelaskan latar belakang masalah, tujuan penulisan, pembatasan masalah, metodologi penelitian, dan sistematika penulisan. Bab dua berisi mengenai dasar teori yang digunakan dalam penelitian ini. Secara umum akan dibahas mengenai pengertian energi angin dan potensinya, prinsip kerja pembangkit listrik tenaga angin kecepatan rendah, generator aksial yang kemudian akan dijelaskan bagaimana variasi-variasi dari generator aksial dan bagaimana variasi-variasi itu akan mempengaruhi kinerja dari generator aksial. Variasi-variasi yang dimaksudkan di sini adalah bentuk stator, jumlah stator, celah udara, bentuk magnet, dan jumlah magnet. Bab 3 berisi tentang perancangan dari generator flux axial. Pada bab ini juga dijelaskan mengenai proses pembuatan dan spesifikasi dan bahan dari generator flux axial yang akan dibuat serta alasan dipilihnya jenis dan spesifikasi tersebut. Bab 4 merupakan hasil dan pembahasan dari percobaan yang dilakukan serta pengolahan data hasil dari simulasi dan hasil alat. Datanya kemudian akan dibentuk menjadi grafik yang kemudian akan dianalisa. Data yang didapatkan dari simulasi adalah data tegangan, arus, dan daya total terhadap kecepatan generator. Kemudian data ini akan dibandingkan antara keadaan berbeban dan tanpa beban lalu dianalisa berdasarkan teori yang ada. Bab 5 berisi tentang kesimpulan dari penelitian ini disertai dengan saran atas penelitian yang telah dilakukan.

BAB 2

LANDASAN TEORI

2.1 Energi Angin

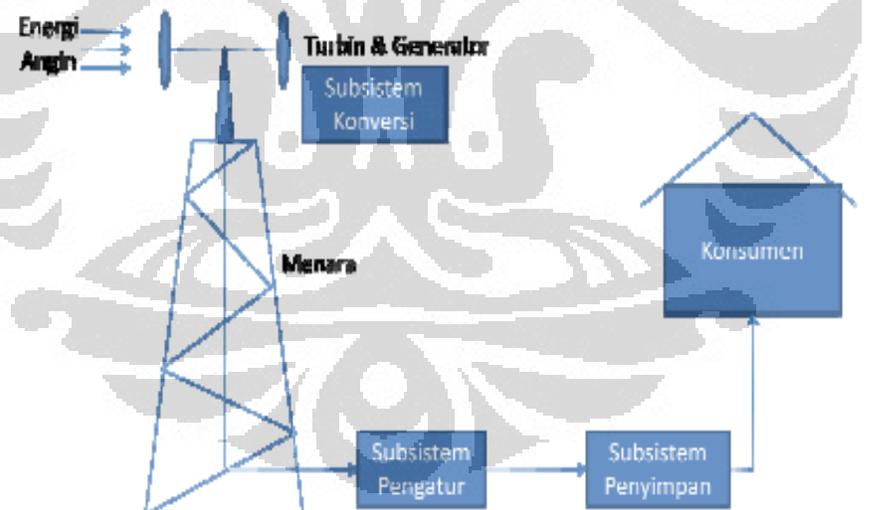
Angin adalah udara yang bergerak yang diakibatkan oleh rotasi bumi dan perbedaan tekanan udara khususnya tekanan tinggi ke tekanan rendah atau perbedaan suhu udara yang rendah ke suhu udara yang tinggi. Hal ini berkaitan dengan besarnya energi panas matahari yang diterima oleh permukaan bumi. Suatu wilayah menerima panas matahari bisa berbeda dengan wilayah lainnya. Daerah yang menerima panas matahari lebih besar akan mempunyai suhu udara yang lebih panas dan tekanan udara yang rendah. Perbedaan suhu dan tekanan setiap daerah akan terjadi aliran udara pada wilayah tersebut. Sifat angin adalah apabila dipanaskan, maka udara memuai. Dan mengakibatkan udara menjadi lebih ringan sehingga naik. Hal ini pun membuat tekanan udara turun karena udaranya berkurang. Udara dingin di sekitarnya mengalir ke tempat yang bertekanan rendah tadi. Udara yang menyusut menjadi lebih berat dan turun ke tanah. Diatas tanah udara menjadi panas lagi dan naik kembali. Aliran naiknya udara panas dan turunnya udara dingin ini dinamakan konveksi.

Pada zaman sekarang, angin dapat dimanfaatkan sebagai salah satu energi alternatif yang bersifat dapat diperbarui dalam memenuhi kebutuhan listrik manusia yang semakin meningkat. Energi angin sangat ramah lingkungan sehingga dapat dijadikan sumber energi dan banyak dikembangkan di seluruh dunia. Energi angin dimanfaatkan oleh manusia untuk perahu layar pada zaman dahulu, kincir angin, dan penggilingan gandum. Karena angin adalah pergerakan udara yang memiliki massa dan bergerak dengan kecepatan tertentu, maka angin akan memiliki potensi berupa angin dan daya.

2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Angin

Pembangkit listrik tenaga angin atau pembangkit listrik tenaga bayu adalah suatu sistem yang dapat merubah energi kinetik yang terdapat pada partikel-partikel udara yang bergerak dengan kecepatan tertentu menjadi energi listrik. Dimana prosesnya berawal dari angin yang ditangkap oleh baling-baling atau sudu turbin angin yang merubahnya menjadi energi mekanis rotasi oleh turbin. Turbin mempunyai poros yang sama dengan rotor pada generator ini mengakibatkan rotor ikut berputar dan menghasilkan listrik pada generator. Energi listrik tersebut disimpan melalui subsistem pengatur dan penyimpanan kemudian disuplai kepada konsumen.

Dengan memanfaatkan energi angin dimana turbin terhubung satu poros dengan rotor maka kita dapat memanfaatkan energi mekanis dan dapat menghasilkan banyak manfaat bahkan sebagai penggerak utama generator pada pembangkit listrik tenaga angin.



Gambar 2.1 Skema Pemanfaatan PLTB

Prinsip dan cara kerja turbin angin secara umum sama, hanya saja yang membedakannya jenis angin dimana turbin angion tersebut dipasang. Karena di

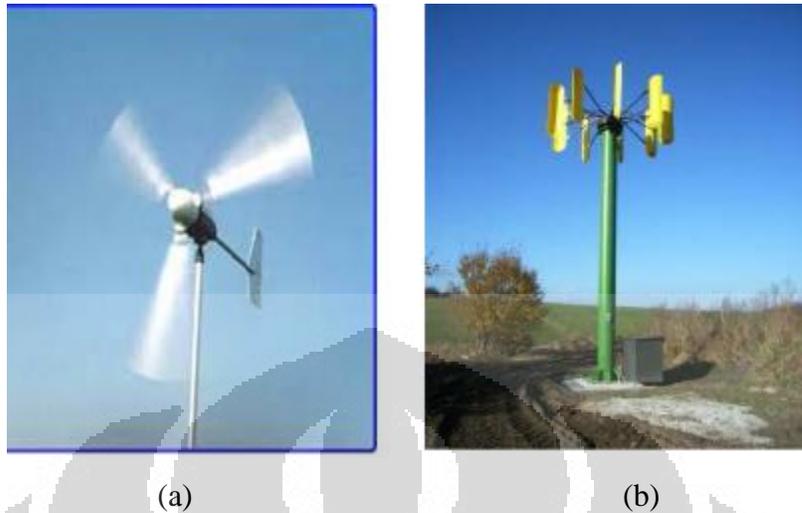
Indonesia mempunyai karakteristik angin yang berkecepatan rendah dan mempunyai frekuensi yang rendah juga, maka dalam pembuatan turbin angin harus di berikan beberapa modifikasi-modifikasi yang sesuai agar kerja turbin angin menjadi maksimal. Modifikasi tersebut bermacam-macam salah satunya dengan mendesain sudu-sudu atau baling-baling turbin, jenis dan desain generator, dan alat penunjang lainnya

2.2.1 Subsistem konversi

Subsistem konversi mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Dimana pada bagian ini terdapat komponen sudu turbin, transmisi, dan generator.

a. Sudu turbin

Sudu turbin atau baling-baling adalah komponen turbin angin yang berfungsi untuk menangkap angin yang akan dijadikan sebagai sumber tegangan dengan cara dijadikan sebagai penggerak dari turbin tersebut. Sudu adalah perantara-perantara sumber angin untuk dijadikan sumber energi pada turbin angin atau menjadi komponen pertama yang sangat menunjang hasil keluaran generator. Oleh karena itu, desain dari bentuk sudu turbin sangat berpengaruh terhadap tingkat efisiensi daya mekanis dalam hal menggerakkan turbin. Karena tegangan keluaran generator juga di tentukan oleh daya mekanik yang digerakan oleh angin. Jenis sudu turbin ada bermacam-macam dan tentunya disesuaikan oleh keadaan daerah tertentu. Sebagai contoh, turbin dengan sudu horizontal yang pada umumnya digunakan pada daerah angin yang mempunyai kecepatan relatif tinggi, dan sebaliknya sudu vertikal digunakan pada kecepatan angin yang relatif rendah.



Gambar 2.2 (a) Turbin Angin Poros Horizontal, (b) Turbin Angin Poros Vertikal

b. Transmisi

Transmisi berfungsi untuk mempercepat putaran dari generator. Dengan memanfaatkan perbandingan antara roda gigi pada turbin dan roda gigi pada rotor maka kecepatan dari turbin dapat dimaksimalkan oleh generator. Hal ini dilakukan karena kecepatan putar turbin belum mencapai kecepatan putar yang diinginkan pada generator.

c. Generator

Generator adalah alat yang berfungsi mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Dimana terjadi proses induksi pada rotor dan stator sehingga dapat menghasilkan listrik. Energi yang dihasilkan generator dapat berupa arus bolak-balik (AC) ataupun arus searah (DC) tergantung dari generator yang akan dipakai.

Ada beberapa cara dalam merancang generator agar dapat menghasilkan energi listrik yang diinginkan, yaitu :

1. Menaikkan putaran rotor sesuai dengan rating generator.
2. Menambah jumlah kumparan medan dan menggunakan magnet permanen yang kuat serta mendesain arah fluks magnet.

2.3 Generator Sinkron Flux Axial

2.3.1 Generator sinkron Konvensional

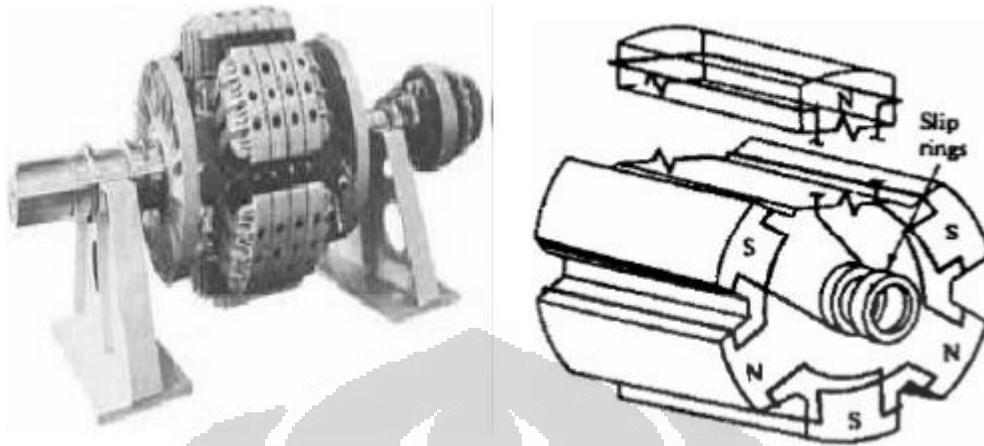
Adalah sebuah generator dimana bekerja dengan arus bolak-balik (AC) yang mempunyai rangkaian medan yang disuplai oleh sumber DC external dan mengubah energi mekanik menjadi energi listrik.

Bagian-bagian dari generator adalah :

1. Rotor, adalah bagian yang berputar yang mempunyai bagian terdiri dari poros, inti, kumparan, cincin geser, dan sikat-sikat.
2. Stator, adalah bagian yang tak berputar (diam) yang mempunyai bagian terdiri dari rangka stator yang merupakan salah satu bagian utama dari generator yang terbuat dari besi tuang dan ini merupakan rumah dari semua bagian-bagian generator, kutub utama beserta belitannya, kutub-kutub pembantu beserta belitannya, bantalan-bantalan poros.

