

**RANCANG BANGUN GENERATOR SINKRON  
MAGNET PERMANEN FLUKS AKSIAL DOUBLE SIDE  
SINGLE STATOR 1 KVA**

**T H E S I S**

Disusun oleh :

Nama : POEDJI OETOMO  
NIM : 13520007  
Konsentrasi : Tenaga Listrik



**PROGRAM STUDI MAGISTER TEKNIK ELEKTRO  
SEKOLAH PASCA SARJANA  
INSTITUT SAINS DAN TEKNOLOGI NASIONAL  
JAKARTA  
2015**

**RANCANG BANGUN GENERATOR SINKRON  
MAGNET PERMANEN FLUKS AKSIAL DOUBLE SIDE  
SINGLE STATOR 1 KVA**

**THESIS**

*Diajukan untuk memenuhi persyaratan pada Kurikulum  
Program Studi Magister Teknik Elektro - Sekolah Pascasarjana  
Institut Sains dan Teknologi Nasional  
Jakarta*



Disusun oleh :

Nama : POEDJI OETOMO  
NIM : 13520007  
Konsentrasi : Tenaga Listrik

Jakarta, Desember 2015

Disetujui oleh :



**Prof. Dr. Mashah R.T. Siregar, APU**  
Pembimbing

**LEMBAR PERSETUJUAN**

**RANCANG BANGUN GENERATOR SINKRON  
MAGNET PERMANEN FLUKS AKSIAL DOUBLE SIDE  
SINGLE STATOR 1 KVA**

Disusun oleh :

Nama : POEDJI OETOMO  
NIM : 13520007  
Konsentrasi : Tenaga Listrik

*Telah dipertahankan di depan Dewan Penguji  
Pada hari Selasa, 29 Desember 2015  
Susunan Dewan Penguji :*

Ketua : Prof. Dr. Masbah R.T. Siregar, APU

Anggota : Prof. Dr. Ir. Didik Notosudjono, MSc

: Dr. Ir. Hendro Tjahyono, DEA

: Dr. Ir. Djoko Hari Nugroho, MT

*Jagore*  
.....

*Panung*  
.....

*[Signature]*  
.....

*[Signature]*  
.....

*Thesis ini telah diterima sebagai salah satu persyaratan  
untuk memperoleh gelar Magister Teknik*

Jakarta, 29 Desember 2015



Prof. Dr. Masbah R.T. Siregar, APU  
Kepala Program Studi Magister Teknik Elektro

## PERNYATAAN KEASLIAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : **Poedji Octomo**  
NIM : **13520007**  
Program Studi : **Magister Teknik Elektro**  
Konsentrasi : **Tenaga Listrik**

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa Thesis yang telah saya buat ini dengan judul **"RANCANG BANGUN GENERATOR SINKRON MAGNET PERMANEN FLUKS AKSIAL DOUBLE SIDE SINGLE STATOR 1 KVA"** adalah benar hasil karya saya sendiri dan bukan merupakan duplikasi, serta tidak mengutip sebagian atau seluruhnya dari karya orang lain, kecuali yang telah disebutkan sumbernya.

Jakarta, 29 Desember 2015

Penulis,



Poedji Octomo

## KATA PENGANTAR

Alhamdulillah segala puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT karena berkat limpahan rahmat dan hidayah-Nya penulis dapat menyelesaikan penyusunan makalah thesis ini

Penulisan makalah ini merupakan salah satu persyaratan untuk menyelesaikan pendidikan Strata 2 pada Sekolah Pasca Sarjana Teknik Elektro Institut Sains dan Teknologi Nasional Jakarta. Dalam penyusunan makalah ini, penulis banyak memperoleh saran, bantuan dan bimbingan. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada :

1. Bapak Prof. Dr. Masbah R.T. Siregar, APU selaku Kepala Program Studi Magister Teknik Elektro ISTN.dan juga sebagai pembimbing thesis.
2. Bapak Prof. Dr. Ir. Didik Notosudjono, MSc selaku dosen Pasca Sarjana yang memberikan saran serta masukan pada sidang thesis
3. Bapak Dr. Ir. Hendro Tjahyono, DEA selaku dosen Pasca Sarjana yang memberikan saran serta masukan pada sidang thesis
4. Bapak Dr. Ir. Djoko Hari Nugroho, MT selaku dosen Pasca Sarjana yang memberikan saran serta masukan pada sidang thesis
5. Bapak Ir. MD. Trisno, MT, yang mengizinkan dan memberikan dukungan dalam pembuatan alat di laboratorium perakitan mesin Institut Sains dan Teknologi Nasional
6. Bapak dan ibu staf pengajar sekolah pasca sarjana Institut Sains dan Teknologi Nasional serta rekan-rekan semua pihak yang selalu membantu dan memberikan semangat

Penulis telah berusaha seoptimal mungkin dalam penyusunan makalah ini, namun demikian saran dan kritik yang membangun diperlukan untuk penulisan yang lebih baik.

Jakarta, 30 Desember 2015

Poedji Oetomo

# RANCANG BANGUN GENERATOR SINKRON MAGNET PERMANEN FLUKS AKSIAL DOUBLE SIDE SINGLE STATOR 1 KVA

## Abstrak

Berbagai penelitian telah banyak dilakukan untuk memanfaatkan energy primer dikonversi menjadi energi listrik. Generator merupakan bagian dari peralatan pembangkit listrik yang berfungsi mengkonversi energi mekanik menjadi energi listrik.

Pada pembahasan penelitian ini menyajikan hasil rancangan, pembuatan dan pengujian dari model generator fluks axial magnet permanen type disc. Flux medan magnet berasal dari magnet permanen yang ditempatkan pada disc sebagai rotor dan arahnya sejajar dengan poros. Kontruksi generator dirancang dengan sisi ganda atau duble side dan ditengahnya terdapat stator yang dibuat dengan dicetak dari bahan resin . Pada stator terdapat kumparan-kumparan tembaga tanpa inti besi dengan bentuk persegi sama dengan bentuk magnet yang digunakan. Bila rotor berputar maka kumparan pada stator akan dikenai flux medan magnet yang berubah terahap waktu sehingga akan timbul tegangan induksi pada kumparan.

. Bagaimana output dari generator yang dihasilkan maka perlu dilakukan pengujian dengan mengukur tegangan, frekwensi dan daya yang dihasilkan..Pengujian yang dilakukan adalah tanpa beban ataupun diberi beban peralatan listrik

## PLAN TO GET UP AXIAL-FLUX PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS GENERATOR DOUBLE SIDE SINGLE STATOR 1 KVA

### *Abstract*

*Many research been develop now day for conversion primary energy to electrical power. One of the equipmenst are electrical generator unit.*

*This research is proposed to design, built and tested genrator model with axial flux permanent disc type. Electromagnetic field installed on rotor is built from permanent magnet is put on the disc at the rotor bar and the position is line with generator shaft. Generator construction is designed with double side or single side enslosure with the stator winding compartment in the midlle position and encapsulate by cast resin.*

*Stator winding built from copper coil without core, stator model is cube construction instead of round model, it's the same construction with magnet construction also cube. Whenever rotor turn on, stator winding will got induction from magnetic flux and the magnetic flux will cange. This process will generate voltage output from stator winding.*

*To verify and check generator output power, voltage, frequency is required further testing with load or no load test*

## DAFTAR ISI

Halaman Judul .....	i
Lembar Persetujuan .....	ii
Pernyataan Keaslian .....	iii
Kata Pengantar .....	iv
Abstrak .....	v
Abstract .....	vi
Daftar Isi .....	vii
Daftar Tabel .....	ix
Daftar Gambar .....	x
<b>BAB I. PENDAHULUAN</b> .....	<b>1</b>
I.1 Latar Belakang .....	1
I.2 Rumusan Masalah .....	2
I.3 Tujuan Penelitian .....	2
I.4 Ruang Lingkup .....	2
I.5 Manfaat Penelitian .....	2
<b>BAB II. TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	<b>3</b>
II.1 Generator ac dan prinsip kerja .....	3
II.2 Generator Sinkron Magnet Permanen .....	5
II.2.1 Generator sinkron magnet permanen Fluks Axial .....	6
II.2.2 Stator .....	8
II.2.3 Rotor .....	10
II.2.4 Prinsip Kerja Generator Axial .....	12
II.2.5 Magnet permanen .....	12
II.3 Rangkaian Listrik Tiga Fasa .....	15



<b>BAB III. METODELOGI PENELITIAN</b> .....	20
III.1 Perancangan rotor .....	21
III.2 Perancangan stator .....	25
III.3 Material bahan .....	28
III.4 Pembuatan generator fluks axial .....	30
<b>BAB IV. PENGUJIAN DAN ANALISA DATA</b> .....	34
IV.1 Tegangan keluaran hasil rancangan berdasarkan teori .....	37
IV.2 Pengujian tanpa beban .....	38
IV.3 Pengujian dengan beban lampu pijar hubung star .....	41
IV.4 Pengujian dengan besar beban bervariasi hubung star .....	43
IV.5 Pengujian beban hanya pada 1 fasa .....	45
IV.6 Pengujian dengan beban lampu pijar hubung delta .....	46
IV.7 Pengujian dengan besar beban bervariasi hubung delta .....	47
IV.8 Pengujian dengan beban motor listrik hubung delta .....	49
<b>BAB V. KESIMPULAN</b> .....	52
Daftar Pustaka .....	53

Lampiran-lampiran

## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Perbandingan jumlah magnet dan jumlah kumparan stator .....	25
Tabel 4.1	Hasil perhitungan tegangan keluaran generator .....	37
Tabel 4.2	Data hasil pengukuran tegangan keluaran hubung star .....	38
Tabel 4.3	Data hasil pengukuran tegangan $V_{L1}$ keluaran hubung delta .....	40
Tabel 4.4	Data hasil pengukuran tegangan, arus dan faktor daya untuk beban lampu pijar hubung star .....	41
Tabel 4.5	Data hasil pengukuran daya dengan perubahan kecepatan rotor untuk beban lampu pijar hubung star .....	41
Tabel 4.6	Data hasil pengukuran tegangan, arus dan faktor daya dengan besar beban bertambah pada hubung star .....	43
Tabel 4.7	Data hasil pengukuran daya 3 fasa dengan besar beban bertambah pada hubung star .....	43
Tabel 4.8	Persentase daya 3 fasa yang dihasilkan terhadap daya diperlukan pada setiap beban hubung star .....	44
Tabel 4.9	Data hasil pengukuran dengan beban lampu pijar pada fasa c .....	45
Tabel 4.10	Data hasil pengukuran tegangan, arus dan faktor daya untuk beban lampu pijar hubung delta .....	46
Tabel 4.11	Data hasil pengukuran daya aktif (P) dan daya semu (VA) untuk beban lampu pijar hubung delta .....	46
Tabel 4.12	Data hasil pengukuran tegangan, arus dan faktor daya dengan besar beban bertambah pada hubung delta .....	48
Tabel 4.13	Data hasil pengukuran daya 3 fasa dengan besar beban bertambah pada hubung delta .....	48
Tabel 4.14	Persentase daya 3 fasa dihasilkan terhadap daya diperlukan per tingkatan besar beban hubung delta .....	49
Tabel 4.15	Data hasil pengukuran tegangan dan arus antara fasa untuk beban motor listrik 3 fasa hubung delta .....	50
Tabel 4.16	Data hasil pengukuran daya aktif (P) dan daya semu (VA) untuk beban motor listrik 3 fasa hubung delta .....	50

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Prinsip Kerja Generator ac .....	4
Gambar 2.2	Topologi generator RFPM dan AFPM .....	5
Gambar 2.3	Generator axial satu stator dan satu rotor .....	6
Gambar 2.4	Generator axial satu stator dan dua rotor .....	7
Gambar 2.5	Generator axial dua stator dan satu rotor .....	7
Gambar 2.6	Generator axial dengan multi disc .....	8
Gambar 2.7	Kumparan non-overlapping .....	8
Gambar 2.8	Kumparan overlapping .....	9
Gambar 2.9	Susunan magnet permanen pada rotor .....	11
Gambar 2.10	Garis gaya magnet .....	15
Gambar 2.11	Gelombang tegangan 3 fasa .....	16
Gambar 2.12	Diagram fasor tegangan 3 fasa .....	16
Gambar 2.13	Hubungan bintang / star ( Y ) .....	17
Gambar 2.14	Diagram fasor Tegangan pada hubung bintang .....	17
Gambar 2.15	Hubungan delta .....	18
Gambar 3.1	Diagram alir perancangan dan pembuatan generator fluks axial .....	20
Gambar 3.2	Kontruksi rancangan generator fluks aksial .....	21
Gambar 3.3	Rancangan susunan magnet pada disc rotor .....	22
Gambar 3.4	Susunan beberapa manet dari kedua rotor .....	23
Gambar 3.5	Grafik rapat fluks magnet di sepanjang garis tengah diantara 2 rotor .....	24
Gambar 3.6	Rancangan kumparan .....	26
Gambar 3.7	Rancangan susunan kumparan pada stator .....	27
Gambar 3.8	Kawat Email .....	28
Gambar 3.9	Tesla meter dan Magnet Permanen .....	29
Gambar 3.10	Plat besi bentuk disk sebagai rotor .....	29
Gambar 3.11	Resin dan hardener .....	29
Gambar 3.12	Blok diagram pembuatan generator fluks axial .....	30

Gambar 3.13	Susunan magnet pada disc rotor .....	31
Gambar 3.14	Pembuatan dan pengujian awal pada kumparan .....	31
Gambar 3.15	9 buah kumparan yang sudah jadi .....	32
Gambar 3.16	Stator terbuat dari resin didalamnya terdapat 9 kumparan .....	32
Gambar 3.17	Susunan stator dan rotor serta ukuran celah udara dalam mm .....	33
Gambar 3.18	Generator fluks axial hasil rancangan .....	33
Gambar 4.1	Susunan peralatan pada pengujian generator .....	35
Gambar 4.2	Skema rangkaian pengukuran daya 3 fasa .....	36
Gambar 4.3	Grafik tegangan fungsi dari putaran rotor berdasarkan teori .....	37
Gambar 4.4	Grafik hasil pengukuran tegangan $V_a$ , $V_b$ dan $V_c$ serta frekwensi dari keluaran generator hubung star .....	38
Gambar 4.5	Tampilan pada layar osciloskop dari tegangan $V_a$ , dan $V_b$ keluaran generator hubung star .....	39
Gambar 4.6	Tampilan pada layar osciloskop dari tegangan $V_b$ , dan $V_c$ keluaran generator hubung star .....	39
Gambar 4.7	Grafik hasil pengukuran tegangan $V_{LL}$ dan frekwensi dari keluaran generator hubung delta .....	40
Gambar 4.8	Grafik pengukuran tegangan dengan beban lampu pijar hubung star .....	42
Gambar 4.9	Grafik pengukuran daya 3 fasa dengan beban lampu pijar hubung star .....	42
Gambar 4.10	Grafik perbandingan antara daya yang diperlukan dan daya yang dihasilkan generator hubung star .....	44
Gambar 4.11	Grafik hasil pengukuran tegangan $V_a$ , $V_b$ dan $V_c$ dengan beban lampu pijar hubung star hanya pada fasa c .....	45
Gambar 4.12	Grafik hasil pengukuran tegangan dan arus pada beban lampu pijar hubung delta .....	47
Gambar 4.13	Grafik pengukuran daya 3 fasa dengan beban lampu pijar hubung delta .....	47
Gambar 4.14	Grafik perbandingan antara daya yang diperlukan dan daya yang dihasilkan generator hubung delta .....	48

Gambar 4.15	Grafik hasil pengukuran tegangan dan arus dengan beban motor listrik hubung delta .....	51
Gambar 4.16	Grafik hasil pengukuran daya 3 fasa dengan beban motor listrik hubung delta .....	51

## BAB I PENDAHULUAN

### I.1. LATAR BELAKANG

Semakin besarnya kebutuhan energi listrik telah mendorong berbagai pihak untuk mencari solusi dalam mengatasi masalah ini. Besarnya kebutuhan energi listrik yang diperlukan saat ini menunjukkan bahwa energi listrik sudah menjadi suatu kebutuhan pokok yang sangat penting, misalnya untuk keperluan rumah tangga sehari-hari

Belum meratanya distribusi tenaga listrik maka diperlukan alternatif untuk mendapatkan energi listrik. Banyak sekali penelitian yang telah dilakukan untuk mencari sumber energi alternatif selain minyak bumi dan batubara. Pemanfaatan energi matahari, angin dan air sudah banyak dilakukan baik skala kecil maupun besar. Salah satunya adalah pemanfaatan air dan angin. Banyak berbagai pihak membuat kincir angin atau kincir air untuk mendapatkan energi gerak. Selanjutnya dengan generator energi gerak tersebut dikonversi menjadi energi listrik.

Generator listrik adalah sebuah perangkat listrik untuk mengubah energi gerak menjadi energi listrik arus bolak balik. Generator memiliki dua bagian utama, yaitu stator dan rotor. Stator adalah bagian dari generator yang diam sedangkan rotor adalah bagian yang berputar. Dimana terdapat kumparan medan untuk membangkitkan fluks magnet. Umumnya arah fluks magnet pada generator konvensional adalah radial yaitu tegak lurus poros. Pada generator fluks axial type disc arah fluks medan sejajar dengan poros. Ada berbagai macam konstruksi generator flux axial, yang paling sederhana yaitu dengan menggunakan stator tanpa inti besi dan fluks medan dapat menggunakan magnet permanen yang dilekatkan pada rotor berupa disc. Konstruksi yang sederhana ini dapat

diaplikasikan sebagai alternatif untuk memenuhi kebutuhan daya listrik pada rumah tinggal yang jauh dari pusat beban listrik.

