

**RANCANG BANGUN GENERATOR AC 1 PHASA DENGAN
MAGNET PERMANEN PADA MAKET PLTU**



HABIB SULISTYANTO

5115122575

**Skripsi ini Ditulis untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan dalam
Memperoleh Gelar Sarjana Pendidikan**

PROGRAM STUDI PENDIDIKAN TEKNIK ELEKTRO

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNIK


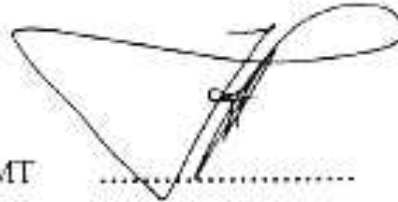

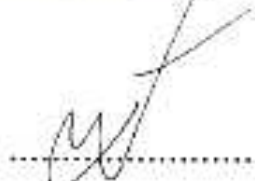

UNIVERSITAS NEGERI JAKARTA

2017

LEMBAR PENGESAHAN

RANCANG BANGUN GENERATOR AC 1 PHASA DENGAN MAGNET PERMANEN PADA MAKET PLTU HABIB SULISTYANTO/5115122575

PENGESAHAN PANITIA UJIAN SKRIPSI

NAMA DOSEN	TANDA TANGAN	TANGGAL
Drs. Purwanto G., MT (Ketua Penguji)		22.02.2017
Massus Subekti, S.Pd, MT (Sekretaris)		16-02-2017
Imam Arif R., MT (Dosen Ahli)		17.02.2017
Dr. Daryanto, MT (Dosen Pembimbing I)		17.02.2017
Dr. Suyitno, M.Pd (Dosen Pembimbing II)		20.02.2017

Tanggal Lulus : 10-02-2017

HALAMAN PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa :

1. Karya tulis skripsi saya ini adalah asli dan belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar akademik sarjana, baik di Universitas Negeri Jakarta maupun di perguruan tinggi lain.
2. Karya tulis ini adalah murni gagasan, rumusan, dan penelitian saya sendiri dengan arahan dosen pembimbing.
3. Dalam karya tulis ini tidak terdapat karya atau pendapat yang telah ditulis atau dipublikasikan orang lain, kecuali tertulis dengan jelas dicantumkan sebagai acuan dalam naskah dengan disebutkan nama pengarang dan dicantumkan daftar pustaka.
4. Pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya dan apabila kemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik berupa pencabutan gelar yang telah diperoleh karena karya tulis ini, serta sanksi lainnya sesuai dengan norma yang berlaku di Universitas Negeri Jakarta.

Jakarta, 20 Februari 2017

Yang Membuat Pernyataan



6000
Habib Sulistyanto

5115122575

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah Subhanallahu wa ta'ala yang telah memberikan rahmat, karunia dan hidayahnya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul “Rancang Bangun Generator AC 1 Phasa Dengan Magnet Permanen Pada Maket PLTU” yang merupakan persyaratan untuk meraih gelar Sarjana Pendidikan Teknik Elektro pada Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Jakarta.

Dalam kesempatan kali ini, izinkan penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang tak terhingga kepada :

1. Bapak Massus Subekti, M.T selaku Koordinator Program Studi Pendidikan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Negeri Jakarta.
2. Bapak Dr. Daryanto, M.T dan Bapak Dr. Suyitno M., M.Pd selaku dosen pembimbing yang dengan sabar memberikan bimbingan, motivasi serta ilmu yang bermanfaat dalam menyelesaikan skripsi ini.
3. Imam Arif Raharjo, MT. selaku dosen pembangkit energi listrik yang memberikan pengarahan dalam menyelesaikan skripsi ini.

Terimakasih juga penulis ucapkan kepada Kedua Orang Tua, keluarga, sahabat penulis di Keluarga Cemara dan teman-teman RETRO yang telah memberikan semangat, doa, serta dukungannya. Skripsi ini masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan adanya kritik dan saran yang membangun. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi peneliti dan pengembangan selanjutnya.

Jakarta, Februari 2017

Penulis

ABSTRAK

HABIB SULISTYANTO, RANCANG BANGUN GENERATOR AC 1 PHASA DENGAN MAGNET PERMANEN PADA MAKET PLTU, Skripsi. Jakarta: Fakultas Teknik Universitas Negeri Jakarta 2017. Dosen Pembimbing Dr. Daryanto, MT dan Dr. Suyitno M., M.Pd.