2.3.2 Konstruksi Generator Sinkron

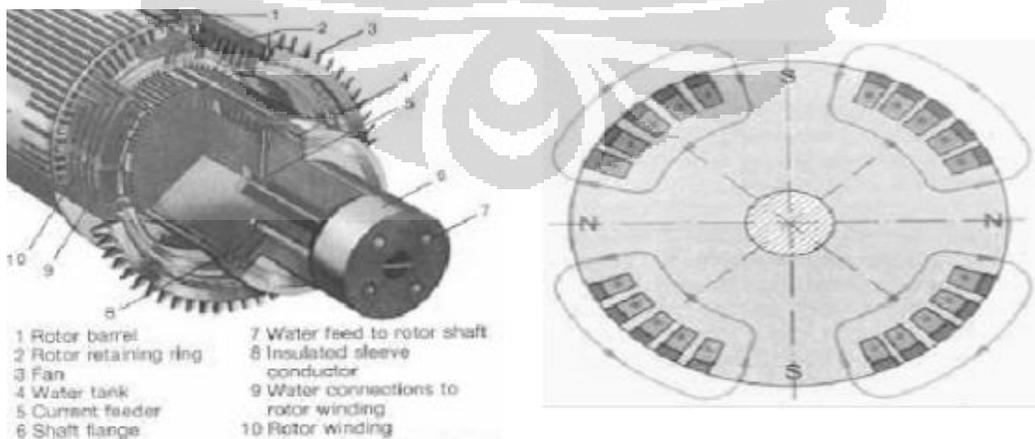
Pada generator sinkron, lilitan rotor dicatu menggunakan arus DC untuk menghasilkan medan magnet rotor. Rotor generator diputar oleh prime mover yang menghasilkan medan magnet berputar pada mesin. Medan magnet putar ini menginduksi tegangan tiga fasa pada kumparan stator generator. Rotor pada generator sinkron pada dasarnya adalah sebuah elektromagnet yang besar. Kutub medan magnet dapat berupa *salient* (kutub sepatu) dan non *salient* (rotor silinder).



Gambar 2.3 Rotor *Salient* (kutub sepatu) Pada Generator

Perbedaan antara kutub *salient* dan kutub non *salient* terletak pada konstruksi kutub magnet pada rotor. Pada kutub *salient* kutub magnet menonjol keluar dari permukaan rotor sedangkan pada kutub non *salient*, kutub magnet rata dengan permukaan rotor.

Rotor silinder pada umumnya digunakan untuk rotor dua kutub dan empat kutub, sedangkan rotor kutub sepatu digunakan untuk rotor dengan empat kutub atau lebih. Konstruksi rotor ditentukan oleh kecepatan putar *prime mover*, frekuensi, dan rating daya generator. Pada umumnya, untuk daya dibawah 10 MVA dan kecepatan rendah maka menggunakan rotor kutub sepatu atau *salient*.



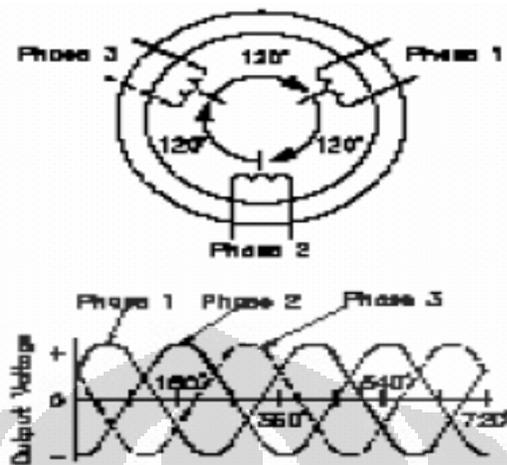
Gambar 2.4 Generator Non Salient (rotor silinder)

Arus DC yang disuplai ke rangkaian rotor menggunakan beberapa cara :

1. Menyuplai daya DC ke rangkaian dari sumber DC eksternal dengan sarana slip ring dan sikat.
2. Menyuplai daya DC dari sumber DC khusus yang ditempelkan langsung pada batang rotor generator sinkron.

2.3.3 Prinsip Kerja Generator Sinkron

Jika sebuah kumparan diputar pada kecepatan konstan pada medan magnet homogen, maka akan terinduksi tegangan sinusoidal pada kumparan tersebut. Medan magnet bisa dihasilkan oleh kumparan yang dialiri arus DC atau oleh magnet tetap. Pada mesin tipe ini medan magnet diletakkan pada stator (disebut generator kutub eksternal / external kutub generator) yang mana energi listrik dibangkitkan pada kumparan rotor. Hal ini dapat menimbulkan kerusakan pada *slip ring* dan karbon sikat, sehingga menimbulkan permasalahan pada pembangkitan daya tinggi. Untuk mengatasi permasalahan ini, digunakan tipe generator dengan kutub internal (*internal pole generator*), dimana medan magnet dibangkitkan oleh kutub rotor dan tegangan AC dibangkitkan pada rangkaian stator. Tegangan yang dihasilkan akan sinusoidal jika rapat fluks magnet pada celah udara terdistribusi sinusoidal dan rotor diputar pada kecepatan konstan. Tegangan AC tiga fasa dibangkitkan pada mesin sinkron kutub internal pada tiga kumparan stator yang diset sedemikian rupa sehingga membentuk beda fasa dengan sudut 120° . Bentuk gambaran sederhana hubungan kumparan 3-fasa dengan tegangan yang dibangkitkan diperlihatkan pada gambar di bawah ini



Gambar 2.5 Hubungan Kumbaran 3 fasa Dengan Tegangan

2.3.4 Kecepatan Putar Generator Sinkron

Rotor generator sinkron terdiri atas rangkaian elektromagnetik yang di suplai arus DC. Kecepatan putar generator sama dengan frekuensi elektrik dari generator sinkron. Hubungan antara kecepatan putar medan magnet dengan frekuensi elektrik pada stator adalah

$$f_c = \frac{n_r p}{120} \quad (2.1)$$

Dimana

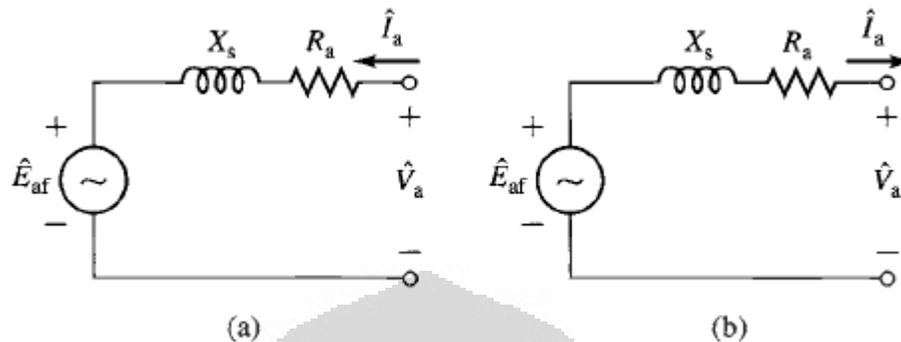
f_c = frekuensi listrik (Hz)

n_r = kecepatan putar rotor = kecepatan medan magnet (rpm)

p = jumlah kutub magnet

persamaan di atas menunjukkan hubungan anatara kecepatan putar rotor dengan frekuensi listrik yang dihasilkan. Agar daya yang dihasilkan tetap pada frekuensi 50 Hz maka generator harus berputar dengan kecepatan yang tetap dan kutub mesin yang ditentukan. Sebagai contoh untuk membangkitkan 60 Hz pada mesin dua kutub, rotor arus berputar dengan kecepatan 3600 rpm. Untuk membangkitkan daya 50 Hz pada mesin empat kutub, rotor harus berputar pada 1500 rpm.

2.3.5 Rangkaian Ekuivalent Generator Sinkron



(a) Rangkaian pada rotor. (b) rangkaian pada stator

Tegangan induksi E_a dibangkitkan pada fasa generator sinkron. Tegangan ini bisaanya tidak sama dengan tegangan yang muncul pada terminal generator. Tegangan induksi dan tegangan terminal bernilai sama ketika tidak ada arus jangkar pada mesin. Ada beberapa faktor yang menyebabkan terjadinya perbedaan nilai antara tegangan induksi dan tegangan terminal, antara lain :

1. Induktansi sendiri kumparan jangkar.
2. Resistansi kumparan jangkar.
3. Efek permukaan rotor silient.
4. Terjadinya reaksi jangkar atau mengalirnya arus pada stator yang menyebabkan distorsi medan magnet pada celah udara.

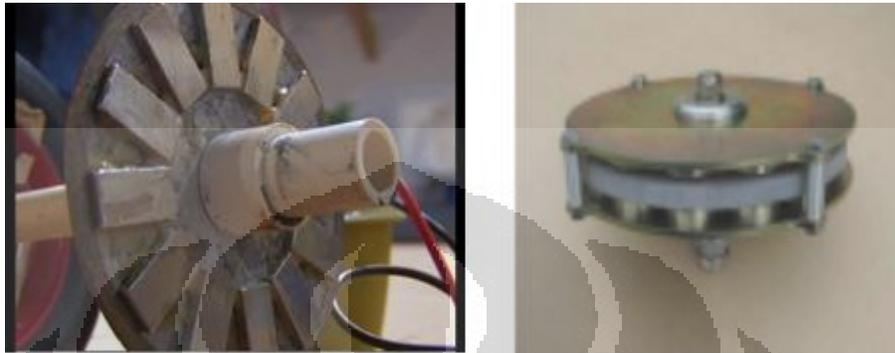
2.4 Generator Aksial

Generator fluks aksial adalah suatu mesin yang dapat mengkonversi energi mekanik menjadi energi listrik dimana arus yang dihasilkan adalah arus bolak-balik. Generator ini terdiri dari stator dan rotor yang memiliki arah aliran fluks yang memotong stator secara aksial.

2.4.1 Konstruksi Generator Aksial

Generator ini mempunyai bagian yang sama pada umumnya dengan generator sinkron lainnya. Hanya saja pada dimensinya, generator fluks aksial lebih lebar

diameternya karena untuk memperbesar daya keluarannya. Pada generator aksial desainnya pun kita bisa tentukan sesuai dengan kebutuhan.



Gambar 2.6 Generator Axial

1. Stator

Generator flux aksial mempunyai berbagai macam variasi seperti, kombinasi stator dan rotor, magnet, dan lainnya. Salah satu kombinasi pada stator ialah stator dengan inti besi berbentuk torus dan stator tanpa inti besi. Stator dengan bentuk torus bisaanya digunakan pada kecepatan putar yang tinggi. Tipe ini menggunakan inti besi pada bagian tengah lilitan kumparannya untuk lebih mengarahkan medan magnet menuju kumparan. Pada stator tanpa inti besi, bisaanya digunakan pada kecepatan putar yang rendah. Pada stator tanpa inti besi susunan kumparannya terbagi 2 macam, yaitu *overlapping* dan *non-overlapping*.



(a)

(b)

Gambar 2.7 a) Stator *Overlapping*, (b) Stator *Non-Overlapping*

Pada stator *overlapping* kita bisa lihat bahwa susunan kumparnya tumpang tindih dengan kumparan lainnya dengan fasa yang berbeda pada tiap kumparannya. Sedangkan pada stator non *overlapping* susunan kumparnya berada sejajar dan berimpit dengan kumparan lainnya dengan fasa yang saling berurutan sesuai dengan jumlah kumparan pada stator tersebut. Jumlah gulungan pada stator menentukan besarnya tegangan, arus keluaran, dan daya pada generator tersebut. Gulungan pada kumparan tersebut menentukan apakah yang dikuatkan adalah tegangan atau arus tergantung dari hubungan paralel atau seri pada hubungan kumparannya.

