



UNIVERSITAS INDONESIA

**ANALISIS KONFIGURASI DELAPAN KUTUB MAGNET DAN
SEMBILAN KUMPARAN GENERATOR AKSIAL TIGA FASA
DENGAN ROTOR GANDA DAN STATOR INTERNAL TANPA
INTI**

SKRIPSI

INDAH MARISA DHANTI

0806330996

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



UNIVERSITAS INDONESIA

**ANALISIS KONFIGURASI DELAPAN KUTUB MAGNET DAN
SEMBILAN KUMPARAN GENERATOR AKSIAL TIGA FASA
DENGAN ROTOR GANDA DAN STATOR INTERNAL TANPA
INTI**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat memperoleh gelar sarjana

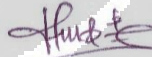
INDAH MARISA DHANTI

0806330996

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
DEPOK
JULI 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 : Indah Marisa Dhanti
NPM : 0806330996
Tanda Tangan : 
Tanggal : Juli 2012



LEMBAR PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Indah Marisa Dhanti

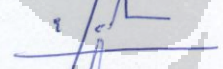
NPM : 0806330996

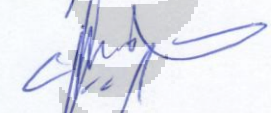
Program Studi : Teknik Elektro


Judul Skripsi : Analisis Konfigurasi Delapan Kutub Magnet dan Sembilan Kumparan Generator Aksial Tiga Fasa dengan Rotor Ganda dan Stator Internal 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 : Dr. Ing. Eko Adhi Setiawan, S.T. M.T. ()

Penguji : Ir. I Made Ardita Y., M.T. ()

Penguji : Prof. Dr. Ir. Iwa Garniwa M. K., M.T. ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 10 Juli 2012

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah *robbil 'alamin*, puji syukur kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan karunia-Nya, sehingga Penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik. Penyusunan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik dari Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Indonesia.

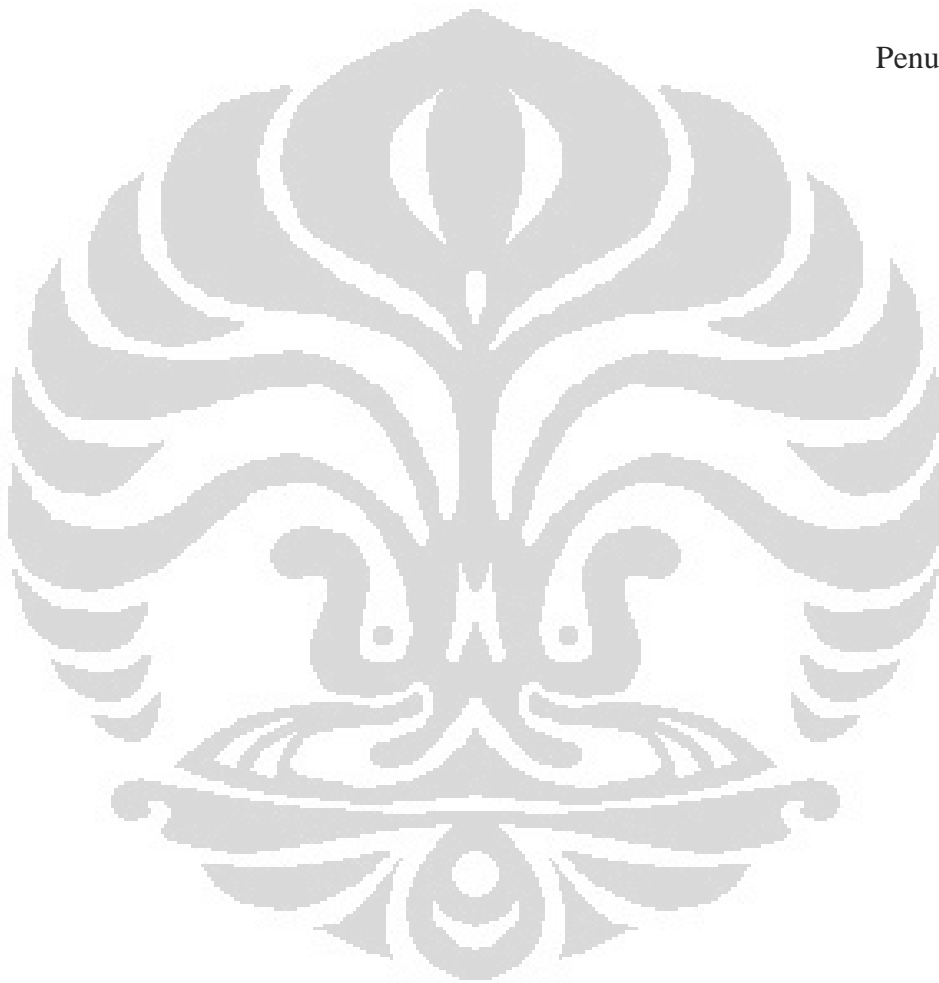
Penulis menyadari bahwa tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, penyusunan skripsi ini tidak mungkin dapat berjalan dengan baik. Oleh karena itu, Penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bpk. Dr. Ing. Eko Adhi Setiawan, ST. MT. selaku dosen pembimbing skripsi yang telah meluangkan waktu untuk memberikan bimbingan, arahan, dan diskusi kepada penulis sehingga skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik.
2. Pak Malik, Pak Raharjo, Pak Anton dan seluruh keluarga besar LAPAN yang telah memberikan bantuan yang teramat besar dalam pembuatan dan pengujian generator ini.
3. Keluarga Penulis, kedua orang tua, kakak dan adik Penulis yang selalu memberikan dukungan, motivasi, dan doa.
4. Teman-teman sesama bimbingan, Bubi Maura Nilendra, Saeful Sulun, S. Daniel C. Panjaitan dan Maulana Akbar yang telah banyak bertukar pikiran dan memberikan masukan yang berguna untuk Penulis.
5. Teman-teman Lab. Konversi Energi Listrik, Lab. Tegangan Tinggi dan Pengukuran Listrik, Lab. Sistem Tenaga Listrik, serta seluruh mahasiswa Departemen Teknik Elektro, khususnya angkatan 2008 yang banyak memberikan bantuan dalam segala bentuk kepada Penulis.
6. Dosen, karyawan, dan seluruh sivitas akademik Departemen Teknik Elektro, serta pihak-pihak lain yang tidak bisa Penulis sebutkan satu persatu.
7. 슈퍼주니어 오빠들과 엘프. Terima kasih atas kerja kerasnya selama ini.
8. Sang Bumi, yang selalu menjadi tempat untuk kembali pulang.

Akhir kata, semoga Allah SWT berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah bersedia membantu Penulis. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi.

Depok, Juli 2012

Penulis



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

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

Nama : Indah Marisa Dhanti

NPM : 0806330996

Program Studi : Teknik Elektro

Departemen : Teknik Elektro

Fakultas : Teknik

Jenis karya : Skripsi

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

**ANALISIS KONFIGURASI DELAPAN KUTUB MAGNET DAN
SEMBILAN KUMPARAN GENERATOR AKSIAL TIGA FASA
DENGAN ROTOR GANDA DAN STATOR INTERNAL TANPA
INTI**

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/format-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan 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: 11 Juni 2012

Yang menyatakan



(Indah Marisa Dhanti)

ABSTRAK

Nama : Indah Marisa Dhanti
Program Studi : Teknik Elektro
Judul : Analisis Konfigurasi Delapan Kutub Magnet dan Sembilan Kumparan Generator Aksial Tiga Fasa dengan Rotor Ganda dan Stator Internal Tanpa Inti

Pemanfaatan mesin magnet permanen fluks aksial terus mengalami perkembangan seiring meningkatnya penelitian tentang pemanfaatan energi angin sebagai salah satu solusi dari isu pemanasan global. Model dan modifikasi dari generator aksial sangat memegang peranan penting terhadap kinerja generator. Berbagai tipe dan jenis dicoba untuk meningkatkan efisiensi dari penggunaannya. Pada skripsi ini generator aksial tiga fasa dengan rotor ganda dan stator internal tanpa inti dibuat dan diuji di Laboratorium Komposit dan Laboratorium Uji Sistem Konversi Energi Angin di LAPAN Rumpin. Desain yang diterapkan yaitu tipe stator *distributed* dengan sembilan kumparan dan delapan pasang magnet permanen. Hasil uji akan dianalisa untuk mengetahui unjuk kerja dari generator ini.

Kata kunci :

Generator aksial, rotor ganda, stator internal, turbin angin

ABSTRACT

Name : Indah Marisa Dhanti
Study Program : Electrical Engineering
Title : Configuration Analysis of Eight Magnetic Poles
and Nine Coils Three Phase Axial Flux Generator
with Double Rotor and Internal Coreless Stator

The use of axial flux permanent magnet machine continues to progress as the research about the use of wind energy as a solution for global warming issue keep increasing. The model and the modification of axial generator hold the important role of generator performance. Various types and kinds of axial generator are tested to improve the efficiency of its use. In this undergraduated thesis, a three phase axial flux generator with double rotor and internal coreless stator is made and tested at the Laboratory of Composite and the Laboratory of Wind Power Conversion System Testing in LAPAN Rumpin. The design applied is the distributed stator with nine coils and eight pairs of permanent magnet. The test results will be analysed to see the performance of this generator.

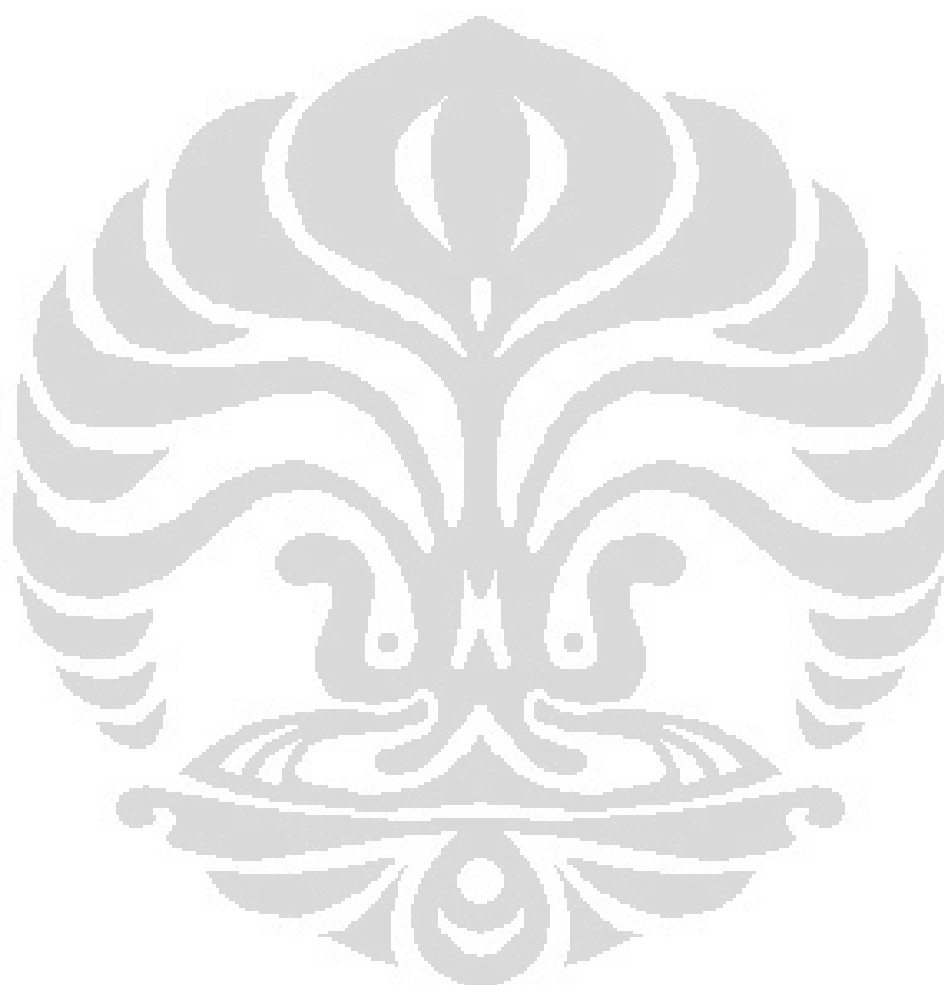
Keywords :

Axial Generator, double rotor, internal stator, wind turbine

DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	II
LEMBAR PENGESAHAN	III
KATA PENGANTAR	IV
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	ERROR!
BOOKMARK NOT DEFINED.	
ABSTRAK	VII
ABSTRACT.....	VIII
DAFTAR ISI.....	IX
DAFTAR GAMBAR	XII
DAFTAR TABEL.....	XIV
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Tujuan	1
1.3 Batasan Masalah	1
1.4 Metodologi Penulisan	2
1.5 Sistematika Penulisan	2
BAB 2 LANDASAN TEORI.....	3
2.1 Sistem <i>Direct Drive</i> dan Penggunaan Magnet Permanen.....	3
2.2 Generator Magnet Permanen	4
2.2.1 GENERATOR MAGNET PERMANEN FLUKS AKSIAL.....	4
2.2.2 GENERATOR MAGNET PERMANEN FLUKS RADIAL	6
2.2.3 GENERATOR MAGNET PERMANEN FLUKS MELINTANG	7
2.3 Konstruksi Generator Fluks Aksial	8
2.3.1 STATOR.....	8
2.3.1.1 Jumlah Stator.....	9
2.3.1.2 Inti Stator.....	10
2.3.2 ROTOR	15
2.3.3 CELAH UDARA (<i>AIR GAP</i>)	16
2.3.4 PENEMPATAN MAGNET PERMANEN	16
2.3.5 BENTUK KUTUB	18

2.3.6 PERBANDINGAN JUMLAH MAGNET DAN KUMPARAN STATOR	19
2.4 Prinsip Kerja Generator Fluks Aksial	20
2.5 Rangkaian Ekuivalen	20
BAB 3 PERANCANGAN DAN PENGUJIAN.....	22
3.1 Perancangan Generator	22
3.2 Pembuatan Generator.....	25
3.2.1 ROTOR	25
3.2.1.1 Penyiapan Mandril	27
3.2.1.2 Proses Penuangan.....	27
3.2.2 STATOR.....	31
3.2.3 BAHAN DAN KOMPOSISI.....	33
3.2.3.1 Matrix.....	33
3.2.3.2 Filler.....	33
3.2.3.3 Reinforce	34
3.2.3.4 Komposisi.....	34
3.3 Pengujian Generator	35
3.3.1 PENGUJIAN TANPA BEBAN.....	35
3.3.2 PENGUJIAN BERBEBAN	37
BAB 4 HASIL PENGUJIAN DAN ANALISIS.....	39
4.1 Hasil Pengujian.....	39
4.1.1 PENGUJIAN TANPA BEBAN.....	39
4.1.1.1 Kecepatan Rendah.....	39
4.1.1.2 Kecepatan Tinggi	40
4.1.2 PENGUJIAN BERBEBAN	42
4.2 Analisis	44
4.2.1 TEGANGAN GENERATOR TERHADAP KECEPATAN PUTAR	44
4.2.2 ARUS GENERATOR TERHADAP KECEPATAN PUTAR.....	46
4.2.3 DAYA GENERATOR TERHADAP KECEPATAN PUTAR	46
4.2.4 HASIL PENGUJIAN TERHADAP HASIL PERHITUNGAN RANCANGAN AWAL..	48
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	50
5.1 Kesimpulan.....	50
5.2 Saran	50



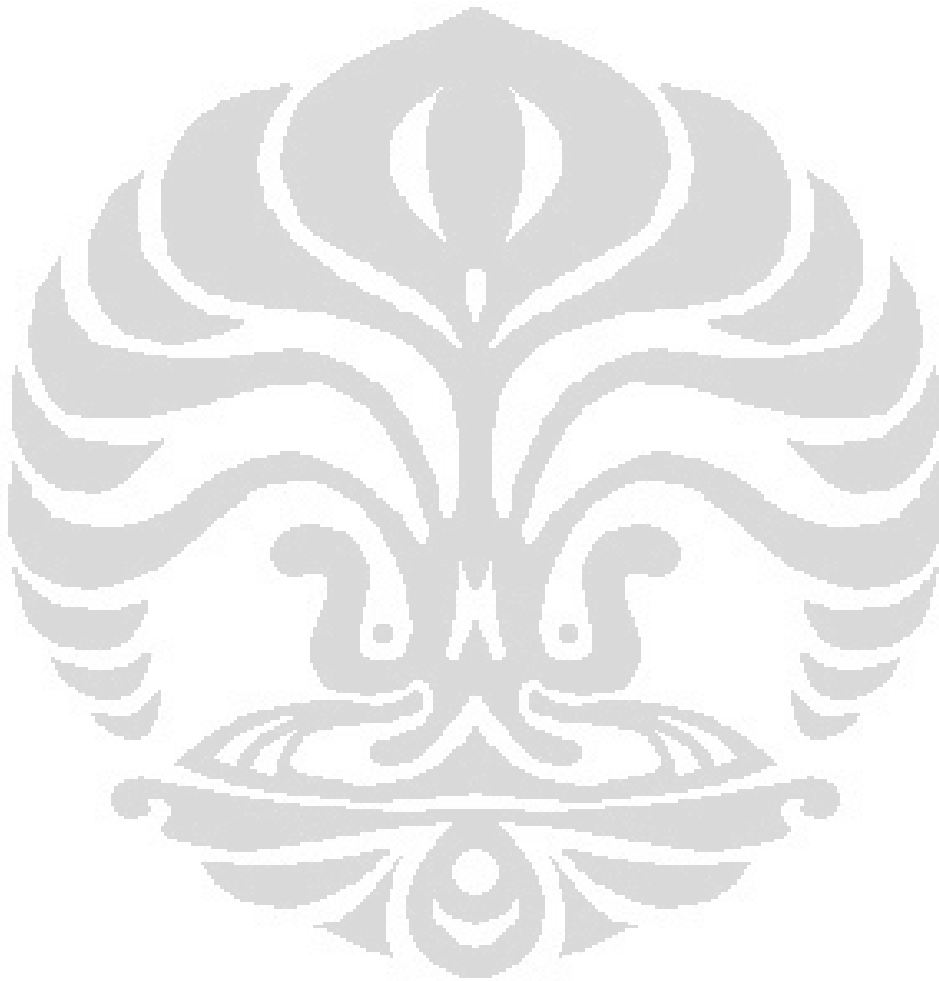
DAFTAR GAMBAR

GAMBAR 2.1. SKEMA GENERATOR MAGNET PERMANEN FLUKS AKSIAL	6
GAMBAR 2.2. PERBEDAAN ARAH FLUKS RADIAL DAN AKSIAL.....	7
GAMBAR 2.3. PENAMPANG GENERATOR RFPM DAN AFPM	7
GAMBAR 2.4. GENERATOR FLUKS MELINTANG TIPE <i>SURFACE-MOUNTED</i>	8
GAMBAR 2.5. GENERATOR AKSIAL STATOR GANDA	9
GAMBAR 2.6. GENERATOR AKSIAL DENGAN KESEIMBANGAN STATOR	10
GAMBAR 2.7. (A). STATOR DENGAN SLOT, (B). ALIRAN FLUKS TIPE SLOT	11
GAMBAR 2.8. (A). STATOR TANPA SLOT, (B). ALIRAN FLUKS TIPE TANPA SLOT... 11	11
GAMBAR 2.9. (A). STATOR <i>OVERLAPPING</i> (B). SKEMATIK STATOR <i>OVERLAPPING</i>	12
GAMBAR 2.10. (A). STATOR <i>NON-OVERLAPPING</i> (B). SKEMATIK STATOR <i>NON-OVERLAPPING</i>	13
GAMBAR 2.11. (A). STATOR <i>CONCENTRATED</i> (B). STATOR <i>DISTRIBUTED</i>	14
GAMBAR 2.12. STATOR KUTUB SALIENT	14
GAMBAR 2.13. GENERATOR AKSIAL DENGAN STATOR KUTUB SALIENT: (A). KONSTRUKSI; (B). STATOR; (C). ROTOR. 1-MAGNET PERMANEN, 2-PENYANGGA ROTOR, 3-KUTUB STATOR, 4-KUMPARAN STATOR.	15
GAMBAR 2.14. ROTOR GENERATOR AKSIAL TIPE GANDA	16
GAMBAR 2.15. MAGNET PERMANEN <i>SURFACE-MOUNTED</i>	17
GAMBAR 2.16. MAGNET PERMANEN <i>EMBEDDED</i>	17
GAMBAR 2.17. BENTUK MAGNET PERMANEN PADA ROTOR.....	17
GAMBAR 2.18. TIPE MAGNET N-N	18
GAMBAR 2.19. TIPE MAGNET N-S	18
GAMBAR 2.20. BENTUK KUTUB GENERATOR AKSIAL	19
GAMBAR 2.21. RANGKAIAN EKIVALEN GENERATOR AKSIAL	21
GAMBAR 3.1. KURVA DEMAGNETISASI UNTUK BEBERAPA JENIS MAGNET.....	22
GAMBAR 3.2. PENAMPANG MELINTANG GENERATOR AKSIAL	26
GAMBAR 3.3. CETAKAN UPPER ROTOR.....	28
GAMBAR 3.4. MAL MAGNET.....	28
GAMBAR 3.5. BILAH KAYU UNTUK MENUTUP LUBANG LUAPAN PADA CETAKAN....	28
GAMBAR 3.6. CETAKAN UPPER ROTOR YANG DIISI LARUTAN	29
GAMBAR 3.7. UPPER ROTOR YANG SUDAH KERING	29
GAMBAR 3.8. CETAKAN LOWER ROTOR	29
GAMBAR 3.9. CETAKAN LOWER ROTOR YANG DIISI LARUTAN.....	30
GAMBAR 3.10. CETAKAN LOWER ROTOR DITUTUP DENGAN CETAKAN UPPER ROTOR	30
GAMBAR 3.11. HASIL CETAKAN ROTOR	31
GAMBAR 3.12. CETAKAN <i>LOWER</i> DILAYER DENGAN SERAT WR 200.....	32
GAMBAR 3.13. CETAKAN <i>UPPER</i> DILAYER DENGAN SERAT WR 200	32
GAMBAR 3.14. KUMPARAN PADA CETAKAN.....	32