## **I.2. Rumusan Masalah**

Adapun permasalahan yang diambil yaitu pembuatan generator magnet permanen meliputi :

- Rancang bangun / pembuatan generator tipe flux axial menggunakan magnet permanen dengan dua rotor dan satu stator'.
- Melakukan pengujian dengan memberikan beban listrik dan mengukur tegangan serta daya listrik

## **I.3. Tujuan Penelitian**

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui keluaran tegangan dan daya listrik generator fluks aksial tanpa beban maupun berbeban listrik

## **I.4. Ruang Lingkup**

- Pengujian dilakukan dalam laboratorium dengan menggunakan motor listrik sebagai sumber gerak generator
- Bentuk kumparan yang digunakan persegi panjang sesuai dengan bentuk magnet
- Sumber fluks magnet adalah magnet permanen dengan jumlah 12 per disk rotor

## **I.5. Manfaat Penelitian**

- Diharapkan dari hasil rancang bangun generator fluks axial ini bermanfaat bagi perkembangan desain generator putaran rendah dan dapat diaplikasikan pada daerah-daerah yang belum mendapatkan listrik

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

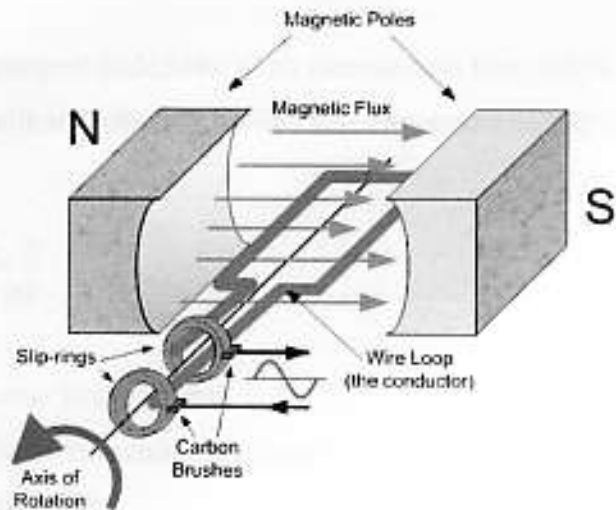
#### **II.1 Generator ac**

Generator adalah sebuah perangkat listrik untuk mengubah energi gerak menjadi energi listrik arus bolak balik. Arus bolak balik adalah nilai arus secara periodik akan bernilai positif dan negatif yang memiliki nilai frekwensi tertentu. Generator Arus Bolak-balik sering disebut juga sebagai generator AC (alternating current). Kontruksi generator terdiri dari dua bagian utama, yaitu Stator dan rotor. Stator merupakan bagian diam dari generator. Pada stator terdapat kumparan yang mengeluarkan tegangan bolak-balik. Sedangkan rotor merupakan bagian bergerak sebagai sumber medan magnet yang menginduksikan ke stator. Pada generator sinkron jumlah putaran rotornya sama dengan jumlah putaran medan magnet pada stator Generator arus bolak-balik dibagi menjadi dua jenis, Generator ac 1 fasa dan 3 fasa. Generator ac 3 fasa pada stator terdapat 3 kelompok kumparan menghasilkan tegangan 3 fasa dimana perbedaan sudut listrik antara fasa 120 derajat. Sedangkan generator ac 1 fasa hanya ada 1 kelompok kumparan sehingga tegangan yang dihasilkan hanya 1 fasa.

#### **Prinsip Generator ac [1] [13] [15]**

Rotor dari generator akan diputar oleh penggerak mula, menghasilkan medan magnet putar di dalam mesin. Medan magnet putar menyebabkan medan magnet yang melingkupi kumparan stator berubah secara kontinu. Prinsip dasar generator arus bolak-balik menggunakan hukum Faraday yang menyatakan jika sebatang penghantar berada pada medan magnet yang berubah-ubah, maka pada penghantar tersebut akan terbentuk gaya gerak listrik. Demikian pula halnya jika kawat atau kumparan konduktor tersebut digerak-gerakan dalam medan magnet yang tetap. Besarnya tegangan atau ggl yang timbul pada kawat atau kumparan konduktor sebanding dengan besarnya perubahan fluks magnet yang terhadap waktu, dan dituliskan dalam bentuk persamaan :





Gambar 2.1 Prinsip Kerja Generator ac [15]

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi}{dt} \dots\dots\dots (2.1)$$

Dengan :

- $\varepsilon$  = Tegangan induksi (V)
- $N$  = Jumlah lilitan
- $\Phi$  = fluks magnet (weber)
- $t$  = Waktu (det)

Tanda minus (-) menunjukkan bahwa ggl induksi melawan perubahan yang dihasilkan ggl induksi itu sendiri. Hal ini dikenal sebagai Hukum Lenz. Bila terdapat kumparan terdiri N belitan berada dalam medan magnet putar dengan kecepatan sudut  $\omega$  maka medan magnet yang melingkupi kumparan berubah secara kontinu sehingga besarnya tegangan induksi  $\varepsilon$  pada kumparan adalah :

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi}{dt}$$

$$\varepsilon = -N \cdot \frac{d(\Phi \cdot \cos \omega t)}{dt}$$

$$\varepsilon = \omega \cdot N \cdot \Phi \cdot \sin(\omega t) \dots\dots\dots (2.3)$$

Jumlah kutub magnet pada rotor akan menentukan banyaknya putaran per menit rotor untuk menghasilkan frekuensi listrik yang diinginkan sesuai dengan persamaan (2.4) berikut : [13]

$$f_e = \frac{n_m \cdot P}{120} \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

Dengan :

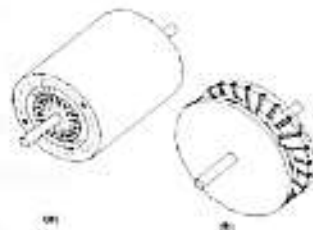
- $f_e$  = frekuensi listrik (hertz)
- $n_m$  = kecepatan mekanik rotor (rpm)
- $P$  = jumlah kutub

Oleh karena itu, untuk menghasilkan frekuensi sebesar 50 Hz, generator berkutub dua harus berputar dengan kecepatan sebesar 3000 rpm, generator berkutub empat dengan kecepatan 1500 rpm, dan seterusnya

## II.2 Generator Sinkron Magnet Permanen

Komponen Utama Generator magnet permanen sama seperti pada umumnya generator, yaitu stator dan rotor. Generator sinkron magnet permanen adalah generator sinkron yang menggunakan material magnet permanen sebagai pengganti kumparan medan pada rotor. Secara garis besar, genertor sinkron magnet permanen dapat dibagi menjadi dua jenis bila dilihat dari arah fluks magnet yang dihasilkan, yaitu : [6]

- Generator magnet permanen dengan fluks radial (Radial Flux Permanent Magnet / RFPM), arah fluksnya radial tegak lurus dengan poros mesin
- Generator magnet permanen dengan fluks aksial (Axial Flux Permanent Magnet / AFPM) arah fluksnya sejajar dengan poros mesin



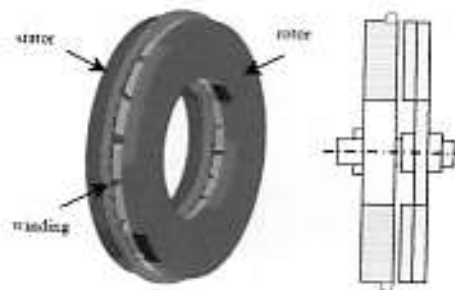
Gambar 2.2 : Topologi generator (a) RFPM , (b) AFPM [6]

### II.2.1. Generator sinkron magnet permanen Fluks Axial [6] [8] [9]

Dengan arah fluks magnet yang sejajar dengan poros maka konstruksi rotor dan stator dapat berupa piringan atau disc. Diantara rotor dan stator terdapat celah udara yang dapat diatur kerapatannya. Dari segi konstruksi, mesin AFPM dapat dibedakan menjadi beberapa tipe berdasarkan jumlah stator dan rotor yang digunakan, diantaranya mesin dengan sisi tunggal (single sided), sisi ganda (double sided), ataupun dengan desain multidisc

#### 1. Rotor dan Stator Tunggal (Cakram Tunggal)

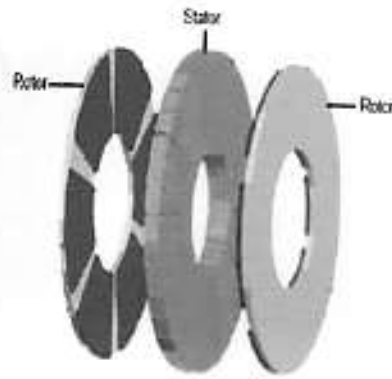
Generator ini terdiri dari sebuah rotor dan sebuah stator yang mempunyai 3 jenis stator yaitu slotted stator, slotless stator, dan saliant pole stator. Rotornya terdiri dari sebuah piringan besi kuat yang terdapat magnet di permukaannya. Mesin AFPM ini biasa digunakan pada torsi kecil. Sehingga sangat efektif, bila digunakan pada turbin angin dengan kapasitas penggerak yang kecil



Gambar 2.3 : Mesin AFPM satu stator dan satu rotor [9]

#### 2. Rotor Ganda dan Stator Tunggal

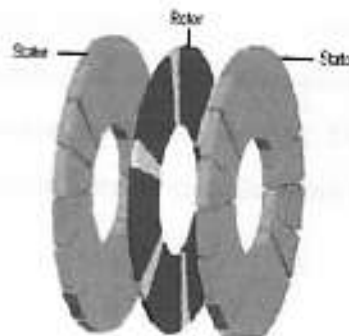
Pada tipe ini terdapat dua buah rotor yang mengapit sebuah stator (rotor eksternal), dapat dibedakan menjadi dua jenis berdasarkan arah fluksnya yaitu tipe N-S dan tipe N-N. Perbedaannya terletak pada pergerakan fluks dan ukuran diameter statornya. Pada tipe N-S, arah fluks akan memotong kumparan secara lurus dari rotor satu ke kutub yang berlawanan pada rotor lainnya. Sedangkan pada tipe N-N arah fluksnya memotong kumparan dan akan kembali ke kutub yang berlawanan pada rotor yang sama.



Gambar 2.4 : Mesin AFPM dua rotor dan satu stator [8]

### 3. Stator Ganda dan Rotor Tunggal

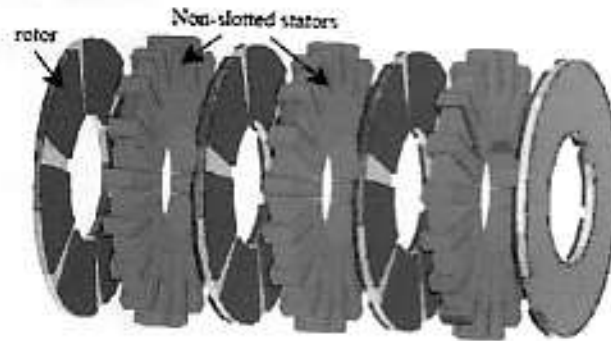
Pada generator axial tipe ini terdapat dua buah stator yang mengapit sebuah rotor (stator eksternal). Pada tipe ini tidak ada variasi tipe N-N atau N-S pada rotornya, tetapi variasi terjadi pada bentuk konstruksi statornya. Tipe ini efektif jika digunakan pada mesin dengan momen inersia yang kecil yang memiliki sedikit besi pada bagaian rotornya.



Gambar 2.5 : Mesin AFPM dua stator dan satu rotor [8]

### 4. Rotor dan Stator banyak

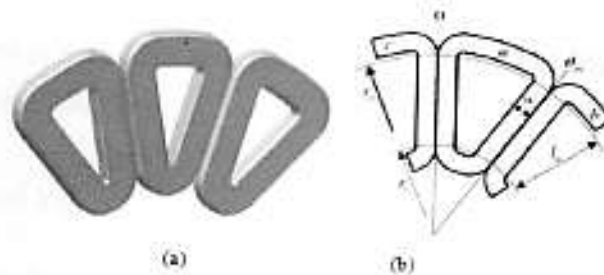
Pada generator tipe ini terdapat lebih dari dua stator atau dua rotor. Tipe ini dibuat untuk memenuhi kebutuhan tenaga listrik yang lebih besar. Hanya saja kekurangan pada generator ini terletak pada torsi yang besar. Generator ini juga memiliki dua tipe yaitu tipe N-N dan tipe N-S pada statornya.



Gambar 2.6 : Generator axial dengan multi disc [9]

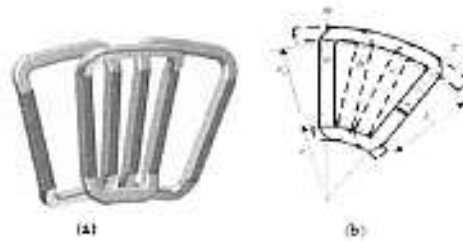
### II.2.2 Stator [3] [6] [8]

Mesin AFPM mempunyai berbagai macam bentuk variasi stator diantaranya adalah stator dengan inti besi berbentuk torus dan stator tanpa inti besi. Stator dengan bentuk torus biasanya digunakan pada penggerak dengan putaran tinggi. Tipe ini memiliki inti besi di tengahnya yang selanjutnya dililitkan oleh kumparan. Untuk 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 didalamnya. Pada stator tanpa inti besi susunan kumparannya terbagi menjadi 2 macam, yaitu tersusun secara overlapping dan non-overlapping. Pada stator dengan susunan kumparannya secara non-overlapping, susunan kumparannya berada di sejajar dan berimpit di samping kumparan lainnya. Dengan susunan fasanya saling berurutan sesuai dengan jumlah kumparan pada stator tersebut.



Gambar 2.7 Kumparan non-overlapping [3]

Pada stator yang susunan kumparannya overlapping susunan kumparannya berada tumpang tindih dengan kumparan yang lainnya namun dengan kumparan fasa yang berbeda.



Gambar 2.8 : Kumparan overlapping [3]

Jumlah gulungan pada stator menentukan besarnya tegangan yang dihasilkan. Gulungan pada kumparan tersebut menentukan apakah yang dikuatkan adalah tegangan atau arus tergantung dari hubungan paralel atau seri pada hubungan kumparannya. Besarnya tegangan per fasa dinyatakan dengan  $E_f$  yang dihasilkan dapat menggunakan persamaan : [6]

$$E_f = \pi \sqrt{2} f N_1 k_{w1} \Phi_f \dots \dots \dots (2.5)$$

Dengan :

- $f$  = frekuensi (Hz)
- $N_1$  = jumlah lilitan per fasa
- $k_{w1}$  = faktor belitan
- $\Phi_f$  = fluks magnet rata-rata (Wb)

Faktor belitan  $k_{w1} = k_{d1} \cdot k_{p1}$  dimana  $k_{d1}$  adalah faktor distribusi dan  $k_{p1}$  adalah pitch factor besarnya adalah

Faktor distribusi  $k_{d1}$

$$k_{d1} = \frac{\sin(\pi / 2m_1)}{q_1 \sin[\pi / (2m_1 q_1)]} \dots \dots \dots (2.6)$$

Dengan :

$m_1$  = jumlah fasa

$q_1$  = Jumlah slot per magnet per fasa

dan

$$k_{pt} = \sin\left(\beta \frac{\pi}{2}\right) \dots\dots\dots (2.7)$$

Dengan

$$\beta = \frac{w_c(r)}{\tau_c(r)} \dots\dots\dots (2.8)$$

Dengan

$w_c$  = jarak coil

$\tau_c$  = jarak magnet

Jumlah slot per magnet per fasa  $q_1$

$$q_1 = \frac{s_1}{2pm_1} \dots\dots\dots (2.9)$$

$s_1$  = slot pada stator

$2p$  = pasang magnet

jumlah coil per fasa  $n_c$

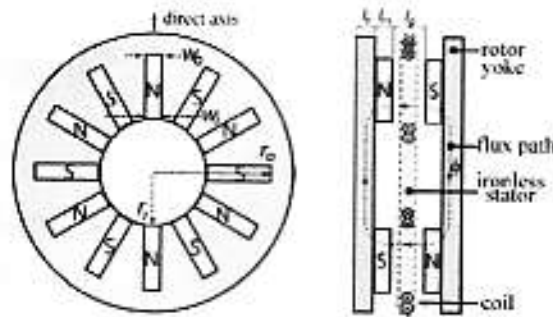
$$n_c = \frac{s_1}{m_1} \dots\dots\dots (2.10)$$

$s_1$  = slot pada stator

$m_1$  = jumlah fasa

### II.2.3. Rotor [4] [6]

Rotor pada generator axial 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 terbuat dari plat besi yang berfungsi sebagai tatakan penyanggah magnet. Pada Gambar (2.9). Polaritas magnet yang mengarah ke stator disusun dengan N-S,



Gambar 2.9 Susunan magnet permanen pada rotor [4]

Untuk menentukan besar fluks rata-rata ditengah antara 2 rotor dapat menggunakan persamaan berikut : [6]

$$\phi_r = B_{mg} \frac{\pi}{8p} D_{out}^2 (1 - k_d^2) \dots\dots\dots(2.11)$$

Dengan :