2. Rotor

Pada rotor generator aksial tidak membutuhkan arus eksitasi dari luar karena medan magnet yang dihasilkan menggunakan magnet permanen. Rotor juga terdiri dari plat besi yang digunakan untuk menyangga magnet permanen. Pada generator ini tidak menggunakan inti besi yang dikarenakan dengan besar dan volume dan magnet permanennya. Hal ini pun disesuaikan dengan besarnya celah udara yang terdapat pada stator dengan alasan menjaga kerapatan fluks magnet pada statornya.

3. Air Gap

Air gap adalah celah udara yang terdapat antara stator dan rotor dimana tempat ini merupakan tempat berpindahannya fluks magnet dan menginduksi kumparan di stator. Besar atau lebarnya celah udara 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.

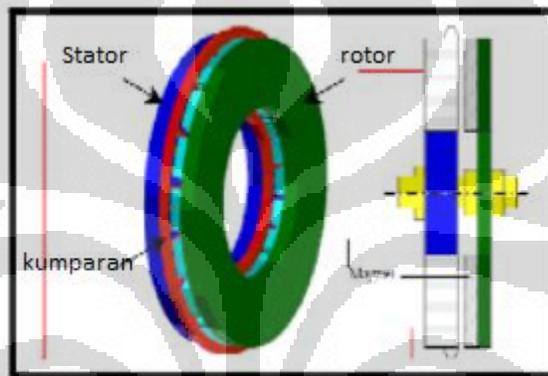
2.4.2 Tipe-Tipe Generator Aksial

Ada beberapa tipe generator fluks aksial, yaitu :

1. Generator fluks aksial rotor tunggal stator tunggal (cakram tunggal).
2. Generator fluks rotor ganda stator tunggal (eksternal rotor).
3. Generator fluks stator ganda dan rotor tunggal (internal rotor).
4. Generator fluks rotor dan stator banyak.

1. Rotor dan stator tunggal (Cakram Tunggal)

Generator ini bisa digunakan pada torsi kecil dan biasanya sangat cocok digunakan pada turbin angin dimana kecepatan putarnya yang kecil. Generator ini terdiri dari sebuah stator dan sebuah rotor. Ada beberapa jenis stator pada jenis generator ini diantaranya *slotted stator*, *slotless stator*, dan *saliant pole stator*. Rotor pada generator ini terdiri dari sebuah piringan besi kuat yang terdapat magnet di permukaannya.



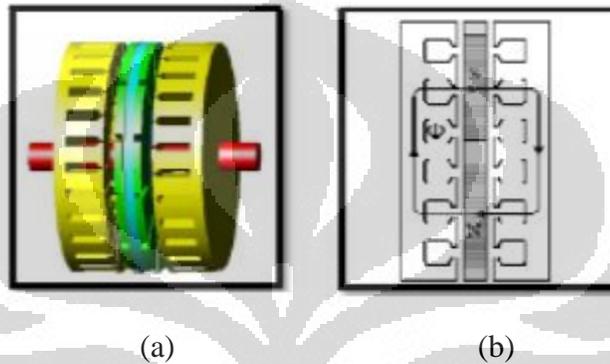
Gambar 2.8 Generator Axial Cakram Tunggal

2. Rotor ganda dan stator tunggal

Konstruksi generator ini terdiri dari dua buah rotor yang mengampit sebuah stator (stator eksternal). Berdasarkan arah fluksnya generator ini dibedakan menjadi dua tipe yaitu tipe N-S dan tipe N-N. Pada N-S arah fluks memotong kumparan secara lurus dari rotor satu ke kutub yang berlawanan pada rotor lainnya. Sedangkan pada tipe N-N arah fluksnya memotong kumparan dan akan kembali ke kutub yang berlawanan pada rotor yang sama.

3. Stator Ganda dan Rotor Tunggal

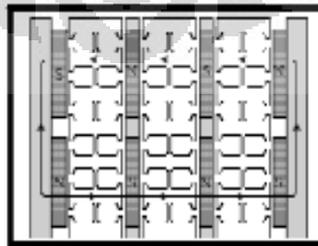
Pada tipe ini dua buah stator mengapit sebuah rotor (stator eksternal). Pada generator ini variasainya tidak terdapat pada kombinasi magnetnya, melainkan pada bentuk statornya. Tipe ini efektif jika digunakan pada mesin dengan momen inersia yang kecil yang memiliki sedikit besi pada bagian rotornya.



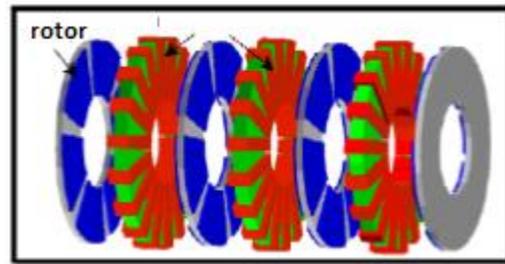
Gambar 2.9(a)Generator Axial Stator Ganda. (b) Arah Fluks Pada Tipe Eksternal Stator

4. Rotor dan stator banyak

Pada generator ini terdapat lebih dari dua stator dan dua rotor. Tipe ini dibuat untuk memenuhi kebutuhan tenaga listrik yang lebih besar. Kekurangan dari generator ini adalah mempunyai torsi yang besar dan memiliki transfer panas yang tidak begitu baik dibandingkan dengan kedua tipe sebelumnya. Pada generator ini juga mempunyai variasi magnet yaitu N-N dan N-S pada statornya.



Gambar 2.10 Arah Fluks Pada Tipe N-S Generator Axial Multi Stage



Gambar 2.11 Stator Generator Axial Multi Stage

2.4.3 Prinsip Kerja Generator Aksial

Prinsip kerja generator aksial hampir sama dengan generator sinkron pada umumnya dimana rotor sebagai penghasil medan magnet yang akan menginduksi kumparan pada stator dimana rotor dicatu menggunakan arus searah. Karena rotor merupakan rangkaian tertutup, maka pada rotor akan mengalir arus searah yang akan melewati Rf. Berdasarkan hukum Oersted, bahwa arus yang mengalir pada kumparan akan menghasilkan medan magnet. Pada generator aksial, rotor tidak membutuhkan catu atau eksitasi dari luar. Hal ini di karenakan generator aksial menggunakan magnet permanen pada rotor sehingga medan magnet bernilai konstan atau tidak membutuhkan eksitasi dari luar. Besarnya medan magnet tergantung dari jenis magnet permanen yang digunakan.

Garis gaya medan magnet yang dihasilkan di rotor akan memotong permukaan kumparan yang ada pada stator. Perpotongan garis gaya medan magnet rotor dengan permukaan kumparan stator akan menghasilkan fluks yang elingkupi kawat stator, berdasarkan persamaan berikut ini :

$$\Phi = B_r A \cos \theta \quad (2.2)$$

Φ = Fluks medan magnet

B = Medan magnet rotor

A = Luas permukaan bidang penampang kumparan stator

θ = Sudut antara garis gaya medan magnet rotor dengan garis normal bidang penampang kumparan stator

Karena pada rotor menggunakan magnet permanen, maka medan magnet yang dihasilkan adalah konstan pada fungsi waktu. Dengan demikian, untuk setiap periode waktunya, nilai fluks magnetis yang timbul pada stator akan juga bernilai konstan. Namun, ketika sistem generator mendapatkan energi mekanik dari luar yang disebut sebagai penggerak utama, akan terjadi perubahan pada sudut perpotongan antara garis gaya medan magnet rotor dengan bidang normal kumparan jangkar. Hal ini akan menyebabkan perubahan nilai fluks magnetik di stator terhadap waktu dan akan menghasilkan tegangan induksi, di dimana:

$$e_{ind} = -N_s \frac{d\phi}{dt} \quad (2.3)$$

e_{ind} = ggl induksi yang dibangkitkan di stator

N_s = jumlah lilitan kawat stator

ϕ = fluks magnetik

2.4.4 Generator axial tanpa beban

Pada saat memutar generator dengan kecepatan tertentu dan rotor menghasilkan medan magnet, maka tegangan E (a) akan terinduksi pada kumparan jangkar stator.

$$E_a = \bar{2}\pi f N \pi \phi \quad (2.4)$$

E_a = Tegangan yang dibangkitkan

f = frekuensi listrik yang dihasilkan

N = Jumlah lilitan pada stator

ϕ = fluks yang dihasilkan

Dimana untuk frekuensi yang dihasilkan adalah:

$$f = \frac{np}{120} \quad (2.5)$$

f = frekuensi listrik yang dihasilkan

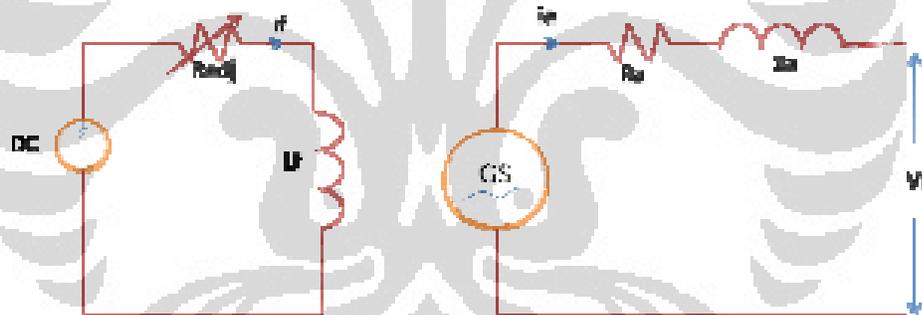
n = kecepatan medan putar rotor (rpm)

P = jumlah kutub pada rotor

Dalam keadaan tanpa beban arus jangkar tidak mengalir pada stator, karenanya tidak terdapat pengaruh reaksi jangkar. Fluks hanya dihasilkan oleh medan magnet rotor yang menembus luas penampang stator.

2.4.5 Generator axial berbeban

Dalam keadaan berbeban, arus jangkar akan mengalir di karenakan terjadi rangkaian stator pada beban. Reaksi jangkar bersifat reaktif karena itu dinyatakan sebagai reaktansi, dan disebut magnetisasi (X_m). Reaktansi magnetasi (X_m) ini bersama-sama dengan reaktansi fluks bocor (X_a) dikenal sebagai reaktansi sinkron (X_s)



$$E_a = V + I_a R_a + j I_a X_s$$

$$X_s = X_m + X_a$$

(2.6)

E_a = tegangan induksi pada jangkar

V = tegangan terminal output

R_a = resistansi jangkar

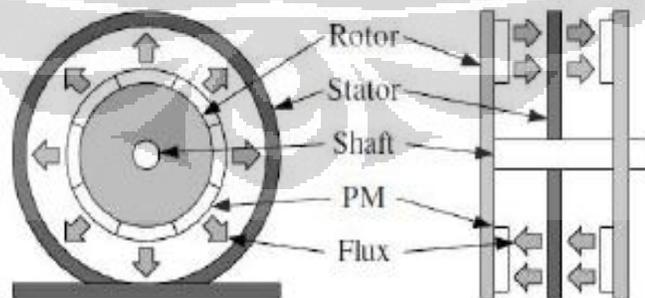
X_s = reaktansi sinkron

Tegangan induksi E_a dibangkitkan pada fasa generator sinkron. Bini bisaanya tidak sama dengan tegangan yang muncul pada terminal generator. Tegangan induksi sama dengan tegangan output terminal hanya ketika tidak ada arus jangkar yang mengalir pada mesin. Beberapa faktor yang menyebabkan perbedaan antara tegangan induksi dengan tegangan terminal adalah:

1. Distorsi medan magnet pada celah udara oleh mengalirnya arus pada stator, disebut reaksi jangkar.
2. Induktansi sendiri kumparan jangkar.
3. Resistansi kumparan jangkar.
4. Efek permukaan rotor.