GAMBAR 3.15. CETAKAN <i>LOWER</i> DIISI LARUTAN.....	32
GAMBAR 3.16. CETAKAN <i>LOWER</i> TERISI PENUH LARUTAN.....	32
GAMBAR 3.17. CETAKAN <i>LOWER</i> DITUTUP DENGAN CETAKAN <i>UPPER</i>	33
GAMBAR 3.18. ROTOR DAN STATOR GENERATOR.....	33
GAMBAR 3.19. GENERATOR JADI	33
GAMBAR 3.20. GENERATOR AKSIAL YANG TELAH DIHUBUNGKAN DENGAN ALAT PENGUJIAN	35
GAMBAR 3.21. MOTOR PENGGERAK DENGAN POSISI <i>BELT</i> UNTUK KECEPATAN RENDAH.....	36
GAMBAR 3.22. BEBAN LAMPU UNTUK PENGUJIAN BERBEBAN.....	37
GAMBAR 4.1. GRAFIK TEGANGAN GENERATOR TANPA BEBAN TERHADAP KECEPATAN PUTAR RENDAH	39
GAMBAR 4.2. GRAFIK ARUS GENERATOR TANPA BEBAN TERHADAP KECEPATAN PUTAR RENDAH	40
GAMBAR 4.3. GRAFIK DAYA GENERATOR TANPA BEBAN TERHADAP KECEPATAN PUTAR RENDAH	40
GAMBAR 4.4. GRAFIK TEGANGAN GENERATOR TANPA BEBAN TERHADAP KECEPATAN PUTAR TINGGI	41
GAMBAR 4.5. GRAFIK ARUS GENERATOR TANPA BEBAN TERHADAP KECEPATAN PUTAR TINGGI.....	41
GAMBAR 4.6. GRAFIK DAYA GENERATOR TANPA BEBAN TERHADAP KECEPATAN PUTAR TINGGI.....	42
GAMBAR 4.7. GRAFIK TEGANGAN GENERATOR BERBEBAN TERHADAP KECEPATAN PUTAR.....	42
GAMBAR 4.8. GRAFIK ARUS GENERATOR BERBEBAN TERHADAP KECEPATAN PUTAR GENERATOR	43
GAMBAR 4.9. GRAFIK DAYA GENERATOR BERBEBAN TERHADAP KECEPATAN PUTAR	43
GAMBAR 4.10. KAJIAN TANGAN KANAN	44
GAMBAR 4.11. KESALAHAN ARAH LILITAN PADA FASA S	45
GAMBAR 4.12. KONFIGURASI <i>DISTRIBUTED WINDING</i> YANG TEPAT	45
GAMBAR 4.13. <i>HYSTERESIS LOOP</i>	48

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Perbandingan Jumlah Magnet dan Kumparan Stator.....	19
Tabel 3.1. Hasil perhitungan tegangan generator rancangan.....	24
Tabel 3.2. Hasil perhitungan tegangan, arus dan daya generator rancangan.....	25
Tabel 3.3. Ukuran geometri rotor	26
Tabel 3.4. Ukuran geometri stator	31



BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Krisis energi dewasa ini telah menjadi suatu masalah yang paling hangat diperbincangkan oleh masyarakat dunia, termasuk di Indonesia. Berdasarkan masalah pemakaian energi konvensional yang semakin menipis, penggunaan dan pengembangan energi terbarukan (*renewable energy*) menjadi hal yang sangat penting. Apalagi dengan makin mengglobalnya isu emisi CO₂ yang kontra terhadap pelestarian lingkungan global. Salah satu pemanfaatan energi yang sedang berkembang saat ini adalah energi angin. Dewasa ini telah banyak jenis generator yang dimanfaatkan untuk perkembangan pembangkit listrik tenaga angin, diantaranya generator aksial. Generator ini merupakan generator yang sering dimanfaatkan dalam hal pembangkitan listrik dengan tenaga angin yang berkapasitas kecil.

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.

1.2 Tujuan

Tujuan penulisan skripsi ini adalah:

1. Merancang dan membuat generator aksial tiga fasa untuk turbin angin kecepatan rendah.
2. Mengetahui kinerja generator aksial tiga fasa yang telah dirancang dan dibuat.

1.3 Batasan Masalah

Agar penulisan lebih terarah sesuai dengan tujuan penulisan, maka perlu dibatasi beberapa hal yaitu:

1. Pembahasan mengenai pembuatan dan unjuk kerja dari generator aksial tiga fasa dengan rotor ganda dan stator internal tanpa inti dengan ukuran yang spesifik.
2. Dimensi generator disesuaikan dengan ukuran cetakan yang telah tersedia di Lapan.
3. Pengujian dilakukan sesuai dengan kemampuan peralatan uji yang ada di Laboratorium Uji LAPAN.
4. Analisis dilakukan dengan mengabaikan efisiensi, *losses*, dan faktor daya pada generator aksial.

1.4 Metodologi Penulisan

Metodologi yang dilakukan dalam penulisan skripsi ini adalah:

1. Studi literatur dengan mencari sumber-sumber yang terkait berupa buku, penulisan ilmiah, hasil seminar, internet dan tulisan-tulisan lainnya yang dapat digunakan untuk merancang model generator.
2. Membuat alat berdasarkan rancangan yang telah ditentukan.
3. Menganalisis unjuk kerja dari generator aksial yang telah dibuat.

1.5 Sistematika Penulisan

Untuk memudahkan pembahasan, skripsi ini dibagi dalam 5 bab. Setiap bab mempunyai pokok bahasan tertentu sebagai bagian dari tujuan pembahasan dalam skripsi ini. Bab satu adalah bab pendahuluan yang menjelaskan tentang latar belakang masalah, tujuan penulisan, batasan masalah, metodologi penulisan, dan sistematika penulisan. Bab dua menjelaskan landasan teori tentang sistem *direct drive* dan penggunaan magnet permanen, generator magnet permanen dengan fluks aksial, radial, dan melintang, serta konstruksi, prinsip kerja, juga rangkaian ekuivalen generator aksial. Bab tiga menjelaskan tentang proses pembuatan dan pengujian generator aksial. Bab empat memaparkan hasil pengujian dan analisis terhadap unjuk kerja yang diperlihatkan oleh hasil pengujian generator. Bab lima berisi kesimpulan dari pembahasan yang dilakukan pada bab sebelumnya serta saran-saran bagi penelitian mengenai topik ini ke depannya.

BAB 2 LANDASAN TEORI

2.1 Sistem *Direct Drive* dan Penggunaan Magnet Permanen

Dalam menyalurkan energi mekanik berupa putaran dari turbin ke generator, dapat digunakan dua cara. Cara pertama yaitu dengan menggunakan gerigi, dan yang kedua adalah *direct drive* atau dikopel secara langsung tanpa perantara gerigi. Kedua konsep tersebut digunakan secara luas dalam bidang industri contohnya turbin angin. Masing-masing konsep ini memiliki kelebihan dan kekurangan. Keuntungan dari mesin dengan magnet permanen dan konsep *direct drive* antara lain tidak adanya rugi-rugi eksitasi, dan penurunan berat dari bahan aktif, serta tidak ada kesulitan tambahan yang berkaitan dengan kesalahan pada *gear box*.

Pada sistem *direct drive*, rotor generator terhubung secara langsung ke poros rotor. Dengan demikian, konsep *direct drive* bekerja pada kecepatan rendah. Ketika menaikkan skala turbin angin, kecepatan putar akan terus berkurang. Untuk meningkatkan daya yang dihasilkan, torsi T harus dinaikkan, berbanding terbalik dengan penurunan kecepatan putar ω_m sesuai persamaan:

$$P = T \cdot \omega_m \quad (2.1)$$

Daya generator P dapat pula dikatakan sebagai fungsi dari kepadatan gaya tangensial F_d , diameter celah udara D_g , panjang aksis l_s dan kecepatan putar seperti terlihat pada persamaan berikut.

$$P = \frac{\pi}{2} F_d \cdot D_g^2 \cdot l_s \cdot \omega_m \quad (2.2)$$

Karena torsi sebanding dengan kuadrat dari diameter celah udara, generator dengan sistem *direct drive* memiliki diameter yang lebih besar untuk menghasilkan torsi yang lebih besar pula. Torsi yang besar ini dengan demikian membutuhkan gaya tangensial yang tinggi serta diameter celah udara yang besar. Gaya tangensial yang tinggi dan diameter celah udara yang besar mengakibatkan peningkatan jumlah bahan untuk menjaga agar celah udara tetap pada penyimpangan yang semestinya dalam melawan tekanan normal antara stator dan rotor.

Oleh karena itu, konsep *direct drive* yang bekerja pada kecepatan rendah, memiliki kelemahan seperti rating torsi yang tinggi, diameter besar, massa yang berat, dan biaya yang tinggi dibandingkan sistem dengan gerigi. Konsep *direct drive* biasanya dirancang dengan diameter besar dan *pole pitch* kecil untuk meningkatkan efisiensi, mengurangi bahan aktif, dan untuk menjaga agar rugi-rugi lilitan tetap kecil.

Mesin dengan magnet permanen dipertimbangkan sebagai struktur elektromagnet yang menjanjikan bagi sistem *direct drive*, karena dibandingkan mesin yang dieksitasi dengan arus searah, mesin dengan magnet permanen memiliki kelebihan sebagai berikut.

1. Menghasilkan energi tinggi dan massanya ringan.
2. Tidak memerlukan pasokan daya tambahan untuk eksitasi medan, dan memiliki tingkat kehandalan yang lebih tinggi karena tanpa slip ring.
3. Meningkatkan efisiensi.
4. Rasio daya:berat lebih tinggi.

2.2 Generator Magnet Permanen

Generator dengan magnet permanen dapat diklasifikasikan baik dengan arah fluks atau struktur seperti berikut.

1. Generator fluks membujur (*longitudinal*) dan melintang (*transverse*)
2. Generator fluks aksial dan radial
3. Generator dengan slot dan tanpa slot
4. Generator dengan *surface mounted* dan generator dengan fluks terkonsentrasi

2.2.1 Generator Magnet Permanen Fluks Aksial

Generator magnet permanen fluks aksial atau *axial flux permanent magnet generator* (AFPM) adalah suatu mesin dengan magnet permanen yang mengkonversikan energi mekanik menjadi energi listrik yang menghasilkan arus bolak-balik dan fluks dengan arah aksial. Yang dimaksud dengan arah aksial yaitu arah fluks sejajar dengan poros generator.

Generator fluks aksial ini mempunyai konstruksi yang sama dengan generator sinkron atau generator konvensional pada umumnya, memiliki stator,

rotor dan celah udara (*air gap*). Hanya saja perbedaannya pada arah aliran fluks dan generator fluks aksial memiliki kecenderungan memperlebar diameternya untuk memperbesar daya keluarannya. Bentuk serta jumlah stator dan rotornya pun dapat dimodifikasi sesuai dengan kebutuhan yang akan digunakan.

Pada generator konvensional dengan arah fluks radial, fluks yang memotong kumparan di stator dan menimbulkan gaya gerak listrik tidak sepenuhnya tertangkap oleh kumparan statornya. Melainkan sebagian akan lepas dan menjadi rugi-rugi yang terdapat pada generator sinkron. Lain halnya dengan generator fluks aksial yang fluksnya mempunyai arah secara aksial ke kumparan stator sehingga fluks dapat di tangkap lebih baik oleh kumparan stator dengan rugi-rugi fluks yang terbuang lebih sedikit.

Untuk segi konstruksi, generator konvensional fluks radial mempunyai konstruksi yang lebih besar sehingga akan mempunyai massa yang lebih besar. Jika dibandingkan dengan daya yang dihasilkan sama, generator fluks aksial mempunyai massa yang lebih ringan dan efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan generator fluks radial.

Secara singkat, dibandingkan dengan generator fluks radial, generator fluks aksial memiliki keuntungan sebagai berikut.

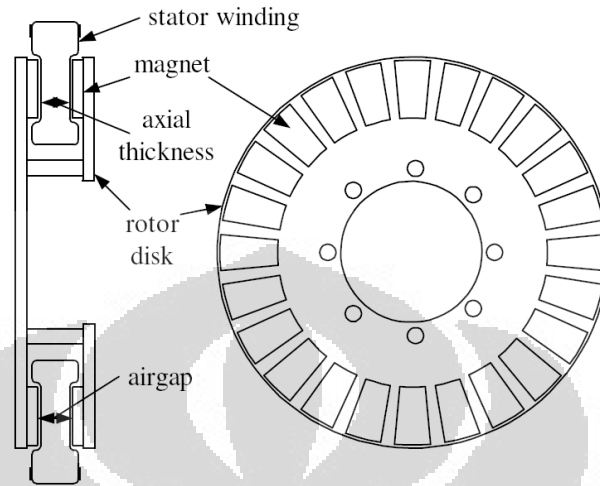
1. Lilitan sederhana
2. *Cogging torque* dan tingkat bising yang rendah (pada tipe *slotless*)
3. Jarak aksial mesin pendek
4. Rasio torsi:volume yang lebih tinggi

Sedangkan kekurangan generator fluks aksial dibandingkan generator fluks radial yaitu:

1. Rasio torsi:massa yang rendah
2. Diameter luar besar, jumlah magnet permanen banyak, dan ketidakstabilan struktural (pada tipe *slotless*)
3. Kesulitan dalam mempertahankan *air gap* dalam diameter yang besar (pada tipe dengan slot)
4. Pembuatan inti stator sulit (pada tipe dengan slot)

Oleh karena itu, untuk menerapkan generator fluks aksial dengan aplikasi *direct drive* untuk turbin angin skala besar, kekurangan-kekurangan ini harus

diselesaikan atau diperbaiki secara signifikan, karena dapat meningkatkan biaya dan kesulitan dalam pembuatan.

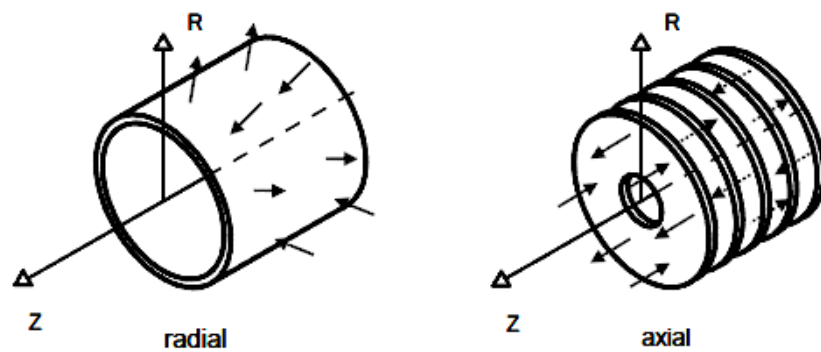


Gambar 2.1. Skema Generator Magnet Permanen Fluks Aksial

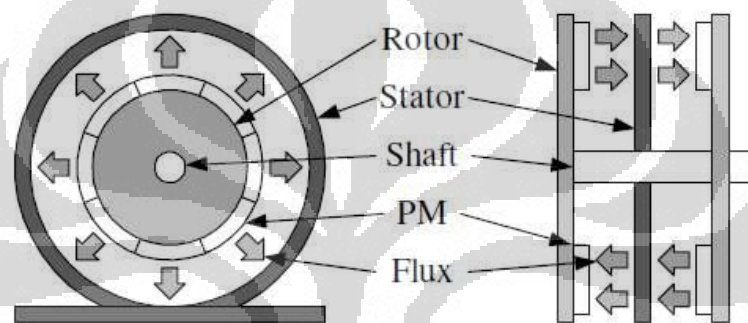
2.2.2 Generator Magnet Permanen Fluks Radial

Generator magnet permanen fluks radial atau *radial flux permanent magnet* (RFPM) menghasilkan fluks magnetik dalam arah radial dengan magnet permanen terorientasi secara radial. Yang dimaksud dengan radial yaitu arah fluks magnet tegak lurus dengan poros generator. Generator fluks aksial merupakan pilihan yang lebih baik secara ekonomi untuk turbin angin skala besar tipe *direct drive* dibandingkan dengan generator fluks aksial.

Generator fluks radial dengan magnet permanen memiliki densitas torsi yang lebih baik daripada generator fluks radial yang dieksitasi tanpa magnet permanen. Namun, dengan adanya magnet permanen, pembuatan menjadi lebih sulit dan struktur menjadi lebih kuat, terutama pada mesin-mesin besar. Generator fluks radial telah hampir dioptimalkan pada desain elektromagnetnya, sehingga akan sulit untuk mengurangi bahan aktif dan biaya dari mesin secara signifikan.



Gambar 2.2. Perbedaan Arah Fluks Radial dan Aksial



Gambar 2.3. Penampang Generator RFPM dan AFPM

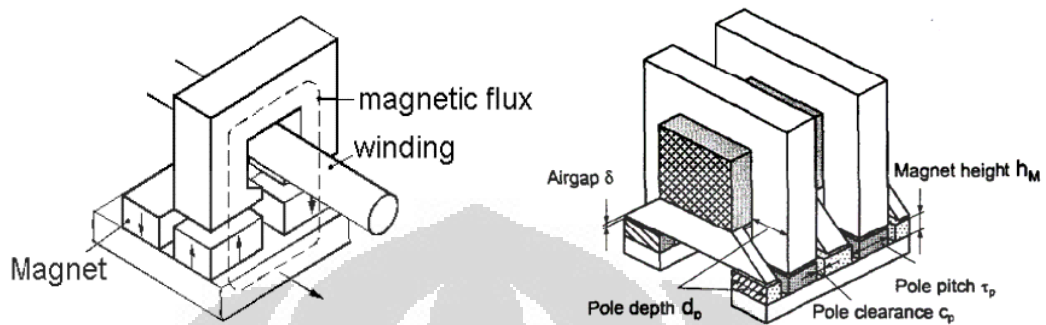
2.2.3 Generator Magnet Permanen Fluks Melintang

Prinsip generator fluks melintang (*transverse flux*) yaitu jalur fluks magnetik tegak lurus dengan arah putaran rotor. Perbedaan utama generator fluks melintang dengan fluks aksial dan radial yaitu generator fluks aksial memungkinkan peningkatan ruang untuk lilitan tanpa mengurangi ruang yang tersedia untuk fluks utama. Generator fluks melintang dapat dibuat dengan *pole pitch* yang sangat kecil dibandingkan dengan tipe lainnya.

Berat dari generator fluks melintang sekitar setengah dari total berat mesin asinkron dengan *gearbox*. Generator fluks melintang cocok untuk aplikasi *direct drive* karena torsi spesifiknya yang tinggi, meskipun generator ini memiliki sejumlah besar bagian-bagian dan metode khusus dalam pembuatan dan perakitan.

Berdasarkan tinjauan dari berbagai generator fluks melintang yang berbeda, keuntungan utama dari generator ini dibandingkan dengan generator fluks membujur dapat dirangkum sebagai berikut.

1. Kepadatan gaya lebih tinggi
2. Rugi-rugi tembaga yang sangat kecil
3. Lilitan sederhana



Gambar 2.4. Generator Fluks Melintang Tipe *Surface-Mounted*

2.3 Konstruksi Generator Fluks Aksial

2.3.1 Stator

Stator merupakan bagian yang diam pada generator, di mana kumparan jangkar terletak. Maksud dari kumparan jangkar yaitu kumparan yang menangkap fluks magnetik yang dihasilkan oleh medan magnet utama yang berasal dari magnet permanen. 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. Stator generator aksial memiliki banyak jenis, yang akan dijelaskan pada bab selanjutnya.

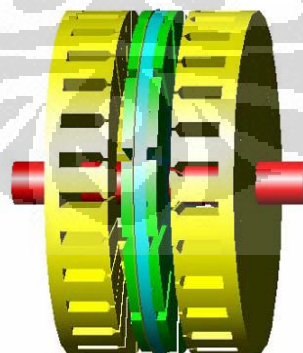
Generator aksial dapat menghasilkan listrik satu fasa maupun tiga fasa. Generator aksial satu fasa cukup sederhana untuk dibuat. Semua kumparan terhubung secara seri satu sama lain, dan bekerja bersama untuk menghasilkan satu *pulse* atau denyut besar pada waktu yang sama. Meskipun ini sederhana, turbin, yang umumnya merupakan turbin angin, mengalami benturan yang kasar untuk tiap denyut. Hal ini dapat menghambat unjuk kerja turbin angin dan menyebabkan getaran yang merusak. Sistem satu fasa ini masih digunakan ketika masih dirasa praktis, dan disesuaikan untuk melawan getaran yang telah disebutkan. Akan lebih rumit juga untuk menangani ketidakefisienan ketika menyearahkan tegangan hasil untuk menyimpan arus searah ke dalam baterai.

Solusi yang lebih bergaya yaitu dengan merangkai kumparan stator menjadi tiga fasa. Pada berbagai titik yang diberikan, hanya sepertiga generator yang berada pada daya puncak, dua lainnya menurun atau meningkat ke puncak yang selanjutnya. Getaran berkurang tidak hanya dengan memiliki arus puncak sepertiga kalinya, namun juga karena arus puncak terjadi tiga kali lebih sering. Ketika menyearahkan daya tiga fasa untuk mengisi baterai, arus jua menjadi lebih halus. Biaya tambahan untuk penyearah tidak perlu diperhitungkan sebagai hambatan, karena jika dipilih secara tepat, mereka akan bertahan cukup lama.

2.3.1.1 Jumlah Stator

- Generator Fluks Aksial Stator Ganda

Generator aksial stator ganda terdiri atas dua stator eksternal dan satu rotor di dalam, serta biasa dikenal sebagai tipe stator eksternal. Tipe ini juga memiliki perbedaan konstruksi rotor dengan tipe rotor eksternal. Tidak ada variasi tipe N-N atau N-S pada rotornya, tetapi variasi bentuk terjadi pada konstruksi statornya. Pada tipe eksternal stator, konstruksi rotornya tidak semudah pada tipe rotor eksternal dengan alasan pergerakan fluks utamanya yang tidak melewati rotornya. Tipe ini sangat efektif bila digunakan pada mesin dengan momen inersia yang kecil yang memiliki sedikit besi pada bagian rotornya.