$B_{mg}$  = B maksimum ditengah antara 2 rotor,

$k_d$  = perbandingan radius dalam magnet dengan radius luar magnet

$$= \frac{R_{in}}{R_{out}} = \frac{D_{in}}{D_{out}}$$

$P$  = jumlah magnet

Distribusi komponen B normal diruang antara 2 rotor dapat ditentukan dengan persamaan

$$B_z(x, z) = B_{m0} \sin(\beta x) \frac{1}{\cosh(\beta t / 2)} \cosh(\beta z) \dots\dots\dots(2.12)$$

Dengan :

$B_{m0}$  = B maksimum di permukaan magnet

$\beta$  =  $2 \pi / \lambda$

$\lambda$  = panjang 1 gelombang

$x$  = posisi

$t$  = jarak antar pole

$z$  = jarak antara pole ke titik tengah



Bmaks di permukaan magnet :

$$B_{mo} = B_r [1 - \exp(-\beta h_m)] \frac{\sin(\pi/n_M)}{\pi/n_M} \dots\dots\dots (2.13)$$

Dengan

$B_r$  = remanent magnet

$h_m$  = tebal magnet

$n_M$  = jumlah vector magnetisasi per gelombang

### II.2.4 Prinsip Kerja Generator Axial

Prinsip kerja generator axial sama dengan prinsip kerja generator sinkron, dimana rotor berfungsi sebagai penghasil medan magnet dan stator sebagai rangkaian jangkar dimana tegangan dibangkitkan. Pada generator axial, konstruksi rotornya terdiri dari magnet permanen sehingga medan magnet bernilai konstan. Besarnya nilai medan magnet tergantung dari jenis magnet permanen yang digunakan. Garis gaya medan magnet yang dihasilkan di rotor akan memotong permukaan kumparan yang ada pada stator. Perpotongan garis gaya medan magnet rotor dengan permukaan kumparan stator akan menghasilkan fluks magnet yang melingkupi kumparan kawat stator. Karena pada rotor menggunakan magnet permanen, maka medan magnet yang dihasilkan adalah konstan pada fungsi waktu. Ketika rotor berputar akan terjadi perubahan pada sudut perpotongan antara garis gaya medan magnet rotor dengan bidang normal kumparan pada stator Hal ini akan menyebabkan perubahan besaran fluks magnet di stator terhadap waktu dan akan menghasilkan tegangan induksi. Dan besarnya sesuai dengan kecepatan putar rotor dan jumlah lilitan kumparan pada stator

### II.2.5 Magnet [6]

Magnet adalah suatu obyek yang mempunyai suatu medan magnet. Magnet dapat menarik benda lain, beberapa benda bahkan tertarik lebih kuat dari yang lain, yaitu bahan logam. Namun tidak semua logam mempunyai daya tarik yang sama

terhadap magnet. Besi dan baja adalah dua contoh materi yang mempunyai daya tarik yang tinggi oleh magnet. Kemagnetan adalah kemampuan benda tersebut untuk menarik benda-benda lain disekitarnya. Berdasarkan sifat kemagnetannya benda dapat digolongkan menjadi : [11]

**Feromagnetik**, yaitu benda yang dapat ditarik dengan kuat oleh magnet. Benda Magnetik yang bukan magnet dapat diolah menjadi magnet, namun setiap benda memiliki tingkat kesulitan yang berbeda jika ingin diubah menjadi magnet. Contoh benda ini adalah besi dan baja

**Paramagnetik**, yaitu benda yang ditarik dengan lemah oleh magnet kuat, contohnya alumunium, tembaga, platina

**Diamagnetik**, yaitu benda menolak magnet, artinya benda ini tidak dapat ditarik oleh magnet, contohnya emas, seng, merkuri

Secara garis besar, terdapat 2 jenis magnet, yaitu magnet Alam dan magnet buatan. Magnet Alam adalah magnet yang sudah memiliki sifat kemagnetan secara alami, artinya tanpa ada campur tangan manusia. Magnet Buatan adalah magnet yang dibuat manusia dari bahan – bahan yang mempunyai sifat kemagnetan kuat. Magnet buatan dapat dibedakan menjadi magnet tetap dan magnet sementara

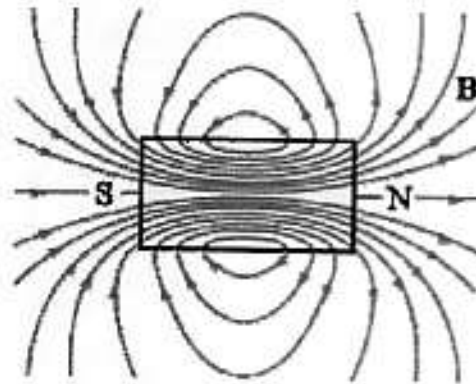
- a. Magnet Tetap (Permanen), merupakan magnet yang sifat kemagnetannya bersifat permanen, meskipun proses pembuatannya sudah dihentikan. Berdasarkan bahan yang digunakannya dapat dibedakan [6]
  1. Magnet Neodymium, terbuat dari logam campuran besi, neodymium, dan boron
  2. Magnet Samarium - cobalt terbuat dari paduan samarium dan kobalt
  3. Magnet Alnico dibuat dari campuran aluminium, nickel dan cobalt
  4. Magnet keramik terbuat dari serbuk ferit

Pada awalnya magnet terbuat dari baja keras dan berbagai alloy misal ALNICO dari paduan logam Al dan Ni, kemudian berkembang menjadi terbuat dari keramik atau ferit dari oksida-oksida logam misalnya feroxdure  $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$  dan Barium Ferrite  $\text{BrFe}_{12}\text{O}_{19}$ . magnet-magnet ini relatif memiliki energi produk yang rendah. Magnet NdFeB adalah material magnet permanen generasi ketiga yang terbuat dari logam campuran besi, neodmium, dan boron. Neodymium Iron Boron ( $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ ) merupakan bahan magnet permanen yang memiliki energi produk yang sangat tinggi. Berdasarkan keunggulan dari bahan ini, maka bahan ini menjadi pioner untuk diaplikasikan pada peralatan elektronik, motor listrik/generator, sensor, industri otomotif, Namun magnet permanen ini juga memiliki beberapa kekurangan, yaitu suhu batasan kerja relatif rendah sekitar  $130\text{-}210\text{ }^\circ\text{C}$ , sehingga sulit untuk diaplikasikan pada suhu tinggi. Bahan ini juga memiliki ketahanan korosi yang relatif rendah sehingga dalam aplikasinya diperlukan surface treatment melalui atau pelapisan.

- b. Magnet Sementara (Remanen), merupakan magnet yang sifat kemagnetannya hanya sementara. Medan magnet dihasilkan dengan cara mengalirkan arus listrik atau digosok-gosokkan dengan magnet alam. Bila suatu bahan pengantar dialiri arus listrik, besarnya medan magnet yang dihasilkan tergantung pada besar arus listrik yang dialirkan. Umumnya medan magnet remanen dihasilkan oleh arus dalam kumparan yang berinti besi. Agar medan magnet yang dihasilkan cukup kuat, kumparan diisi dengan besi atau sejenis besi dan sistem ini dinamakan electromagnet. Keuntungan electromagnet adalah bahwa kemagnetannya dapat dibuat sangat kuat, tergantung dengan arus yang dialirkan. Dan kemagnetannya dapat dihilangkan dengan memutuskan arus listriknya.

### **Medan Magnet [12]**

Medan magnet tidak bisa kasat mata namun buktinya bisa diamati dengan kompas atau serbuk halus besi. daerah sekitar yang ditembus oleh garis gaya magnet disebut gaya medan magnetik atau medan magnetik. Jumlah garis gaya dalam medan



Gambar 2.10 Garis gaya magnet [12]

magnet disebut fluks magnetik. Menurut satuan internasional besaran fluks magnetik ( $\Phi$ ) diukur dalam weber, disingkat Wb dan didefinisikan dengan Suatu medan magnet serba sama mempunyai fluks magnetik sebesar 1 weber bila sebatang penghantar dipotongkan pada garis-garis gaya magnet tersebut selama satu detik akan menimbulkan gaya gerak listrik (ggl) sebesar satu volt.

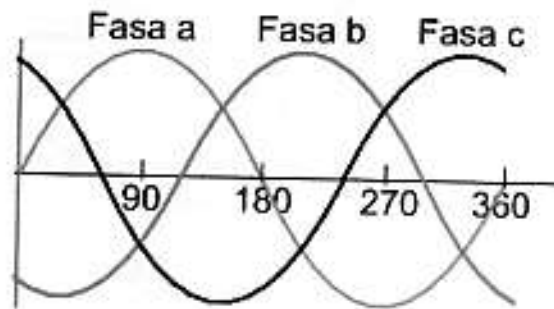
weber = volt x detik.  $[\Phi] = 1 \text{ volt detik} = 1 \text{ Wb}$ .

#### **Kerapatan Fluksi Magnet**

Efektivitas medan magnetik dalam pemakaian sering ditentukan oleh besarnya “kerapatan fluksi magnet”, artinya fluksi magnet yang berada pada permukaan yang lebih luas kerapatannya rendah dan intensitas medannya lebih lemah, sedangkan pada permukaan yang lebih sempit kerapatan fluksi magnet akan kuat dan intensitas medannya lebih tinggi. Kerapatan fluks magnet ( $B$ ) didefinisikan fluks persatuan luas penampang dengan satuan Tesla

### **II.3 Rangkaian Listrik Tiga Fasa [13][14]**

Pada sistem tenaga listrik dikenal dengan sistem 1 fasa dan sistem 3 fasa. Sistem 3 fasa memiliki besar tegangan sama namun memiliki beda sudut listrik antara fasa sebesar 120 derajat.



Gambar 2.11 Gelombang tegangan 3 fasa

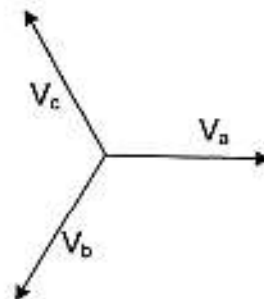
Dari gambar diatas terlihat bahwa setiap fasa memiliki perbedaan sudut dan diidapatkan hubungan tegangan untuk masing-masing fasa sebagai berikut :

$$V_A = V \angle 0^\circ$$

$$V_B = V \angle -120^\circ$$

$$V_C = V \angle -240^\circ$$

Diagram fasor tegangan 3 fasa

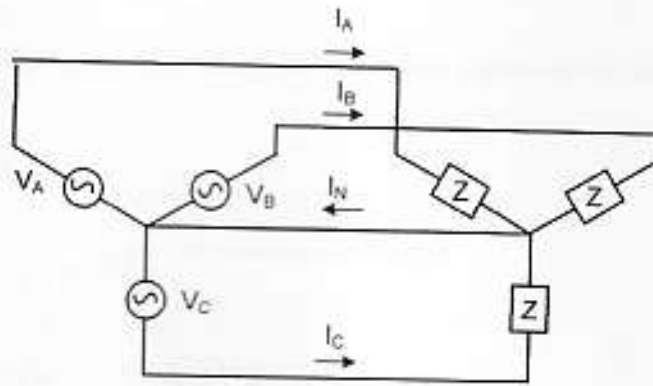


Gambar 2.12 Diagram fasor tegangan 3 fasa [13]

Pada rangkaian 3 fasa terdapat dua jenis hubungan yakni hubung bintang dan hubung delta.

#### **Hubung bintang**

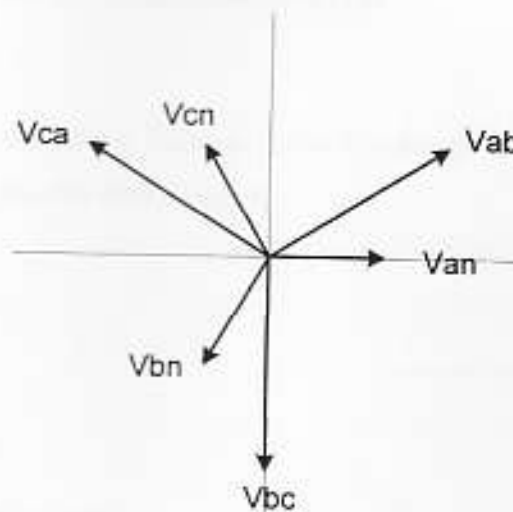
Pada hubungan bintang (Y), ujung-ujung tiap fasa dihubungkan menjadi satu dan merupakan titik netral seperti pada gambar (2.13).



Gambar 2.13 Hubungan bintang / star ( Y ) [13]

$V_{AN}$ ,  $V_{BN}$ , dan  $V_{CN} = V_f$  = tegangan fasa

$V_{AB}$ ,  $V_{BC}$ , dan  $V_{CA} = V_{LL}$  = tegangan line-line



Gambar 2.14 Diagram fasor tegangan pada hubung bintang [13]

Jika sistem tiga fasa seimbang hubungan bintang dihubungkan ke beban tiga fasa seimbang, maka tegangan dan arus adalah :

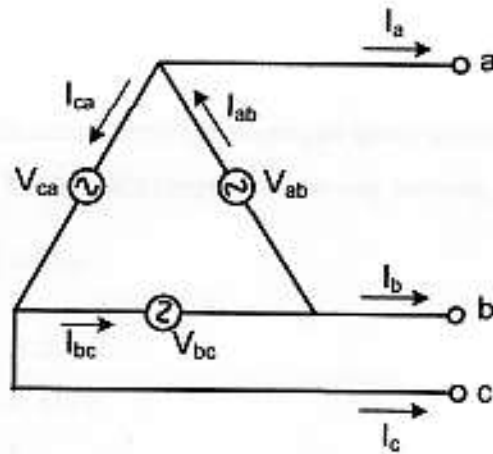
$$I_N = I_A + I_B + I_C = 0 \quad \dots\dots\dots (2.14)$$

$$V_{LL} = \sqrt{3} \cdot V_f \quad \dots\dots\dots (2.15)$$

$$I_L = I_f \quad \dots\dots\dots (2.15)$$

### Hubung delta

Pada hubungan delta ketiga fasa saling dihubungkan seperti pada Gambar (2.15)



Gambar 2.15 Hubungan delta [13]

Jika sistem tiga fasa seimbang hubung delta dihubungkan ke beban tiga fasa seimbang, maka tegangan dan arus adalah :

$$V_{ab} + V_{bc} + V_{ca} = 0$$

$$V_{ab} = V_{bc} = V_{ca} = V_{LL}$$

$$I_L = \sqrt{3} \cdot I_f \quad \dots\dots\dots (2.16)$$

$$V_{LL} = V_f \quad \dots\dots\dots (2.17)$$

### Daya sistem 3 fasa yang seimbang

Jumlah daya 3 fasa diperoleh dengan menjumlahkan daya dari tiap-tiap fasa. Pada sistem yang seimbang, daya total tersebut sama dengan tiga kali daya fasa karena daya pada tiap-tiap fasanya sama. Jika beda sudut antara arus dan tegangan adalah  $\theta$ , maka besarnya daya per fasa

$$P_f = V_f \cdot I_f \cdot \cos \theta \quad \dots\dots\dots (2.18)$$

sedangkan besarnya total daya adalah penjumlahan dari besarnya daya tiap fasa, dan dapat dituliskan dengan,

$$P = 3 \cdot V_f \cdot I_f \cdot \cos \theta \quad \dots \dots \dots (2.19)$$

Pada hubung bintang, besarnya tegangan antar saluran adalah  $V_{LL} = \sqrt{3} \cdot V_f$  dan  $I_L = I_f$  maka daya 3 fasa pada rangkaian hubung bintang adalah:

$$\begin{aligned} P &= 3 \frac{V_{LL}}{\sqrt{3}} \cdot I_L \cos \theta \\ &= \sqrt{3} V_{LL} \cdot I_L \cos \theta \quad \dots \dots \dots (2.20) \\ Q &= \sqrt{3} V_{LL} \cdot I_L \sin \theta \\ S &= \sqrt{3} V_{LL} \cdot I_L \end{aligned}$$

Demikian pula pada hubung delta, dengan besaran tegangan saluran  $V_{LL} = V_f$  dan arus line  $I_L = \sqrt{3} \cdot I_f$  maka daya 3 fasa pada rangkaian hubung delta adalah

$$\begin{aligned} P &= 3V_L \frac{I_{LL}}{\sqrt{3}} \cdot \cos \theta \\ &= \sqrt{3} V_L \cdot I_L \cos \theta \quad \dots \dots \dots (2.21) \\ Q &= \sqrt{3} V_{LL} \cdot I_L \sin \theta \\ S &= \sqrt{3} V_{LL} \cdot I_L \end{aligned}$$

Dengan :

P = Daya aktif (Watt)