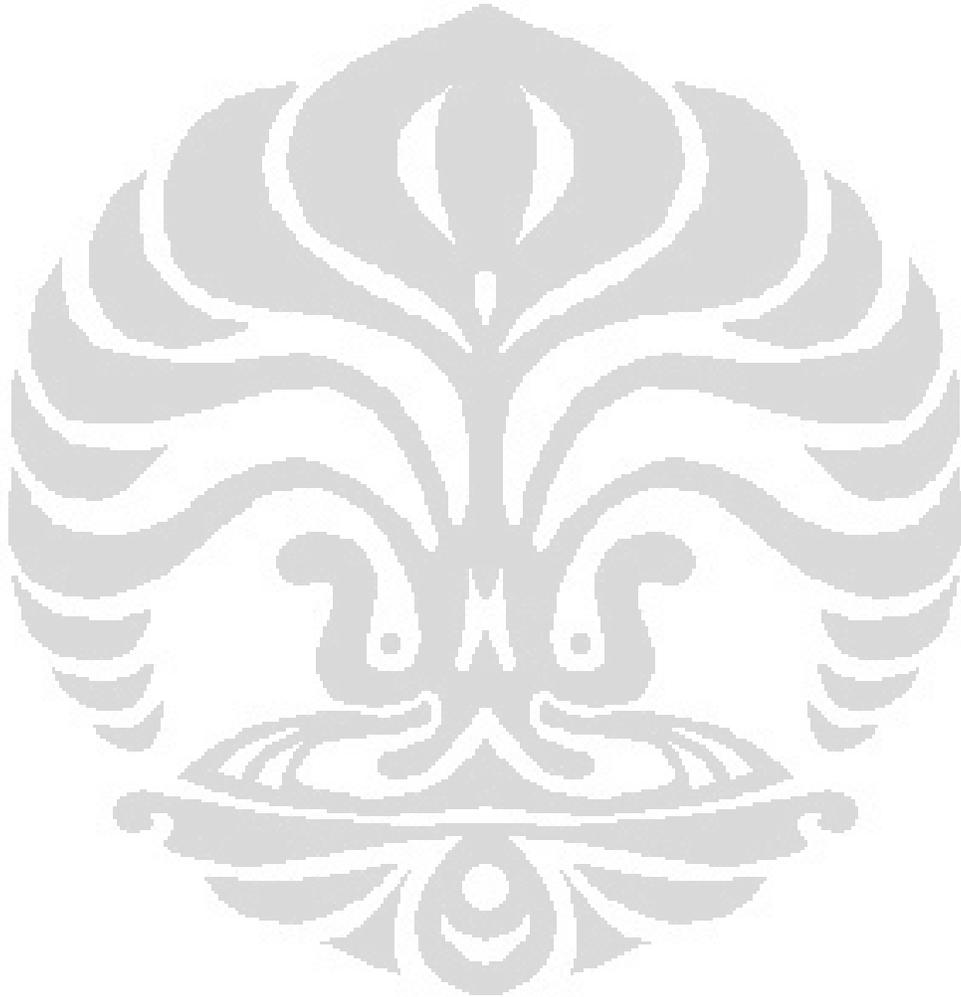
2.5 Perbandingan Antara Generator Aksial Dengan Generator Radial

Secara umum prinsip kerja generator radial dan generator aksial hampir sama, hanya saja yang membedakannya adalah arah fluks yang menembus statornya. Pada generator radial penyebaran arah fluks tidak semuanya tertangkap oleh kumparan statornya, melainkan sebagian akan lepas dan menjadi rugi-rugi yang terdapat pada generator sinkron. Berbeda dengan generator aksial dimana fluksnya mempunyai arah aksial ke arah kumparan stator sehingga fluks dapat di tangkap dengan baik oleh kumparan stator. Sehingga rugi-rugi fluks yang terbuang lebih sedikit.



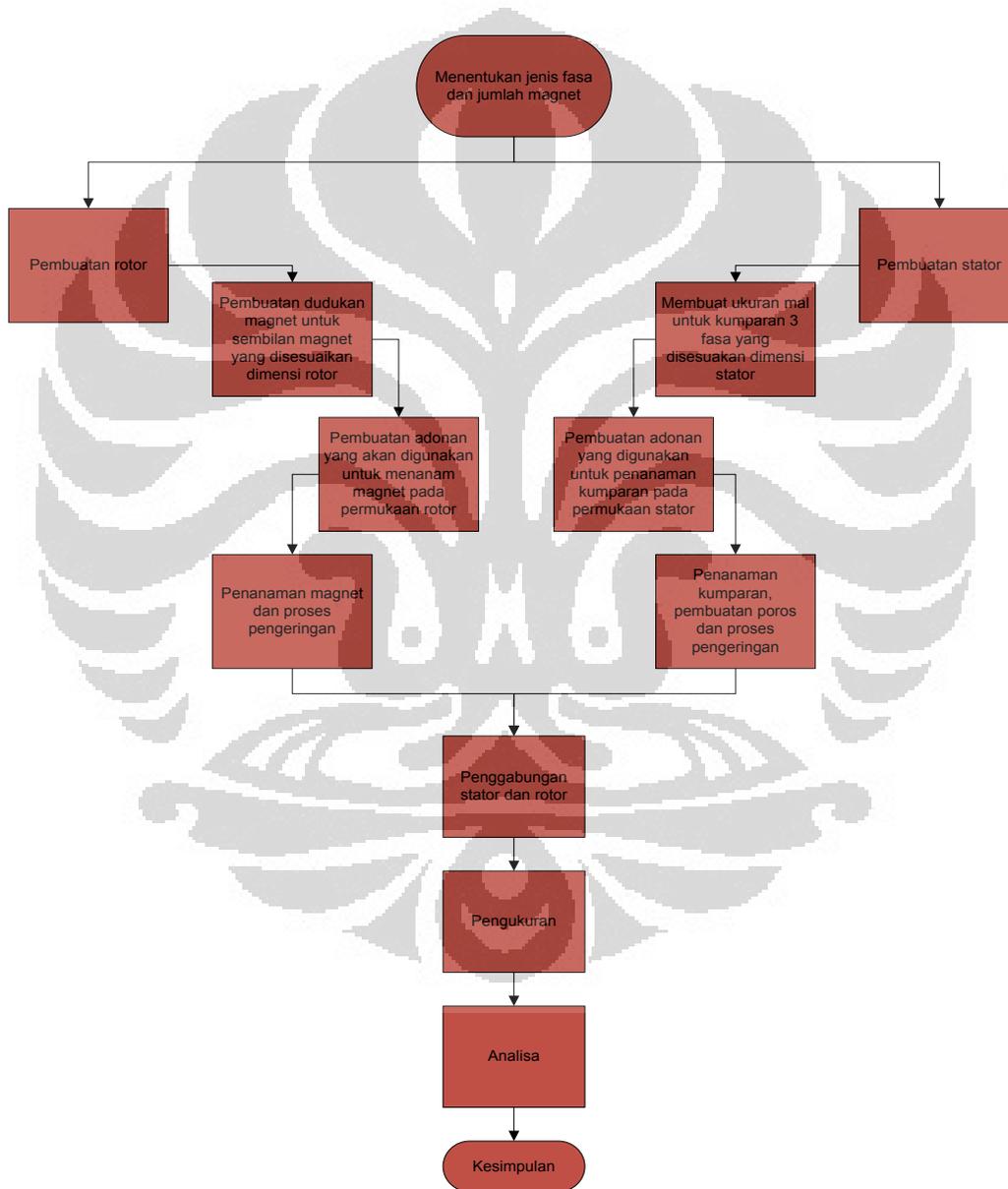
Gambar 2.12 Perbandingan Arah Fluks Radial vs Axial

Untuk generator radial mempunyai konstruksi yang lebih besar sehingga akan mempunyai massa yang lebih besar.



BAB 3 PERANCANGAN DAN PENGUJIAN

Berikut adalah diagram alir dari rancang bangun generator flux axial 3 fasa :



Gambar 3.1 Diagram alir pembuatan generator 3 fasa flux axial

Pada bab ini akan dijelaskan tentang pembuatan Generator Axial berdasarkan simulasi yang dibuat. Pada pembuatan Generator ini ada beberapa tahap diantaranya :

1. Pembuatan generator berdasarkan spesifikasi yang ditentukan sebelumnya.
2. Pengukuran.

Pada bab ini juga di jelaskan spesifikasi ukuran yang digunakan dalam pembuatan generator baik stator dan rotor. Besarnya ukuran ini pun mengacu pada standard ukuran dari LAPAN

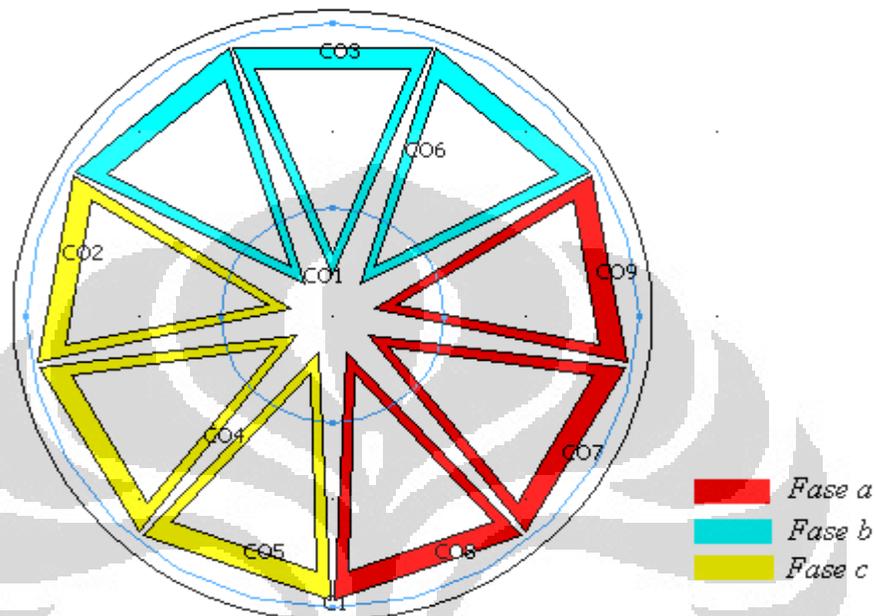
3.1 Proses Pembuatan Generator Axial berdasarkan simulasi

Membuat model generator menggunakan adalah titik awal dalam proses pembuatan generator. Pada tahap ini, simulasi memegang peranan penting terhadap nilai efisiensi generator yang akan dibuat. Berdasarkan teori angin dan keadaan geografis Indonesia bahwa angin yang berada di Indonesia mempunyai kecepatan rendah. Hal ini menjadi suatu pertimbangan yang dijadikan acuan dalam pembuatan model generator. Pada skripsi ini, model generator yang akan dibuat adalah Generator Fluks Axial.

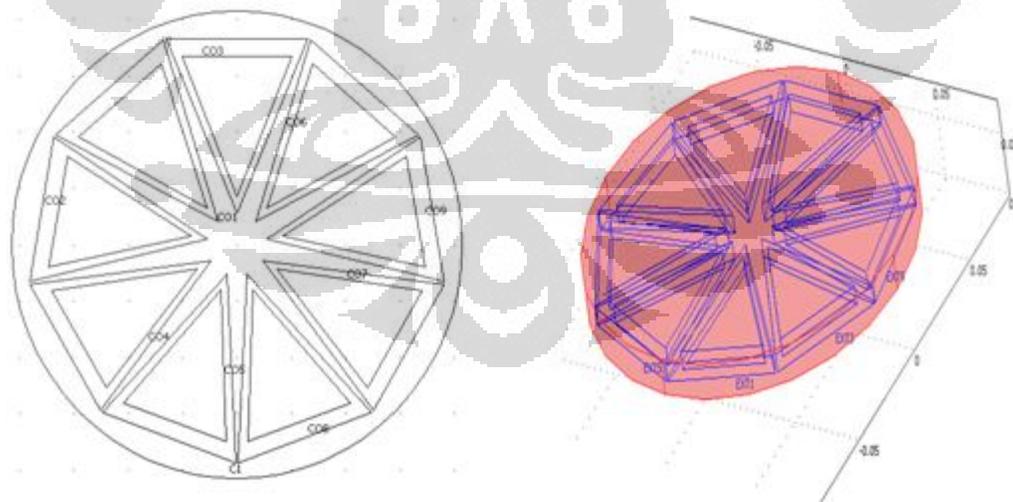
3.1.1 Stator

Stator yang akan dibuat pada simulasi adalah stator tanpa inti besi (*coreless*) dimana pada bagian tengah kumparan statornya berupa celah udara. Pada stator ini juga dibuat agar menghasilkan tegangan 3 fasa yang diserikan dan terdapat 9 stator yang disesuaikan dengan jumlah magnet. Penyesuaian magnet ini dilakukan agar fluks yang dihasilkan dapat memotong kumparan pada stator secara menyeluruh. Pada stator ini kumparan yang dibuat tidak menumpuk (*non-overlapping*). Alasan dibuat generator tiga fasa karena tegangan yang dihasilkan lebih stabil dan pada

generator getaran yang dihasilkan lebih sedikit dibandingkan satu phasa. Berikut adalah model stator yang telah dibuat menggunakan COMSOL



Gambar 3.2 Distribusi Kumparan Stator



Gambar 3.3 Model Stator Generator Axial

3.1.1.1 Pembuatan kumparan stator

Dalam pembuatan stator pertama-tama kita membuat lilitan pada stator. Pembuatan lilitan harus disesuaikan oleh dimensi stator karena pada stator terdapat sembilan kumparan, sehingga kita harus membuat ukuran dari masing-masing kumparan. Kumparan yang digunakan adalah kawat email jenis F Class, penampang 0,6mm, setiap kumparan berjumlah 60 lilitan dan diparalel 2 kawat. Setelah kita membuat ukuran dari masing-masing kumparan, kita menyesuaikan ukuran mal terhadap kumparan. Mal adalah alat yang digunakan dalam proses melilit kumparan stator agar kumparan stator berbentuk segitiga yang rapih dan kuat sehingga ukuran dari lilitan tersebut pas dengan ukuran stator.