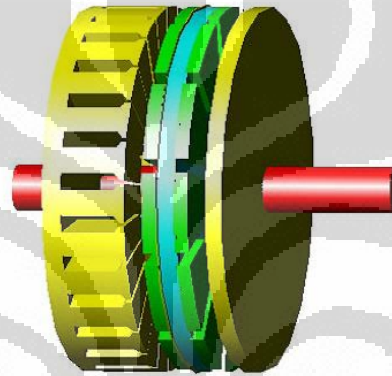


Gambar 2.5. Generator Aksial Stator Ganda

- Generator Fluks Aksial Stator Tunggal dengan Keseimbangan Stator

Konfigurasi ini sederhana, karena hanya ada satu stator dan satu rotor. Namun, terdapat gaya tarik yang besar di antara stator dan rotor. Untuk mencegah

rotor bergerak dalam arah aksial, harus digunakan suatu bantalan khusus, yang akan membuat konstruksi semakin rumit. Dengan menambahkan stator tambahan pada konstruksi, merupakan sebuah cara efektif untuk menyeimbangkan gaya tarik tersebut. Pada sisi berlawanan dari rotor, kutub magnet permanen dibutuhkan untuk menghasilkan medan magnet untuk menginduksi gaya penyeimbang. Stator dilaminasi, karena medan magnet berosilasi, terbentuklah rugi-rugi eddy-current dan hysteresis. Ketika jalur fluks telah dirancang dengan teliti, gaya yang dihasilkan antara rotor dan stator tambahan dapat menyeimbangkan gaya antara rotor dan stator.

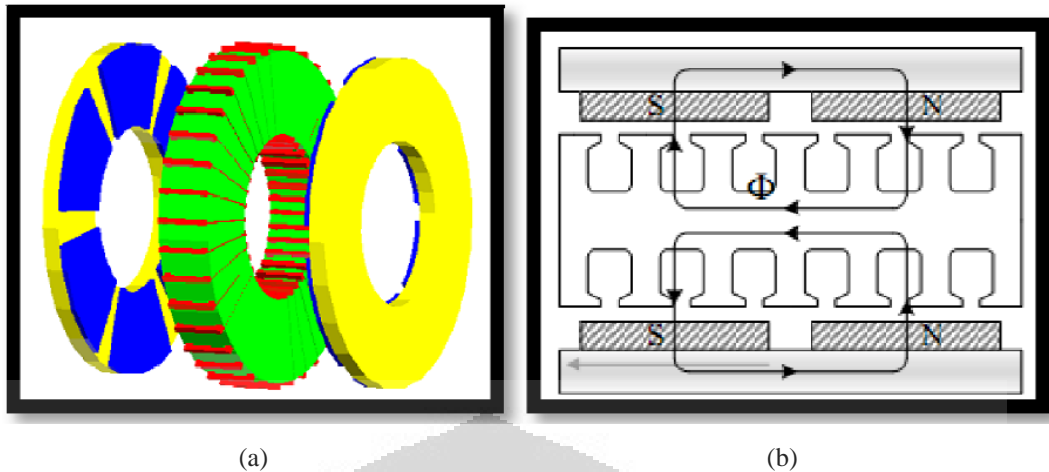


Gambar 2.6. Generator Aksial dengan Keseimbangan Stator

2.3.1.2 Inti Stator

- Stator dengan Slot

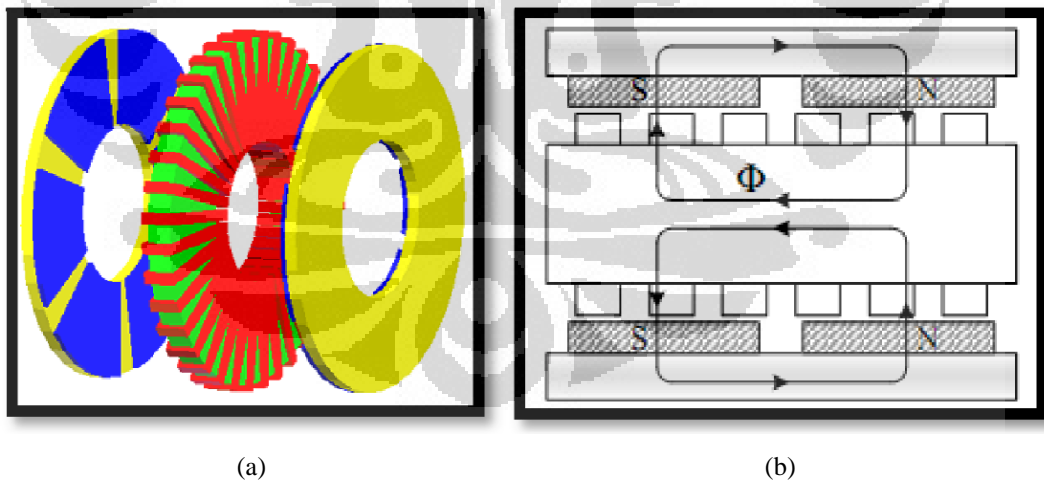
Pada tipe stator dengan slot ini, dapat dilihat bahwa arah fluks mengalir melewati celah antara sisi-sisi pada statornya. Sehingga celah udara yang dilewati oleh fluks ini lebih panjang jika dibandingkan dengan tipe stator dengan tanpa slot. Tentu saja hal ini akan mempengaruhi dari torsi beban yang ditimbulkan pada generator ini. Pada stator dengan tipe slot memiliki bentuk stator yang memiliki kumparan lebar dengan kumparan celah udara AC fasa banyak yang dibungkus oleh inti stator yang dihubung secara *back-to-back*. Volume magnet pada tipe slot ini bisa hanya setengah dari volume magnet tipe lainnya.



Gambar 2.7. (a). Stator dengan Slot, (b). Aliran Fluks Tipe Slot

- Stator Tanpa Slot

Pada stator dengan tipe tanpa slot 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. Mesin tipe ini memiliki panjang aksial yang lebih pendek dari tipe dengan slot.



Gambar 2.8. (a). Stator Tanpa Slot, (b). Aliran Fluks Tipe Tanpa Slot

a. Stator Dengan Inti

Prototip generator jenis ini memiliki konstruksi sederhana dan biasa disebut sebagai mesin torus (toroidal) atau *drum-type winding*. Mesin ini tanpa slot dan umumnya mempunyai rotor ganda. Statornya terdiri atas lilitan toroidal

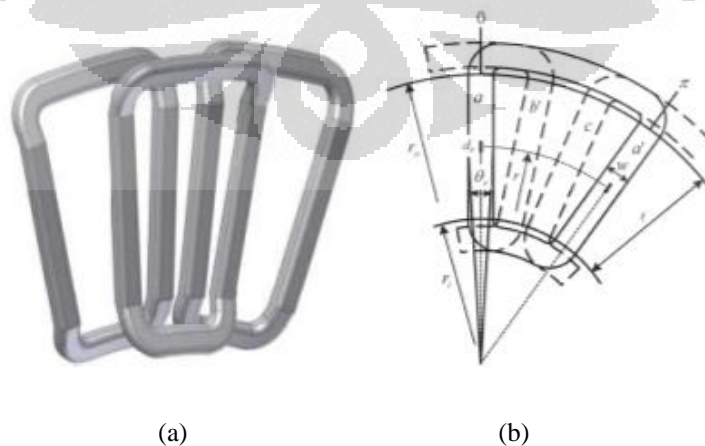
tanpa slot dengan inti besi yang menyangga lilitan tiga fasa dalam gaya toroidal dengan maksud kumparan yang terkonsentrasi. Kumparannya memiliki bentuk persegi, sesuai dengan penampang melintang dari inti. Panjang lilitan ujung yang berarah aksial cukup pendek, menghasilkan resistansi rendah dan mengurangi rugi daya. Panjang konduktor aktif yaitu dua bagian radial yang menghadap magnet, polaritas yang diatur untuk menginduksi GGL tambahan di sekitar kumparan stator.

b. Stator Tanpa Inti

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

- Lilitan *Overlapping*

Pada stator yang susunan kumparannya secara *overlapping*, susunan kumparannya berada tumpang tindih dengan kumparan yang lainnya. Hanya satu kumparan tiap pasangan kutub perfasa yang digunakan pada lilitan tipe ini. Tidak dibutuhkan adanya lilitan distribusi karena sisi kumparan telah didistribusikan melalui sepertiga *pole pitch*, dan lebih dari itu, kepadatan fluks aksial celah udara pada mesin ini cukup sinusoidal.



Gambar 2.9. (a). Stator *overlapping* (b). Skematik stator *overlapping*

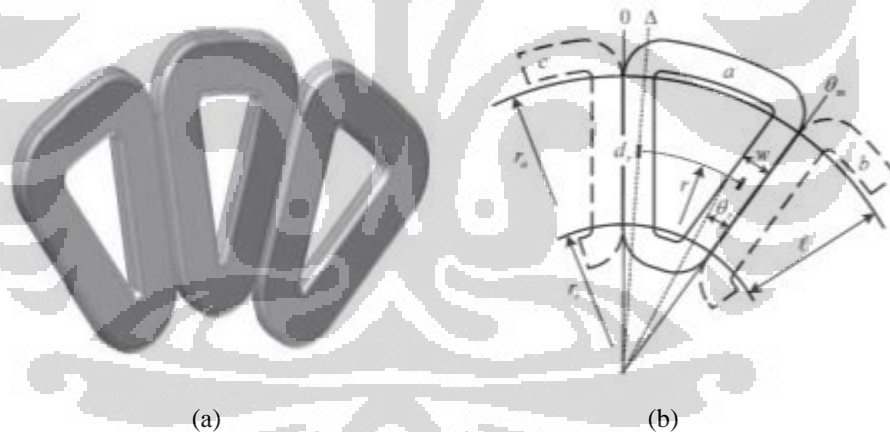
- Lilitan *Non-overlapping*

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

Keuntungan penggunaan lilitan *non-overlapping* yaitu:

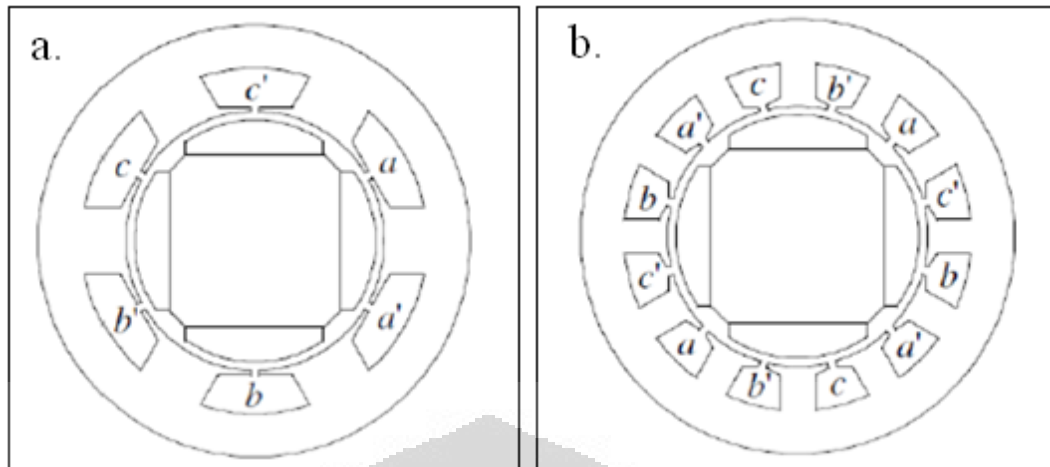
1. Pembuatan kumparan dan perakitan stator lebih mudah;
2. Mengurangi biaya lilitan stator karena jumlah kumparan yang lebih sedikit dan struktur lilitan yang sederhana;
3. Diameter keseluruhan lebih kecil;
4. Rugi lilitan stator lebih kecil karena panjang lilitan yang lebih pendek;

Kekurangan tipe *non-overlapping* yaitu torsi output yang rendah karena faktor lilitannya yang rendah. Namun penelitian baru-baru ini menunjukkan bahwa mesin aksial dengan lilitan *non-overlapping* dengan jumlah kutub yang tinggi bisa memiliki faktor lilitan yang tinggi dan torsi output yang baik.



Gambar 2.10. (a). Stator *non-overlapping* (b). Skematik stator *non-overlapping*

Stator pada generator axial juga dapat dibedakan berdasarkan cara menyusun kumparan fasa untuk desain generator tiga fasa. Berdasarkan hal ini, stator dapat dibedakan menjadi dua jenis, yaitu susunan stator *concentrated* dan susunan stator *distributed*. Pada susunan *concentrated* fasa yang sama disatukan pada satu bagian sementara pada susunan *distributed* phasanya diselang-seling satu dengan yang lainnya.



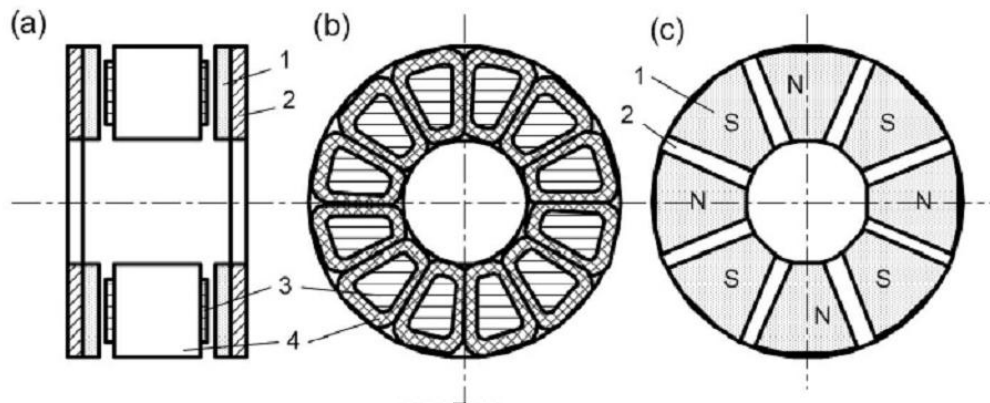
Gambar 2.11. (a). Stator *concentrated* (b). Stator *distributed*

- Lilitan Kutub Salient

Lilitan stator terdiri atas sejumlah kumparan dengan parameter terkonsentrasi dan inti feromagnetik yang terpisah untuk masing-masing kumparan. Secara keseluruhan, jumlah kutub stator (kumparan) berbeda dengan jumlah kutub rotor. Perbedaan jumlah kutub stator dan rotor ini harus ada untuk menghasilkan torsi *starting* untuk motor dan mengurangi denyutan torsi.



Gambar 2.12. Stator Kutub Salient

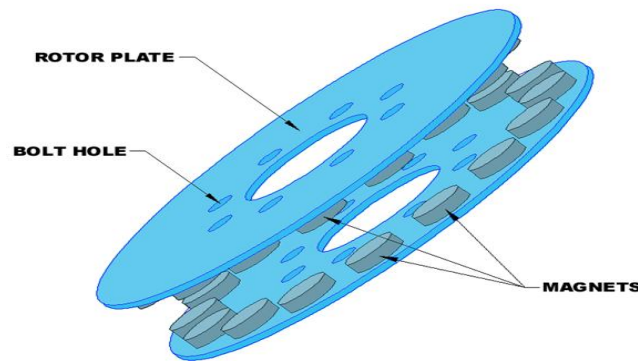


Gambar 2.13. Generator Aksial dengan Stator Kutub Salient: (a). konstruksi; (b). stator; (c). rotor.
1-magnet permanen, 2-penyangga rotor, 3-kutub stator, 4-kumparan stator.

2.3.2 Rotor

Rotor pada generator aksial berfungsi sebagai tempat medan magnet utama dihasilkan. Pada rotor, tidak diperlukan arus eksitasi dari luar karena medan magnet yang dihasilkan berasal dari magnet permanen. Rotor pada generator jenis ini terdiri dari plat besi yang berfungsi sebagai tatakan penyangga magnet permanen. Magnet permanen yang biasa digunakan yaitu jenis Neodymium Iron Boron (NdFeB) yang merupakan suatu komponen magnet kuat dengan resistansi terhadap suhu tinggi. Selain NdFeB, sering juga digunakan magnet jenis Strontium Ferrite yang harganya jauh lebih terjangkau meskipun tentu saja tidak sekuat NdFeB.

Desain generator dengan tanpa inti besi di tengah stator, tentunya berhubungan dengan besar dan volume dari magnet permanennya. Hal ini sesuai dengan besarnya celah udara yang terdapat pada stator dengan alasan menjaga kerapatan fluks magnet pada statornya. Akan tetapi, kekurangannya justru akan menjadi lebih mahal untuk biaya konstruksinya karena membutuhkan magnet yang lebih besar.



Gambar 2.14. Rotor Generator Aksial Tipe Ganda

2.3.3 Celah Udara (*Air Gap*)

Air gap merupakan celah udara pada generator antara rotor dan stator dimana area ini merupakan tempat berpindahnya fluks magnet pada magnet permanen dan menginduksi ke 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.

2.3.4 Penempatan Magnet Permanen

Penempatan magnet permanen pada rotor generator aksial terdiri atas dua cara, yaitu:

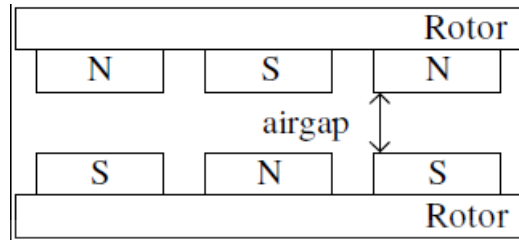
1. Magnet Permanen “*Embedded*”

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

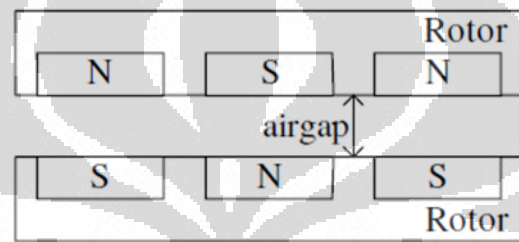
2. Magnet Permanen “*Surface-Mounted*”

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*.

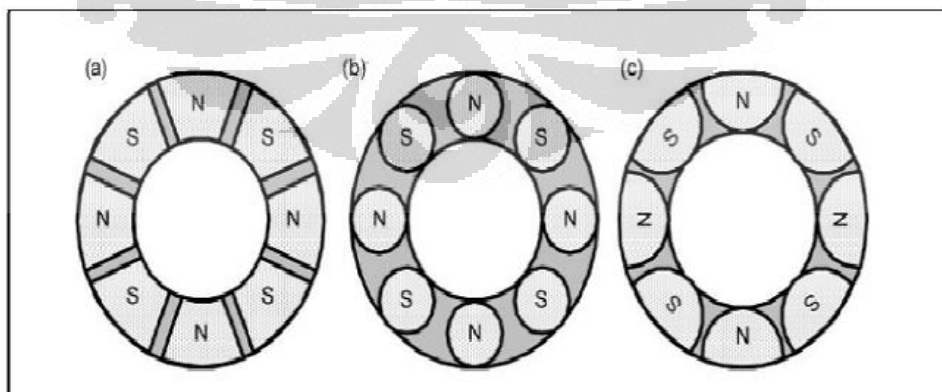


Gambar 2.15. Magnet Permanen *Surface-Mounted*



Gambar 2.16. Magnet Permanen *Embedded*

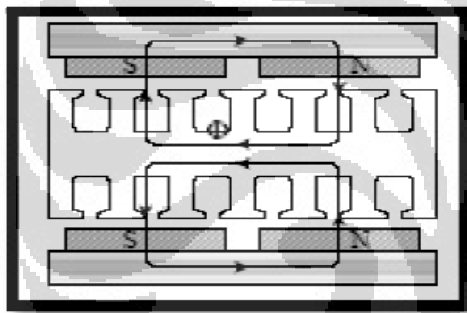
Bentuk magnet permanen pada rotor generator fluk aksial juga sangat bervariasi, diantaranya trapezoid, sirkular, semi sirkular, dan persegi. Tentunya bentuk-bentuk magnet tersebut disesuaikan dengan tipe dari keadaan statornya dengan mempertimbangkan ingkat efisiensi dari proporsionalitas keadaan stator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



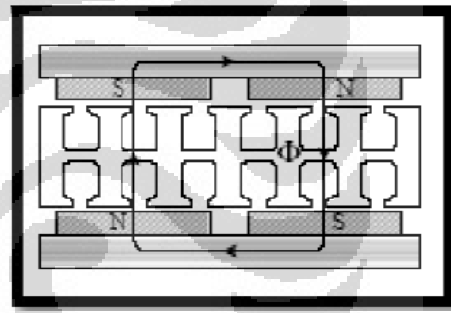
Gambar 2.17. Bentuk Magnet Permanen Pada Rotor

Untuk generator fluks aksial dengan minimal *double rotor*, terdapat dua tipe penempatan magnet dengan melihat dari skematik jalannya fluks yang mengalir pada rotor, yaitu rotor dengan tipe magnet N-N atau S-S dan tipe magnet N-S. hal tersebut dapat dilihat dari pasangan magnet yang mendukungnya. Jika magnet yang dipasangkan berbeda kutub, dapat dikatakan magnet tersebut merupakan tipe N-S, sebaliknya, bila kutub yang sama saling bertemu, maka magnet tersebut merupakan tipe N-N.

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.



Gambar 2.18. Tipe Magnet N-N

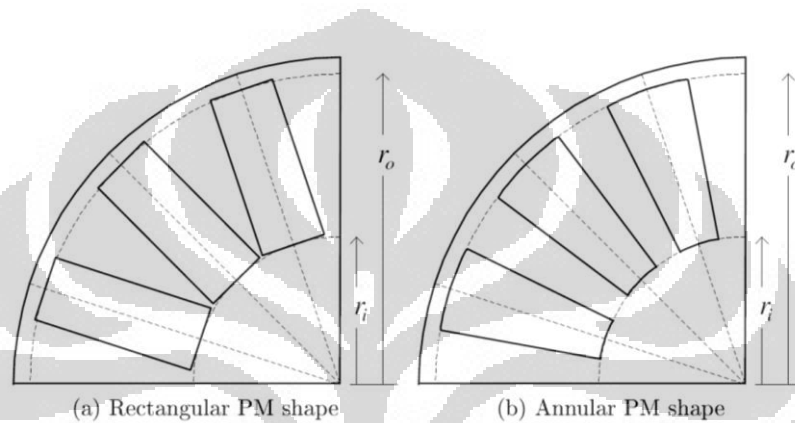


Gambar 2.19. Tipe Magnet N-S

2.3.5 Bentuk Kutub

Ada berbagai macam bentuk kutub yang dapat digunakan pada generator fluks aksial, di antaranya bentuk persegi, melingkar, dan sektor. Bentuk kutub persegi digunakan untuk mengurangi biaya bahan dari generator tersebut dengan mengurangi volume dan massa dari magnet permanen magnet. Biaya dari magnet permanen dapat diperkecil lebih lanjut sebagai hasil dari proses pembuatan bentuk kutub persegi yang lebih sederhana. Kelebihan lain dari bentuk kutub ini yaitu tumpang tindih antara magnet permanen dan konduktor berlangsung secara lebih berangsur, sehingga bentuk gelombang GGL yang diinduksikan menjadi lebih sinusoidal. Kekurangannya yaitu terdapat lebih sedikit fluks tiap kutub yang dihasilkan oleh bentuk kutub persegi.