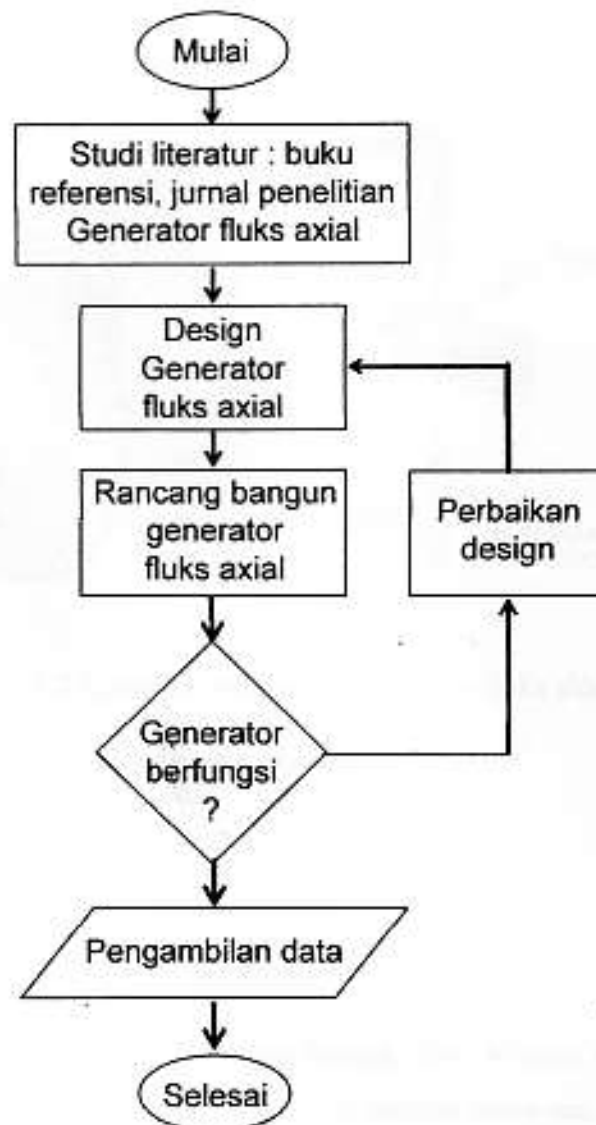
Q = Daya rektif (VAR)

S = Daya semu (VA)



### BAB III METODELOGI PENELITIAN

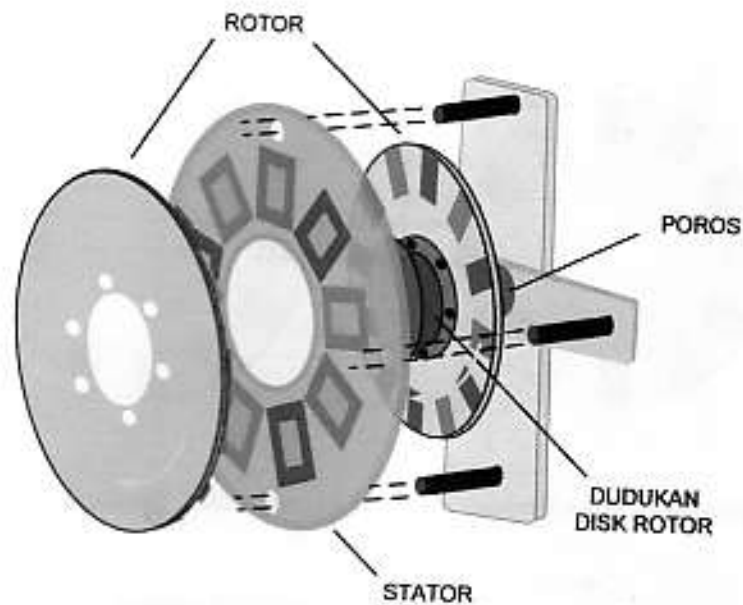
Metode sistem perancangan dan pembuatan generator fluks axial yang dilakukan yaitu



Gambar 3.1 Diagram Alir perancangan dan pembuatan generator fluks axial

Dalam perancangan ini stator dan rotor adalah berupa disc. Rotor terdiri dari 2 buah plat besi dengan ketebalan plat 6 mm. Pada rotor dilekatkan sejumlah magnet

permanen yang berfungsi sebagai sumber fluks medan magnet. Diantara kedua rotor terdapat stator. Stator dibuat dari cetakan resin yang didalamnya terdapat sejumlah kumparan. Kumparan ini akan dilalui fluks medan magnet yang besarnya berubah seiring dengan perputaran rotor. Sehingga pada kumparan akan dibangkitkan tegangan induksi. Kontruksi sederhana rancangan generator fluks axial terdapat pada Gambar 3.2 berikut



Gambar 3.2 Kontruksi rancangan generator fluks aksial

Pada rancangan ini direncanakan generator dapat menghasilkan  
 Sistem tegangan : 3 fasa  
 Tegangan : 220 / 380  
 Daya : 1000 VA  
 Frekwensi : 50 Hz

### III.1 Perancangan rotor

Rotor dibuat dengan menggunakan plat besi bentuk disc. Magnet dilekatkan pada salah satu sisi plat dengan posisi kutub magnet bergantian utara dan selatan. Jumlah kutub magnet pada rotor akan menentukan banyaknya putaran per menit pada rotor untuk menghasilkan frekuensi listrik yang diinginkan yaitu 50 Hz. Dengan persamaan (2.4)

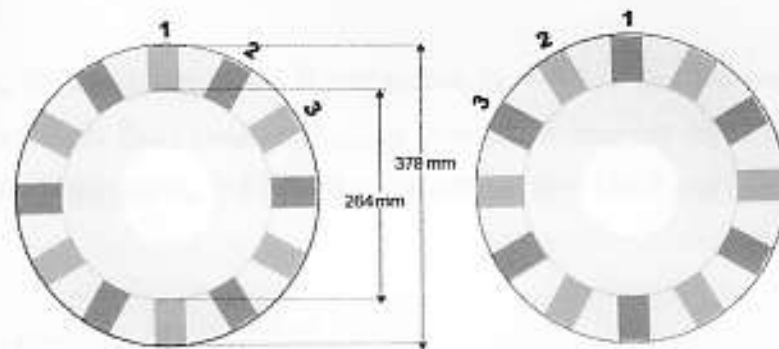
$$f = \frac{n.p}{120}$$

maka jumlah magnet per disc rotor p adalah

$$p = \frac{f \cdot 120}{n}$$

$$p = \frac{50 \cdot 120}{500}$$

$$= 12 \text{ buah}$$



Gambar 3.3 Rancangan susunan magnet pada disc rotor

Dengan diameter dalam magnet  $D_{in} = 264 \text{ mm}$  maka

$$\text{Keliling} = \pi \times 264$$

$$= 829 \text{ mm}$$

dan jarak antar magnet  $T_c$  dapat ditentukan yaitu

$$T_c(r) = 30/360 \times 829$$

$$= 69,1 \text{ mm}$$

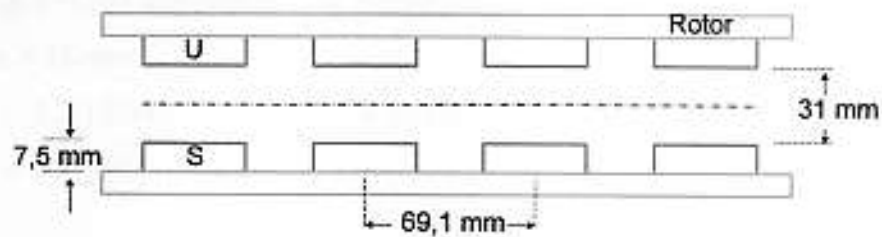
Panjang magnet yang digunakan adalah 57 mm maka

$$D_{out} \text{ magnet} = D_o = 264 + (2 \times 57)$$

$$= 378 \text{ mm}$$

Demikian pula dengan disc rotor yang kedua, magnet disusun seperti pada disc yang pertama. Ketika kedua plat disatukan melalui braket, magnet pada disc satu dengan

magnet pada disc 2 saling berhadapan dengan kutub berlawanan Seperti pada gambar 3.4



Gambar 3.4 Susunan beberapa manet dari kedua rotor

Magnet yang digunakan memiliki B remanence  $B_r = 1,2$  T dan ketebalan  $h_m = 7,5$  mm. Besarnya rapat fluks magnet  $B_{maks}$  di permukaan magnet dapat menggunakan persamaan (2.13) dengan  $n_M = 4$ ,  $\beta = 2\pi / l_a$  [4] dan  $l_a = 138,2$  mm adalah

$$\begin{aligned}
 B_{m0} &= B_r [1 - \exp(-\beta h_m)] \frac{\sin(\pi / n_M)}{\pi / n_M} \\
 &= 1,2 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{2\pi}{0,138} \cdot 0,0075\right) \right] \frac{\sin(\pi / 4)}{\pi / 4} \\
 &= 0,312096 \text{ Tesla}
 \end{aligned}$$

Maka persamaan distribusi komponen B normal ditengah antara 2 rotor dapat menggunakan persamaan (2.12) dengan jarak antara magnet pada disc 1 dengan magnet disc 2 adalah 31 mm

$$\begin{aligned}
 B_z(x, z) &= B_{m0} \sin(\beta x) \frac{1}{\cosh(\beta l / 2)} \cosh(\beta z) \\
 &= 0,312096 \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{0,138} \cdot x\right) \frac{1}{\cosh\left(\frac{2\pi}{0,138} \cdot \frac{0,031}{2}\right)} \cosh\left(\frac{2\pi}{0,138} \cdot 0,0155\right) \\
 B(x) &= 0,312096 \cdot \sin(14,47178 \cdot \pi \cdot x)
 \end{aligned}$$

Besar rapat fluks B suatu titik pada sepanjang garis tengah tergantung pada posisi titik x (arah sumbu x ). Harga kerapatan flux B besarnya periodik dan pada x = 35 maupun x = 104 didapatkan nilai B maksimum yaitu

Pada x = 35 mm

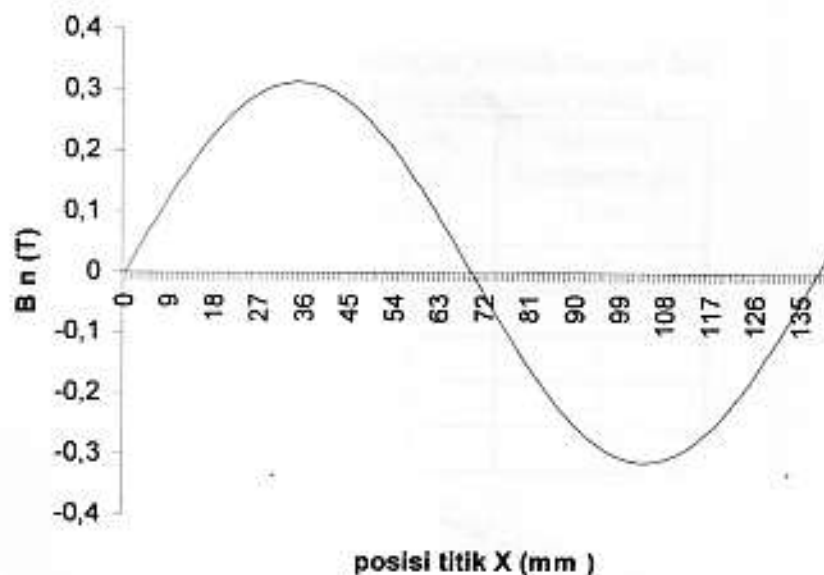
$$\begin{aligned} B(x) &= 0,312096.\sin(14,47178.\pi.0,035) \\ &= 0,3120331 \text{ Tesla} \end{aligned}$$

Dan pada x = 104 mm

$$\begin{aligned} B(x) &= 0,312096.\sin(14,47178.\pi.0,104) \\ &= -0,3120616 \text{ Tesla} \end{aligned}$$

Tanda minus menunjukkan arah fluks magnet

Pada gambar 3.5 adalah grafik hasil perhitungan nilai B sepanjang garis tengah antara 2 disc rotor



Gambar 3.5 Grafik rapat fluks magnet di sepanjang garis tengah diantara rotor

Maka besar fluks rata-rata ditengah antara 2 rotor dapat menggunakan persamaan (2.11) dimana  $D_{in} = 264 \text{ mm}$ ,  $D_{out} = 378 \text{ mm}$  dan rasio perbandingan  $k_d = D_{in} / D_{out}$

$$\begin{aligned}\phi_r &= B_{mg} \frac{\pi}{8p} D_{out}^2 (1 - k_d^2) \\ &= 0,312 \frac{\pi}{8 \cdot 12} 0,378^2 \left[ 1 - \left( \frac{0,264}{0,378} \right)^2 \right] \\ &= 0,00074741 \text{ Weber} \\ &= 7,4741 \cdot 10^{-4} \text{ Weber}\end{aligned}$$

### III.2 Perancangan stator

Stator merupakan bagian yang tetap pada generator. Pada stator terdapat sejumlah kumparan kawat tembaga, yang akan memotong medan magnet pada saat magnet di rotor berputar. Beberapa jurnal percobaan mencantumkan bahwa perbandingan jumlah kumparan dengan jumlah magnet yang dapat memberikan hasil optimal adalah [12]

Tabel 3.1 Perbandingan jumlah magnet dan jumlah kumparan pada stator

Jumlah kumparan	Jumlah magnet (pole)	Jumlah kumparan per fasa
6	8	2
9	12	3
12	16	4
15	20	5
18	24	6

Dengan 12 magnet maka jumlah kumparan adalah 9. Stator yang dirancang pada pembuatan alat ini terdiri dari 9 slot dimana setiap slot terdapat 2 sisi coil [4], maka Jumlah kumparan per fasa dengan persamaan (2.10)

$$n_c = \frac{s_1}{m_1}$$

$$= 9 / 3$$

$$= 3 \text{ kumparan}$$

Dari persamaan (2.9) dapat ditentukan jumlah slot per magnet per fasa  $q_1$

$$q_1 = \frac{s_1}{2pm_1}$$

$$= .0,5 \text{ slot}$$

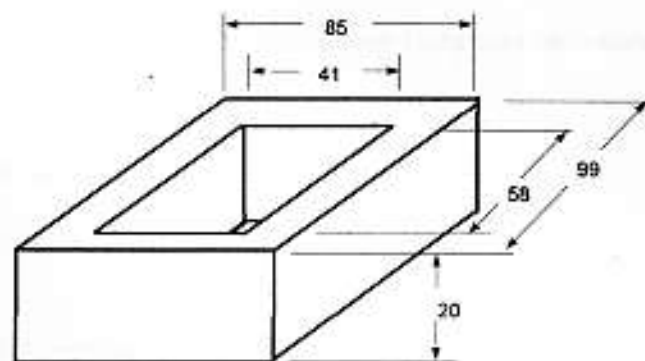
Besar tegangan per fasa yang dihasilkan pada stator tergantung pula dengan adanya faktor belitan  $k_w$  yaitu  $k_w = k_{d1} \cdot k_{p1}$  dimana  $k_{d1}$  adalah faktor distribusi dan  $k_{p1}$  adalah pitch factor. Dengan persamaan (2.6) faktor distribusi  $k_{d1}$

$$k_{d1} = \frac{\sin(\pi / 2m_1)}{q_1 \sin[\pi / (2m_1 q_1)]}$$

$$= \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2.3}\right)}{0,5 \cdot \sin\left[\frac{\pi}{2.3 \cdot 0,5}\right]}$$

$$= 1,1547$$

panjang lebar dan tinggi kumparan disesuaikan dengan bentuk magnet seperti gambar 3.6 berikut



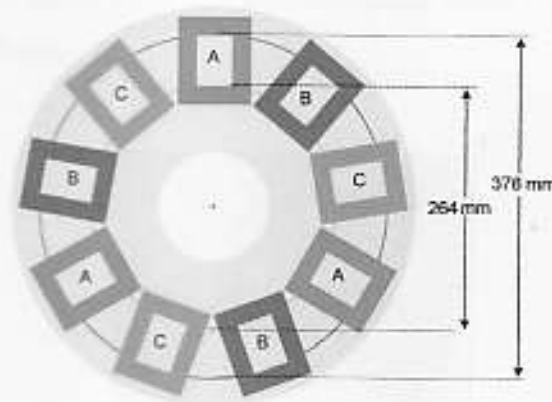
Gambar 3.6 Rancangan kumparan

dengan persamaan (2.8) perbandingan antara lebar kumparan dengan jarak antara magnet  $\beta$  adalah

$$\begin{aligned}\beta &= \frac{w_c(r)}{\tau_c(r)} \\ &= \frac{85}{69,115} \\ &= 1,2298\end{aligned}$$

dengan persamaan (2.7) pitch factor  $k_{pi}$

$$\begin{aligned}k_{pi} &= \sin\left(\beta \frac{\pi}{2}\right) \\ &= \sin\left(1,2298 \frac{\pi}{2}\right) \\ &= 0,9355\end{aligned}$$



Gambar 3.7 Rancangan susunan kumparan pada stator

maka faktor belitan  $k_{wl}$  adalah

$$\begin{aligned}k_{wl} &= k_{di} \cdot k_{pi} \\ &= 1,0802\end{aligned}$$

Dengan persamaan (2.5) tegangan per fasa yang dihasilkan adalah

$$E_f = \pi\sqrt{2}fN_l k_{wl} \phi_f$$



maka jumlah lilitan bila tegangan per fasa  $E_f = 230$  volt

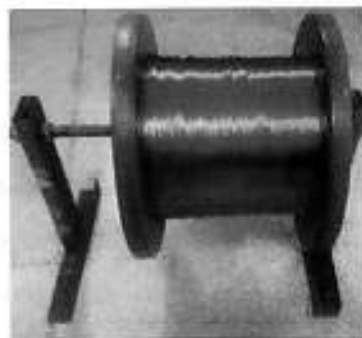
$$\begin{aligned} N_f &= \frac{E_f}{\pi\sqrt{2}fk_w\phi_f} \\ &= \frac{230}{\pi\sqrt{2}\cdot 50 \cdot 1,0802 \cdot 7,4741 \cdot 10^{-4}} \\ &= 1281 \text{ lilitan} \end{aligned}$$

Banyaknya kumpara per fasa adalah 3 maka jumlah lilitan setiap kumparan adalah 427 lilitan. Ketiga kumparan pada fasa yang sama dihubung seri. Diharapkan tegangan yang dibangkitkan pada setiap fasa adalah 230 volt pada frekwensi 50 Hz. Atau setiap kumparan menghasilkan tegangan 76,5 volt.