Gambar 3.4 Mal Yang digunakan Untuk Melilit Kumparan Stator

3.1.1.2 Melilit kumparan

Setelah membuat ukuran mal, kita melilit stator menggunakan alat lilit kumparan.



Gambar 3.5 Mempersiapkan Mal Untuk Proses Melilit Kumputan Stator

Setelah kita mempersiapkan mal, kita memulai proses melilit menggunakan alat lilit kumputan.



(a)



(b)

Gambar 3.6(a) Alat Lilit Kumbaran, (b) Proses Melilit Kumbaran

Berikut adalah proses melilit kumparan stator:

1. Dua buah kawat tembaga dijadikan satu kabel agar arus yang dihasilkan besar sehingga medan yang dihasilkan juga besar.
2. Pasang dan letakan mal kecil untuk lilitan diantara mal besar pada alat pemutar (mal kecil berjumlah tiga buah, dan mal besar berjumlah empat buah).
3. Lewatkan dua tembaga tersebut ke katrol kecil agar memudahkan pada saat melilit.
4. Atur letak atau posisi katrol sesuai letak atau posisi mal dan beri jarak geser mal pada pemutar agar lilitan kumparan menjadi rapih tidak tebal sebelah atau tidak rata.
5. Lakukan proses pelilitan dengan cara memutar pemutar searah jarum jam.

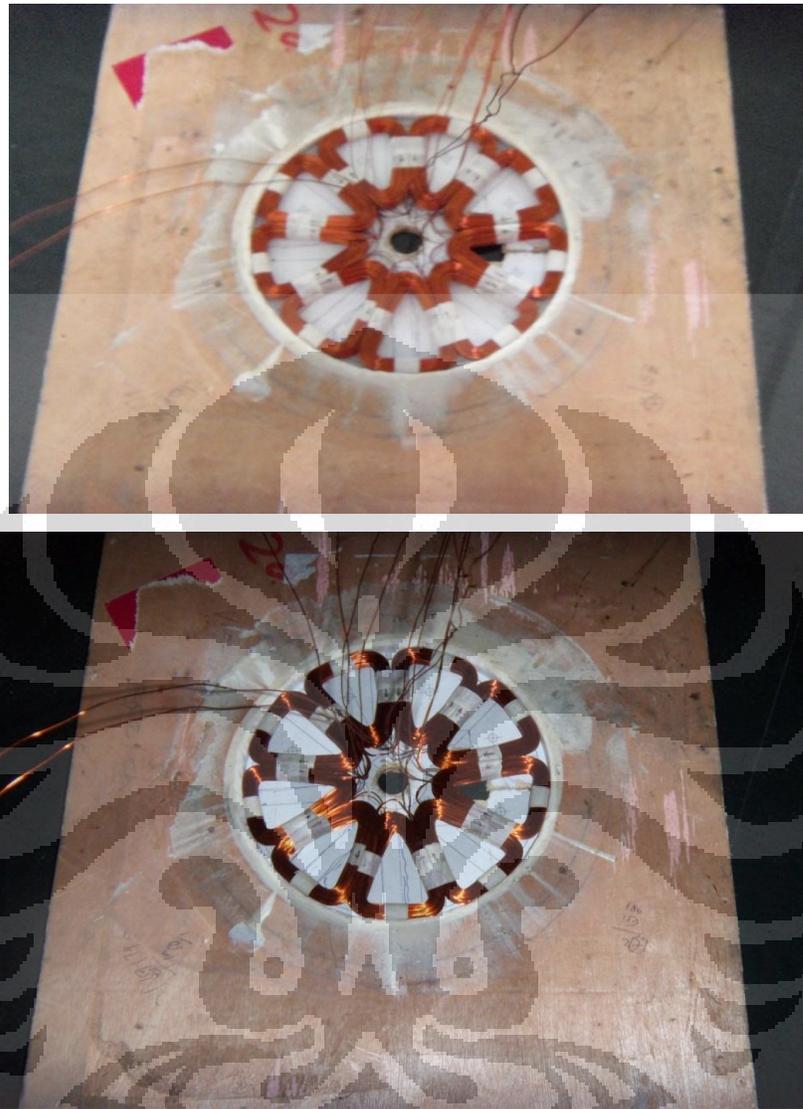


Gambar 3.7 Proses Pembuatan Kumbaran Stator

3.1.1.3 Penyusunan kumbaran stator

Setelah kumbaran stator selesai dililit, kumbaran stator tersebut diletakkan dan disusun berdasarkan posisi magnet pada cetakan stator yang telah dibuat.





Gambar 3.8 Kumbaran Sator Setelah disusun Berdasarkan Posisi Magnet

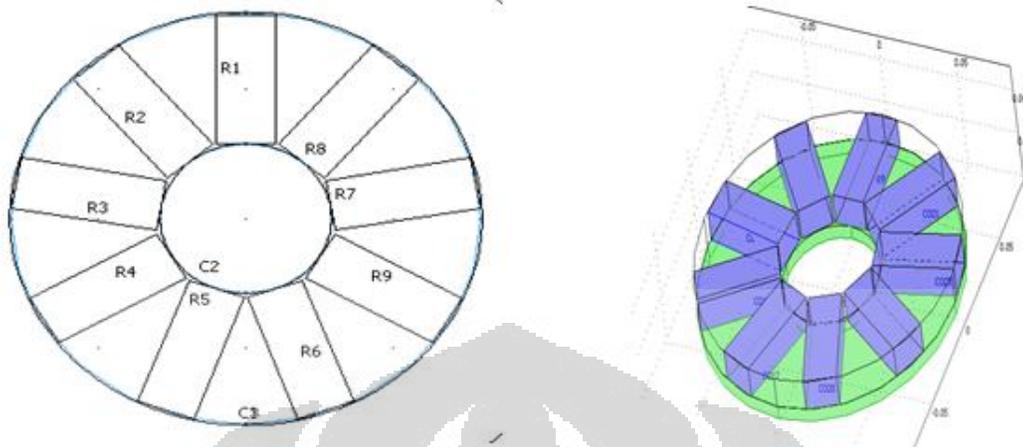
Model Stator ini dibuat sesuai dengan tebal magnet permanen yang digunakan. Kumbaran pada stator dibuat dengan bentuk segitiga karena untuk penyesuaian maksimal ruangan stator yang dibuat.

Tabel 3.1 Ukuran Stator Generator

Dimensi	Keterangan	Jumlah	Satuan (m)
t_s	Tinggi stator		0.05
a_s	Alas stator		0.04
d_s	Ketebalan stator		0.006
D_s	Diameter yoke stator		0.166
N	Jumlah lilitan	600	
N_s	Jumlah kumparan	8	
N_{ph}	Jumlah phasa	1	

3.1.2 Rotor

Generator yang akan dibuat menggunakan dua buah rotor yang saling berhadapan menggapit stator atau disebut rotor ganda. Pada bagian rotor terdiri dari tiga bagian utama yaitu yoke (tatakan magnet) rotor, magnet permanen dan dudukan magnet yang terbuat dari besi. Magnet permanen pada rotor ditanam pada permukaan rotor. Susunan magnet yang digunakan pada generator ini adalah N-S, dimana susunan magnet permanen berlawanan dengan arah kiri kanannya dan arah seberang atas atau bawahnya. Hal ini dikarenakan penyebaran fluks yang dihasilkan akan lebih rapat sehingga kumparan stator dapat menangkap fluks lebih efektif. Magnet permanen yang digunakan adalah strontium ferrite Br 0.8 T. Berikut adalah gambar rotor yang di desain menggunakan COMSOL.



Gambar 3.9 Model Rotor Pada COMSOL

3.1.2.1 Pembuatan dudukan magnet

Pada proses pembuatan rotor bagian ini sangat memegang peranan penting dikarenakan dudukan rotor yang akan dijadikan cetakan saat proses penanaman magnet permanen pada permukaan rotor. Pertama-tama kita harus mengetahui dimensi dari magnet itu sendiri agar kita dapat membuat desain dudukan magnet yang nantinya dijadikan dalam proses penanaman.

Tabel 3.2 Ukuran Geometri model rotor

Dimensi	Keterangan	Panjang(m)
r_i	Jari-jari yoke rotor	0.083
r_x	Jarak magnet ke pusat	0.029
P	Panjang magnet	0.049
L	Lebar Magnet	0.019
T	Tebal magnet	0.0128
T_p	Tebal dudukan magnet	0.0058
R_p	Jari-jari dudukan magnet	0.083

Setelah kita mendapatkan dimensi dari magnet, selanjutnya kita mendesain dudukan magnet. Pada bagian ini bahan yang digunakan boleh menggunakan bahan apa saja. Hanya saja bahan tersebut dapat kita bentuk sesuai desain yang kita inginkan. Biasanya bahan yang digunakan sebagai dudukan magnet berupa kayu triplex. Akan tetapi, karena kondisi pembuatan model menggunakan kayu triplex tidak memadai, kami menggunakan bahan mika. Berikut adalah gambar dari dudukan magnet permanen.



Gambar 3.10 Dudukan Magnet Permanen Menggunakan Bahan Mika

3.1.2.2 Peletakan magnet dan proses penanaman magnet permanen pada permukaan rotor

Setelah dudukan magnet telah dibuat, selanjutnya kita meletakkan sembilan magnet pada dudukan magnet yang nantinya akan ditanam menggunakan bahan komposit. Bahan komposit yang digunakan adalah Epoxy 140/174 dengan filler zirconium silikat ($Zr SiO_4$). Alasan menggunakan bahan ini adalah karena pada bahan ini mempunyai karakteristik mudah dalam proses mencetaknya, hasil dari cetakan

tersebut padat, tidak banyak void bonding, dan kekerasannya baik serta bahan ini tahan terhadap ultra violet/UV.



Gambar 3.11 Cetakan Pengecoran

Berikut adalah proses penanaman rotor dan stator :

1. Cetakan rotor terdiri dari 2 bagian yaitu lower dan upper.
2. Siapkan adonan yang terbuat dari bahan komposit yang digunakan untuk mencetak. Timbang Epoxy 140 500gr, hardener 174 500gr, Zr si o4 500gr. Kita jadikan menjadi 2 bahan yang utama yang akan dijadikan adonan. Bahan tersebut diaduk dan pastikan bahan tersebut sampai benar-benar homogen. Dimana larutan A 250 gr Filler Zr si o4 ditambahkan dengan Epoxy 500 gr dan larutan B 250 gr Filler Zr si o4 ditambahkan dengan Hardener 500 gr kemudian campur perwarna/pigmen bila perlu. Diamkan larutan selama 3 menit agar gelembung-gelembung kecil hilang.
3. Bersihkan cetakan menggunakan ACETONE lalu gosok sampai mengkilap kemudian oles dengan PVA (Polly Vinyl Acrylic). Susun magnet pada dudukan magnet permanen dan diletakan pada cetakan upper rotor. Setelah itu angkat dudukan magnet.