Bentuk kutub *annular sector* merupakan pilihan yang paling terkenal untuk generator aksial dengan magnet permanen *surface-mounted* karena bentuk kutub ini menghasilkan lebih banyak fluks tiap kutub. Magnet permanen memotong stator dengan bentuk relative sesuai penjangnya, menghasilkan distribusi fluks yang lebih kotak. Kekurangan bentuk kutub ini yaitu massa ekstra dari bahan magnet permanen dan biaya terkait pembuatan dari bentuk kutub ini yang lebih rumit.



Gambar 2.20. Bentuk Kutub Generator Aksial

2.3.6 Perbandingan Jumlah Magnet dan Kumbaran Stator

Pada generator aksial tiga fasa, satu grup kumbaran berada pada arus puncak sedangkan yang lainnya tidak. Dengan begitu, magnet berpihak hanya pada satu fasa tiap waktunya. Untuk tiap kumbaran pada rangkaian stator tiga fasa, dibutuhkan 1.33 magnet. Jumlah kumbaran minimal untuk generator tiga fasa adalah tiga gulungan, satu untuk setiap fasanya. Maka akan ada empat magnet. Berikut merupakan perbandingan jumlah magnet dan kumbaran stator.

Tabel 2.1. Perbandingan Jumlah Magnet dan Kumbaran Stator

Kumbaran	Magnet	Jumlah Kumbaran Tiap Fasa
6	8	2
9	12	3
12	16	4
15	20	5
18	24	6

2.4 Prinsip Kerja Generator Fluks Aksial

Prinsip kerja dari generator fluks aksial tidak jauh berbeda dengan prinsip kerja generator konvensional dengan fluks radial. Hanya saja pada generator fluks aksial memiliki medan magnet tetap yang berasal dari magnet permanen di rotornya sehingga tidak memerlukan pencatutan 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:

$$\phi_a = B_f A \cos \theta \quad (2.3)$$

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.

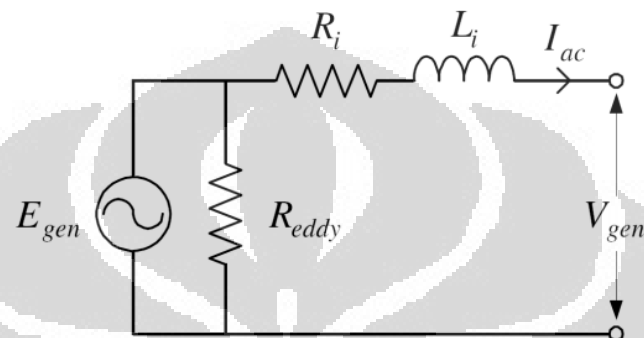
$$E_a = -N \frac{d\phi_a}{dt} \quad (2.4)$$

Tanda negatif pada persamaan 2.4 menunjukkan bahwa arah gaya gerak listrik berlawanan dengan tegangan sumber. Dari persamaan 2.4 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 Rangkaian Ekuivalen

Unjuk kerja *steady-state* suatu generator aksial dapat dianalisa dengan menggunakan rangkaian ekuivalennya, dan cukup untuk memodelkan satu fasanya saja, seperti bisa dilihat pada gambar. Gaya gerak listrik (GGL) hasil induksi dilambangkan oleh sumber tegangan AC E_{gen} . E_{gen} terhubung paralel dengan

sebuah resistor R_{eddy} yang melambangkan rugi-rugi *eddy current* di stator. Kombinasi paralel ini terhubung seri dengan sebuah resistor R_i dan inductor L_i yang melambangkan impedansi internal dari generator aksial. Arus resultan I_{ac} dipilih karena mengalir keluar dari model generator, sementara tegangan yang diukur pada terminal generator adalah V_{gen} .



Gambar 2.21. Rangkaian Ekuivalen Generator Aksial

BAB 3

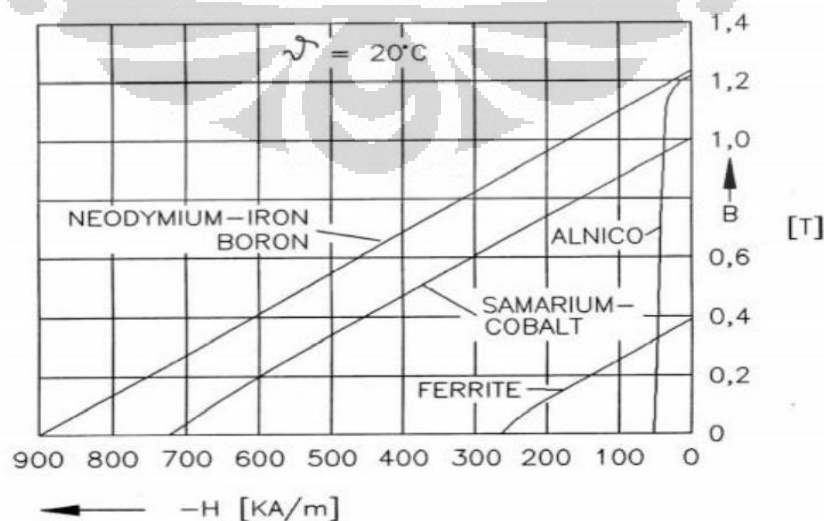
PERANCANGAN DAN PENGUJIAN

Bab ini berisi tentang perancangan dan pembuatan generator fluks aksial serta pengujian untuk mengetahui nilai dari parameter-parameter yang ditentukan. Adapun desain dari generator ini yaitu berbentuk cakram, yang menjadikan fluks dapat mengalir secara aksial.

3.1 Perancangan Generator

Perancangan generator dilakukan dengan menentukan desain yang mencakup jumlah stator dan rotor, perbandingan antara jumlah kumparan dan magnet, serta konfigurasi kumparan dan jumlah fasanya. Konstruksi yang dipilih yaitu rotor ganda dan stator internal tanpa inti. Hanya adanya dua rotor dan satu stator memungkinkan generator untuk diputar oleh turbin angin, sedangkan jumlah rotor ganda bertujuan untuk memaksimalkan jumlah magnet permanen sehingga tegangan keluaran generator lebih optimal. Stator dibuat tanpa inti untuk mencegah timbulnya *cogging torque* dan rugi-rugi pada inti.

Untuk hasil optimal, magnet permanen yang digunakan seharusnya magnet jenis Neodymium Iron Boron, karena seperti terlihat pada gambar 3.1, magnet ini memiliki nilai kerapatan fluks yang lebih tinggi dibandingkan jenis magnet lainnya. Namun, karena keterbatasan bahan, magnet yang akan digunakan adalah jenis Strontium Ferrite dengan kekuatan 0,35 T atau 0,35 Wb/m².



Gambar 3.1. Kurva demagnetisasi untuk beberapa jenis magnet

Perbandingan jumlah magnet dan kumparan stator yang optimal dapat diketahui dengan terlebih dahulu menentukan konfigurasi yang akan digunakan, baik itu *concentrated winding* ataupun *distributed winding*. Untuk konfigurasi *concentrated winding*, jumlah kutub magnet p dapat ditentukan sendiri, dengan syarat bernilai genap, lalu jumlah kumparan Q bisa didapat dari persamaan:

$$Q = 3ni \quad (3.1)$$

dimana n merupakan jumlah kumparan fasa berdampingan yang membentuk grup fasa kumparan, dan i dapat dicari dengan persamaan:

$$36. \left[\frac{p}{6i} - TRUNC \left(\frac{p}{6i} \right) \right] = k; \quad k = 6, 12, 24 \text{ atau } 30 \quad (3.2)$$

Sedangkan untuk konfigurasi *distributed winding* dengan jumlah kutub magnet kelipatan tiga, jumlah kumparan Q yang optimal yaitu

$$Q = p - 3 \quad (3.3)$$

dengan

$$n = Q/3 \quad (3.4)$$

Untuk konfigurasi *distributed winding* dengan jumlah kutub magnet bukan kelipatan tiga, jumlah kumparan Q yang optimal yaitu

$$Q = 3n = 3 \cdot ROUND(p/3 - 0,5) \quad (3.5)$$

Pada skripsi ini, perancangan dan pembuatan generator fluks aksial disesuaikan dengan dimensi cetakan generator yang telah tersedia di Laboratorium Komposit LAPAN, oleh karena itu, jumlah magnet permanen dan kumparan tergantung dari ukuran cetakan stator dan rotor tersebut. Dengan keterbatasan ukuran rotor dan stator ini, Penulis menggunakan perbandingan delapan pasang magnet dan sembilan kumparan dari kawat tembaga berdiameter 0,6 mm. Generator yang dibuat merupakan generator tiga fasa dimana kumparan fasanya disusun secara *distributed*, yaitu dengan susunan ABCABCABC.

Dari perancangan generator, dapat diketahui nilai keluaran generator yang diharapkan, seperti besar tegangan, arus, dan daya. Nilai tegangan E_A dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$E_A = \sqrt{2}\pi N_c \phi f \quad (3.6)$$

dimana N_c merupakan jumlah lilitan, serta ϕ dan f merupakan fluks dan frekuensi yang masing-masing dapat dicari menggunakan persamaan:

$$\phi = \int B \, dA \quad (3.7)$$

dan

$$f = \frac{n_m p}{120} \quad (3.8)$$

A merupakan luas penampang yang ditembus oleh fluks, oleh karena itu bernilai $(0,05 \times 0,02) \text{ m}^2$ atau $0,001 \text{ m}^2$ sesuai dengan luas permukaan magnet. Dengan demikian nilai fluks menjadi $0,00035 \text{ Wb}$ karena $B_r = 0,35 \text{ Wb/m}^2$. Sedangkan n_m merupakan kecepatan putar generator. Tabel 3.1 berikut menunjukkan nilai tegangan yang didapat berdasarkan perhitungan sesuai persamaan yang telah disebutkan di atas.

Tabel 3.1. Hasil perhitungan tegangan generator rancangan

No.	Kecepatan Putar (RPM)	Frekuensi (Hz)	Tegangan RMS (V)	Tegangan antarfasa (V)
1	100	6.67	0.62	1.08
2	150	10	0.93	1.62
3	200	13.33	1.24	2.16
4	250	16.67	1.56	2.69
5	300	20	1.87	3.23
6	350	23.33	2.18	3.77
7	400	26.67	2.49	4.31
8	450	30	2.8	4.85
9	500	33.33	3.11	5.39
10	550	36.67	3.42	5.93
11	600	40	3.73	6.47
12	650	43.33	4.04	7.01
13	700	46.67	4.36	7.54
14	750	50	4.67	8.08
15	800	53.33	4.98	8.62

Untuk mengetahui nilai arus, nilai hambatan kawat R harus dicari terlebih dahulu dengan persamaan:

$$R = \frac{\rho l}{A} \quad (3.9)$$

Keterangan:

ρ = Hambatan jenis kawat tembaga ($1,68 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$)

l = Panjang kawat tembaga (27 m)

A = Luas penampang kawat tembaga ($2,83 \times 10^{-7} \text{ m}^2$)

Dengan demikian dapat diketahui nilai hambatan kumparan yaitu $1,6 \Omega$. Nilai arus dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$I = \frac{E_A}{R} \quad (3.10)$$

dan nilai daya juga bisa didapat dengan persamaan:

$$S = 3 E_A I \quad (3.11)$$

Nilai perhitungan arus dan daya pada berbagai kecepatan putar dapat dilihat pada Tabel 3.2 berikut ini.

Tabel 3.2. Hasil perhitungan tegangan, arus dan daya generator rancangan

No.	Kecepatan Putar (RPM)	Tegangan RMS (V)	Arus (A)	Daya (VA)
1	100	0.62	0.39	0.72
2	150	0.93	0.58	1.63
3	200	1.24	0.78	2.9
4	250	1.56	0.97	4.53
5	300	1.87	1.16	6.52
6	350	2.18	1.36	8.87
7	400	2.49	1.55	11.6
8	450	2.8	1.75	14.7
9	500	3.11	1.94	18.1
10	550	3.42	2.13	21.9
11	600	3.73	2.33	26.1
12	650	4.04	2.52	30.6
13	700	4.36	2.72	35.5
14	750	4.67	2.91	40.7
15	800	4.98	3.1	46.4

3.2 Pembuatan Generator

Pembuatan generator fluks aksial ini dilakukan di Laboratorium Komposit LAPAN.

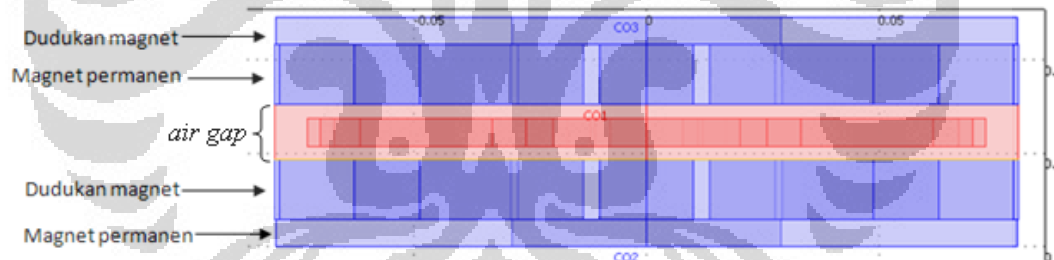
3.2.1 Rotor

Generator yang dibuat mempunyai dua buah rotor yang berhadapan satu dengan yang lainnya atau disebut juga sebagai rotor ganda. Rotor ini terdiri dari tiga bagian utama yaitu *yoke* (tatakan magnet) rotor, magnet permanen, dan dudukan magnet yang terbuat dari besi. Magnet permanen yang dipasang bersifat

embedded pada tatakan penyangga rotor, atau dengan kata lain ditanam pada permukaan tatakan rotor.

Distribusi magnet permanen yang digunakan disesuaikan dengan tipe NS, artinya magnet permanen berlawanan kutub baik dengan kanan kirinya maupun dengan seberang atas atau bawahnya. Keuntungan dari penggunaan tipe NS ini menyebabkan kerapatan fluks magnet menjadi lebih rapat.

Pada generator axial, celah udara atau *air gap* merupakan komponen yang memegang peranan penting karena melalui celah udara inilah fluks magnetik mengalir dan menyebabkan timbulnya tegangan induksi. Celah udara ini juga menjadi salah satu karakteristik dari generator di mana setiap generator harus dirancang sedemikian rupa sehingga celah udara tidak berubah pada saat generator berputar, karena jika celah udara berubah maka karakteristik dari generator pun ikut berubah. Pada generator aksial ini, celah udara merupakan jarak dari tatakan rotor satu ke tatakan rotor lainnya, dimana besarnya adalah 0,0118 m.



Gambar 3.2. Penampang melintang generator aksial

Tabel 3.3. Ukuran geometri rotor

Dimensi	Keterangan	Panjang (m)
r_i	Jari-jari yoke rotor	0.083
r_s	Jarak magnet ke pusat	0.029
p	Panjang magnet	0.05
l	Lebar magnet	0.02
t	Tebal magnet	0.0128
t_p	Tebal dudukan magnet	0.0058
r_p	Jari-jari dudukan magnet	0.083

Material yang digunakan untuk pembuatan rotor yaitu:

- Binder/Matrix = Epoxy Resin 174 (EX Germany)
- Hardener = Hdr 140 dan Versamide 911
- Filler = Zirconium Silicate ($ZrSiO_4$) 50 %
Titanium Dioxide (TiO_2) 2 %

Bahan *binder* dan *filler* dilarutkan hingga tercapai kondisi homogen antar larutan. Sedangkan bahan *hardener* dicampur ketika bahan akan digunakan atau dituang. Bahan-bahan ini bersifat isolator dengan tingkat kekerasan yang memenuhi standar dan tekstur yang tepat untuk pengerjaan *casting* (cetak-mencetak).

Generator yang akan dibuat adalah generator aksial dengan rotor ganda, sehingga akan terdapat dua cetakan rotor yang digunakan, yaitu *upper rotor* dan *lower rotor*. Berikut akan dijelaskan langkah-langkah pengerjaan bagian rotor.

3.2.1.1 Penyiapan Mandril

Tahap pengerjaan yang pertama adalah tahap penyiapan *mandril*. Tahap ini dilakukan dengan tujuan agar hasil cetakan rotor dapat dilepas dari cetakan dengan mudah atau tidak lengket dan hasil cetakan lebih halus.

- Bersihkan cetakan dengan Acetone agar cetakan terbebas dari kotoran dan unsur-unsur kimiawi yang tidak diinginkan.
- Oleskan WAX (Mirror Glaze) ke seluruh permukaan cetakan. Setelah permukaan kering, gosok permukaan dengan kain katun yang bersih dan kering hingga permukaan cetakan tampak mengilap.
- Oleskan PVA (Polyvinyl Acrylic) ke permukaan cetakan dengan menggunakan kuas hingga rata.

3.2.1.2 Proses Penuangan

- Upper Rotor
 - a. Siapkan cetakan *upper rotor*.



Gambar 3.3. Cetakan upper rotor

- b. Atur magnet permanen dengan menggunakan mal magnet.



Gambar 3.4. Mal magnet

- c. Tutup lubang-lubang luapan pada cetakan dengan menggunakan bilah-bilah bambu atau kayu yang telah disiapkan (16 buah).



Gambar 3.5. Bilah kayu untuk menutup lubang luapan pada cetakan

- d. Tuangkan larutan yang telah dicampur Hardener ke dalam cetakan hingga mencapai setengah ketinggian magnet permanen (300 gram).



Gambar 3.6. Cetakan upper rotor yang diisi larutan

- e. Diamkan hingga larutan mengering (4 jam).
- f. Setelah larutan mengering, sumbat/tutup lubang luapan dibuka seluruhnya dan diganti dengan slang plastik yang berfungsi sebagai ceiling (saluran lubang luapan).



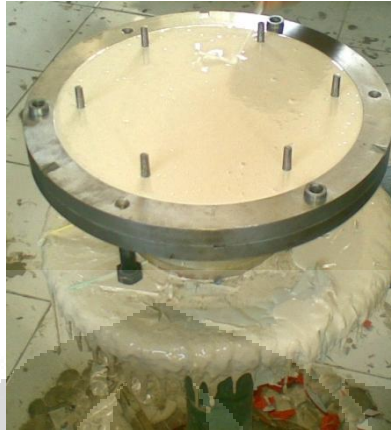
Gambar 3.7. Upper rotor yang sudah kering

- Lower Rotor
 - a. Siapkan cetakan *lower rotor*.



Gambar 3.8. Cetakan lower rotor

- b. Tuangkan larutan yang telah ditambah Hardener hingga penuh (1700 gram).



Gambar 3.9. Cetakan lower rotor yang diisi larutan

- c. Tutup dengan cetakan *upper rotor* (jangan ditekan agar larutan yang keluar melalui ceiling halus atau tidak ada letupan-letupan yang dapat menyebabkan timbulnya void pada hasil cetakan).



Gambar 3.10. Cetakan lower rotor ditutup dengan cetakan upper rotor

- d. Kencangkan baut-baut pengikat cetakan. Diamkan selama 8 jam.
e. Setelah 8 jam, buka cetakan dan keluarkan hasil cetakan.



Gambar 3.11. Hasil cetakan rotor

3.2.2 Stator

Stator yang dibuat merupakan stator tanpa inti (*coreless*) dengan susunan kumparan *non-overlapping*. Alasan pemilihan tiga fasa yaitu agar tegangan keluaran generator lebih stabil nilainya, khususnya bila disearahkan menjadi tegangan DC yang bisa digunakan untuk mengisi baterai.

Tabel 3.4. Ukuran geometri stator

Dimensi	Keterangan	Jumlah	Panjang (m)
t_s	Tinggi kumparan		0,05
a_s	Alas kumparan		0,04
d_s	Ketebalan kumparan		0,006
D_s	Diameter yoke stator		0,166
N	Jumlah lilitan	60	
N^s	Jumlah kumparan	9	
N_{ph}	Jumlah fasa	3	

Penyiapan cetakan dan komposisi bahan stator sama dengan rotor. Langkah-langkah pengecoran stator yaitu sebagai berikut.

- a. Cetakan *upper* dan *lower* dilayer dengan menggunakan serat Woven Roting tipe WR 200 dengan matrix Epoxy 140/174 (tanpa *filler*).



Gambar 3.12. Cetakan *lower* dilayer dengan serat WR 200



Gambar 3.13. Cetakan *upper* dilayer dengan serat WR 200

- b. Set kumparan yang telah dipasang poros, pada cetakan lower.



Gambar 3.14. Kumparan pada cetakan

- c. Isi cetakan *lower* dengan larutan sampai penuh.



Gambar 3.15. Cetakan *lower* diisi larutan



Gambar 3.16. Cetakan *lower* terisi penuh larutan

- d. Tutup dengan cetakan upper, diamkan sampai larutan keluar dari lubang luapan (*cilling*).

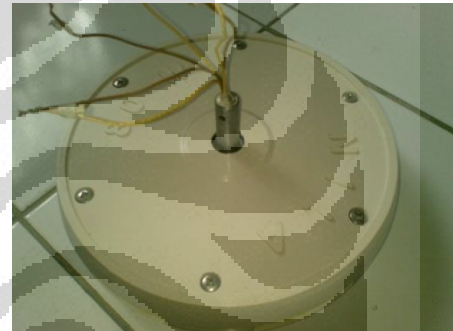


Gambar 3.17. Cetakan *lower* ditutup dengan cetakan *upper*

- e. Kencangkan baut-baut pengikat, diamkan ± 8 jam baru dibuka.