### III.3 Material bahan

#### a. Kawat email

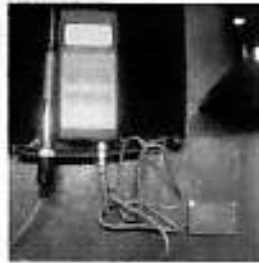
Untuk membuat lilitan pada coil atau kumparan stator digunakan kawat email berdiameter 0,8 mm.



Gambar 3.8 Kawat Email

#### b. Magnet Permanen

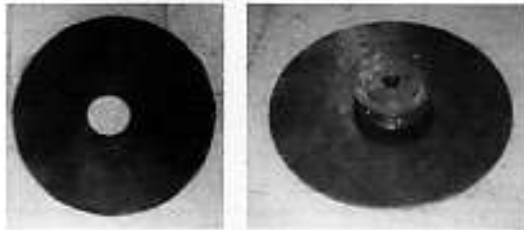
Manget permanent yang digunakan adalah jenis neodymium (NdFeB) dengan  $B_r = 1,2$  Tesla berbentuk persegi panjang berukuran panjang lebar dan tinggi adalah (57 x 40 x 7,5) mm sebanyak 24 buah



Gambar 3.9 Tesla meter dan Magnet Permanen

c. Plat besi berbentuk disc

Untuk membuat rotor digunakan plat besi ketebalan 6 mm dan dibentuk disc dengan diameter luar 385 mm dan diameter dalam 80 mm



Gambar 3.10 Plat besi bentuk disk sebagai rotor

d. Resin

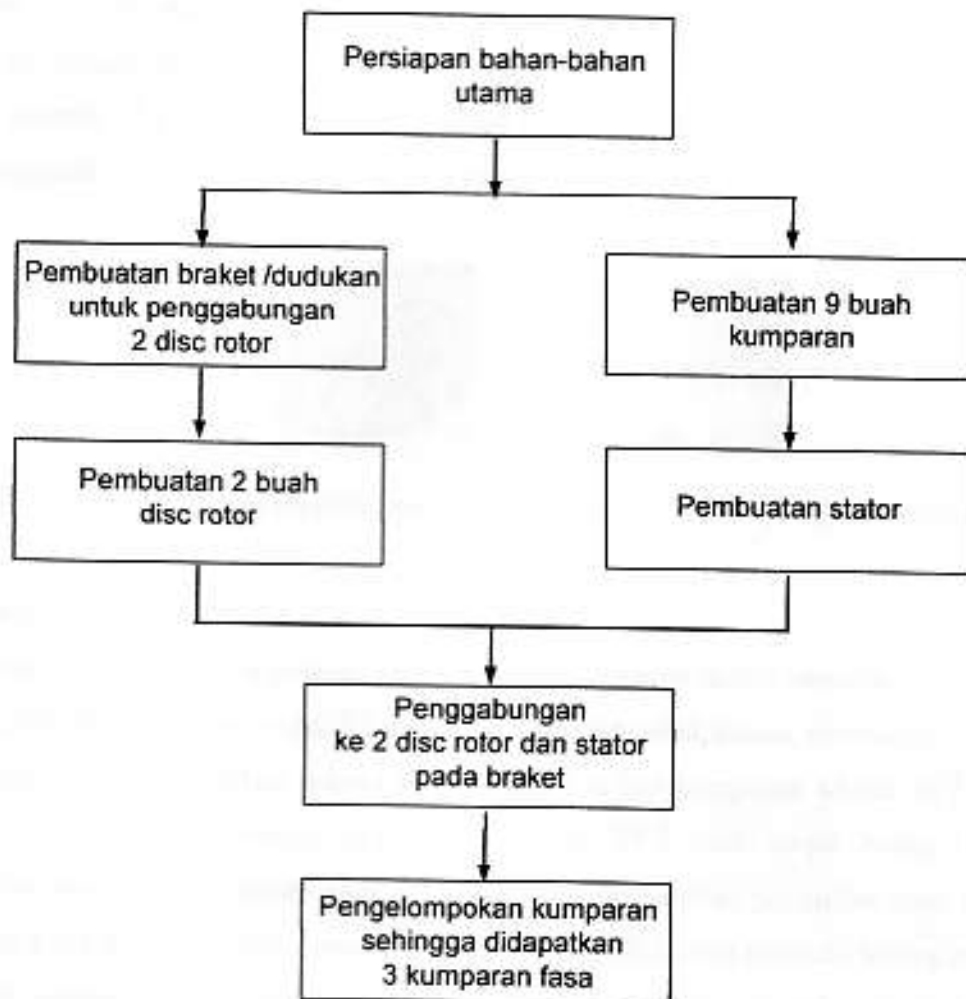
Stator yang dirancang adalah stator tanpa inti besi, maka agar kumparan yang sudah tersusun tetap pada posisinya digunakan resin. Resin adalah bahan kimia berbentuk cair agak kental dan bila dicampur dengan hardener akan mempercepat proses pengerasan resin



Gambar 3.11 Resin dan hardener

### III.4. Pembuatan generator fluks axial

Blok diagram pembuatan generator fluks axial 2 rotor dan satu stator adalah sebagai berikut



Gambar 3.12 Blok diagram pembuatan generator fluks axial

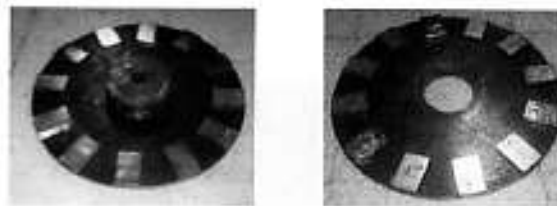
#### Pembuatan braket disk rotor

Dudukan disk rotor diperlukan untuk penggabungan 2 disk rotor sehingga perputaran ke 2 disk rotor berputar bersamaan. Diameter braket bagian luar disesuaikan dengan diameter lingkaran dalam disk rotor yaitu  $(85 + 30) \text{ mm} = 115 \text{ mm}$  Lebih besar dari 85

mm karena untuk lubang baut. Sedangkan diameter dalam braket disesuaikan dengan diameter poros

#### **Pembuatan rotor**

Pembuatan rotor dari plat besi berbentuk disk 2 buah dengan ukuran diameter luar 382 mm dan diameter dalam 85 mm. Magnet dilekatkan pada permukaan disc rotor dan dikuatkan dengan lem besi dengan posisi kutub magnet bergantian utara dan selatan. Jumlah magnet 12 per disc dengan  $D_m = 264$  mm dan jarak antar magnet  $T_c(r) = 69,1$  mm. Demikian pula dengan rotor disk ke 2 dengan konfigurasi dan jumlah magnet sama.



Gambar 3.13 Susunan magnet pada kedua disc sesuai rancangan pada gambar 3.3

#### **Pembuatan kumparan**

Kumparan dibuat berbentuk persegi panjang dengan dimensi dalam panjang lebar sesuai dengan permukaan magnet yaitu 57 mm x 40 mm dan tebal sesuai rancangan 20 mm. Pada perancangan didapatkan bahwa jumlah lilitan setiap kumparan adalah 427 lilitan dan tegangan yang dihasilkan diharapkan adalah 76,5 volt tanpa beban. Untuk mengetahui berapakah tegangan yang dihasilkan perlu dilakukan pengujian awal pada 1 kumparan yang dibuat sebagai contoh. Dari hasil pengujian awal ternyata tegangan yang dihasilkan adalah kurang maka perlu dilakukan koreksi dengan menambah jumlah lilitan sehingga menjadi 460 lilitan per kumparan



Gambar 3.14 Pembuatan dan pengujian awal pada kumparan

### Pembuatan stator

Untuk menghasilkan tegangan 3 fasa dibutuhkan 3 kumparan fasa. Ke 9 kumparan disusun sesuai rancangan sehingga didapatkan 3 kelompok fasa atau masing-masing fasa terdiri dari 3 kumparan. Ke 3 kumparan yang sefasa dihubung seri sehingga jumlah belitan perfasa menjadi  $3 \times 460 = 1380$  lilitan untuk menghasilkan tegangan fasa 230 volt. Kumparan-kumparan disusun seperti pada gambar 3.7. Pada gambar 3.16a, kumparan yang sudah tersusun dicetakan kemudian dicor dengan campuran resin dan hardener. Pada gambar 3.16b adalah stator dengan media resin yang telah berubah padat. Pada pembuatan stator ini ujung setiap kumparan tidak termasuk bagian yang dicor dengan resin



Gambar 3.15 9 kumparan yang sudah jadi



(a)



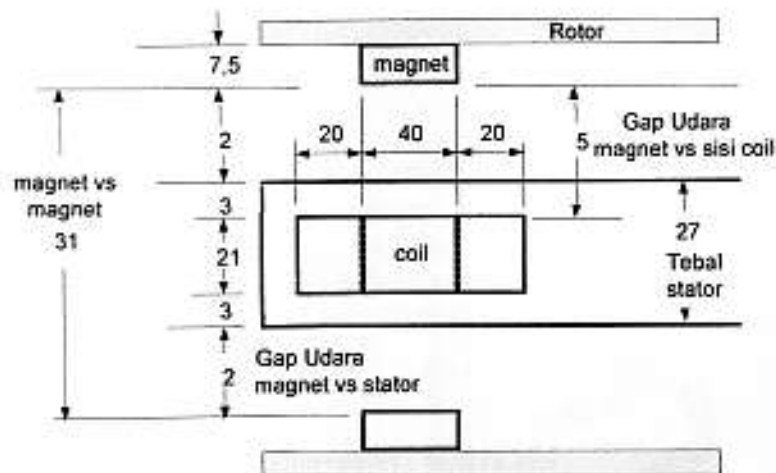
(b)

Gambar 3.16 Stator terbuat dari resin didalamnya terdapat 9 kumparan

### Penggabungan disk rotor dan stator

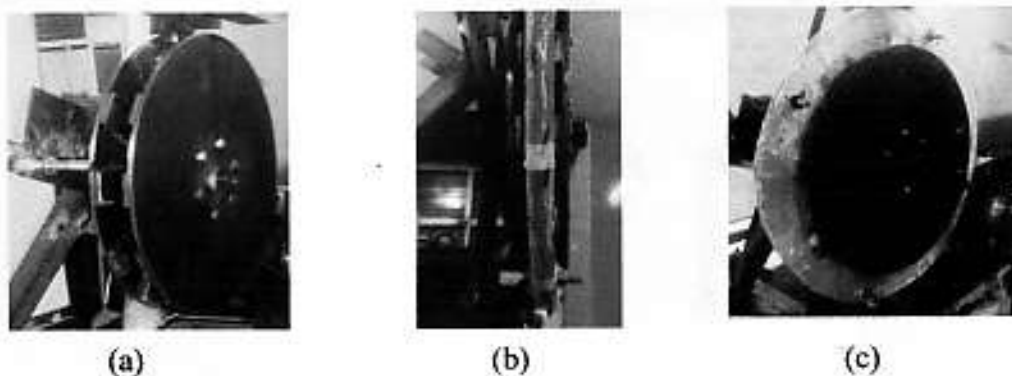
Penggabungan ke 2 disk rotor dan stator dengan braket dengan susunan stator berada ditengah. Ada celah udara antara stator dan rotor sehingga rotor dapat berputar bebas. Kutub magnet di disc rotor yang satu dengan kutub magnet di disc rotor ke 2 saling

berhadapan dan arah kutub berlawanan utara selatan. Penempatan kedua disc rotor pada braket dikuatkan dengan baut. Pada pembuatan stator ujung setiap kumparan tidak termasuk bagian yang dicor dengan resin. Maka dilakukan penyambungan pada ujung-ujung kawat kumparan yang sefasa dihubungkan seri sehingga jumlah belitan perfasa menjadi  $3 \times 460 = 1380$  lilitan untuk menghasilkan tegangan fasa 230 volt. Kumparan fasa dapat dibentuk untuk sisten tegangan hubung bintang ataupun delta



Gambar 3.17 Susunan stator dan rotor beserta ukuran celah udara dalam mm

Pada gambar 3.18 berikut adalah genetaror hasil rancangan Selanjutnya akan dilakukan pengujian bagaimana hasilnya ketika tanpa beban ataupun dengan diberikan beban listrik.



Gambar 3.18 Generator hasil rancangan : a) stator belum terpasang b) Tampak samping setelah stator terpasang di tengah antara 2 rotor c) tampak depan generator fluks axial

## BAB IV PENGUJIAN DAN ANALISA DATA

Spesifikasi rancangan generator fluks axial double side single stator yang akan diuji seperti pada gambar 3.18 adalah sebagai berikut :

Jumlah fasa tegangan	:	3
Tegangan tanpa beban per fasa (volt)	:	230
Putaran rotor (rpm)	:	500
Frekwensi (Hz)	:	50
Daya total 3 fasa (kVA)	:	1

### **Rotor**

Jenis magnet	:	NdFeB
Jumlah magnet per disk rotor	:	12
Kerapatan fluks magnet (Tesla)	:	1,2
Diameter dalam magnet (mm)	:	264
Diameter luar magnet (mm)	:	378
Jarak antar magnet (mm)	:	69,11
Celah udara antar magnet berhadapan (mm)	:	31

### **Stator**

Tebal stator (mm)	:	27
Jumlah kumparan per fasa	:	3
Lebar kumparan (mm)	:	85
Jumlah lilitan per kumparan	:	460
Diameter kawat email (mm)	:	0,8

### **Alat pendukung pengujian**

#### **- Inverter**

Dalam pengujian berfungsi untuk mengatur kecepatan motor listrik sebagai penggerak mula generator.

#### **- Motor listrik 3 fasa**

Dalam pengujian digunakan 2 buah motor listrik yaitu satu sebagai penggerak mula generator dan satunya lagi sebagai beban listrik dengan daya 0,75 HP.



Gambar 4.1 : Susunan peralatan pada pengujian generator

- Lampu pijar

Dalam pengujian berfungsi sebagai beban listrik dari generator yang terhubung star dan delta. Jumlah daya lampu yang terpasang pada pengujian beban tetap 100 watt dan 200 watt sedangkan pengujian dengan bertambahnya beban pada tegangan tetap 220 volt besarnya 60 watt hingga 220 watt per fasa.

- Multitester digital

Adalah alat ukur untuk mengukur tegangan arus daya dan faktor daya dari rangkaian pengujian

- Tachometer digital

Adalah alat ukur kecepatan rotasi sebuah objek seperti poros mesin listrik



- Oscilloskop

Adalah alat ukur elektronika yang berfungsi memproyeksikan bentuk sinyal listrik dalam pengujian berfungsi untuk menampilkan pada layar tegangan keluaran generator.

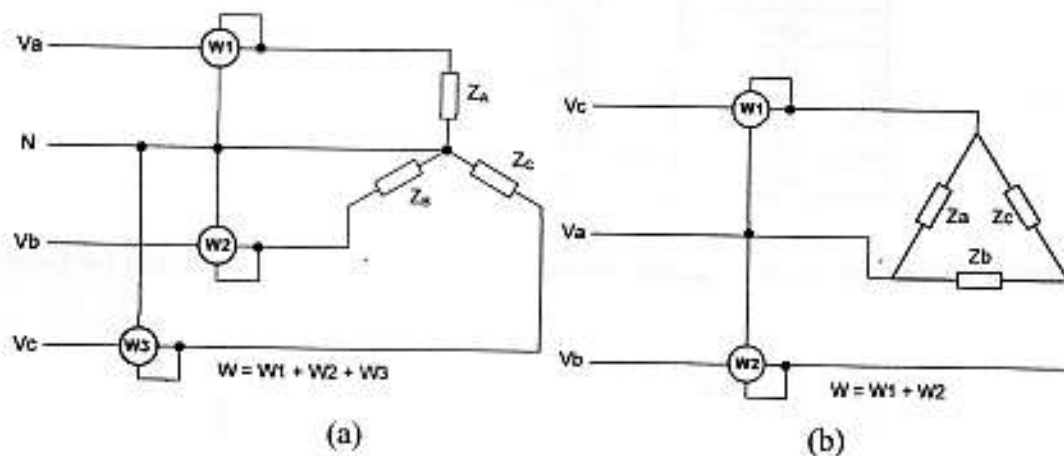
- kontaktor magnet dan timer

Adalah alat penghubung listrik yang bekerja atas dasar magnet. Dalam pengujian digunakan untuk rangkaian pengasutan start delta motor listrik dan sebagai saklar lampu hubung star dan delta.