Gambar 3.12 Pembersihan cetakan rotor

4. Siapkan kedua larutan dengan mencampur 300 gr larutan A dan 300 gr larutan B lalu aduk sampai homogen.
5. Tuangkan adonan tersebut ke dalam cetakan upper dan lower menggunakan kucuran halus. Pada upper, adonan dituangkan hingga ketinggian setengah dari tinggi magnet



Gambar 3.13 proses penanaman magnet permanen pada permukaan rotor

6. Siapkan dan campur larutan A dan larutan B kemudian isikan pada cetakan lower hingga penuh. Kemudian tutup dengan cetakan upper secara hati-hati. Pastikan larutan meluap pada Cilling.



- Gambar 3.14(a) pengisian cetakan lower. (b) penggabungan upper dan lower
7. .Kencangkan baut cetakan kemudian isikan Cilling dengan larutan bila Cilling kosong
 8. Diamkan selama 8 jam setelah itu cetakan baru bisa dibuka. Proses ini memang memakan waktu lama karena proses curing gravitasi tanpa vacuum dan oven.



Gambar 3.15 Rotor Setelah Dilakukan Proses Pencetakan

9. Selanjutnya persiapan pembuatan stator

10. Larutkan Polyester + pewarna + katalis (kurang lebih 200 gr)
11. Set kumparan dan poros pada cetakan lower. Isi sela-sela kumparan dengan potongan serat gelas



Gambar 3.16 Pemasangan poros stator

12. Tuangkan larutan Gel coat + polyester sampai penuh



Gambar 3.17 Proses penanaman kumparan stator

13. Setelah kering baru dibuka

14. Gabungkan sisi stator dan sisi rotor dan kecangkan baut



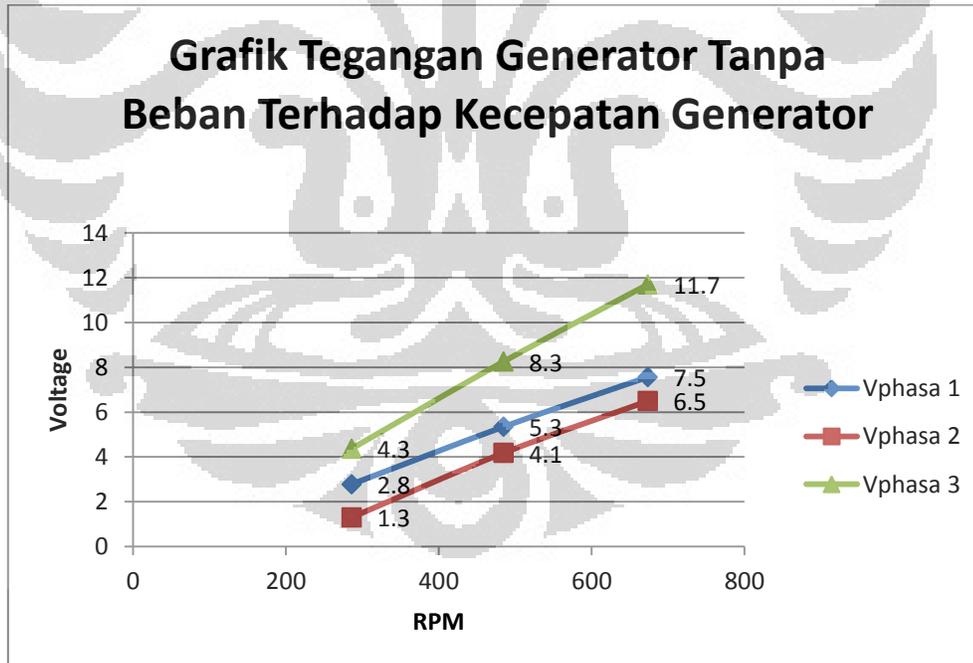
Gambar 3.18 Generator telah selesai dibuat

BAB 4 HASIL PERCOBAAN DAN ANALISA

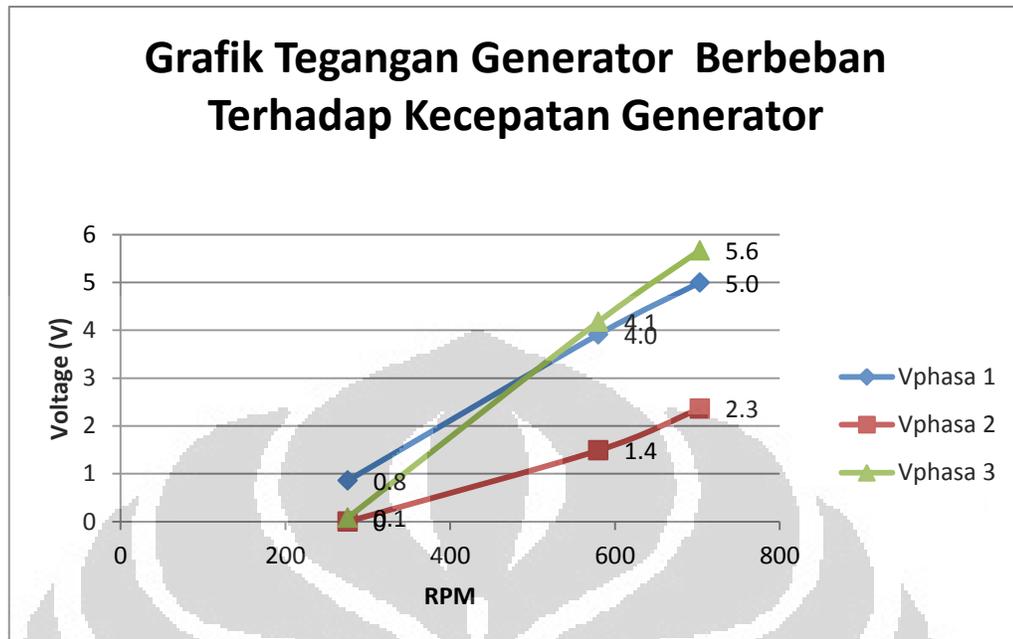
4.1 Hasil Percobaan

Pengukuran generator axial 3 fasa dilakukan untuk mengetahui unjuk kerja terhadap kecepatan putar generator. Pengukuran dilakukan berdasarkan spesifikasi yang digunakan dan dijelaskan pada bab perancangan atau bab tiga. Hal ini dilakukan dengan tujuan agar kita dapat mengetahui nilai tegangan, arus, dan daya yang dihasilkan generator axial 3 fasa yang sudah dibuat. Dengan mengacu pada data spesifikasi komponen generator, maka hasil pengukuran yang didapat berdasarkan variasi dari kecepatan generator.