Gambar 3.18. Rotor dan stator generator



Gambar 3.19. Generator jadi

3.2.3 Bahan dan Komposisi

3.2.3.1 Matrix

- Epoxy resin type Bakelite 174
Bentuk fisik cairan kental dan berwarna bening.
- Hardener V140 (Versamide)
Bentuk fisik cairan kental dan berwarna coklat muda.
- Hardener V911 (Versamide)
Bentuk fisik cairan kental dan berwarna hazen (cokelat muda agak kekuningan)

3.2.3.2 Filler

- Zirconium Silicate ($ZrSiO_4$)
Bentuk fisik berupa tepung putih halus (>1500 Mass)

- Titanium Dioxide (TiO_2)
Bentuk fisik berupa tepung putih halus.

3.2.3.3 Reinforce

- Woven Roting 200 (WR 200)
Bentuk fisik berupa anyaman serat gelas berwarna putih. Angka di belakang WR menunjukkan density dari serat tersebut. Misalnya:

WR 200 \rightarrow 200 gram/m² ;

WR 400 \rightarrow 400 gram/m² ; dst.

Aplikasinya mengikuti benda apa yang akan dibuat. Fungsi dari Reinforce/serat adalah untuk kerangka atau penguat. Reinforce disini hanya digunakan untuk pembuatan stator, berfungsi sebagai skin atau kulit pelindung agar kumparan tidak terkena gesekan.

3.2.3.4 Komposisi

- Cara membuat larutan:

Siapkan: 1 Kg Epoxy 174 \rightarrow Binder

400 gram Zirconium \rightarrow Filler

100 gram Titanium Dioxide \rightarrow Filler

Larutkan filler sedikit demi sedikit ke dalam Epoxy 174 (warna bening) sambil diaduk perlahan sampai benar-benar homogen.

- Cara membuat hardener

Siapkan: Hardener V140 \rightarrow 500 gram

Hardener V911 \rightarrow 500 gram

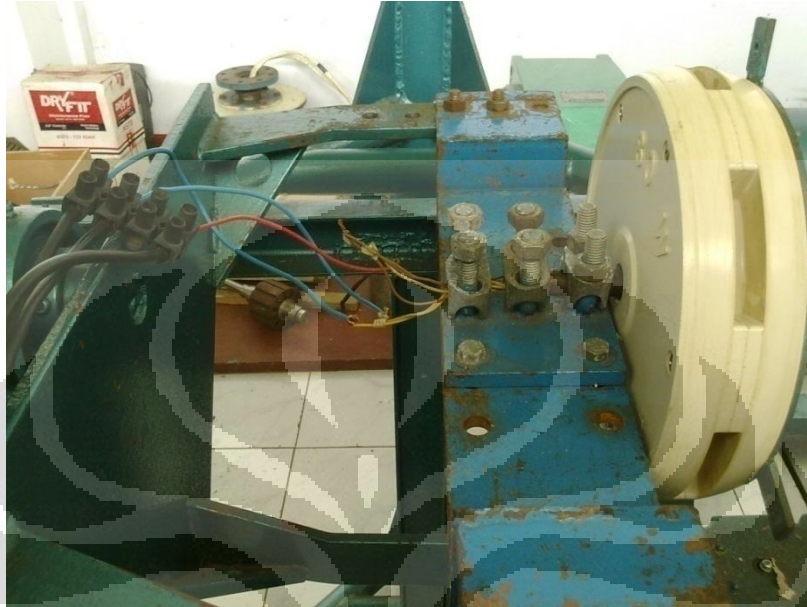
Aduk kedua hardener sampai tercampur (homogen). Hardener V911 sebenarnya hanya sebagai akselerator untuk mempercepat proses pengeringan. Cara penggunaan V911 harus hati-hati, jika ragu-ragu sebaiknya jangan digunakan, cukup hardener V140 saja.

- Sebelum dituang ke dalam cetakan, larutan dicampur dengan hardener kemudian diaduk sampai benar-benar homogen, dengan komposisi:

Larutan : Hardener = 2 : 1 (dalam satuan berat)

3.3 Pengujian Generator

3.3.1 Pengujian Tanpa Beban



Gambar 3.20. Generator aksial yang telah dihubungkan dengan alat pengujian

Pengujian tanpa beban dilakukan untuk mengetahui nilai tegangan antar fasa dan arus terhadap kecepatan putar generator mulai dari kisaran 100 RPM hingga 750 RPM, dengan kondisi generator tanpa pembebanan. Pengujian tanpa beban ini sendiri dilakukan dalam dua tahap. Tahap pertama merupakan pengujian dengan kecepatan rendah, yakni hingga sekitar 450 RPM. Tahap kedua yaitu pengujian dengan kecepatan tinggi hingga mencapai 750 RPM. Pengujian dilakukan dalam dua tahap dikarenakan *prime mover* atau penggerak utama yang digunakan untuk memutar generator pada pengujian ini merupakan motor dimana sistem yang digunakan bukanlah *direct drive* melainkan menggunakan *belt* untuk menyesuaikan kecepatan putar, seperti bisa dilihat pada gambar 3.21.



Gambar 3.21. Motor penggerak dengan posisi *belt* untuk kecepatan rendah

Pengujian dilakukan dengan mempercepat putaran generator, dimana kecepatan mesin dinaikkan sekitar 50 RPM setiap 10 detik. Dengan adanya interval waktu dalam mengukur tegangan dan arus dari generator ini, diharapkan nilai yang didapatkan akan menjadi lebih valid karena diasumsikan dalam 10 detik tersebut nilai tegangan dan arus yang diukur sudah berada pada kondisi stabil.

Penaikan kecepatan dilakukan secara manual, sehingga nilai kecepatan tidak bisa tepat pada angka 50 RPM atau kelipatannya. Hal ini dikarenakan keterbatasan alat dan operator dalam pengaturan ulang PID yang dibutuhkan dalam pengambilan data secara otomatis.

Sebelum generator diuji dengan peralatan dan perangkat lunak yang disediakan oleh LAPAN, dilakukan pengujian sederhana menggunakan multimeter untuk mengetahui konfigurasi yang paling optimal bagi generator aksial ini. Dari pengujian sederhana ini, disimpulkan bahwa konfigurasi yang

tepat digunakan adalah konfigurasi Wye (Y), dimana yang digunakan sebagai netral adalah kawat $R_2S_2T_1$. Hal ini akan dibahas lebih lanjut pada bab selanjutnya. Hasil pengujian merupakan nilai tegangan antar fasa dan arus, sehingga dari kedua parameter tersebut, dapat diketahui nilai daya kompleks dalam satuan VA, sesuai persamaan:

$$S = 3 V_{\phi} I_{\phi} \quad (3.12)$$

dan

$$V_{\phi} = \frac{V_{LL}}{\sqrt{3}} \quad (3.13)$$

3.3.2 Pengujian Berbeban

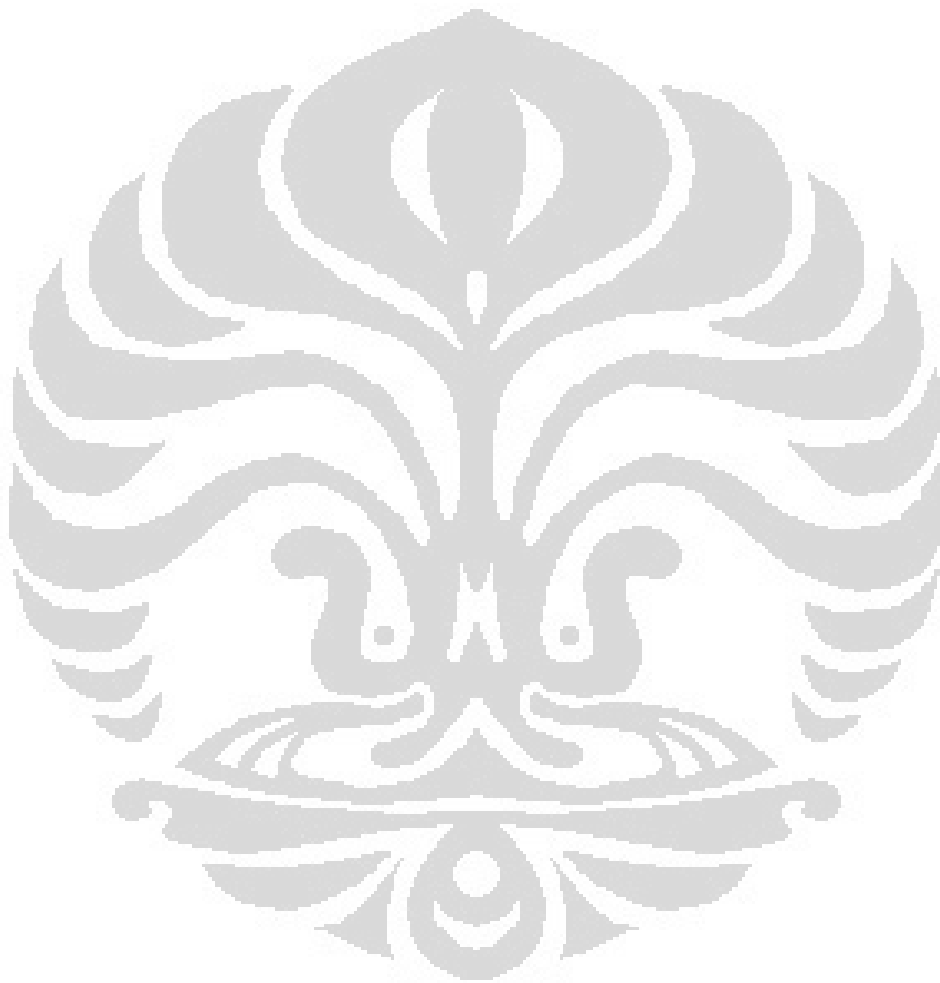
Pengujian berbeban dilakukan hingga kecepatan putar 800 RPM, dimana beban yang digunakan adalah 3 buah lampu dengan besar masing-masing 25 W. Dari pengujian berbeban ini bisa dilihat bahwa generator aksial tiga fasa yang dibuat mampu menyalakan lampu-lampu tersebut.



Gambar 3.22. Beban lampu untuk pengujian berbeban

Secara umum parameter yang diuji dan cara pengambilan data pada percobaan berbeban tidaklah berbeda dari percobaan tanpa beban. Namun pada

percobaan, kecepatan generator tidak dibagi menjadi kecepatan rendah dan kecepatan tinggi. Pada pengujian ini, generator langsung diputar dari kondisi diam hingga menyentuh angka 800 RPM.



BAB 4

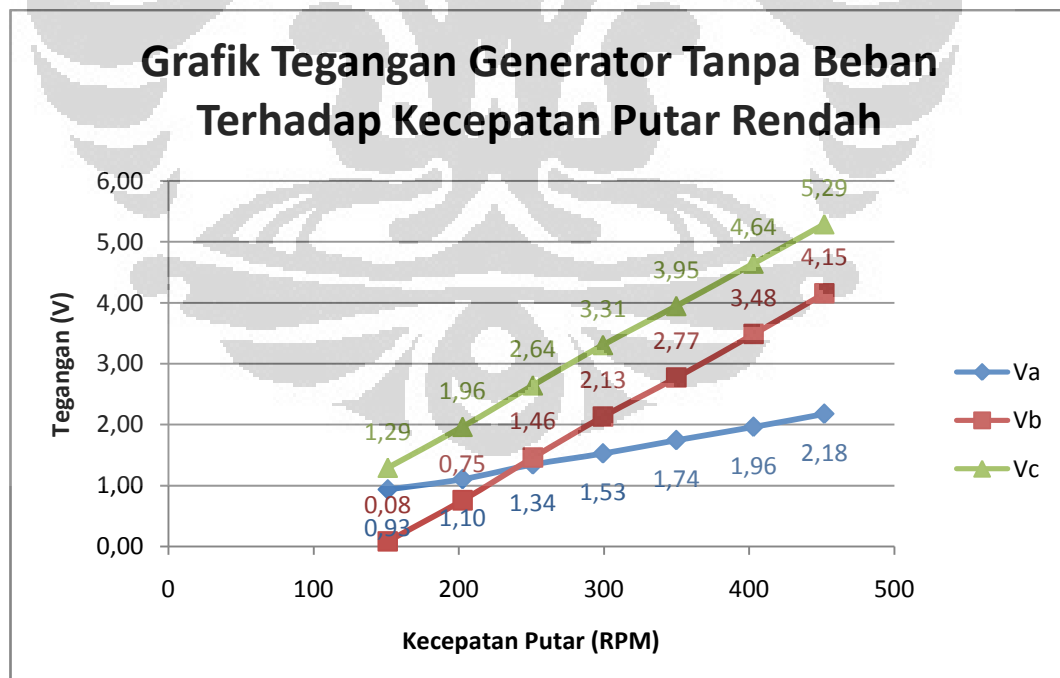
HASIL PENGUJIAN DAN ANALISIS

4.1 Hasil Pengujian

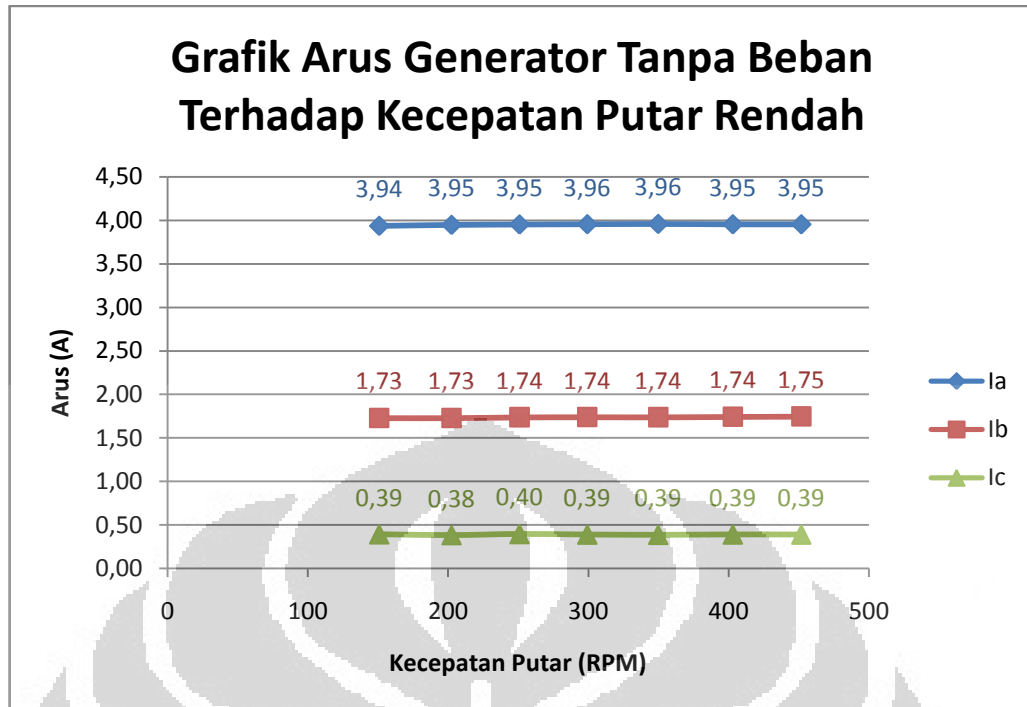
Pengujian generator aksial tiga fasa dilakukan untuk mengetahui unjuk kerja terhadap kecepatan putar generator. Pengujian dilakukan berdasarkan spesifikasi yang digunakan dan dijelaskan pada bab perancangan atau bab tiga. Hal ini dilakukan dengan tujuan agar kita dapat mengetahui nilai tegangan, arus,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

4.1.1 Pengujian Tanpa Beban

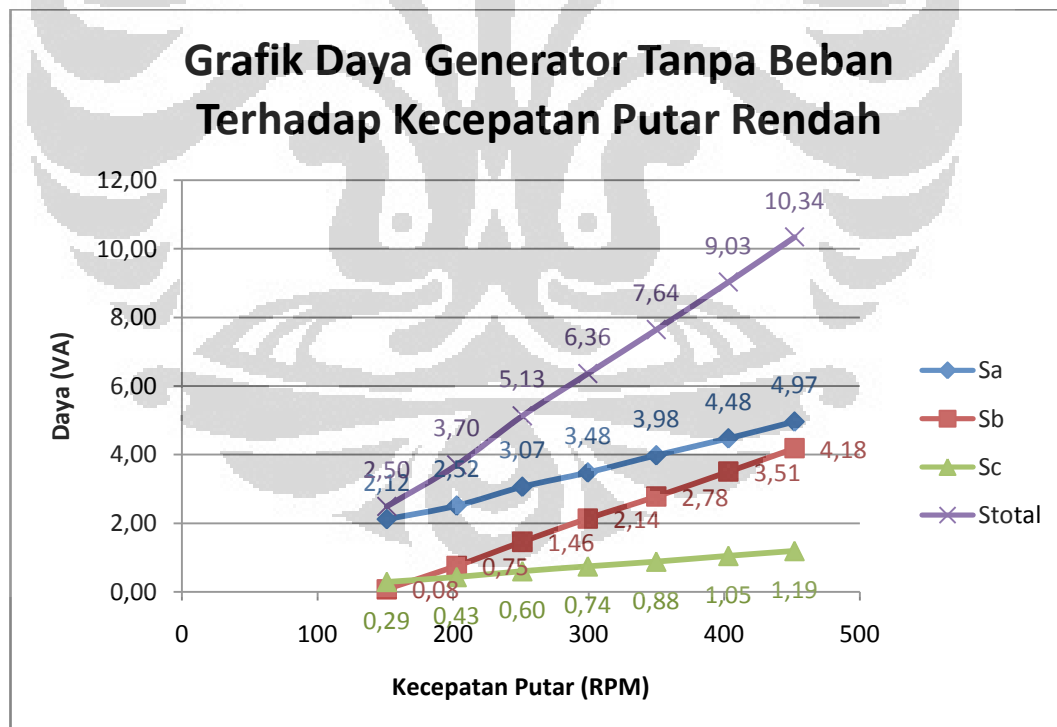
4.1.1.1 Kecepatan Rendah



Gambar 4.1. Grafik Tegangan Generator Tanpa Beban Terhadap Kecepatan Putar Rendah

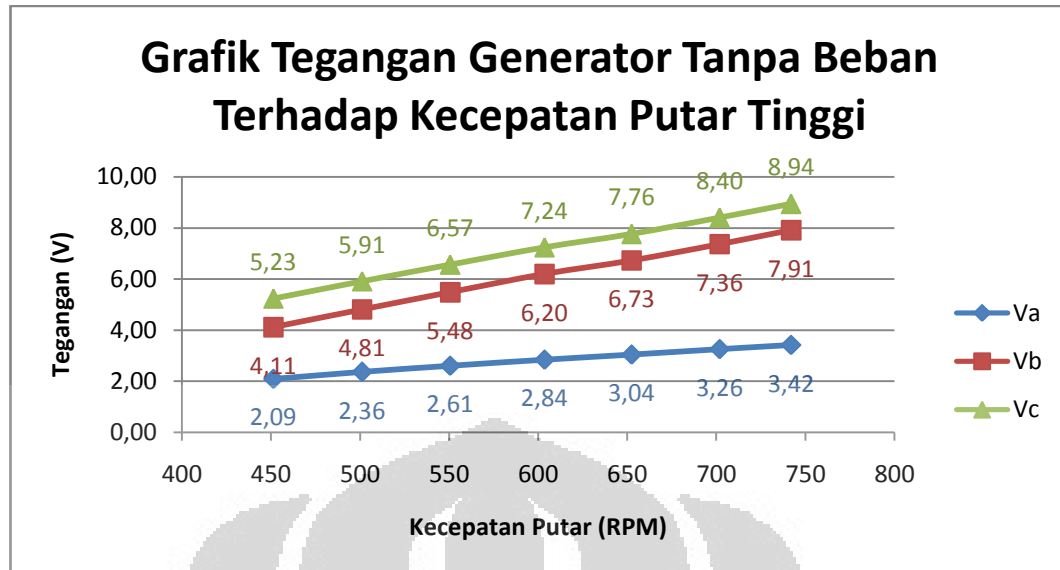


Gambar 4.2. Grafik Arus Generator Tanpa Beban Terhadap Kecepatan Putar Rendah

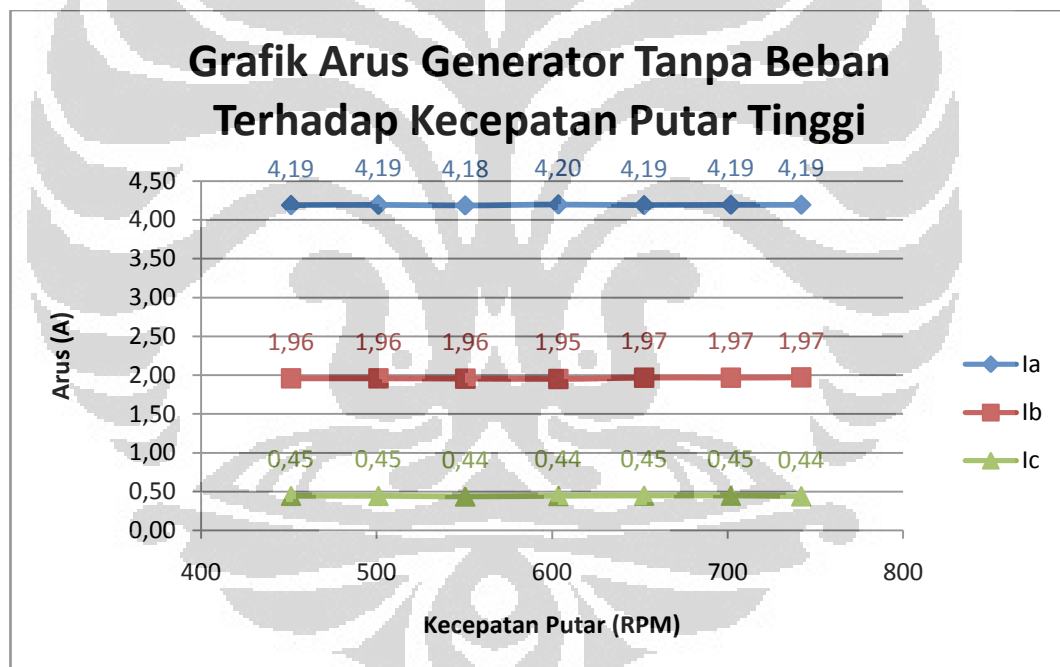


Gambar 4.3. Grafik Daya Generator Tanpa Beban Terhadap Kecepatan Putar Rendah

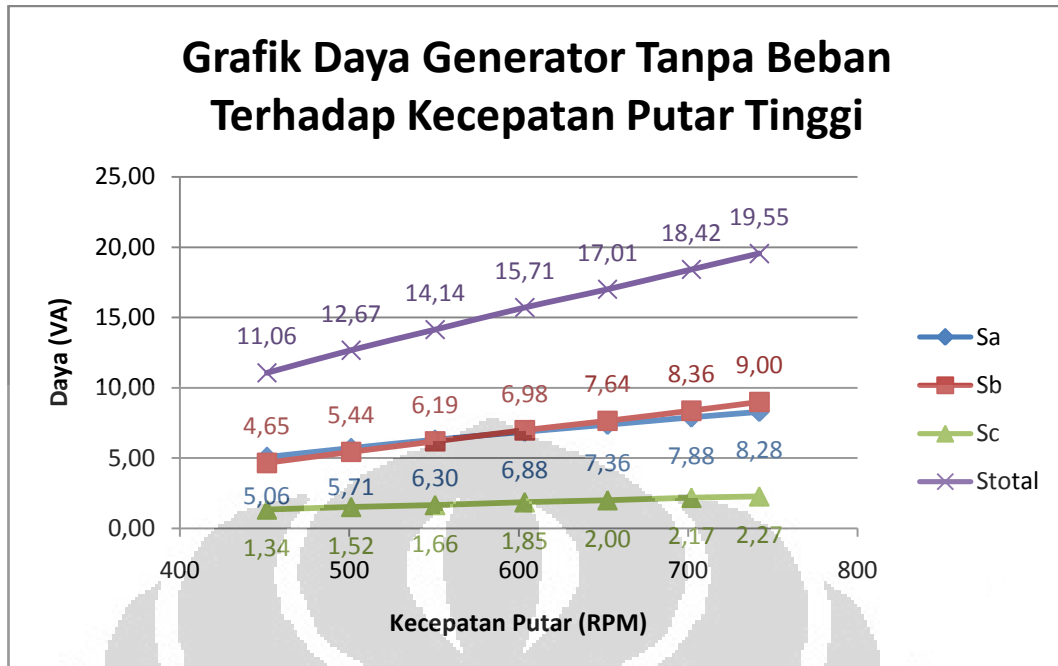
4.1.1.2 Kecepatan Tinggi



Gambar 4.4. Grafik Tegangan Generator Tanpa Beban Terhadap Kecepatan Putar Tinggi