- Transformator

Dalam pengujian digunakan untuk menurunkan tegangan keluaran generator untuk input ke osciloskop

Pada pengujian ini dilakukan pengukuran tegangan, frekwensi, arus, faktor daya dan daya yang dihasilkan generator. Untuk mengukur daya 3 fasa digunakan skema rangkaian seperti pada gambar 4.2



Gambar 4.2 : Skema rangkaian pengukuran daya 3 fasa a) hubung star b) hubung delta

#### IV.1 Tegangan keluaran hasil rancangan berdasarkan teori

Dari hasil perhitungan dan rancang bangun pada bab III sebelumnya didapatkan fluks rata-rata  $\Phi_r$ , faktor belitan  $k_{wl}$ , jumlah lilitan per fasa  $N_1$  dan jumlah magnet per disk rotor  $p$ , yaitu :

$$p = 12$$

$$\Phi_r = 7,4741 \cdot 10^{-4} \text{ Weber}$$

$$k_{wl} = 1,0802$$

$$N_1 = 1380$$

Dengan persamaan (2.4)

$$f_e = \frac{n_m \cdot p}{120}$$

dan persamaan (2.5)

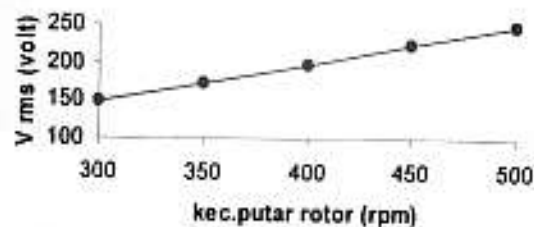
$$E_r = \pi \sqrt{2} f N_1 k_{wl} \Phi_r$$

didapatkan besar tegangan per fasa seperti pada tabel 4.1

Tabel 4.1 Hasil perhitungan tegangan keluaran generator

Putaran rotor (rpm)	Frekwensi (Hz)	V rms ( volt )
300	30	149
350	35	173
400	40	198
450	45	223
500	50	248

Dari tabel 4.1 didapatkan sebuah grafik tegangan rms sebagai fungsi dari putaran rotor :



Gambar 4.3 : Grafik tegangan rms fungsi dari putaran rotor berdasarkan teori

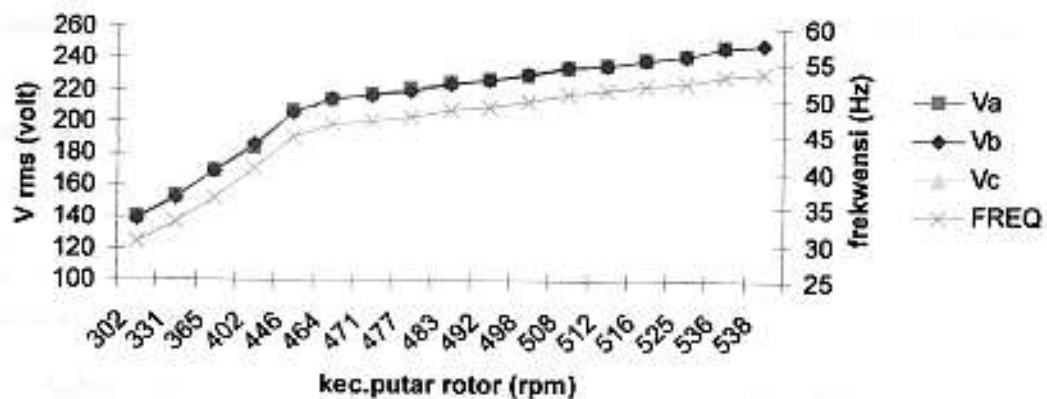
#### IV.2 Pengujian tanpa beban

Pengujian pertama yang dilakukan adalah mengukur output tegangan dan frekwensi tanpa beban dengan variabel kecepatan putar rotor. Untuk hubung star tegangan rms dari masing-masing fasa to netral tercantum pada tabel 4.2 berikut :

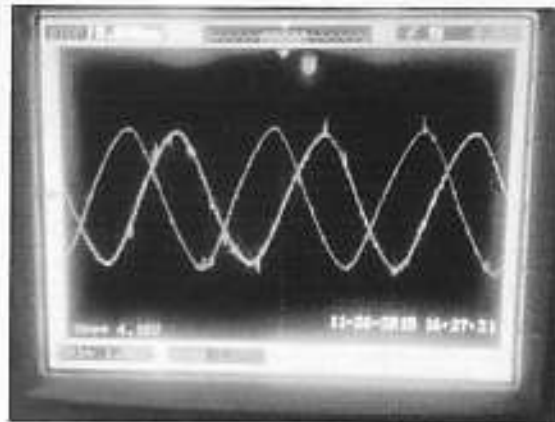
Tabel 4.2 Data hasil pengukuran tegangan keluaran hubung star

RPM	Frekwensi ( Hz )	Va ( volt )	Vb ( volt )	Vc ( volt )
302	30,4	140	139	139
331	33	153	152	153
365	36,5	169	169	170
402	40,5	184	186	186
446	44,9	207	206	205
464	46,6	214	215	215
471	47	218	217	218
477	47,7	221	220	220
483	48,5	225	224	224
492	49	227	227	227
498	49,8	229	230	231
508	50,8	234	235	234
512	51,3	236	236	236
516	52	239	239	239
525	52,4	242	242	243
536	53,4	247	247	248
538	53,8	248	249	249

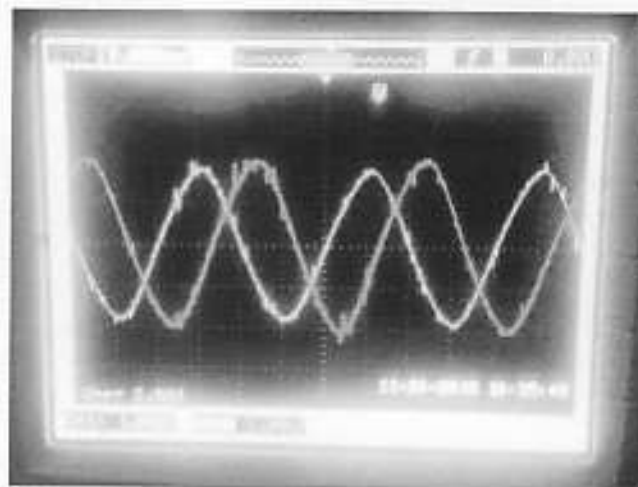
Dari tabel 4.2 hasil pengukuran diperoleh grafik pada gambar 4.4 sebagai berikut :



Gambar 4.4 : Grafik hasil pengukuran tegangan Va, Vb dan Vc serta frekwensi dari keluaran generator hubung star



Gambar 4.5 : Tampilan pada layar osciloskop dari tegangan Va, dan Vc keluaran generator hubung star



Gambar 4.6 : Tampilan pada layar osciloskop dari tegangan Va, dan Vc keluaran generator hubung star

Bentuk dari gelombang tegangan Va dan Vc dapat dilihat pada layar osciloskop dengan setelan :

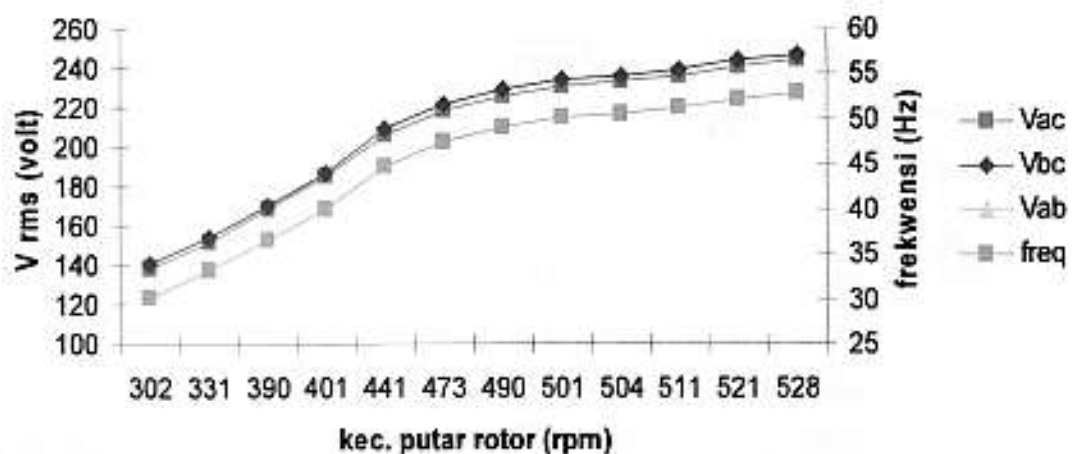
Time / Div = 5 ms  
 Volt / Div = 1 volt  
 Rasio trafo =  $220 / 12 = 18,333$

Untuk hubung delta tegangan rms dari masing-masing antar line tercantum pada tabel 4.3 berikut :

Tabel 4.3 Data hasil pengukuran tegangan  $V_{LL}$  keluaran hubung delta

RPM	Hz	Vac ( volt )	Vbc ( volt )	Vab ( volt )
302	30,1	138	140	136
331	33,2	152	154	151
390	36,4	168	170	166
401	40	185	187	183
441	44,7	206	209	203
473	47,5	218	222	215
490	49,1	226	229	223
501	50,1	231	234	228
504	50,5	233	236	230
511	51,3	236	239	233
521	52,1	241	244	237
528	52,8	244	247	240

Dari data tabel 4.3 hasil pengukuran di atas diperoleh grafik pada gambar 4.7



Gambar 4.7 : Grafik hasil pengukuran tegangan  $V_{LL}$  serta frekwensi dari keluaran generator hubung delta

Dari gambar 4.4 dan 4.7 hasil data pengujian didapatkan bahwa semakin cepat putaran rotor semakin meningkat pula tegangan dan frekwensi. Bila dibandingkan dengan gambar 4.3 terdapat perbedaan yaitu kenaikan tegangan tidak linier atau terjadi patahan ketika putaran rotor sekitar 450 rpm. Jika fluks rata-rata  $\Phi_f$  besarnya tetap karena sumber fluks

adalah magnet permanen maka terjadinya patahan disebabkan karena putaran rotor tidak stabil pada sekitar 450 rpm.

Dari tampilan layar osciloskop gambar 4.5 dan 4.6 didapatkan bentuk gelombang tegangan dan beda fasa dari tegangan generator yang dibangkitkan. Gelombang tegangan adalah sinusoida namun tidak sempurna dan beda fasa yang didapatkan berkisar 118 - 121 derajat listrik pada kecepatan sekitar 504 rpm

#### IV.3 Pengujian dengan beban lampu pijar hubung star

Pengujian berikutnya adalah dengan memberikan beban yaitu lampu pijar dengan daya 100 watt per fasa hubung star dan kumparan generator juga terhubung star. Tegangan  $V_a$ ,  $V_b$  dan  $V_c$  adalah tegangan rms fasa to netral. Skema rangkaian pengukuran daya seperti pada gambar 4.2a Hasil pengukuran tercantum pada tabel 4.4 dan tabel 4.5 berikut :

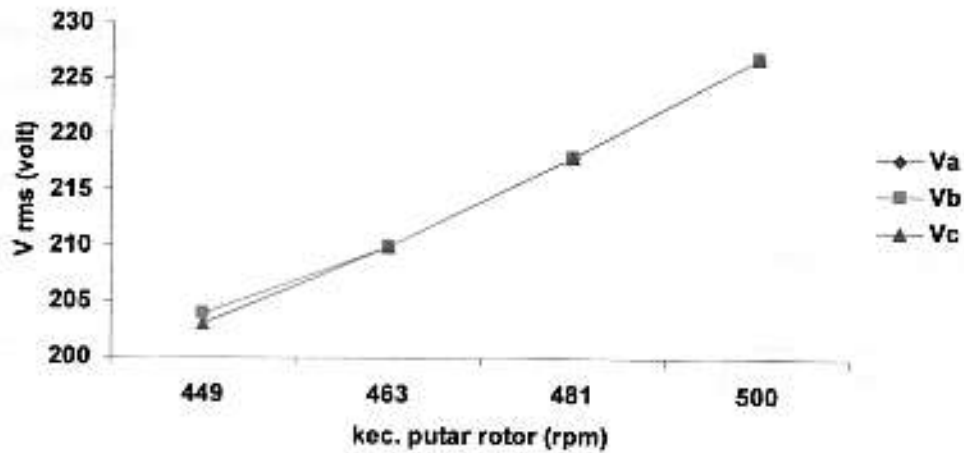
Tabel 4.4 Data hasil pengukuran tegangan, arus dan factor daya untuk beban lampu pijar hubung star

Putaran rotor ( rpm )	Fasa a			Fasa b			Fasa c		
	$V_a$ (volt)	$I_a$ ( A )	cos phi	$V_b$ ( volt )	$I_b$ ( A )	cos phi	$V_c$ (volt)	$I_c$ ( A )	cos phi
449	204	0,41	0,998	204	0,4	0,998	203	0,4	0,998
463	210	0,42	0,998	210	0,41	0,998	210	0,41	0,998
481	218	0,43	0,998	218	0,42	0,998	218	0,42	0,998
500	227	0,44	0,998	227	0,43	0,998	227	0,43	0,998

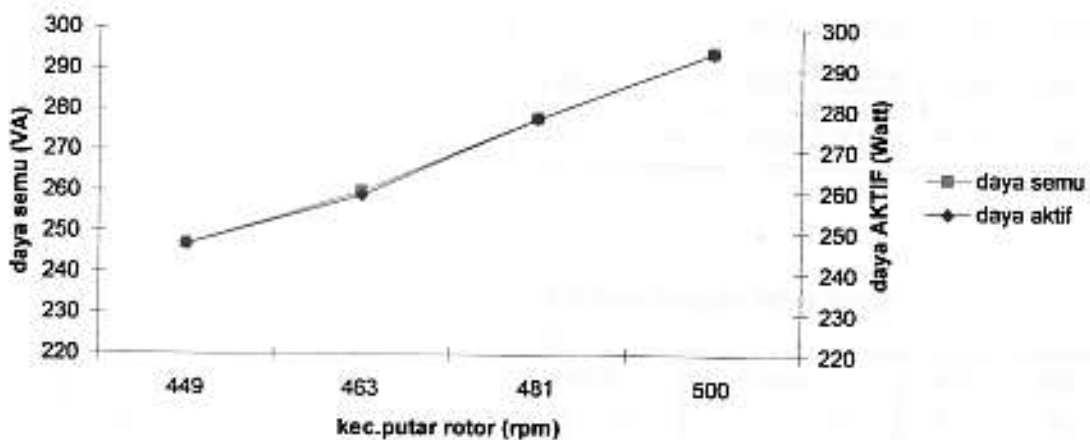
Tabel 4.5 Data hasil pengukuran daya dengan perubahan kecepatan rotor sama pada tabel 4.3 untuk beban lampu pijar hubung star

Putaran rotor ( rpm )	Fasa a		Fasa b		Fasa c		JML	JML
	P (watt)	S ( VA )	P (watt)	S ( VA )	P (watt)	S ( VA )	P (watt)	S ( VA )
449	84	84	81	81	82	82	247	247
463	88	88	85	86	86	86	259	260
481	94	94	92	92	92	92	278	278
500	100	100	97	97	97	97	294	294

Dari data tabel 4.4 dan 4.5 hasil pengukuran di atas diperoleh grafik pada gambar 4.8 dan 4.9 sebagai berikut



Gambar 4.8 : Grafik hasil pengukuran tegangan  $V_a$ ,  $V_b$  dan  $V_c$  dengan beban lampu pijar hubung star



Gambar 4.9 : Grafik hasil pengukuran daya 3 fasa dengan beban lampu pijar hubung star

Dari hasil pengujian dengan beban lampu pijar didapatkan bahwa kecepatan putar rotor berpengaruh pula terhadap daya keluaran generator. Perubahan daya dan arus cenderung bertambah dengan meningkatnya putaran rotor sedangkan faktor daya tetap yaitu 0,998. Pada putaran 449 rpm daya 3 fasa adalah 247 watt dan putaran 500 rpm adalah 294 watt

#### IV.4 Pengujian dengan besar beban bervariasi hubung star

Beban yang digunakan adalah beberapa lampu pijar dengan variasi besar daya berbeda dan tegangan keluaran generator dibuat tetap 220 volt. Jumlah daya lampu bertambah dari 60 watt hingga 220 watt per fasa. Hasil pengukuran tercantum pada tabel 4.6 dan 4.7

Tabel 4.6 Data hasil pengukuran tegangan, arus dan faktor daya dengan besar beban bertambah pada hubung star

Beban per fasa (watt)	Fasa a			Fasa b			Fasa c		
	Va ( volt )	Ia ( A )	cos phi	Vb ( volt )	Ib ( A )	cos phi	Vc ( volt )	Ic ( A )	cos phi
60	220,6	0,26	0,996	220,1	0,26	0,996	220,3	0,26	0,996
(60+60)	220,5	0,52	0,998	220,7	0,52	0,999	220,4	0,52	0,998
(60+100)	220,8	0,69	0,999	220,6	0,68	0,999	220,8	0,68	0,999
(100+100)	220,6	0,87	0,999	220	0,85	0,999	220,8	0,84	0,999
(60+60+100)	220	0,95	0,999	220	0,94	0,999	220,5	0,94	0,999