4.1.1 Tegangan Generator Terhadap Kecepatan Generator

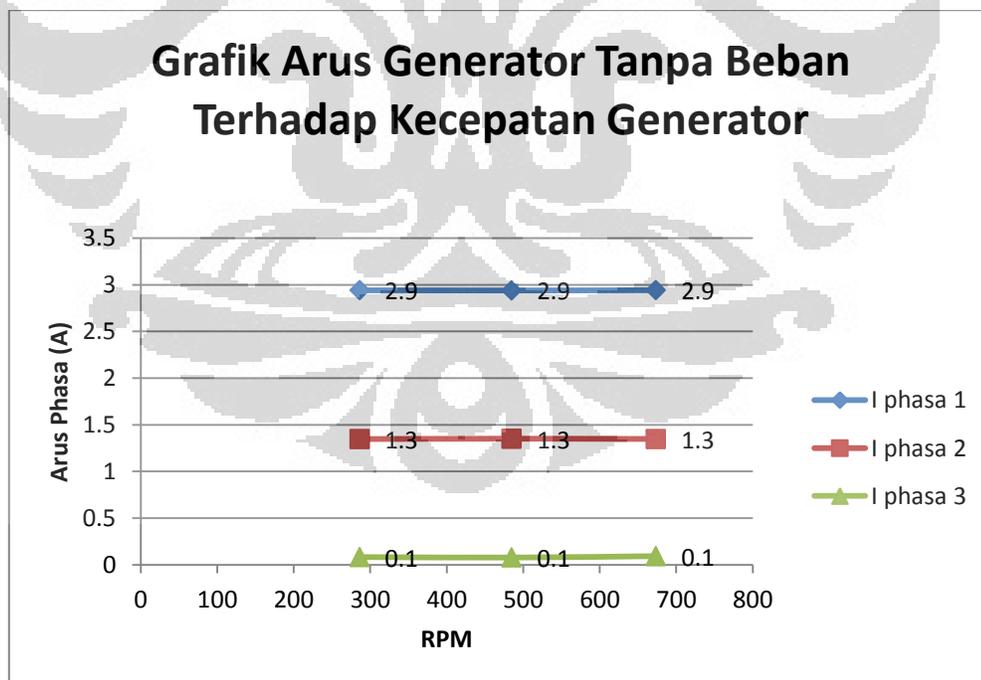


Gambar 4.1 Grafik Generator Terhadap Kecepatan Generator

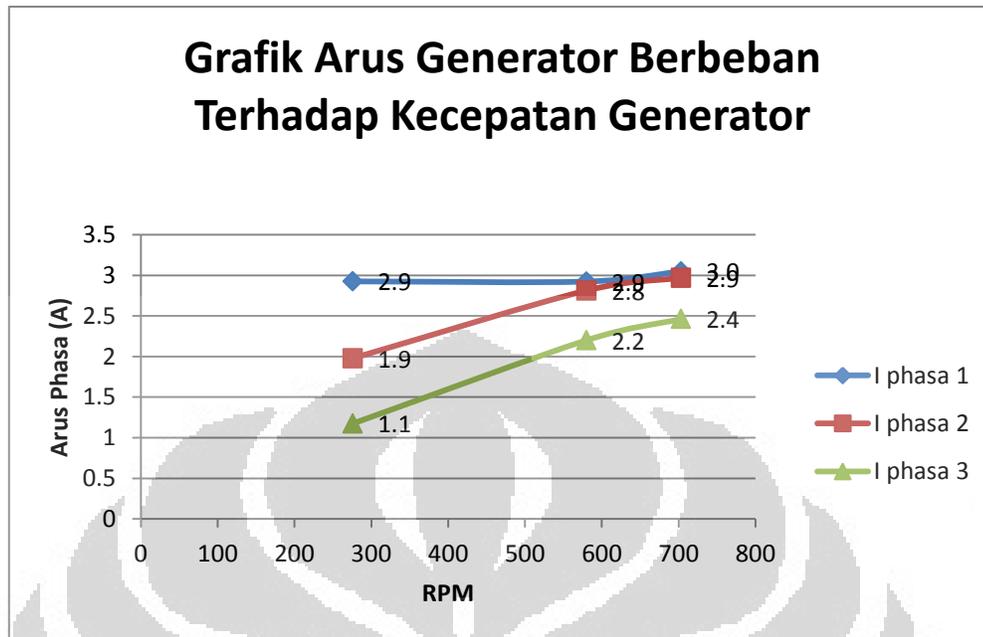


Gambar 4.2 Grafik Tegangan Generator Berbeban Terhadap Kecepatan Generator

4.1.2 Arus Generator Terhadap Kecepatan Generator

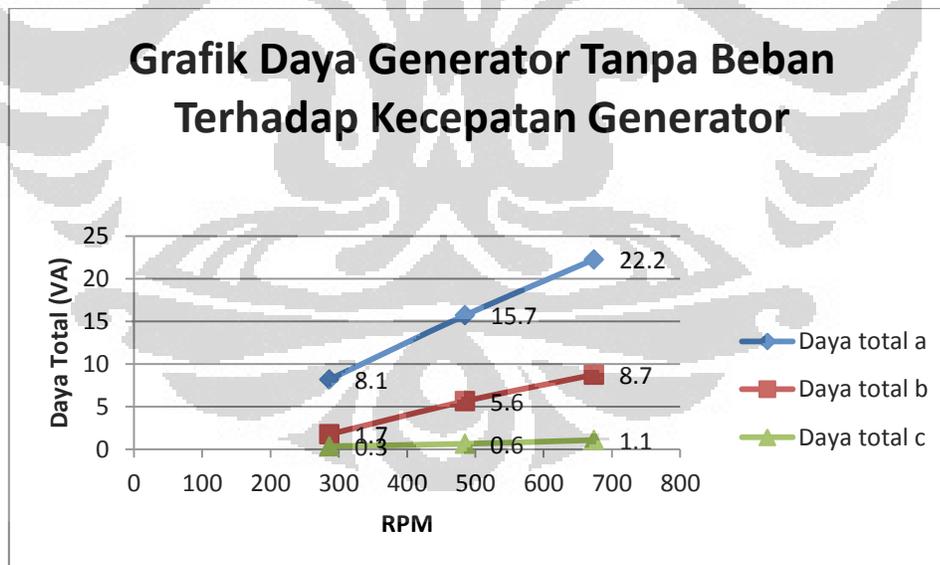


Gambar 4.3 Grafik Arus Generator Tanpa Beban Terhadap Kecepatan Generator

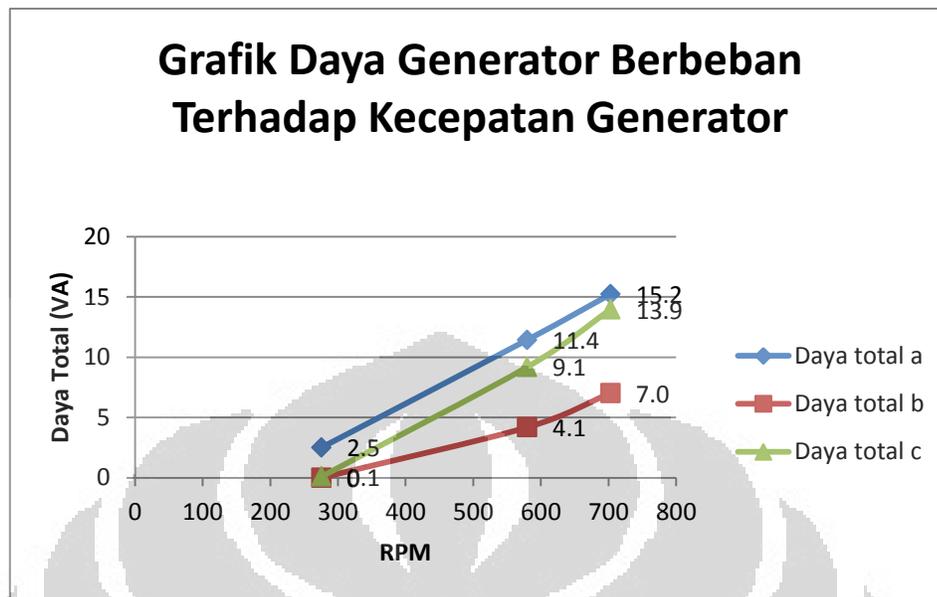


Gambar 4.4 Grafik Arus Generator Berbeban Terhadap Kecepatan Generator

4.1.3 Daya Generator Terhadap Kecepatan Generator

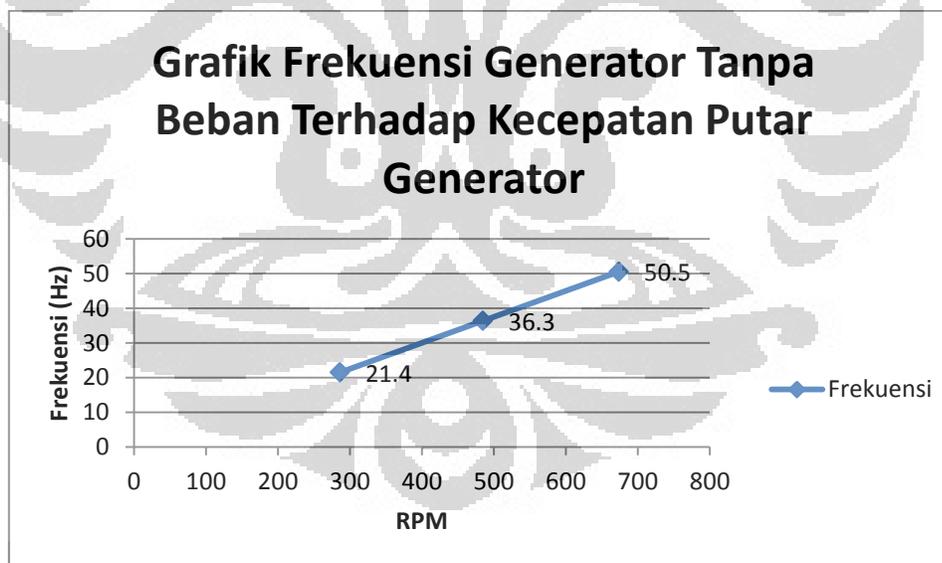


Gambar 4.5 Grafik Daya Generator Tanpa Beban Terhadap Kecepatan Generator

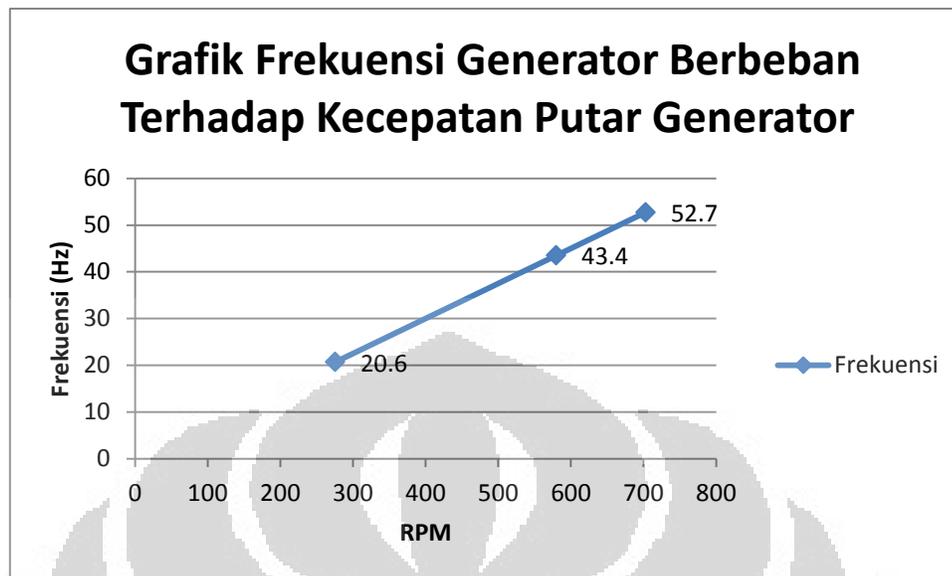


Gambar 4.6 Grafik Daya Generator Berbeban Terhadap Kecepatan Generator

4.1.4 Frekuensi Generator Terhadap Kecepatan Putar Generator



Gambar 4.7 Grafik Frekuensi Generator Tanpa Beban Terhadap Kecepatan Putar Generator



Gambar 4.8 Grafik Frekuensi Generator Berbeban Terhadap Kecepatan Putar Generator

4.2 Analisa

4.2.1 Tegangan Generator Terhadap Kecepatan Generator

Pada subbab ini akan dibahas mengenai tegangan generator pada percobaan dan pengukuran. Tegangan yang dihasilkan oleh generator adalah tegangan AC dan sangat dipengaruhi oleh kecepatan putar generator. Pada pengukuran tegangan dilakukan dua pengukuran, menggunakan beban lampu dan tidak berbeban. Hasil dari kedua pengukuran ini yang nantinya akan dibandingkan dan dianalisa

Pada Gambar 4.1 terlihat bahwa grafik mempunyai bentuk linier. Dengan semakin bertambahnya kecepatan generator maka semakin besar tegangan generator yang dihasilkan. Pada kecepatan 286.1 rpm menghasilkan tegangan $V_{phasa\ 1}$ sebesar 2.7 Volt dan pada saat kecepatan bertambah menjadi 312.5 rpm menghasilkan tegangan $V_{phasa\ 1}$ sebesar 3.399 Volt. Sama halnya pada gambar 4.2 dimana generator diberikan beban. Pada kecepatan 276 rpm menghasilkan tegangan $V_{phasa\ 1}$ sebesar 0.9 Volt dan pada saat kecepatan bertambah menjadi 394 rpm maka tegangan yang dihasilkan 1.8 Volt. Bertambahnya nilai tegangan yang dihasilkan

seiring dengan kecepatan generator ini sesuai dengan persamaan (2.4). Pada persamaan ini terdapat frekuensi listrik yang terdapat pada persamaan (2.5) dimana frekuensi listrik yang dihasilkan dipengaruhi oleh kecepatan putar generator. Sehingga semakin bertambahnya kecepatan putar generator, maka frekuensi listrik yang dihasilkan akan bertambah. Dengan bertambahnya frekuensi listrik yang dihasilkan maka akan bertambah nilai dari tegangan yang dihasilkan oleh generator.

Jika kita lihat pada pengukuran tegangan generator tanpa beban terhadap kecepatan generator dan pengukuran tegangan generator berbeban terhadap kecepatan generator terjadi perbedaan nilai tegangan antara kedua pengukuran tersebut. Pada generator tanpa beban ketika kecepatan 312.5 rpm menghasilkan tegangan $V_{\text{phasa 1}}$ sebesar 3.3 Volt dan generator berbeban pada kecepatan 394 rpm tegangan yang dihasilkan 1.8 Volt. Beda dari kedua nilai tegangan ini disebabkan oleh beban yang terpasang pada generator. Pada saat generator diberikan beban, maka akan ada arus yang mengalir pada stator yang disebut arus jangkar. Arus ini akan membentuk medan magnet yang akan melawan medan magnet pembangkitnya, Sehingga fluks yang dihasilkan medan magnet pembangkit tersebut akan berkurang pada saat menginduksi kumparan stator. Hal ini akan mengakibatkan kecilnya nilai dari tegangan yang dihasilkan.

Pada kedua grafik antara generator berbeban dan tidak berbeban pun kita lihat tidak seimbang. Hal ini disebabkan oleh konstruksi lilitan stator yang masing-masing beda fasanya tidak 120° . Selain itu jika kita lihat dari kedua grafik antara tegangan generator berbeban terhadap kecepatan generator dan tegangan generator tanpa beban terhadap kecepatan generator, kecepatan kedua grafik ini berbeda. Pada generator berbeban kecepatan awal sebesar 286.1 rpm dan pada generator berbeban kecepatan awalnya sebesar 276 rpm. Hal ini terjadi akibat beban yang diberikan generator membuat kecepatan generator menurun yang diiringi daya yang ikut menurun.

Jika kita lihat pada grafik generator berbeban terjadi perubahan pada $V_{\text{phasa 3}}$ dan $V_{\text{phasa 1}}$. Dimana apabila kita bandingkan dengan grafik tegangan generator tanpa beban, urutan $V_{\text{phasa 3}}$ dan $V_{\text{phasa 1}}$ generator berbeban tidak serupa. Hal ini

disebabkan kesalahan pada waktu pengukuran. Kesalahan ini terjadi akibat beban atau lampu pijar yang dipakai tidak dalam keadaan baik, sehingga pada saat data hasil pengukuran diolah terdapat nilai tegangan yang tidak seimbang. Hal ini terjadi karena lampu pijar yang dipakai memiliki hambatan dalam yang berbeda-beda karena lampu pijar ini sudah digunakan pengukuran-pengukuran generator lain yang mempunyai rating yang lebih besar dengan lampu pijar tersebut sehingga kondisi lampu pijar yang digunakan dalam keadaan tidak baik. Hal ini pun juga menyebabkan grafik arus dan daya total generator berbeban tidak serupa dengan grafik arus dan daya total generator tanpa beban.

4.2.2 Arus Generator terhadap Kecepatan Generator

Pada pengukuran ini yang di ukur adalah arus. Pengukuran generator dilakukan dengan menggunakan beban dan tanpa beban. Pengukuran ini bertujuan untuk mendapatkan nilai arus yang mengalir pada beban dari generator axial 3 fasa yang dibuat.