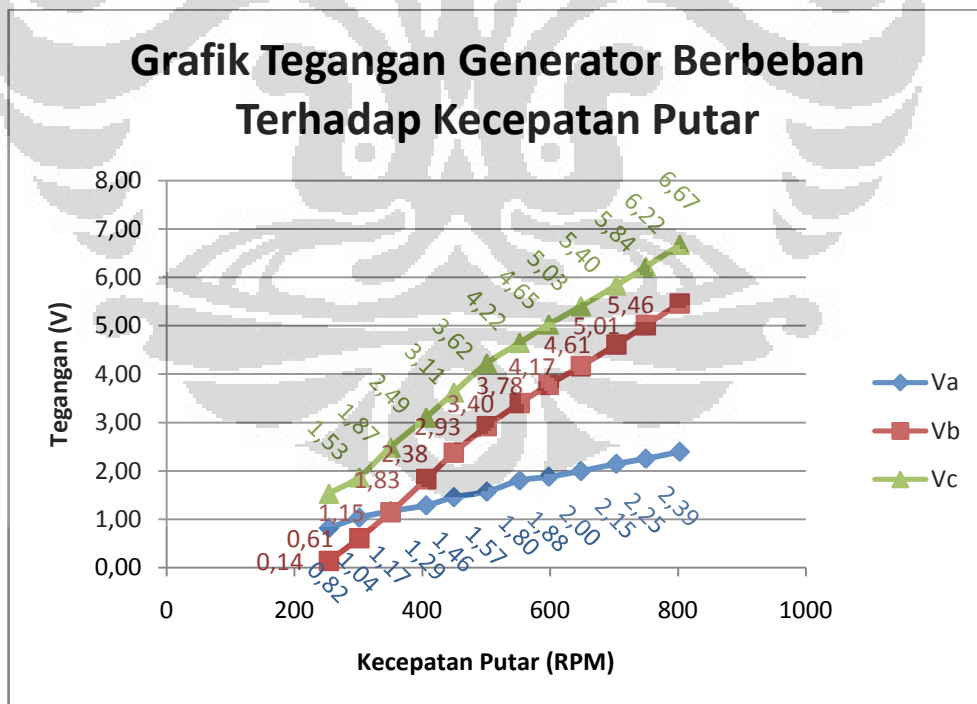


Gambar 4.5. Grafik Arus Generator Tanpa Beban Terhadap Kecepatan Putar Tinggi

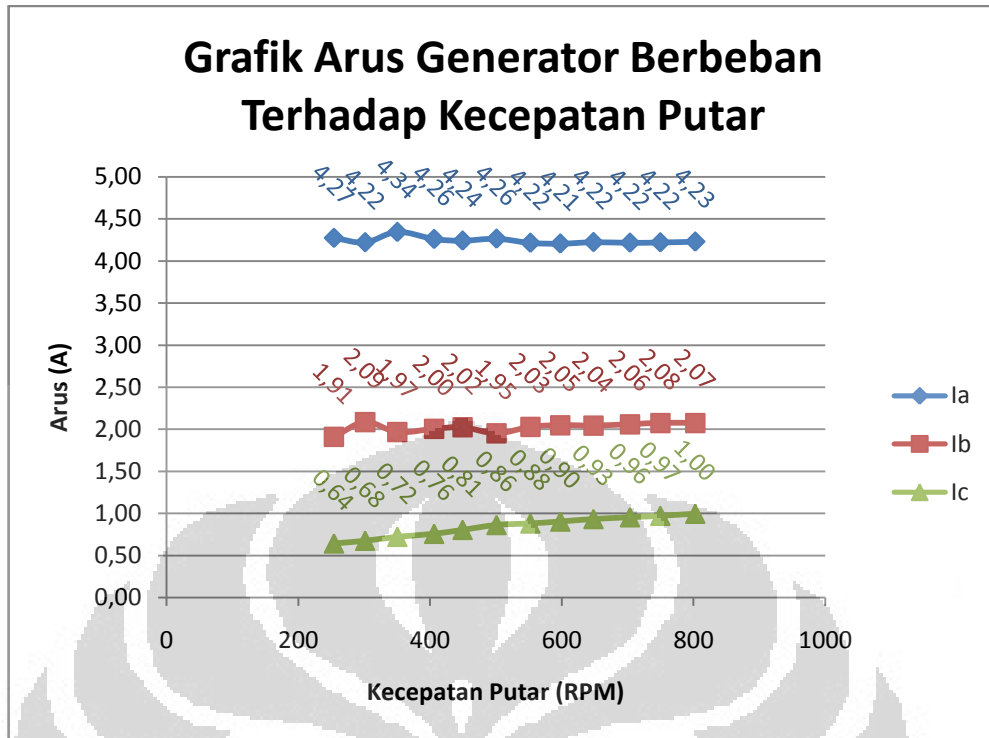


Gambar 4.6. Grafik Daya Generator Tanpa Beban Terhadap Kecepatan Putar Tinggi

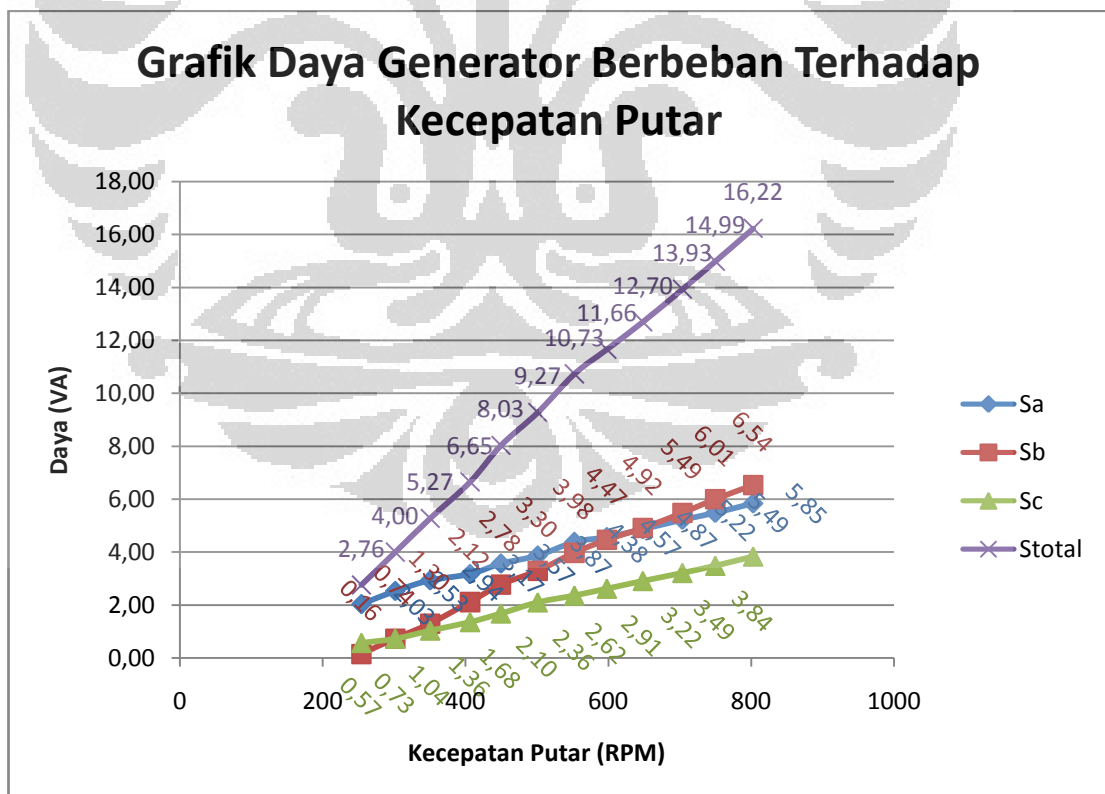
4.1.2 Pengujian Berbeban



Gambar 4.7. Grafik Tegangan Generator Berbeban Terhadap Kecepatan Putar



Gambar 4.8. Grafik Arus Generator Berbeban Terhadap Kecepatan Putar Generator



Gambar 4.9. Grafik Daya Generartor Berbeban Terhadap Kecepatan Putar

4.2 Analisis

4.2.1 Tegangan Generator Terhadap Kecepatan Putar

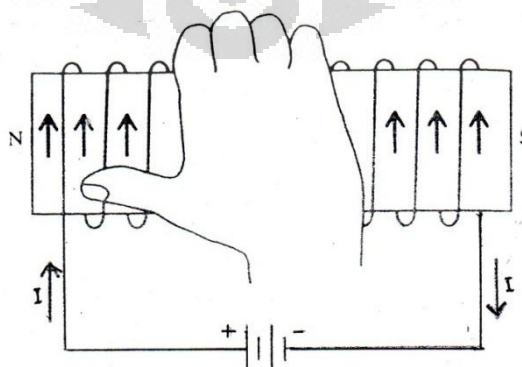
Baik dari pengujian tanpa beban dengan kecepatan putar rendah dan tinggi serta pengujian berbeban, dapat dilihat bahwa nilai tegangan bersifat linier dengan kecepatan. Dengan kata lain, semakin meningkatnya kecepatan putar generator maka akan semakin tinggi nilai tegangannya. Namun, terdapat keanehan dimana nilai tegangan tidak persis sama antara fasa yang satu dan lainnya. Pada fasa a nilai tegangan antar fasa ini bahkan terlihat memiliki gradien yang berbeda dari tegangan antar fasa pada fasa b dan fasa c.

Perbedaan nilai tegangan ini disebabkan oleh kesalahan dalam peletakan kumparan stator. Pada generator yang diuji, kumparan stator disusun dengan konfigurasi tRsTrStRS. Perbedaan huruf besar dan kecil menandakan perbedaan arah lilitan kumparan. Berdasarkan polanya, bisa kita lihat bahwa kumparan S yang ketiga memiliki arah lilitan yang salah. Seharusnya stator disusun dengan konfigurasi tRsTrStRs.

Hal ini dapat dijelaskan menggunakan Hukum Lenz yang menyatakan bahwa:

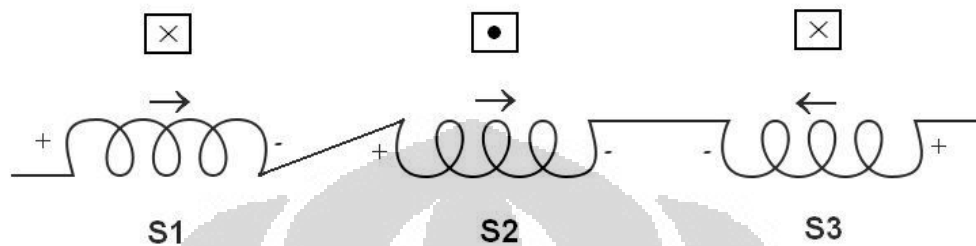
“Arah tegangan yang dibangkitkan pada kumparan adalah sedemikian sehingga apabila ujung kumparan dihubungkan, akan menghasilkan arus yang dapat menimbulkan fluks yang melawan perubahan fluks yang asli.”

Atau dapat pula digambarkan secara lebih sederhana menggunakan kaidah tangan kanan seperti terlihat pada gambar 4.10.



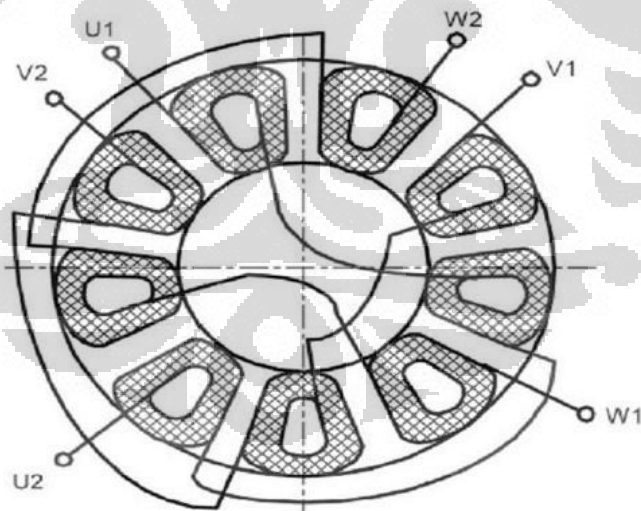
Gambar 4.10. Kaidah Tangan Kanan

Kumparan ketiga pada fasa S yang terbalik arahnya menyebabkan resultan tegangan dan arus pada fasa S menjadi berkurang atau lebih kecil dibandingkan dengan dua fasa lainnya. Gambar 4.11. memperjelas letak kesalahan pada generator ini, dimana arah lilitan kumparan S_3 harusnya sama dengan arah lilitan kumparan S_1 .



Gambar 4.11. Kesalahan arah lilitan pada fasa S

Namun, meskipun stator disusun dengan konfigurasi tR_sTrStR_s tersebut, masih ada kelemahan pada generator ini. Untuk *distributed winding*, fasa R_1 dan S_1 harus terpisah sejauh 80° , begitu pula fasa S_1 dan T_1 . Hal ini dapat dilihat pada gambar 4.12 dengan fasa UVW sama dengan fasa RST.



Gambar 4.12. Konfigurasi *distributed winding* yang tepat

Konfigurasi kumparan sesuai Gambar 4.12 yaitu $U_1-W_3-V_1-u_2-W_1-v_2-U_3-w_2-V_3$ atau $R_1-T_3-S_1-r_2-T_1-s_2-R_3-t_2-S_3$. Dengan ini dapat diketahui bahwa arah kumparan sama untuk setiap bagian fasa. $R_1-S_1-T_1$, $r_2-s_2-t_2$ dan $R_3-S_3-T_3$.

Penyetaraan arah kumparan seperti ini akan menyebabkan besar tegangan di tiap fasa menjadi sama.

Oleh karena itu, untuk sedikit memperbaiki kesalahan yang dibuat pada generator ini, yang digunakan sebagai netral adalah $R_2S_2T_1$ yang berarti konfigurasi kumparan menjadi TRstrSTRS atau STRstrSTR. Penyebutan fasa RST yang tidak berurutan dikarenakan ketidaktepatan dalam penomoran fasa kumparan, dimana pada generator ini, penomoran fasa dimulai dari kumparan B, sehingga penyebutan fasa menjadi tRsTrStRS. Meskipun demikian, ketidaktepatan penomoran fasa ini hanya mempengaruhi penyebutan fasa yang menjadi sedikit berbelit, sedangkan nilai parameter seperti tegangan dan arus tidak terpengaruh olehnya.

4.2.2 Arus Generator Terhadap Kecepatan Putar

Pada grafik generator tanpa beban, arus yang dihasilkan cenderung tetap. Hal ini dikarenakan pada saat pengukuran generator tanpa beban, rangkaian generator bersifat *close loop* atau rangkaian tertutup, sehingga arus yang mengalir menjadi stabil.

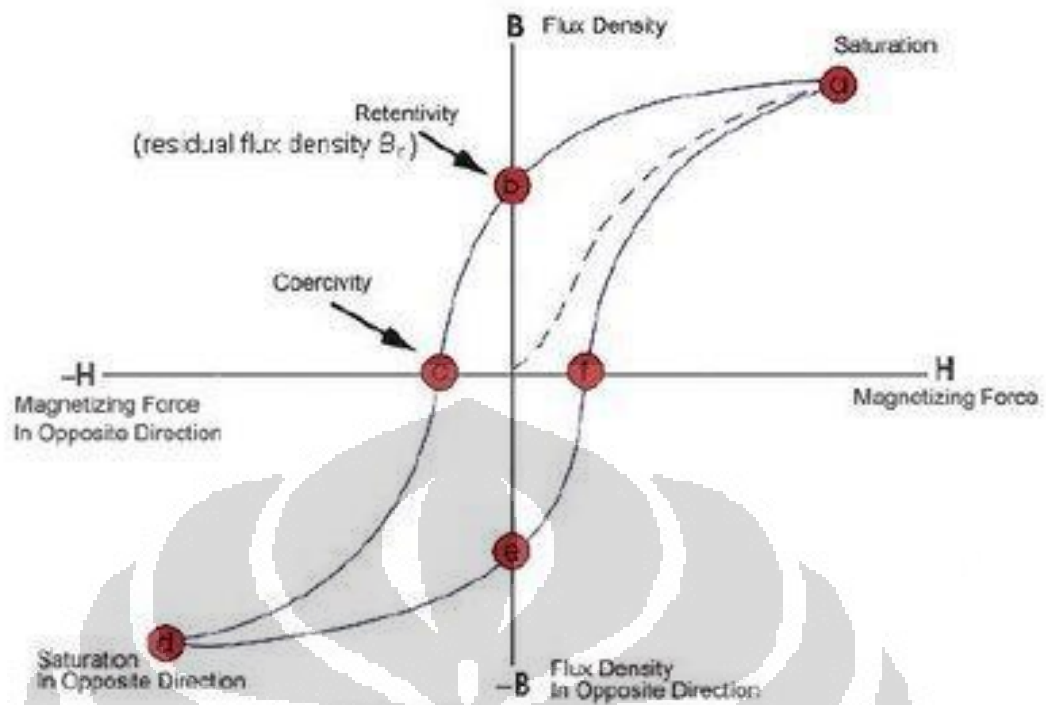
Pada grafik generator berbeban, meskipun tidak terlalu tajam, dapat dilihat bahwa nilai arus mengalami peningkatan dibandingkan pada grafik generator tanpa beban. Dalam keadaan berbeban, arus jangkar akan mengalir dan mengakibatkan terjadinya reaksi jangkar. Reaksi jangkar bersifat reaktif karena itu dinyatakan sebagai reaktansi, dan disebut reaktansi magnetisasi. Adanya reaksi jangkar ini mengakibatkan turunnya nilai tegangan karena daya diasumsikan bernilai konstan. Dengan demikian, dapat diketahui penyebab naiknya nilai arus pada generator berbeban dibandingkan generator tanpa beban sesuai dengan hasil percobaan.

4.2.3 Daya Generator Terhadap Kecepatan Putar

Sama halnya dengan tegangan, besar daya yang dihasilkan suatu generator pastilah meningkat sejalan dengan bertambahnya kecepatan putar generator. Perbedaan yang muncul antara besar daya yang dihasilkan oleh tiap fasanya tidak lain dikarenakan alasan yang sama dengan perbedaan tegangan yang dihasilkan.

Yang menjadi permasalahan utama adalah kecilnya nilai tegangan yang dihasilkan oleh generator yang dibuat ini. Bahkan pada percobaan berbeban, generator baru bisa menyalakan lampu pada kecepatan yang cukup tinggi, sementara untuk aplikasi pembangkit listrik tenaga angin, diharapkan generator dapat bekerja optimal pada kecepatan rendah. Ditambah fakta bahwa yang dapat menyala hanya dua buah lampu, karena daya yang dihasilkan salah satu fasanya tidak sempurna.

Untuk permasalahan seperti ini, yang dapat dilakukan yaitu mengganti jenis magnet permanen menjadi Neodymium Iron Boron yang memiliki kekuatan lebih tinggi daripada Strontium Ferrite. Karena seperti dapat dilihat di kurva demagnetisasi Strontium Ferrite dan Neodymium Iron Boron pada gambar 3.1, Strontium Ferrite memiliki titik *residual flux* atau *retentivity* yang lebih rendah daripada Neodymium Iron Boron. Dari nilai *coercivity* pun terlihat bahwa Neodymium Iron Boron memiliki daya *coercive* yang lebih tinggi daripada Strontium Ferrite. Hal ini mengakibatkan jumlah fluks pada magnet Neodymium Iron Boron cenderung lebih kuat dan tahan lama. Karena seperti dapat dilihat pada gambar 4.12 mengenai *hysteresis loop* berikut, jumlah fluks yang ada bergantung juga pada riwayat fluks sebelumnya. *Retentivity* sendiri merupakan nilai fluks atau kerapatan fluks yang tersisa saat gaya gerak magnet atau kuat medan turun ke nilai nol. Sedangkan *coercivity* merupakan nilai dari medan sebaliknya yang diperlukan untuk mengembalikan kerapatan fluks ke titik nol setelah saturasi.