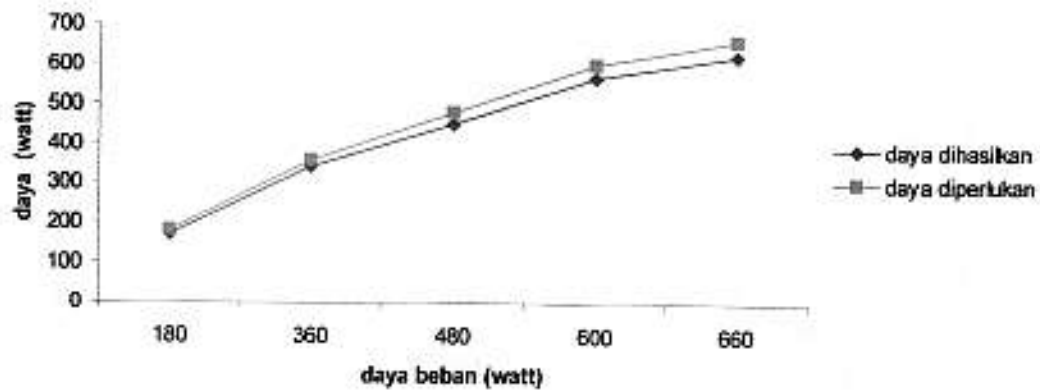
Tabel 4.7 Data hasil pengukuran daya 3 fasa dengan besar beban bertambah pada hubung star

Beban per fasa (watt)	Fasa a		Fasa b		Fasa c		JML P (watt)	JML S ( VA )
	P (watt)	S ( VA )	P (watt)	S ( VA )	P (watt)	S ( VA )		
60	57	57	57	57	57	57	171	171
(60+60)	115	115	115	115	115	115	345	345
(60+100)	152	152	150	150	150	150	452	452
(100+100)	194	192	189	189	184	186	567	567
(60+60+100)	208	208	206	206	207	207	621	621

Dari tabel 4.7 dapat dibuat grafik yang menggambarkan perbandingan antara daya yang dihasilkan dan daya yang diperlukan pada setiap besar beban yaitu pada gambar



4.10. Sedangkan Besarnya persentase daya yang dihasilkan generator pada tiap beban tercantum pada tabel 4.8.



Gambar 4.10 : Grafik perbandingan antara daya yang diperlukan dan daya yang dihasilkan generator hubung star

Tabel 4.8 Persentase daya 3 fasa yang dihasilkan terhadap daya diperlukan pada setiap beban hubung star

Daya beban lampu (watt)	Daya yang diberikan (watt)	Persentase daya yang diberikan (%)
180	171	95,0
360	345	95,8
480	452	94,2
600	567	94,5
660	621	94,1

Pada pengujian besar beban bervariasi (daya beban bertambah) dengan tegangan  $V$  dibuat tetap 220 volt diketahui bahwa faktor daya relatif tetap yaitu 0,99. Sedangkan daya 3 fasa yang diberikan berkisar (94,1 – 95) % dari besar beban yang dipasang seperti tercantum pada tabel 4.8

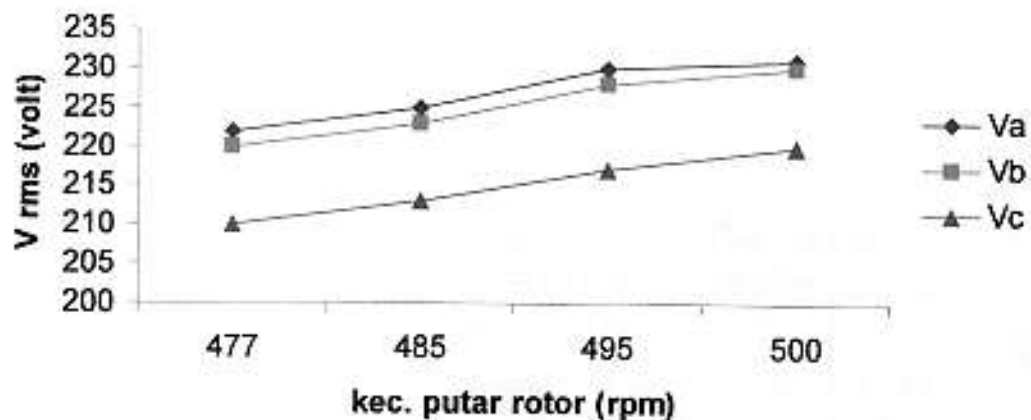
#### IV.5 Pengujian beban hanya pada 1 fasa

Kemudian dilakukan pula pengujian hanya pada satu fasa saja yaitu fasa c dengan beban lampu pijar. 2 x 100 watt hasilnya adalah pada tabel 4.9

Tabel 4.9 Data hasil pengukuran dengan beban lampu pijar pada fasa c

Putaran rotor (rpm)	Fasa c					Va (Volt)	Vb (Volt)
	Vc (volt)	Ic (A)	cos phi	P (watt)	S (VA)		
477	210	0,84	0,999	176	176	222	220
485	213	0,85	0,999	179	179	225	223
495	217	0,86	0,999	186	186	230	228
500	220	0,86	0,999	190	190	231	230

Dari data tabel 4.9 hasil pengukuran di atas diperoleh grafik pada gambar 4.11



Gambar 4.11 : Grafik hasil pengukuran tegangan Va, Vb dan Vc dengan beban lampu pijar hubung star hanya pada fasa c

Pada pengujian beban hanya pada satu fasa yaitu fasa c didapatkan bahwa selisih tegangan antara fasa tanpa beban dengan fasa berbeban dengan faktor daya 0,999 berkisar antara 10 ~13 volt. Pada pengujian tanpa beban subbab IV.2 dalam tabel 4.2 didapatkan bahwa putaran 477 rpm  $V_c = 220$  volt sedangkan dalam tabel 4.9 ketika diberikan beban pada putaran yang sama  $V_c$  menjadi 210 volt dengan daya dihasilkan 176 watt dan faktor daya 0,999.

#### IV.6 Pengujian dengan beban lampu pijar hubung delta

Pengujian berikutnya adalah dengan memberikan beban yaitu lampu pijar 100 watt hubung delta. Tegangan  $V_{ab}$  dan  $V_{ac}$  adalah tegangan line to line keluaran generator terhubung delta. Skema rangkaian pengukuran daya seperti pada gambar 4.2b dan hasil pengujian tercantum pada tabel 4.10 dan 4.11

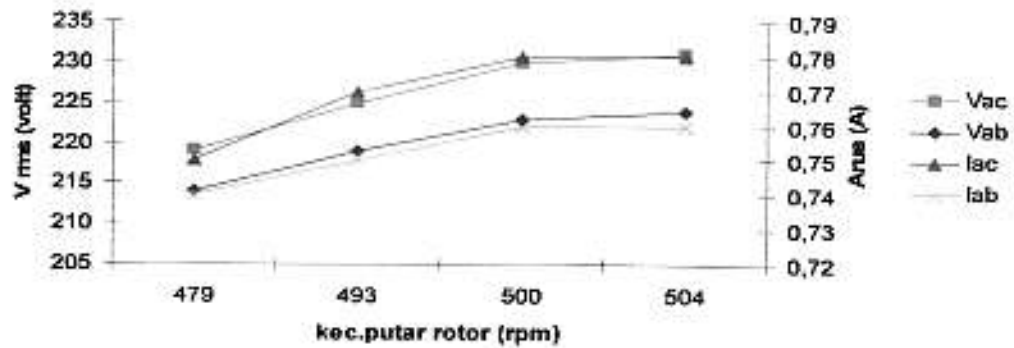
Tabel 4.10 Data hasil pengukuran tegangan, arus dan faktor daya untuk beban lampu pijar hubung delta

Putaran rotor ( rpm )	Line c			Line b		
	$V_{ac}$ ( volt )	$I_{ac}$ ( A )	cos phi	$V_{ab}$ ( volt )	$I_{ab}$ ( A )	cos phi
479	219	0,75	0,876	214	0,74	0,848
493	225	0,77	0,878	219	0,75	0,848
500	230	0,78	0,878	223	0,76	0,848
504	231	0,78	0,877	224	0,76	0,846

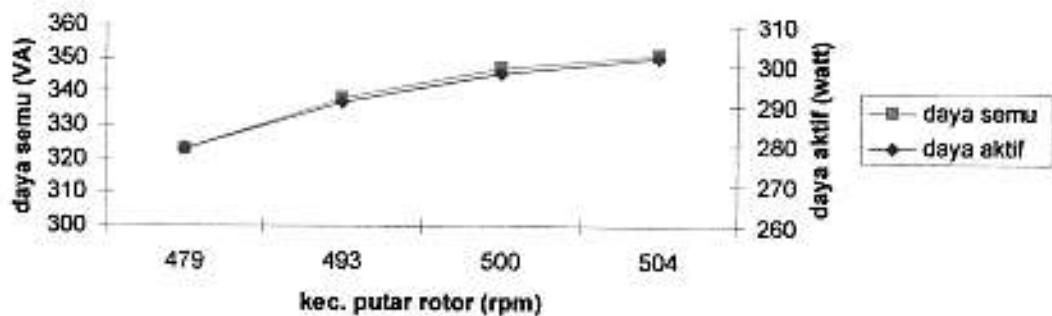
Tabel 4.11 Data hasil pengukuran daya aktif (P) dan daya semu (VA) untuk beban lampu pijar hubung delta

Putaran rotor ( rpm )	Line c		Line b		JML P (watt)	JML S ( VA )
	P (watt)	S ( VA )	P (watt)	S ( VA )		
479	146	166	133	157	279	323
493	152	174	139	164	291	338
500	156	178	142	169	298	347
504	158	181	144	170	302	351

Dari data tabel 4.10 dan 4.11 hasil pengukuran diperoleh grafik pada gambar 4.12 dan gambar 4.13 berikut :



Gambar 4.12 : Grafik hasil pengukuran tegangan dan arus pada beban lampu pijar hubung delta



Gambar 4.13 : Grafik hasil pengukuran daya 3 fasa dengan beban lampu pijar hubung delta

Sama halnya ketika hubung star pada hubung delta kecepatan putar rotor berpengaruh pula terhadap daya keluaran generator yaitu daya dan arus cenderung bertambah dengan meningkatnya putaran rotor. seperti tampak pada gambar 4.12 dan 4.13. Sedangkan faktor daya cenderung tetap yaitu 0,84 pada line b dan 0,87 pada line c. Pada putaran 479 rpm daya 3 fasa adalah 279 watt dan putaran 504 rpm meningkat menjadi 302 watt.

#### IV.7 Pengujian dengan besar beban bervariasi hubung delta

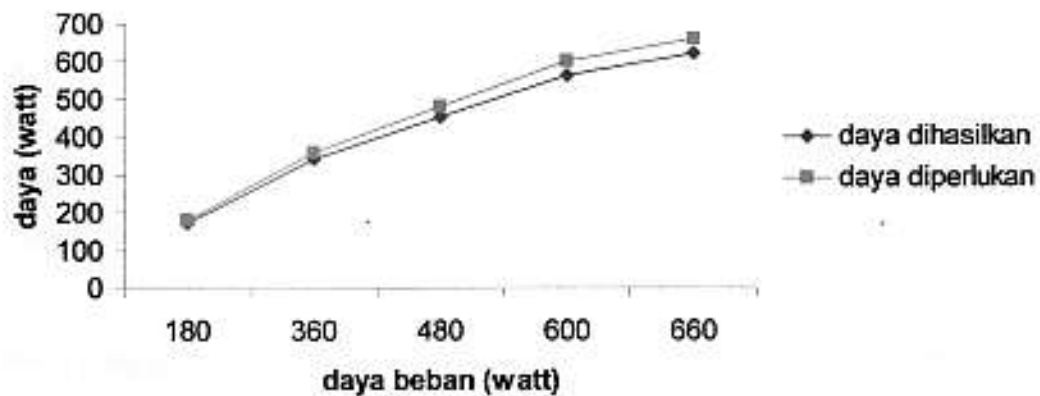
Pengujian hubung delta berikutnya adalah sama dengan pengujian IV.4 yaitu dengan besar beban bertambah. Variasi jumlah daya lampu yang digunakan juga sama yaitu 60 watt hingga 220 watt. Hasil pengukuran tercantum pada tabel 4.12 dan 4.13. Tabel 4.14 adalah Persentase daya 3 fasa dihasilkan terhadap daya diperlukan per tingkatan besar beban.

Tabel 4.12 Data hasil pengukuran tegangan, arus dan faktor daya dengan besar beban bertambah pada hubung delta

Beban per fasa (watt)	line c			line b		
	Vac ( volt )	Iac ( A )	cos phi	Vab ( volt )	Iab ( A )	cos phi
60	220,5	0,47	0,887	215	0,45	0,891
(60+60)	220,5	0,92	0,876	214,5	0,89	0,853
(60+100)	220,4	1,21	0,878	214,5	1,18	0,859
(100+100)	220,7	1,5	0,877	214,9	1,47	0,863
(60+60+100)	220,1	1,67	0,874	215	1,61	0,86

Tabel 4.13 Data hasil pengukuran daya 3 fasa dengan besar beban bertambah pada hubung delta

Beban per fasa (watt)	line c		line b		JML P (watt)	JML S ( VA )
	P (watt)	S ( VA )	P (watt)	S ( VA )		
60	91	103	81	97	172	200
(60+60)	178	202	163	190	341	392
(60+100)	235	268	218	253	453	521
(100+100)	289	331	272	313	561	644
(60+60+100)	322	368	299	348	621	716



Gambar 4.14 : Grafik perbandingan antara daya yang diperlukan dan daya yang dihasilkan generator hubung delta

Tabel 4.14 Persentase daya 3 fasa dihasilkan terhadap daya diperlukan per tingkatan besar beban hubung delta

Daya beban lampu (watt)	Daya yang diberikan (watt)	Persentase daya yang diberikan ( % )
180	172	95,6
360	341	94,7
480	453	94,4
600	561	93,5
660	621	94,1

Pada pengujian beban bervariasi dengan hubung delta pada tegangan V dibuat tetap 220 volt didapatkan bahwa faktor daya juga relatif tetap yaitu 0,99. Sedangkan daya 3 fasa yang diberikan berkisar (94,1 – 95,6) % dari besar beban yang dipasang

#### IV.8 Pengujian dengan beban motor listrik hubung delta

Berikutnya adalah pengujian dengan beban motor listrik 3 fasa dan data motor sesuai dengan name platnya adalah

Daya : 0,75 HP  
 Tegangan : 220 / 380 volt  
 Arus : 3,9 / 2,2 amper  
 Cos phi : 0,7  
 Putaran : 910 rpm  
 Frekwensi : 50 Hz

Pada pengujian ini pengasutan motor listrik menggunakan rangkaian pengasutan star delta dan tegangan keluaran generator yang digunakan adalah 3 fasa hubung delta. Skema rangkaian pengukuran daya seperti pada gambar 4.2b dan data hasil pengujian tercantum pada tabel 4.15 dan 4.16 berikut :

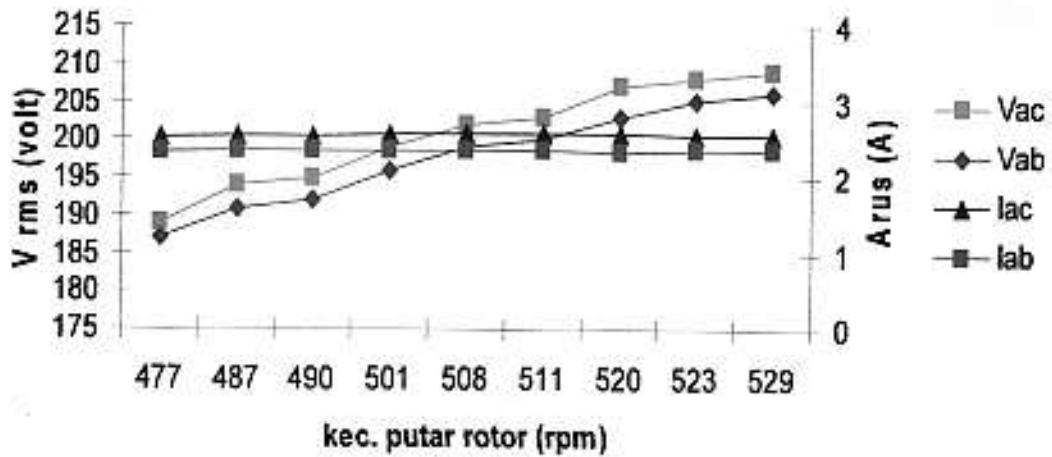
Tabel 4.15 Data hasil pengukuran tegangan dan arus antara fasa untuk beban motor listrik 3 fasa hubung delta

Putaran rotor generator ( rpm )	Line c			Line b			Putaran rotor motor ( rpm )
	Vac ( volt )	Iac ( A )	cos phi	Vab ( volt )	Iab ( A )	cos phi	
477	189	2,54	0,600	187	2,34	0,411	950
487	194	2,55	0,611	191	2,35	0,415	979
490	195	2,56	0,612	192	2,36	0,416	980
501	199	2,57	0,606	196	2,36	0,425	1000
508	202	2,58	0,608	199	2,37	0,416	1014
511	203	2,58	0,608	200	2,36	0,418	1019
520	207	2,57	0,604	203	2,34	0,421	1032
523	208	2,55	0,604	205	2,35	0,423	1045
529	209	2,55	0,604	206	2,35	0,426	1053

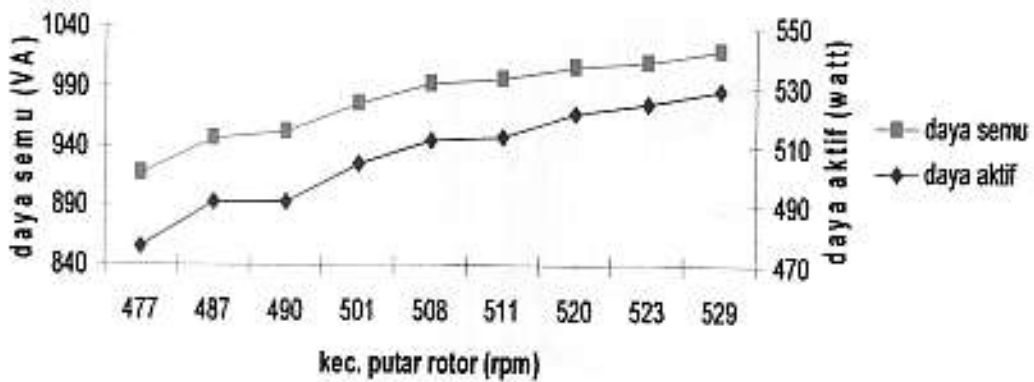
Tabel 4.16 Data hasil pengukuran daya aktif (P) dan daya semu (VA) untuk beban motor listrik 3 fasa hubung delta

Putaran rotor ( rpm )	line c		line b		JML P (watt)	JML S ( VA )
	P (watt)	S ( VA )	P (watt)	S ( VA )		
477	295	482	181	435	476	917
487	305	496	186	450	491	946
490	306	497	185	455	491	952
501	313	513	191	462	504	975
508	316	522	196	471	512	993
511	317	524	196	473	513	997
520	320	529	201	478	521	1007
523	322	531	202	479	524	1010
529	323	537	206	483	529	1020

Dari data tabel 4.15 hasil pengukuran di atas diperoleh gambar 4.15 yaitu grafik hubungan antara putaran rotor dengan tegangan dan arus pada motor listrik. Sedangkan gambar 4.16 adalah grafik daya 3 fasa yang diberikan pada motor berdasarkan tabel 4.16.