Pada grafik generator tanpa beban, arus yang dihasilkan cenderung tetap. Hal ini dikarenakan pada saat pengukuran generator tanpa beban maka rangkaian generator bersifat close loop atau rangkaian tertutup. Sehingga arus yang mengalir menjadi stabil. Pada grafik generator berbeban dapat kita lihat bahwa grafik arus menjadi linear. Hal ini sesuai persamaan yang kita ketahui. Apabila kita ambil satu sample data yaitu

Percobaan tanpa beban

V			I			RPM	Daya total
7.4	6.3	11	2.9	1.4	0.1	661	11.9

Percobaan berbeban

V			I			RPM	Daya Total
4.6	2.1	5.2	3	3	2.4	664	11.1

Jika kita lihat pada kedua tabel tersebut rata-rata tegangan fasa dan arus generator tanpa beban adalah 8.2 V dan 1.4 A. Kemudian untuk rata-rata tegangan fasa dan arus generator berbeban adalah 3.9 V dan 2.8 A. Daya total yang dihasilkan antara generator tanpa beban dan generator berbeban sebesar 11.9 VA dan 11.1 VA.

Sehingga hal ini sesuai dengan persamaan yang kita ketahui bahwa

$$P = V \cdot I \quad (4.1)$$

Dimana

P = Daya (Watt)

V = Tegangan (Volt)

I = Arus (Ampere)

Apabila kita asumsikan daya bernilai konstan, maka apabila suatu generator diberikan beban akan mengakibatkan tegangan pada generator tersebut akan turun yang disebabkan arus jangkar, sehingga arus pada generator berbeban tersebut akan bertambah. Hal ini menyebabkan nilai arus yang mengalir menjadi bertambah sesuai dengan rumus diatas.

4.2.3 Daya Generator Terhadap Kecepatan Generator

Pada pengukuran ini bertujuan untuk mengetahui nilai daya total yang dihasilkan generator berbeban dan tanpa beban. Pada 4.5 dan 4.6 kita lihat bahwa grafik dari daya total generator berbeban dan tanpa beban berubah-ubah. Hal ini disebabkan karena kecepatan generator tidak dijaga konstan. Sehingga nilai dari daya total kedua percobaan berubah-ubah. Akan tetapi rata-rata dari hasil pengukuran adalah nilai daya total naik seiring dengan bertambahnya kecepatan generator. Pada generator tanpa beban dengan kecepatan 286 rpm menghasilkan daya total sebesar 8.1 VA dan pada saat kecepatan bertambah menjadi 313 rpm maka nilai daya total bertambah menjadi 9.8 VA. Sama halnya dengan generator berbeban, pada saat kecepatan generator 276 rpm daya total yang dihasilkan 2.6 VA dan pada saat

kecepatan bertambah 394 rpm nilai daya total menjadi 5.2 VA. Kenaikan nilai daya sesuai dengan persamaan pada subbab 4.2.2 dimana apabila nilai tegangan naik yang diiringi nilai arus yang naik maka besarnya daya akan meningkat.

Jika kita lihat dalam grafik, penurunan besar nilai daya total pada generator berbeban disebabkan oleh kecepatan generator yang berkurang akibat diberikan beban. Sehingga apabila kecepatan berkurang maka nilai tegangan akan berkurang dan mengakibatkan nilai daya total juga berkurang



BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

1. Tegangan dan daya generator berbanding linear dengan kecepatan generator.
2. Pada saat generator kondisi berbeban maka kecepatan putar generator menurun sehingga mempengaruhi daya generator dan tegangan generator.
3. Tegangan fasa yang dihasilkan generator flux axial 3 fasa berbeban adalah $V_{phasa\ 1}$ 1.5 V, $V_{phasa\ 2}$ 0.1 V, $V_{phasa\ 3}$ 0.1 V dengan kecepatan generator 703 Rpm
4. Daya total yang dihasilkan generator axial fluks 3 fasa berbeban pada kecepatan generator 703 Rpm adalah 36.4 VA
5. Arus yang dihasilkan generator fluks axial 3 fasa berbeban adalah $I_{phasa\ 1}$ 3A, $I_{phasa\ 2}$ 3A, $I_{phasa\ 3}$ 2.5A

5.2 Saran

1. Untuk Menghasilkan frekuensi 50 Hz, maka jumlah magnet pada rotor generator flux axial 3 fasa berbeban adalah
$$F = \frac{np}{120}$$
$$50 = \frac{703\ Rpm\ p}{120}$$
$$50 = 5.85\ p$$
$$p = 9\ magnet$$
2. Dalam proses melilit stator, sebaiknya menggunakan alat penggulung lilitan otomatis. Dalam proses melilit apabila menggunakan penggulung manual dapat menyebabkan tumpukan lilitan pada fasa stator tidak beraturan sehingga lilitan antara fasa berbeda yang dapat menyebabkan tegangan antar fasa tidak seimbang dan tegangannya pun lebih kecil
3. Kumparan stator generator 3 fasa, beda antara fasanya sebaiknya 120°

DAFTAR ACUAN

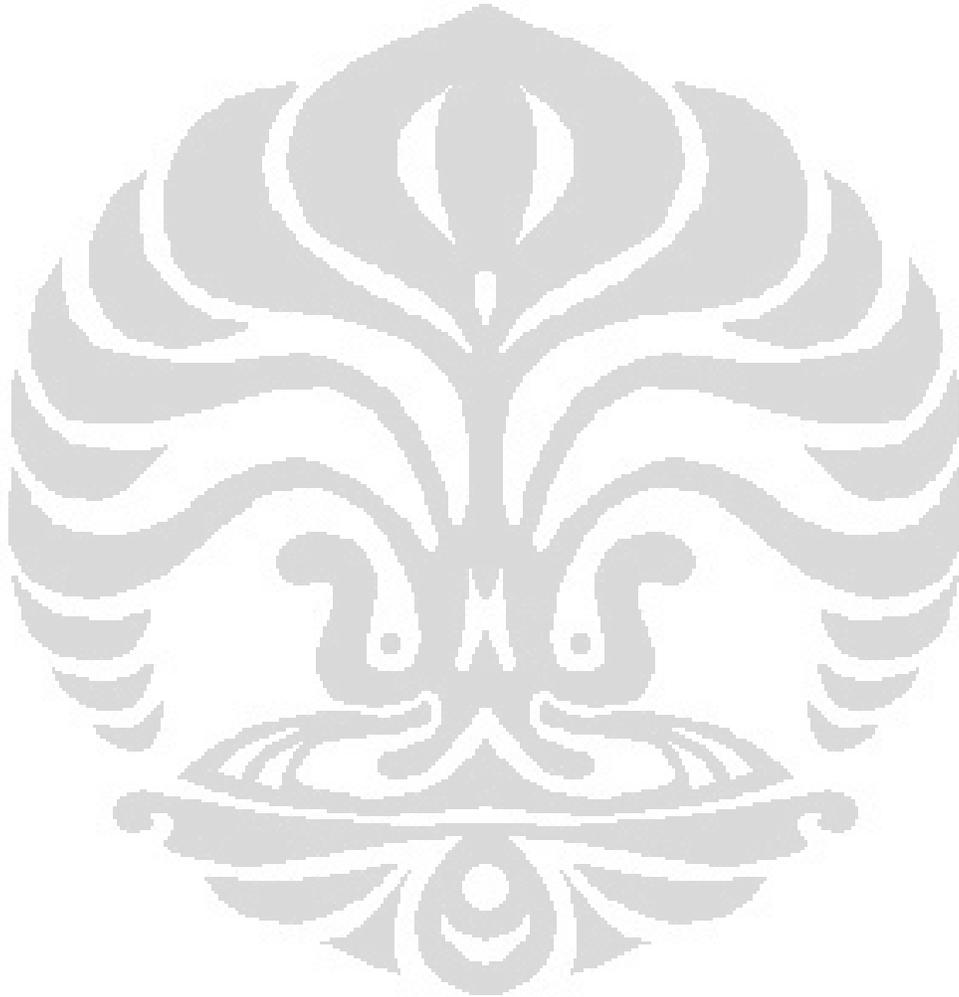
- [1] Garrison F. Price, Todd D. Batzel dkk. “*Design and Testing of a Permanent Magnet Axial Flux Wind Power Generator*”, 2008.
- [2] Rossouw F.G. “*Analysis and Design of Axial Flux Permanent Magnet Wind Generator System for Direct Battery Charging Applications*” Departement of Electrical & Electronic Engineering, Stellenbosch University, Matieland, 2009.
- [3] Yicheng Chen. dkk, “*PM Wind Generator Comparison of Different Topologies*”IEEE, 2004
- [4] N. A. Karim, N. A. Karim, J. Azzouzi, dan G. Barakat, “*Influence of skewing on the performances of an axial flux pm wind generator coupled to a diode rectifier,*” in *Electric Machines & Drives Conference, 2007. IEMDC `07. IEEE International*, J. Azzouzi, Ed., vol. 2, 2007, pp. 1037-1042.
- [5] Marian Lukaniszyn, dkk. “*Field-circuit analysis of construction modifications of a torus-type PMDC motor*”, COMPEL: The International Journal for computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, 2003.
- [6] Hideki Kobayashi, Yuhito Doi, Koji Miyata, Takehisa Minowa. “*Design of the axial-flux permanent magnet coreless generator for the multi-megawatts wind turbine*”, Magnetic Materials R&D Center, Shin-Etsu Chemical Co., Ltd, 2-1-5 Kitago, Echizen-shi, Fukui, Japan.
- [7] Yicheng Chen. dkk, “*PM Wind Generator Comparison of Different Topologies*”IEEE, 2004
- [8] <http://www.windstuff.com>
- [9] <http://www.otherpower.com>
- [10] <http://www.yougreendream.com>

DAFTAR PUSTAKA

Chapman, Stephen J., "*Electric Machinery and Power System Fundamentals*", McGraw-Hill, New York, 2002.

William H. Hayt dan John A. Buck "*Elektromagnetika*", Erlangga, Jakarta, 2006.

Zuhal, *Dasar Tenaga Listrik dan Elektronika Daya*, Gramedia, Jakarta, 1995.

**UNIVERSITAS INDONESIA**

LAMPIRAN

LAPORAN HA

No. :

- 1.Kode Benda Uji : Generator Mhs UI, 3phase/ 9kump/ 60L/ par-2(0,6mm)/ 2x9Fe
- 2.Tanggal Pengujian : 31 Desember 2011
- 3.Tegangan Beban : Sistem 6 Volt
- 4.Jenis Beban : Dengan Beban

Waktu	Tegangan AC															
	L1				L2				L3				L1			
	Mean	σ	Max	Min	Mean	σ	Max	Min	Mean	σ	Max	Min	Mean	σ	Max	Min
1	0.86	0.21	1.24	0.61	0	0.13	0	0	0.08	0.24	0.47	0	2.93	0.13	3.12	2.71
2	1.79	0.31	2.25	1.38	0	0.22	0	0	1.14	0.39	1.72	0.54	2.93	0.03	2.97	2.87
3	2.67	0.26	2.98	2.26	0.07	0.2	0.31	0.23	2.41	0.31	2.87	1.95	2.95	0.1	3.13	2.8
4	3.56	0.23	3.86	3.22	0.8	0.22	1.06	0.41	3.26	0.36	3.9	2.85	3	0.1	3.13	2.8
5	3.91	0.13	4.11	3.67	1.49	0.2	1.78	1.09	4.18	0.18	4.48	3.92	2.92	0.13	3.14	2.72
6	4.29	0.19	4.58	4	1.81	0.19	2.07	1.53	4.56	0.11	4.76	4.44	2.96	0.09	3.08	2.81
7	4.64	0.07	4.76	4.52	2.14	0.19	2.43	1.83	5.2	0.21	5.41	4.87	2.96	0.15	3.24	2.75
8	4.97	0.17	5.23	4.77	2.33	0.08	2.45	2.21	5.43	0.07	5.53	5.28	2.98	0.06	3.06	2.85
9	5	0.08	5.13	4.91	2.37	0.06	2.45	2.28	5.67	0.11	5.85	5.51	3.05	0.04	3.1	2.99
10	4.67	0.56	5.06	3.53	2.12	0.38	2.47	1.35	5.05	0.83	5.7	3.39	2.99	0.12	3.13	2.76