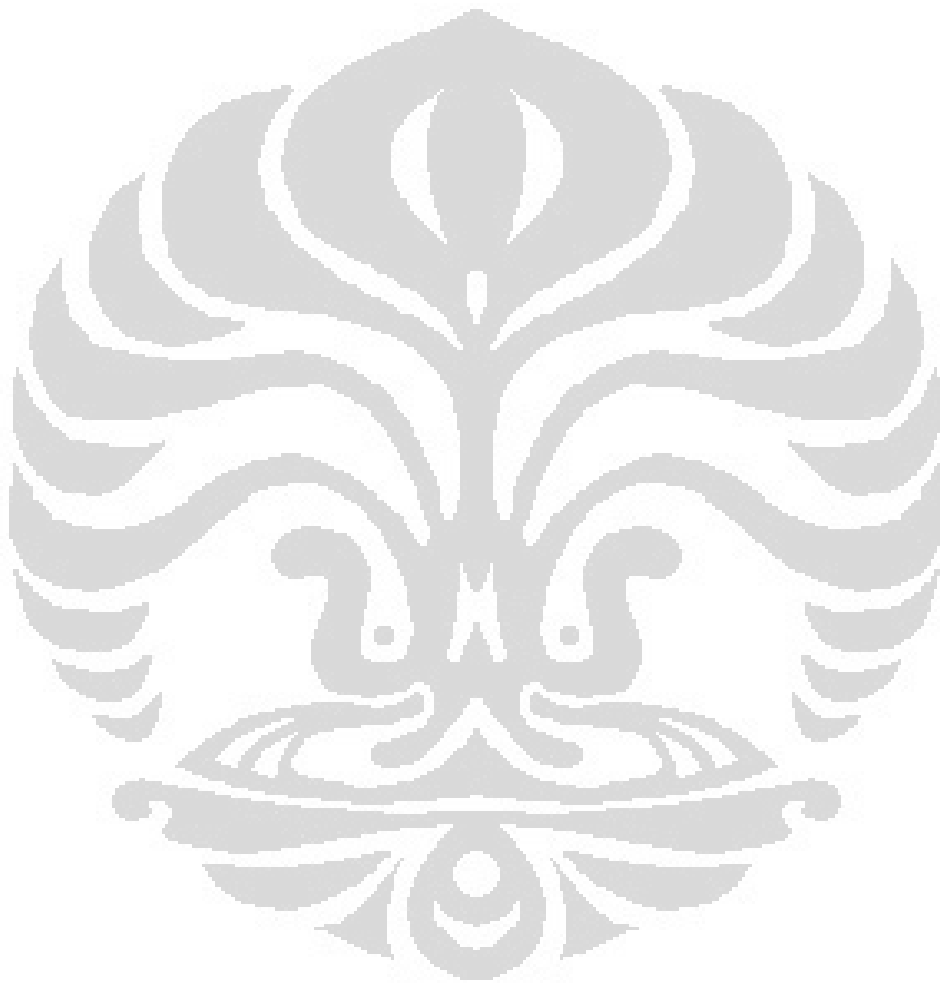
Gambar 4.13. *Hysteresis loop*

Selain itu, Neodymium Iron Boron memiliki dimensi yang lebih kecil daripada Strontium Ferrite, sehingga untuk cetakan rotor yang sama, dapat digunakan 12 magnet pada setiap rotor. Hal ini, sesuai dengan Tabel 2.1 mengenai perbandingan jumlah magnet dan kumparan stator, merupakan konfigurasi yang paling tepat untuk pembuatan generator aksial tiga fasa. Dengan perbandingan magnet dan kumparan yang benar sesuai tabel tersebut, diharapkan daya dan tegangan yang dihasilkan oleh generator aksial menjadi lebih sempurna.

4.2.4 Hasil Pengujian Terhadap Hasil Perhitungan Rancangan Awal

Nilai yang menjadi dasar analisis adalah tegangan, karena nilai arus dan daya tergantung dari nilai tegangan tersebut. Bila hasil pengujian generator dibandingkan dengan hasil perhitungan rancangan awal, terdapat perbedaan nilai yang tidak bisa diabaikan. Hal ini dikarenakan kesalahan konfigurasi tiga fasa seperti telah disebutkan sebelumnya, sehingga nilai tegangan pada masing-masing fasanya menjadi tidak seimbang dan akhirnya mempengaruhi nilai parameter lainnya.

Selain itu, perbedaan nilai ini juga dapat disebabkan oleh kurang akuratnya nilai kekuatan magnet Strontium Ferrite yang digunakan dalam perhitungan, serta perbedaan kecepatan putar generator yang mengakibatkan perbedaan frekuensi listriknya.



BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

1. Pada kecepatan 250.95 RPM, tegangan antar fasa yang dihasilkan oleh generator tanpa beban yaitu V_a 1.34 V, V_b 1.46 V, dan V_c 2.64 V. Nilai arus yaitu I_a 3.95 A, I_b 1.74 A, dan I_c 0.4 A, sedangkan daya totalnya yaitu 5.13 VA.
2. Pada kecepatan 741.96 RPM, tegangan antar fasa yang dihasilkan oleh generator tanpa beban yaitu V_a 3.42 V, V_b 7.91 V, dan V_c 8.94 V. Nilai arus yaitu I_a 4.19 A, I_b 1.97 A, dan I_c 0.44 A, sedangkan daya totalnya yaitu 19.55 VA.
3. Pada kecepatan 749.65 RPM, tegangan antar fasa yang dihasilkan oleh generator berbeban yaitu V_a 2.25 V, V_b 5.01 V, dan V_c 6.22 V. Nilai arus yaitu I_a 4.22 A, I_b 2.08 A, dan I_c 0.97 A, sedangkan daya totalnya yaitu 14.99 VA.
4. Kurang optimalnya unjuk kerja generator ini dikarenakan kesalahan dalam menyusun konfigurasi kumparan stator dimana arah gulungan kumparan S_3 terbalik sehingga konfigurasi menjadi tRsTrStRS dan bukannya tRsTrStRs.

5.2 Saran

1. Untuk hasil yang maksimal, penggunaan magnet jenis Neodymium Iron Boron harus lebih diutamakan daripada Strontium Ferrite.
2. Agar didapat parameter tiga fasa yang optimal, sebaiknya digunakan perbandingan kumparan : magnet = 3 : 4.
3. Bila desain generator yaitu sembilan kumparan dan delapan magnet, konfigurasi kumparan stator yang tepat yaitu *distributed* dengan susunan $R_1-T_3-S_1-r_2-T_1-s_2-R_3-t_2-S_3$.

DAFTAR PUSTAKA

- Chapman, Stephen J., "Electric Machinery and Power System Fundamentals", McGraw-Hill, New York, 2002.
- E. Muljadi, dkk, "Axial Flux, Modular, Permanent-Magnet Generator with a Toroidal Winding for Wind Turbine Applications", IEEE Industry Applications Conference, 1998.
- Jacek F. Gieras, Rong-Jie Wang, Maarten J. Kamper, "Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machine" Kluwer Academic Publisher, New York, 2004.
- Maarten J. Kamper, dkk, "Analysis and Performance of Axial Flux Permanent-Magnet Machine With Air-Cored Nonoverlapping Concentrated Stator Windings", IEEE, 2004.
- Yicheng Chen, dkk, "PM Wind Generator Comparison of Different Topologies", IEEE, 2004.
- Zuhal, *Dasar Tenaga Listrik dan Elektronika Daya*, Gramedia, Jakarta, 1995.

LAMPIRAN

Data Pengujian Generator Tanpa Beban Kecepatan Rendah

Parameter Uji															
RPM				Tegangan AC											
				L1				L2				L3			
σ	Max	Min	Mean	Mean	σ	Max	Min	Mean	σ	Max	Min	Mean	σ	Max	Min
35.6	156.787	69.952	127.318	0.866	0.014	0.891	0.845	-0.416	0.149	-0.192	-0.581	0.781	0.152	1.035	0.607
2.42	157.391	150.905	152.45	0.9	0.012	0.912	0.873	-0.033	0.057	0.033	-0.145	1.178	0.058	1.261	1.08
0.13	151.202	150.805	150.961	0.934	0.014	0.948	0.913	0.08	0.019	0.113	0.053	1.29	0.018	1.312	1.254
8.58	173.874	151.005	158.991	0.954	0.012	0.973	0.938	0.138	0.041	0.227	0.098	1.357	0.05	1.445	1.312
6.63	193.12	174.816	185.029	1.005	0.021	1.041	0.969	0.401	0.098	0.54	0.257	1.61	0.089	1.735	1.482
1.48	200.992	195.217	197.531	1.055	0.01	1.078	1.042	0.641	0.05	0.704	0.559	1.85	0.043	1.913	1.76
0.2	202.861	202.211	202.511	1.104	0.015	1.128	1.083	0.754	0.025	0.779	0.71	1.962	0.014	1.979	1.934
5.9	219.271	202.734	208.163	1.146	0.02	1.185	1.129	0.812	0.047	0.901	0.764	2.021	0.037	2.095	1.979
4.89	236.983	223.463	230.273	1.19	0.014	1.21	1.17	1.047	0.072	1.151	0.929	2.265	0.086	2.377	2.135
6.49	255.291	238.03	247.473	1.253	0.024	1.277	1.213	1.305	0.092	1.436	1.177	2.502	0.079	2.608	2.392
2.45	255.286	249.118	252.125	1.305	0.013	1.325	1.288	1.446	0.011	1.468	1.433	2.629	0.018	2.661	2.607
1.58	252.421	248.009	249.593	1.325	0.007	1.335	1.31	1.443	0.016	1.463	1.411	2.632	0.014	2.655	2.608
2.9	254.263	247.559	250.948	1.344	0.004	1.348	1.336	1.456	0.022	1.485	1.41	2.644	0.014	2.656	2.616
2.21	254.496	248.08	252.754	1.344	0.006	1.353	1.335	1.462	0.023	1.491	1.43	2.643	0.021	2.672	2.607
10.7	275.67	247.553	259.997	1.362	0.01	1.376	1.348	1.511	0.076	1.642	1.44	2.703	0.079	2.851	2.627

4	289.873	277.719	284.503	1.406	0.015	1.428	1.388	1.804	0.064	1.884	1.69	3.008	0.085	3.12	2.864
2.34	298.105	290.287	295.635	1.474	0.023	1.504	1.437	2.002	0.052	2.057	1.911	3.189	0.033	3.243	3.137
4.38	303.718	292.467	299.257	1.525	0.013	1.546	1.508	2.129	0.031	2.163	2.064	3.306	0.025	3.331	3.26
18.5	332.405	279.199	308.065	1.563	0.025	1.611	1.537	2.242	0.095	2.413	2.152	3.4	0.086	3.567	3.316
4.16	346.369	333.714	340.123	1.655	0.021	1.687	1.622	2.574	0.082	2.684	2.452	3.741	0.07	3.841	3.618
2.95	353.079	346.499	348.939	1.718	0.008	1.73	1.704	2.75	0.034	2.789	2.682	3.905	0.04	3.958	3.864
2.93	353.693	346.977	349.787	1.743	0.018	1.769	1.723	2.769	0.033	2.814	2.731	3.947	0.018	3.977	3.93
9.42	377.426	353.871	364.411	1.774	0.015	1.799	1.749	2.926	0.103	3.091	2.81	4.089	0.094	4.243	3.989
4.95	391.553	377.83	385.784	1.85	0.028	1.886	1.8	3.221	0.068	3.318	3.117	4.381	0.071	4.455	4.262
1.55	398.207	393.368	397.282	1.921	0.019	1.944	1.887	3.398	0.027	3.42	3.341	4.552	0.041	4.591	4.466
1.73	403.862	398.207	402.983	1.961	0.016	1.978	1.933	3.483	0.029	3.505	3.412	4.644	0.024	4.67	4.591
8.61	425.297	403.446	414.148	1.997	0.023	2.027	1.968	3.625	0.097	3.765	3.515	4.754	0.094	4.894	4.655
5.6	441.162	425.467	431.152	2.059	0.018	2.086	2.032	3.85	0.062	3.974	3.784	4.999	0.066	5.121	4.919
3.46	451.52	441.368	446.944	2.126	0.025	2.157	2.089	4.064	0.05	4.109	3.971	5.206	0.052	5.287	5.146
0.08	451.887	451.691	451.77	2.175	0.011	2.196	2.156	4.151	0.01	4.16	4.135	5.291	0.013	5.305	5.271
44.1	452.295	337.044	416.842	2.147	0.067	2.198	2.006	3.934	0.339	4.175	3.238	5.04	0.352	5.292	4.32
30.3	324.839	246.453	274.159	1.777	0.123	1.973	1.615	2.266	0.458	3.015	1.681	3.394	0.44	4.098	2.817
36.2	242.147	148.907	188.551	1.437	0.092	1.573	1.308	1.139	0.361	1.624	0.628	2.278	0.357	2.761	1.786

Parameter Uji															
RPM				Arus AC											
				L1				L2				L3			
σ	Max	Min	Mean	Mean	σ	Max	Min	Mean	σ	Max	Min	Mean	σ	Max	Min

35.6	156.787	69.952	127.318	3.942	0.003	3.948	3.938	1.732	0.004	1.737	1.725	0.396	0.006	0.403	0.384
2.42	157.391	150.905	152.45	3.94	0.006	3.95	3.93	1.73	0.006	1.741	1.721	0.392	0.005	0.402	0.385
0.13	151.202	150.805	150.961	3.936	0.004	3.942	3.929	1.729	0.003	1.735	1.724	0.393	0.006	0.403	0.383
8.58	173.874	151.005	158.991	3.944	0.004	3.95	3.937	1.728	0.004	1.733	1.722	0.392	0.008	0.404	0.382
6.63	193.12	174.816	185.029	3.943	0.004	3.95	3.937	1.729	0.004	1.733	1.72	0.387	0.006	0.398	0.38
1.48	200.992	195.217	197.531	3.95	0.004	3.956	3.943	1.734	0.007	1.741	1.719	0.394	0.005	0.401	0.387
0.2	202.861	202.211	202.511	3.947	0.008	3.959	3.936	1.729	0.01	1.741	1.714	0.384	0.004	0.392	0.379
5.9	219.271	202.734	208.163	3.944	0.008	3.957	3.929	1.727	0.006	1.735	1.718	0.394	0.005	0.403	0.388
4.89	236.983	223.463	230.273	3.946	0.005	3.953	3.937	1.73	0.002	1.733	1.727	0.383	0.007	0.391	0.37
6.49	255.291	238.03	247.473	3.951	0.004	3.957	3.946	1.729	0.008	1.74	1.716	0.384	0.008	0.396	0.372
2.45	255.286	249.118	252.125	3.949	0.006	3.959	3.939	1.734	0.008	1.745	1.719	0.392	0.004	0.397	0.384
1.58	252.421	248.009	249.593	3.954	0.005	3.961	3.948	1.737	0.007	1.748	1.728	0.393	0.004	0.401	0.387
2.9	254.263	247.559	250.948	3.952	0.007	3.961	3.94	1.737	0.004	1.744	1.733	0.396	0.007	0.407	0.381
2.21	254.496	248.08	252.754	3.945	0.004	3.951	3.94	1.734	0.008	1.744	1.721	0.387	0.002	0.39	0.382
10.7	275.67	247.553	259.997	3.947	0.007	3.957	3.936	1.732	0.006	1.743	1.721	0.395	0.006	0.404	0.385
4	289.873	277.719	284.503	3.955	0.005	3.966	3.95	1.729	0.007	1.741	1.719	0.394	0.007	0.405	0.385
2.34	298.105	290.287	295.635	3.954	0.004	3.96	3.947	1.734	0.005	1.743	1.726	0.392	0.005	0.399	0.385
4.38	303.718	292.467	299.257	3.955	0.005	3.963	3.949	1.739	0.004	1.744	1.732	0.39	0.004	0.396	0.383
18.5	332.405	279.199	308.065	3.957	0.005	3.964	3.951	1.743	0.006	1.753	1.735	0.39	0.006	0.398	0.383
4.16	346.369	333.714	340.123	3.959	0.006	3.97	3.95	1.74	0.003	1.746	1.737	0.391	0.009	0.408	0.379
2.95	353.079	346.499	348.939	3.956	0.002	3.96	3.953	1.74	0.004	1.747	1.734	0.389	0.008	0.399	0.378
2.93	353.693	346.977	349.787	3.958	0.005	3.969	3.953	1.738	0.004	1.745	1.731	0.387	0.005	0.393	0.375
9.42	377.426	353.871	364.411	3.956	0.008	3.966	3.943	1.742	0.007	1.753	1.733	0.394	0.01	0.415	0.382
4.95	391.553	377.83	385.784	3.954	0.004	3.959	3.949	1.735	0.005	1.741	1.728	0.388	0.003	0.391	0.382

1.55	398.207	393.368	397.282	3.953	0.005	3.961	3.946	1.74	0.008	1.75	1.729	0.389	0.004	0.395	0.382
1.73	403.862	398.207	402.983	3.954	0.006	3.965	3.947	1.743	0.004	1.751	1.737	0.391	0.005	0.397	0.382
8.61	425.297	403.446	414.148	3.955	0.007	3.963	3.942	1.738	0.004	1.745	1.734	0.39	0.003	0.393	0.384
5.6	441.162	425.467	431.152	3.955	0.005	3.961	3.948	1.741	0.004	1.748	1.737	0.391	0.011	0.4	0.374
3.46	451.52	441.368	446.944	3.95	0.004	3.953	3.942	1.747	0.004	1.754	1.742	0.392	0.005	0.4	0.382
0.08	451.887	451.691	451.77	3.954	0.005	3.961	3.946	1.746	0.005	1.755	1.737	0.39	0.006	0.398	0.383
44.1	452.295	337.044	416.842	3.956	0.007	3.967	3.942	1.746	0.005	1.753	1.738	0.393	0.006	0.401	0.382
30.3	324.839	246.453	274.159	3.958	0.005	3.964	3.951	1.737	0.006	1.746	1.727	0.393	0.008	0.405	0.381
36.2	242.147	148.907	188.551	3.958	0.007	3.97	3.948	1.75	0.004	1.758	1.744	0.399	0.009	0.415	0.383

Data Pengujian Generator Tanpa Beban Kecepatan Tinggi

Parameter Uji															
RPM				Tegangan AC											
				L1				L2				L3			
σ	Max	Min	Mean	Mean	σ	Max	Min	Mean	σ	Max	Min	Mean	σ	Max	Min
76.28	259	70.109	208.182	0.743	0.064	0.84	0.644	-0.56	0.716	0.477	-1.419	0.745	0.721	1.807	-0.091
0.457	253.1	251.813	252.413	0.954	0.065	1.055	0.859	1.01	0.212	1.249	0.62	2.293	0.176	2.49	1.956
0.232	253.7	253.064	253.291	1.135	0.038	1.179	1.074	1.343	0.043	1.401	1.278	2.552	0.026	2.576	2.497
12.18	286.1	253.48	265.789	1.23	0.037	1.288	1.177	1.509	0.102	1.692	1.409	2.69	0.105	2.884	2.579
5.621	305	290.338	300.871	1.377	0.042	1.412	1.303	1.947	0.128	2.094	1.737	3.154	0.11	3.281	2.963
2.742	305.5	298.702	303.506	1.463	0.028	1.489	1.418	2.118	0.017	2.141	2.094	3.305	0.014	3.327	3.278
12.29	329.9	298.42	312.877	1.505	0.023	1.545	1.471	2.184	0.101	2.349	2.067	3.367	0.116	3.556	3.244
6.611	350.7	332.601	343.834	1.603	0.036	1.661	1.559	2.589	0.116	2.729	2.4	3.758	0.106	3.891	3.59

0.153	350.8	350.369	350.622	1.677	0.016	1.7	1.649	2.768	0.012	2.784	2.742	3.921	0.015	3.942	3.902
13.45	382.7	350.131	365.633	1.736	0.024	1.773	1.713	2.904	0.142	3.134	2.769	4.071	0.139	4.291	3.91
7.156	404.4	385.333	397.423	1.848	0.039	1.91	1.777	3.339	0.112	3.464	3.173	4.502	0.1	4.63	4.338
3.911	404.7	393.835	402.451	1.919	0.018	1.952	1.894	3.495	0.031	3.536	3.43	4.647	0.022	4.682	4.599
20.47	443.5	393.527	417.357	1.957	0.04	2.023	1.913	3.609	0.203	3.919	3.405	4.744	0.202	5.068	4.541
1.305	452.1	447.79	451.234	2.094	0.035	2.144	2.035	4.114	0.061	4.166	3.978	5.234	0.052	5.291	5.13
0.139	452.5	452.109	452.306	2.15	0.012	2.168	2.131	4.168	0.012	4.186	4.15	5.293	0.01	5.302	5.275
18.04	493	452.076	471.205	2.198	0.039	2.275	2.161	4.35	0.196	4.65	4.163	5.469	0.184	5.757	5.294
6.862	505.8	486.613	496.698	2.328	0.03	2.354	2.263	4.774	0.067	4.867	4.676	5.865	0.047	5.937	5.81
4.876	508.5	496.209	501.025	2.359	0.018	2.383	2.33	4.809	0.058	4.894	4.745	5.912	0.061	6.004	5.849
7.309	517.7	497.594	507.367	2.395	0.011	2.415	2.384	4.917	0.074	5.011	4.813	6	0.067	6.085	5.912
3.691	507.4	496.077	505.372	2.414	0.01	2.426	2.399	4.904	0.028	4.939	4.84	6	0.024	6.025	5.936
12.97	526	493.825	507.515	2.4	0.027	2.452	2.371	4.889	0.113	5.095	4.783	5.978	0.13	6.193	5.846
7.876	560.6	532.311	548.398	2.528	0.039	2.585	2.459	5.401	0.13	5.565	5.153	6.483	0.121	6.663	6.261
4.757	561.3	550.041	553.45	2.609	0.016	2.636	2.583	5.547	0.046	5.61	5.498	6.621	0.055	6.698	6.556
0.187	550.9	550.292	550.569	2.606	0.008	2.62	2.592	5.482	0.011	5.506	5.468	6.568	0.007	6.58	6.556
14.08	584.8	550.693	564.541	2.633	0.028	2.687	2.603	5.637	0.157	5.89	5.492	6.693	0.147	6.946	6.563
5.965	606.8	589.116	598.175	2.76	0.031	2.818	2.711	6.071	0.096	6.221	5.935	7.121	0.078	7.233	6.998
4.654	607.7	597.238	603.49	2.839	0.008	2.853	2.827	6.196	0.045	6.237	6.119	7.24	0.043	7.286	7.165
11.96	631.3	597.743	612.921	2.853	0.019	2.896	2.831	6.262	0.116	6.459	6.122	7.295	0.114	7.494	7.152
7.381	655.7	632.902	644.836	2.979	0.029	3.028	2.925	6.659	0.102	6.813	6.485	7.705	0.104	7.851	7.535
6.634	663.6	644.04	652.346	3.043	0.012	3.062	3.023	6.731	0.084	6.853	6.635	7.761	0.086	7.882	7.658
11.3	681.5	651.6	664.733	3.06	0.034	3.127	3.029	6.87	0.136	7.088	6.711	7.911	0.139	8.133	7.764
2.992	690.3	680.275	685.3	3.162	0.02	3.189	3.129	7.16	0.019	7.189	7.128	8.2	0.019	8.223	8.168