Gambar 4.15 : Grafik hasil pengukuran tegangan dan arus dengan beban motor listrik hubung delta



Gambar 4.16 : Grafik hasil pengukuran daya 3 fasa dengan beban motor listrik hubung delta

Dari data tabel 4.15 dan 4.16 pengujian dengan beban motor listrik hubung delta diketahui bahwa pada 501 rpm atau 50,1 Hz tegangan pada motor listrik adalah  $V_{ac} = 199$  volt  $\cos \phi = 0,6$  dan  $V_{ab} = 196$  volt  $\cos \phi = 0,4$ . Besar daya 3 fasa yang dapat diberikan generator adalah daya aktif  $P = 504$  watt dan daya semu  $S = 975$  VA.



## BAB V KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian terhadap rancang bangun generator fluks axial dapat disimpulkan, bahwa :

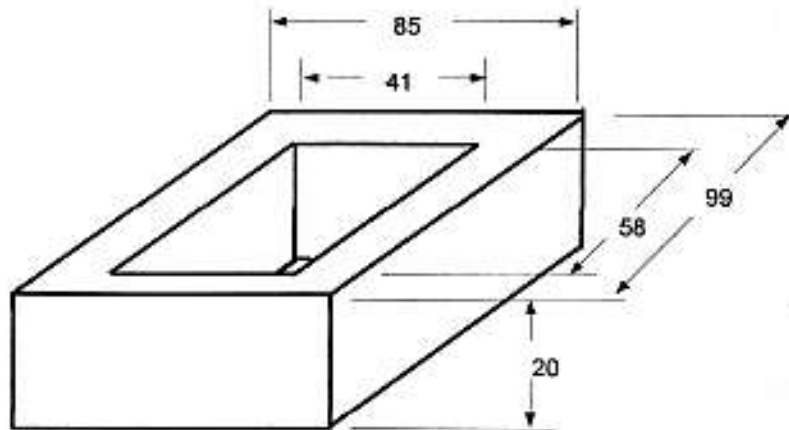
1. Daya 3 fasa yang dihasilkan generator dengan beban lampu pijar pada tegangan 220 volt adalah 621 watt baik kondisi hubung star ataupun delta. Sedangkan dengan beban motor listrik 3 fasa hubung delta didapatkan tegangan line to line  $V_{ab} = 196$  volt dan  $V_{ac} = 199$  volt daya aktif 504 watt dan daya reaktif 975 VA pada frekwensi 50,1 Hz
2. Tegangan keluaran generator.pada hubung star ataupun delta akan meningkat seiring dengan kenaikan kecepatan putar rotor. Pada kondisi tanpa beban didapatkan
  - Dengan hubung star pada putaran 302 rpm tegangan keluaran fasa ke netral  $V_a=140$  volt  $V_b=139$  volt  $V_c=139$  volt sedangkan pada putaran 538 rpm meningkat menjadi  $V_a=248$  volt  $V_b=249$  volt dan  $V_c=249$  volt
  - Dengan hubung delta pada putaran 302 rpm tegangan  $V_{ab}=136$  volt  $V_{bc}= 140$  volt  $V_{ac}=138$  volt sedangkan pada putaran 528 rpm meningkat menjadi  $V_{ab}=240$  volt,  $V_{bc}= 247$  volt dan  $V_{ac}=244$  volt
3. Daya 3 fasa keluaran generator.pada hubung star ataupun delta akan meningkat seiring dengan kenaikan kecepatan putar rotor. Pada kondisi diberikan beban lampu pijar 100 watt setiap fasa didapatkan :
  - Dengan hubung star daya 3 fasa keluaran generator pada putaran rotor 449 rpm adalah 247 watt sedangkan pada putaran 500 rpm meningkat menjadi 294 watt.
  - Dengan hubung delta daya 3 fasa keluaran generator pada putaran rotor 479 rpm adalah 279 watt dan putaran 500 rpm meningkat menjadi 298 watt.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] A.E. Fitzgerald , Charles Kiingsley Jr , Stephen D Umans alih bahasa Djoko Achyanto “ Mesin – Mesin Listrik ” edisi keempat, Erlangga, 1997
- [2] Dae-Won Chung and Yong-Min You “ Design and Performance Analysis of Coreless Axial-Flux Permanent-Magnet Generator for Small Wind Turbines” *Journal of Magnetics* 19(3), 273-281 (2014)
- [3] Francois Gerhardus Rossouw “Analysis and Design of Axial Flux Permanent Magnet Wind Generator System for Direct Battery Charging Applications
- [4] Garrison F. Price, Todd D. Batzel, Mihai Comanescu, and Bruce A. Muller “ Design and Testing of a Permanent Magnet Axial Flux Wind Power Generator ” *Proceedings of The 2008 IAJC-IJME International Conference*, Paper 190, ENT 202
- [5] Hadi Saadat “ Power System Analysis ” McGraw-Hill
- [6] Jacek F Gieras, Rong – Jie Wang, Marteen J Kamper “Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines ” Second Edition, Springer, New York 2008
- [7] J. R. Bumby, N. Stannard and R. Martin “ A Permanent Magnet Generator for Small Scale Wind ”
- [8] Lubna Nasrin “ Improved Version of Energy Efficient Motor for Shell Eco Marathon ” Royal Institute of Technology, Department of Electrical Engineering, Stockholm, October 2011
- [9] M. Aydin, S. Huang and T. A. Lipo “AXIAL FLUX PERMANENT MAGNET DISC MACHINES : A REVIEW ” University of Wisconsin-Madison, College of Engineering Wisconsin, Power Electronics Research Center, 2004
- [10] Maarten J .Kamper, Member,IEEE, Rong-Jie Wang, and Francois G. Rossouw “Analysis and Performance of Axial Flux Permanent-Magnet Machine With Air-Cored Nonoverlapping Concentrated Stator Windings
- [11] Paul A.Tipler ,alih bahasa Bambang Soegijono “ Fisika untuk sains dan teknik ” jilid 2 edisi ketiga, Erlangga

- [12] Staven Fahay, Journal " Basic Principles of the Homemade Axial Flux Alternator " New York, 2006
- [13] Stephen J. Chapman " Electric machinery and power system fundamentals " New York , McGraw-Hill
- [14] Zuhail " Dasar Teknik Tenaga Listrik Dan Elektronika Daya " , Gramedia , Jakarta
- [15] [www.artikel-teknologi.com/prinsip-kerja-generator-ac/](http://www.artikel-teknologi.com/prinsip-kerja-generator-ac/)

### Dimensi kumparan



Kumparan		Panjang sisi bagian luar ( mm )	Lebar sisi bagian luar ( mm )	Tinggi ( mm )	Panjang sisi bagian dalam ( mm )	Lebar sisi bagian dalam ( mm )
A	1	99	83	20,5	58	42
	2	99,5	85,5	19	57	41
	3	99,5	85,5	19,5	57	41
B	4	99	86	19,5	58	41
	5	98,5	86	19	58	40
	6	99,5	85	20	58	41
C	7	99,5	86	19	58	41
	8	99,5	84	20,3	58	42
	9	98,5	85	19,5	58	41
rata-rata		99,2	85,1	19,6	57,8	41,1

## Sintered NdFeB Magnets

### Typical Magnetic Properties

Grade	Max. Energy Product		Remanence		Coercive Force				Rev. Temp. Coeff.		Curie Temp.	Max. Working Temp.
	(BH) <sub>max</sub>		B <sub>r</sub>		H <sub>c</sub>		H <sub>ci</sub>		B <sub>d</sub>	H <sub>e</sub>	T <sub>c</sub>	T <sub>w</sub>
	MGOe	kJ/m <sup>3</sup>	kG	mT	kOe	kA/m	kOe	kA/m	%/°C	%/°C	°C	°C
N27	25-29	199-231	10,5	1050	>10.0	>796	>12.0	>955	-0,12	-0,6	310	80
N30	28-31	223-247	11	1100	>10.2	>812	>12.0	>955	-0,12	-0,6	310	80
N33	31-33	247-263	11,5	1150	>10.5	>836	>12.0	>955	-0,12	-0,6	310	80
N35	33-36	263-287	12	1200	>10.9	>868	>12.0	>955	-0,12	-0,6	310	80
N38	36-39	287-310	12,4	1240	>11.3	>899	>12.0	>955	-0,12	-0,6	310	80
N40	38-41	302-326	12,7	1270	>11.4	>907	>12.0	>955	-0,12	-0,6	310	80
N42	40-43	318-342	13	1300	>11.5	>915	>12.0	>955	-0,12	-0,6	310	80
N45	43-46	342-366	13,5	1350	>11.6	>923	>12.0	>955	-0,12	-0,6	310	80
N48	46-49	366-390	14	1400	>11.6	>923	>12.0	>955	-0,12	-0,6	310	80
N50	48-51	382-406	14,3	1430	>10.3	>820	>12.0	>955	-0,12	-0,6	310	80
N52	50-53	398-422	14,5	1450	>10.3	>820	>11.0	>877	-0,12	-0,6	310	80
N30M	28-31	223-247	11	1100	>10.2	>812	>14.0	>1114	-0,12	-0,59	320	100
N33M	31-33	247-263	11,5	1150	>10.5	>836	>14.0	>1114	-0,12	-0,59	320	100
N35M	33-36	263-287	12	1200	>10.9	>868	>14.0	>1114	-0,12	-0,59	320	100
N38M	36-39	287-310	12,4	1240	>11.4	>907	>14.0	>1114	-0,12	-0,59	320	100
N40M	38-41	302-326	12,7	1270	>11.6	>923	>14.0	>1114	-0,12	-0,59	320	100
N42M	40-43	318-342	13	1300	>12.0	>955	>14.0	>1114	-0,12	-0,59	320	100
N45M	43-46	342-366	13,5	1350	>12.5	>995	>14.0	>1114	-0,12	-0,59	320	100
N48M	46-49	366-390	14	1400	>12.9	>1027	>14.0	>1114	-0,12	-0,59	320	100
N50M	48-51	382-406	14,3	1430	>13.1	>1043	>14.0	>1114	-0,11	-0,58	320-350	100
N30H	28-31	223-247	11	1100	>10.2	>812	>17.0	>1353	-0,11	-0,58	320-350	120
N33H	31-34	247-271	11,5	1150	>10.5	>836	>17.0	>1353	-0,11	-0,58	320-350	120
N35H	33-36	263-287	12	1200	>10.9	>868	>17.0	>1353	-0,11	-0,58	320-350	120
N38H	36-39	287-310	12,4	1240	>11.4	>907	>17.0	>1353	-0,11	-0,58	320-350	120
N40H	38-41	302-326	12,7	1270	>11.6	>923	>17.0	>1353	-0,11	-0,58	320-350	120
N42H	40-43	318-342	13	1300	>12.0	>955	>17.0	>1353	-0,11	-0,58	320-350	120
N45H	43-46	342-366	13,5	1350	>12.5	>999	>17.0	>1353	-0,11	-0,58	320-350	120
N48H	46-49	366-390	14	1400	>12.9	>1027	>17.0	>1353	-0,11	-0,55	340-360	120
N30SH	28-31	223-247	11	1100	>10.2	>812	>20.0	>1592	-0,11	-0,55	340-360	150
N33SH	31-34	247-271	11,5	1150	>10.6	>844	>20.0	>1592	-0,11	-0,55	340-360	150
N35SH	33-36	263-287	12	1200	>11.0	>876	>20.0	>1592	-0,11	-0,55	340-360	150
N38SH	36-39	287-310	12,4	1240	>11.4	>907	>20.0	>1592	-0,11	-0,55	340-360	150
N40SH	38-41	302-326	12,7	1270	>11.8	>939	>20.0	>1592	-0,11	-0,55	340-360	150
N42SH	40-43	318-342	13	1300	>12.4	>987	>20.0	>1592	-0,11	-0,55	340-360	150
N45SH	43-46	342-366	13,5	1350	>12.6	>1003	>20.0	>1592	-0,11	-0,51	350-380	150
N28UH	26-29	207-231	10,6	1060	>9.6	>764	>25.0	>1990	-0,11	-0,51	350-380	180
N30UH	28-31	223-247	11	1100	>10.2	>812	>25.0	>1990	-0,11	-0,51	350-380	180
N33UH	31-34	247-271	11,5	1150	>10.8	>860	>25.0	>1990	-0,11	-0,51	350-380	180
N35UH	33-36	263-287	12	1200	>11.3	>899	>25.0	>1990	-0,11	-0,51	350-380	180
N38UH	36-39	287-310	12,4	1240	>11.5	>915	>25.0	>1990	-0,11	-0,51	350-380	180
N40UH	38-41	302-326	12,7	1270	>11.8	>939	>25.0	>1990	-0,11	-0,51	350-380	180

ISO 9001:2008 Quality Standard Certified

### Physical and Mechanical Properties

Thermal Conductivity

7.7 kcal/m-h-°C

Electrical Resistivity

160 μ-ohm-cm/cm<sup>2</sup>

Young's Modulus

1.7 x 10<sup>4</sup> kg/mm<sup>2</sup>

Density

7.4-7.5 g/cm<sup>3</sup>

Bending Strength

24 kg/mm<sup>2</sup>

Vickers Hardness

500 - 600

Compressive Strength

80 kg/mm<sup>2</sup>

Resistansi dan maksimum Arus kabel sesuai standar industri dalam AWG (American Wire Gauge)

AWG Gauge	Conductor Diameter mm	Ohms per Meter	Ohms per Km	Maximum Amps for chassis wiring	Maximum Amps for Power Transmission	Maximum frequency for 100% skin depth for solid conductor copper
0000	1.168.400	0.00016072	0.160720	380	302	125 Hz
000	1.040.384	0.00020270	0.202704	328	239	160 Hz
00	926.592	0.00025551	0.255512	283	190	200 Hz
0	825.246	0.00032242	0.322424	245	150	250 Hz
1	734.822	0.00040639	0.406392	211	119	325 Hz
2	654.304	0.00051266	0.512664	181	94	410 Hz
3	582.676	0.00064616	0.646160	158	75	500 Hz
4	518.922	0.00081508	0.815080	135	60	650 Hz
5	462.026	0.00102762	1.027.624	118	47	810 Hz
6	411.480	0.00129593	1.295.928	101	37	1100 Hz
7	366.522	0.00163410	1.634.096	89	30	1300 Hz
8	326.390	0.00206050	2.060.496	73	24	1650 Hz
9	290.576	0.00259809	2.598.088	64	19	2050 Hz
10	258.826	0.00327639	3.276.392	55	15	2600 Hz
11	230.378	0.00413280	4.132.800	47	12	3200 Hz
12	205.232	0.00520864	5.208.640	41	9.3	4150 Hz
13	182.880	0.00656984	6.569.840	35	7.4	5300 Hz
14	162.814	0.00828200	8.282.000	32	5.9	6700 Hz
15	145.034	0.01044352	10.443.520	28	4.7	8250 Hz
16	129.032	0.01317248	13.172.480	22	3.7	11 k Hz
17	115.062	0.01660992	16.609.920	19	2.9	13 k Hz
18	102.362	0.02094280	20.942.800	16	2.3	17 kHz
19	91.186	0.02640728	26.407.280	14	1.8	21 kHz
20	81.280	0.03329200	33.292.000	11	1.5	27 kHz
21	72.390	0.04198400	41.984.000	9	1.2	33 kHz
22	64.516	0.05293920	52.939.200	7	0.92	42 kHz
23	57.404	0.06678080	66.780.800	4.7	0.729	53 kHz
24	51.054	0.08419760	84.197.600	3.5	0.577	68 kHz