7.391	681.6	655.665	672.269	3.143	0.018	3.178	3.115	7.023	0.08	7.181	6.876	8.029	0.082	8.19	7.888
15.01	686	646.326	660.608	3.067	0.03	3.111	3.023	6.79	0.146	7.065	6.642	7.823	0.149	8.118	7.686
6.649	707.7	687.867	699.791	3.207	0.049	3.257	3.121	7.318	0.091	7.424	7.148	8.363	0.086	8.457	8.197
7.119	709.7	689.394	701.817	3.255	0.014	3.275	3.241	7.365	0.053	7.424	7.274	8.4	0.056	8.481	8.313
4.887	696.9	685.637	691.301	3.236	0.007	3.247	3.226	7.311	0.032	7.35	7.259	8.33	0.039	8.367	8.27
11.88	725	695.903	708.208	3.275	0.037	3.338	3.227	7.461	0.134	7.672	7.334	8.482	0.13	8.706	8.366
7.169	751.4	729.166	741.976	3.421	0.049	3.469	3.344	7.911	0.106	8.005	7.715	8.941	0.101	9.028	8.741
8.125	742.1	718.949	733.302	3.467	0.009	3.48	3.449	7.997	0.012	8.014	7.978	9.016	0.008	9.029	9.006
33.4	743.3	632.591	709.551	3.497	0.033	3.566	3.46	8.115	0.133	8.364	7.998	9.125	0.132	9.356	9.009
68.51	735	515.505	647.269	3.558	0.106	3.651	3.31	8.147	0.486	8.507	7.025	9.133	0.53	9.528	7.926
87.33	476.5	240.512	300.229	2.416	0.433	3.16	1.894	3.455	1.532	6.27	1.853	4.447	1.477	7.158	2.915

Parameter Uji															
RPM				Arus AC											
				L1				L2				L3			
σ	Max	Min	Mean	Mean	σ	Max	Min	Mean	σ	Max	Min	Mean	σ	Max	Min
76.28	259	70.109	208.182	4.186	0.006	4.194	4.175	1.949	0.006	1.96	1.942	0.437	0.005	0.444	0.431
0.457	253.1	251.813	252.413	4.187	0.01	4.2	4.175	1.952	0.006	1.963	1.941	0.444	0.004	0.448	0.434
0.232	253.7	253.064	253.291	4.184	0.01	4.199	4.168	1.958	0.004	1.966	1.954	0.448	0.002	0.451	0.444
12.18	286.1	253.48	265.789	4.181	0.004	4.187	4.173	1.952	0.005	1.959	1.941	0.452	0.004	0.46	0.446
5.621	305	290.338	300.871	4.192	0.007	4.2	4.182	1.955	0.005	1.961	1.944	0.45	0.004	0.455	0.442
2.742	305.5	298.702	303.506	4.189	0.005	4.195	4.179	1.947	0.003	1.952	1.942	0.444	0.003	0.449	0.439
12.29	329.9	298.42	312.877	4.191	0.005	4.2	4.182	1.959	0.006	1.97	1.951	0.447	0.005	0.455	0.438

6.611	350.7	332.601	343.834	4.189	0.003	4.193	4.183	1.957	0.005	1.965	1.95	0.445	0.005	0.453	0.439
0.153	350.8	350.369	350.622	4.188	0.005	4.195	4.182	1.957	0.004	1.964	1.952	0.443	0.003	0.446	0.438
13.45	382.7	350.131	365.633	4.19	0.005	4.195	4.18	1.958	0.003	1.961	1.952	0.443	0.004	0.45	0.437
7.156	404.4	385.333	397.423	4.182	0.006	4.191	4.177	1.947	0.003	1.954	1.943	0.444	0.009	0.456	0.433
3.911	404.7	393.835	402.451	4.182	0.009	4.197	4.17	1.953	0.007	1.964	1.942	0.443	0.005	0.451	0.435
20.47	443.5	393.527	417.357	4.195	0.004	4.204	4.188	1.954	0.005	1.963	1.943	0.446	0.009	0.459	0.43
1.305	452.1	447.79	451.234	4.189	0.006	4.196	4.178	1.958	0.002	1.962	1.953	0.445	0.009	0.455	0.429
0.139	452.5	452.109	452.306	4.193	0.004	4.2	4.183	1.958	0.002	1.961	1.954	0.445	0.003	0.45	0.44
18.04	493	452.076	471.205	4.197	0.008	4.207	4.183	1.953	0.007	1.965	1.945	0.446	0.003	0.451	0.442
6.862	505.8	486.613	496.698	4.191	0.007	4.199	4.181	1.95	0.005	1.959	1.945	0.446	0.005	0.454	0.438
4.876	508.5	496.209	501.025	4.193	0.006	4.202	4.183	1.959	0.009	1.971	1.946	0.445	0.007	0.453	0.435
7.309	517.7	497.594	507.367	4.191	0.004	4.195	4.185	1.956	0.004	1.962	1.95	0.452	0.007	0.462	0.44
3.691	507.4	496.077	505.372	4.195	0.004	4.203	4.19	1.965	0.006	1.974	1.955	0.444	0.007	0.458	0.431
12.97	526	493.825	507.515	4.191	0.006	4.202	4.182	1.959	0.008	1.968	1.942	0.444	0.007	0.454	0.437
7.876	560.6	532.311	548.398	4.186	0.006	4.195	4.179	1.943	0.005	1.952	1.934	0.436	0.007	0.447	0.425
4.757	561.3	550.041	553.45	4.188	0.007	4.197	4.175	1.96	0.006	1.971	1.951	0.451	0.006	0.461	0.444
0.187	550.9	550.292	550.569	4.185	0.011	4.206	4.172	1.956	0.006	1.967	1.946	0.437	0.007	0.446	0.424
14.08	584.8	550.693	564.541	4.187	0.011	4.208	4.176	1.968	0.005	1.976	1.96	0.448	0.004	0.453	0.441
5.965	606.8	589.116	598.175	4.187	0.004	4.193	4.179	1.959	0.004	1.965	1.953	0.442	0.003	0.446	0.436
4.654	607.7	597.238	603.49	4.197	0.018	4.237	4.183	1.95	0.016	1.968	1.919	0.443	0.011	0.457	0.427
11.96	631.3	597.743	612.921	4.194	0.006	4.202	4.187	1.962	0.011	1.986	1.953	0.446	0.016	0.478	0.428
7.381	655.7	632.902	644.836	4.19	0.007	4.2	4.182	1.967	0.009	1.986	1.953	0.45	0.008	0.462	0.431
6.634	663.6	644.04	652.346	4.19	0.006	4.201	4.18	1.967	0.01	1.981	1.954	0.447	0.01	0.463	0.433
11.3	681.5	651.6	664.733	4.198	0.004	4.203	4.191	1.965	0.007	1.974	1.952	0.443	0.009	0.457	0.429

2.992	690.3	680.275	685.3	4.191	0.007	4.2	4.182	1.968	0.003	1.975	1.964	0.446	0.008	0.457	0.437
7.391	681.6	655.665	672.269	4.195	0.004	4.205	4.191	1.961	0.005	1.97	1.952	0.441	0.004	0.447	0.434
15.01	686	646.326	660.608	4.184	0.009	4.194	4.168	1.966	0.004	1.972	1.96	0.44	0.006	0.446	0.432
6.649	707.7	687.867	699.791	4.192	0.008	4.2	4.178	1.968	0.007	1.977	1.954	0.447	0.007	0.458	0.435
7.119	709.7	689.394	701.817	4.195	0.005	4.201	4.183	1.967	0.004	1.974	1.961	0.447	0.007	0.461	0.438
4.887	696.9	685.637	691.301	4.192	0.005	4.198	4.186	1.968	0.006	1.976	1.959	0.442	0.008	0.456	0.434
11.88	725	695.903	708.208	4.193	0.004	4.199	4.186	1.97	0.003	1.975	1.963	0.452	0.008	0.46	0.438
7.169	751.4	729.166	741.976	4.194	0.005	4.203	4.187	1.97	0.006	1.979	1.96	0.439	0.005	0.448	0.431
8.125	742.1	718.949	733.302	4.192	0.005	4.201	4.187	1.967	0.005	1.976	1.959	0.44	0.005	0.448	0.435
33.4	743.3	632.591	709.551	4.189	0.004	4.195	4.183	1.975	0.005	1.981	1.969	0.443	0.011	0.468	0.431
68.51	735	515.505	647.269	4.195	0.005	4.203	4.188	1.969	0.005	1.983	1.964	0.437	0.006	0.45	0.428
87.33	476.5	240.512	300.229	4.193	0.006	4.203	4.183	1.968	0.009	1.983	1.958	0.443	0.003	0.449	0.438

Data Pengujian Generator Berbeban

Parameter Uji															
RPM				Tegangan AC											
				L1				L2				L3			
σ	Max	Min	Mean	Mean	σ	Max	Min	Mean	σ	Max	Min	Mean	σ	Max	Min
91.682	323.855	68.962	254.677	0.745	0.064	0.857	0.677	-0.701	0.502	0.091	-1.365	0.51	0.502	1.265	-0.054
9.232	279.45	253.184	262.49	0.823	0.059	0.935	0.762	0.099	0.097	0.221	-0.071	1.435	0.15	1.617	1.185
0.141	254.191	253.819	253.978	0.824	0.041	0.897	0.764	0.143	0.189	0.405	-0.133	1.534	0.102	1.689	1.325
12.911	289.251	254.338	267.566	0.953	0.094	1.075	0.81	0.212	0.135	0.396	0.024	1.608	0.092	1.698	1.422
2.675	302.962	294.658	301.367	1.038	0.069	1.17	0.984	0.613	0.14	0.803	0.451	1.872	0.124	2.031	1.716

0.165	303.534	303.006	303.176	1.151	0.163	1.444	0.99	0.84	0.055	0.931	0.763	1.97	0.092	2.086	1.796
12.038	330.57	303.163	317.745	1.192	0.085	1.312	1.038	0.869	0.1	0.996	0.709	2.058	0.128	2.187	1.808
0.199	331.228	330.633	330.971	1.186	0.097	1.357	1.056	1.066	0.045	1.127	0.981	2.263	0.065	2.354	2.164
9.605	361.573	332.431	350.248	1.17	0.084	1.346	1.06	1.147	0.079	1.263	1.013	2.488	0.127	2.696	2.313
0.245	354.043	353.302	353.724	1.228	0.083	1.319	1.064	1.426	0.099	1.54	1.231	2.586	0.057	2.7	2.508
15.294	390.747	354.182	372.321	1.238	0.068	1.346	1.144	1.557	0.099	1.729	1.432	2.788	0.12	2.944	2.581
3.099	407.624	397.608	406.115	1.289	0.109	1.514	1.165	1.831	0.07	1.936	1.731	3.105	0.119	3.28	2.962
0.236	407.679	406.999	407.291	1.305	0.128	1.437	1.063	1.966	0.063	2.101	1.884	3.31	0.134	3.559	3.206
15.06	444.276	406.645	422.08	1.435	0.052	1.535	1.399	2.067	0.096	2.233	1.95	3.308	0.129	3.526	3.159
4.835	455.765	444.294	449.364	1.457	0.025	1.491	1.423	2.377	0.094	2.555	2.293	3.624	0.047	3.712	3.558
4.039	454.749	442.901	452.124	1.478	0.026	1.523	1.433	2.469	0.044	2.557	2.401	3.732	0.063	3.81	3.631
15.631	493.502	454.79	471.774	1.57	0.065	1.68	1.469	2.573	0.146	2.799	2.41	3.82	0.18	4.087	3.574
4.724	507.044	496.104	500.888	1.572	0.108	1.761	1.404	2.926	0.042	2.972	2.865	4.224	0.122	4.433	4.103
4.578	506.434	495.326	502.93	1.654	0.046	1.691	1.542	2.977	0.042	3.025	2.912	4.272	0.03	4.344	4.25
16.961	546.548	506.295	522.011	1.691	0.016	1.72	1.668	3.132	0.121	3.35	3.022	4.367	0.126	4.595	4.26
4.416	560.275	548.112	553.853	1.771	0.023	1.801	1.732	3.459	0.036	3.525	3.389	4.718	0.035	4.761	4.644
4.722	560.555	548.87	554.531	1.82	0.018	1.844	1.788	3.449	0.055	3.541	3.385	4.697	0.055	4.782	4.619
4.544	559.602	547.888	552.282	1.801	0.017	1.831	1.777	3.401	0.026	3.454	3.362	4.648	0.034	4.708	4.606
13.043	594.246	559.623	573.069	1.806	0.02	1.833	1.778	3.513	0.088	3.675	3.411	4.783	0.116	4.975	4.666
3.744	604.742	594.958	597.781	1.88	0.018	1.899	1.84	3.78	0.027	3.832	3.739	5.027	0.029	5.081	4.981
0.811	607.438	605.229	606.749	1.913	0.014	1.935	1.898	3.857	0.016	3.878	3.834	5.098	0.006	5.111	5.091
13.059	639.097	607.285	619.005	1.935	0.009	1.95	1.919	3.903	0.091	4.052	3.808	5.145	0.087	5.329	5.076
5.9	654.005	639.904	648.179	1.996	0.027	2.026	1.959	4.167	0.044	4.211	4.094	5.404	0.044	5.456	5.339
1.302	657.587	654.236	655.599	2.033	0.008	2.044	2.023	4.215	0.013	4.234	4.199	5.449	0.008	5.462	5.438

13.341	688.497	657.207	668.947	2.053	0.023	2.091	2.023	4.272	0.084	4.417	4.196	5.511	0.094	5.688	5.432
6.11	702.71	688.722	697.34	2.117	0.024	2.15	2.069	4.558	0.053	4.617	4.47	5.777	0.054	5.842	5.701
0.365	704.011	702.849	703.573	2.146	0.01	2.161	2.128	4.615	0.014	4.65	4.603	5.838	0.006	5.85	5.828
14.98	741.684	703.788	716.057	2.159	0.013	2.186	2.145	4.677	0.101	4.877	4.604	5.903	0.106	6.117	5.818
4.749	754.041	742.31	749.651	2.252	0.027	2.277	2.191	5.014	0.053	5.07	4.913	6.221	0.049	6.274	6.155
7.557	773.288	754.102	759.11	2.283	0.011	2.303	2.266	5.088	0.043	5.181	5.046	6.303	0.048	6.391	6.25
7.37	798.954	776.511	788.102	2.343	0.025	2.38	2.305	5.318	0.071	5.403	5.195	6.543	0.064	6.639	6.441
0.324	803.14	802.075	802.699	2.394	0.008	2.41	2.378	5.459	0.01	5.473	5.437	6.672	0.013	6.691	6.654
124.609	803.048	461.424	716.192	2.334	0.115	2.421	2.071	5.016	0.671	5.457	3.549	6.194	0.705	6.657	4.665

Parameter Uji															
RPM				Arus AC											
				L1				L2				L3			
σ	Max	Min	Mean	Mean	σ	Max	Min	Mean	σ	Max	Min	Mean	σ	Max	Min
91.682	323.855	68.962	254.677	4.102	0.134	4.351	3.947	2.101	0.165	2.421	1.867	0.707	0.111	0.847	0.439
9.232	279.45	253.184	262.49	4.229	0.068	4.4	4.149	2.04	0.136	2.25	1.84	0.647	0.055	0.713	0.517
0.141	254.191	253.819	253.978	4.274	0.297	4.77	3.98	1.91	0.123	2.096	1.72	0.643	0.088	0.73	0.46
12.911	289.251	254.338	267.566	4.291	0.088	4.437	4.118	1.996	0.176	2.207	1.775	0.668	0.034	0.727	0.617
2.675	302.962	294.658	301.367	4.222	0.118	4.415	4.092	2.085	0.108	2.285	1.999	0.675	0.041	0.742	0.625
0.165	303.534	303.006	303.176	4.137	0.079	4.292	4.006	2.198	0.208	2.532	1.98	0.68	0.059	0.741	0.559
12.038	330.57	303.163	317.745	4.253	0.129	4.45	4.087	2.178	0.106	2.356	1.991	0.676	0.06	0.739	0.568
0.199	331.228	330.633	330.971	4.258	0.1	4.372	4.062	2.11	0.101	2.293	1.992	0.683	0.031	0.718	0.638
9.605	361.573	332.431	350.248	4.345	0.083	4.476	4.213	1.966	0.147	2.252	1.742	0.722	0.046	0.792	0.651

0.245	354.043	353.302	353.724	4.141	0.118	4.386	3.984	2.094	0.127	2.278	1.907	0.737	0.038	0.797	0.679
15.294	390.747	354.182	372.321	4.057	0.14	4.25	3.853	2.054	0.097	2.187	1.89	0.806	0.04	0.876	0.761
3.099	407.624	397.608	406.115	4.261	0.158	4.586	4.073	2.004	0.138	2.287	1.846	0.758	0.076	0.847	0.633
0.236	407.679	406.999	407.291	4.163	0.063	4.24	4.037	1.921	0.223	2.118	1.519	0.836	0.068	0.971	0.778
15.06	444.276	406.645	422.08	4.192	0.055	4.253	4.061	2.083	0.067	2.213	2.022	0.799	0.03	0.828	0.742
4.835	455.765	444.294	449.364	4.242	0.144	4.45	4.067	2.023	0.05	2.079	1.942	0.805	0.028	0.832	0.761
4.039	454.749	442.901	452.124	4.165	0.06	4.239	4.021	2.019	0.067	2.153	1.928	0.831	0.017	0.85	0.8
15.631	493.502	454.79	471.774	4.289	0.075	4.42	4.212	2.058	0.093	2.21	1.97	0.811	0.05	0.876	0.73
4.724	507.044	496.104	500.888	4.265	0.097	4.425	4.109	1.952	0.147	2.158	1.745	0.863	0.047	0.946	0.774
4.578	506.434	495.326	502.93	4.238	0.03	4.28	4.193	2.013	0.072	2.067	1.833	0.856	0.024	0.892	0.823
16.961	546.548	506.295	522.011	4.206	0.017	4.229	4.181	2.053	0.021	2.096	2.026	0.879	0.026	0.918	0.843
4.416	560.275	548.112	553.853	4.209	0.01	4.228	4.193	2.05	0.022	2.077	2.009	0.89	0.014	0.908	0.866
4.722	560.555	548.87	554.531	4.209	0.015	4.236	4.193	2.031	0.016	2.053	2.007	0.88	0.004	0.885	0.872
4.544	559.602	547.888	552.282	4.216	0.014	4.241	4.193	2.028	0.025	2.058	1.985	0.881	0.011	0.896	0.858
13.043	594.246	559.623	573.069	4.209	0.006	4.218	4.198	2.042	0.019	2.062	2.015	0.905	0.02	0.939	0.877
3.744	604.742	594.958	597.781	4.207	0.012	4.224	4.183	2.048	0.008	2.063	2.034	0.904	0.008	0.916	0.894
0.811	607.438	605.229	606.749	4.212	0.013	4.232	4.19	2.049	0.009	2.059	2.031	0.911	0.01	0.926	0.895
13.059	639.097	607.285	619.005	4.218	0.013	4.239	4.199	2.05	0.011	2.071	2.032	0.922	0.014	0.945	0.903
5.9	654.005	639.904	648.179	4.224	0.012	4.239	4.203	2.043	0.017	2.068	2.022	0.934	0.012	0.948	0.913
1.302	657.587	654.236	655.599	4.24	0.014	4.259	4.219	2.044	0.007	2.055	2.034	0.932	0.006	0.942	0.924
13.341	688.497	657.207	668.947	4.227	0.003	4.233	4.222	2.056	0.009	2.074	2.042	0.934	0.012	0.951	0.917
6.11	702.71	688.722	697.34	4.216	0.013	4.236	4.199	2.067	0.015	2.097	2.05	0.952	0.008	0.961	0.937
0.365	704.011	702.849	703.573	4.217	0.008	4.228	4.204	2.059	0.011	2.075	2.036	0.955	0.004	0.963	0.947
14.98	741.684	703.788	716.057	4.204	0.006	4.216	4.196	2.07	0.01	2.086	2.057	0.981	0.019	1.005	0.956

4.749	754.041	742.31	749.651	4.221	0.009	4.234	4.208	2.075	0.01	2.088	2.058	0.972	0.016	0.998	0.952
7.557	773.288	754.102	759.11	4.215	0.005	4.224	4.207	2.07	0.01	2.09	2.055	0.992	0.013	1.015	0.973
7.37	798.954	776.511	788.102	4.22	0.014	4.233	4.198	2.067	0.011	2.091	2.051	1.004	0.017	1.026	0.976
0.324	803.14	802.075	802.699	4.23	0.008	4.247	4.22	2.074	0.012	2.098	2.061	0.997	0.007	1.006	0.989
124.609	803.048	461.424	716.192	4.212	0.014	4.229	4.189	2.047	0.029	2.09	2	0.929	0.106	1.025	0.728