Tujuan penelitian ini adalah untuk menghasilkan generator AC 1 phasa dengan kutub silindris berdaya 3,21 VA dengan faktor daya 0,93. Generator ini selanjutnya akan dihubungkan pada turbin uap dengan poros yang sejajar sehingga kecepatan putar turbin sama besar dengan kecepatan putar rotor generator. Untuk mempercepat atau memperlambat kecepatan putar generator yaitu dengan cara mengatur katup (valve) pada pipa uap dari boiler menuju turbin. Semakin besar katup terbuka, semakin cepat putaran turbin dan generator. Sedangkan semakin kecil katup terbuka, semakin lambat putaran turbin dan generator.

Penelitian ini menggunakan Metode Deskriptif Analisis dengan pendekatan Kuantitatif. Jenis penelitian yaitu rekayasa teknik yang meliputi perencanaan, analisis kebutuhan, perancangan, dan pembuatan generator AC 1 phasa. Bahan utama dalam pembuatan generator ini yaitu dengan memodifikasi rotor motor assinkron dengan cara memasang magnet Neodymium (NdFeB) sebanyak 36 buah dengan jumlah kutub yaitu 6 kutub. Proses peletakkan magnet pada rotor dengan metode *magnet skewing* atau memiringkan magnet dengan pergeseran sebesar 3,42 mm dari busur magnet. Selain memodifikasi rotor motor assinkron, jumlah lilitan pada stator motor juga dirubah menjadi lilitan 1 phasa dengan jumlah lilitan keseluruhan sebanyak 9120 lilitan dan diameter kawat email 0,18 mm.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa generator AC 1 Phasa dengan magnet permanen berkutub silindris mampu menghasilkan tegangan sebesar 214 V atau -2,7% dari tegangan yang berlaku di Indonesia sesuai dengan Standar Nasional Indonesia (SNI) No. 04-0227-2003 yaitu sebesar -10%. Sedangkan frekuensi yang dihasilkan oleh generator sebesar 50,5 Hz atau sesuai dengan batas maksimal frekuensi yang diizinkan oleh Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral (Permen ESDM) no. 04 tahun 2009 yaitu sebesar 50,5 Hz. Generator AC 1 phasa mampu menanggung beban listrik sebesar 3 watt. Hal ini ditunjukkan dengan penurunan tegangan (*drop voltage*) dari 214 V frekuensi 50 Hz menjadi 204 V frekuensi 50 Hz atau sebesar 10 V (4,85%) sesuai dengan Peraturan Umum Instalasi Listrik (PUIL) 2011 tentang penurunan tegangan yang diijinkan sebesar 5%.

Kata Kunci : Generator AC 1 phasa, magnet neodymium, maket, PLTU

ABSTRACT

HABIB SULISTYANTO, DESIGNED GENERATOR AC 1 PHASA WITH A PERMANENT MAGNET ON MAKET PLTU, Skripsi. Jakarta: Faculty of Enggining, Jakarta State University 2017. Supervisor Dr. Daryanto, MT dan Dr. Suyitno M., M.Pd.

The purpose of this research is to produce a generator AC 1 phasa with the cylindrical poles on powerless 3 VA, power factor 0,93. This generator will next is in steam turbine with a shaft parallel so speed turn turbine as large as speed turn the rotor generator. to fasten or slow speed generator is a set manner valve at the steam coming from a boiler to turbine. The bigger open valve, the sooner round turbine and the generator. while the less open valve, slower round turbine and the generator.

This method research uses a descriptive analysis with the quantitative apptoach. The kind of research is a technical engineering which includes planning, analysis needs, design and manufacture of generator AC 1 phasa. The main ingredient in making this generator is modify the rotor motor assyncon with how to install neodymium magnetic (NdFeB) as many as 36 with six polar. The process of laying of magnets to the rotor with the magnetic skewing by shifting of 3,42 mm of an arc magnetic. In addition to modify rotor motor assyncon, the number of coil in stator motor also turned into a convolution 1 phasa by the number of coil a whole as many as 9120 coil and the diameter of wire email 0,18 mm.

The research results show that generator AC 1 phasa with neodymium magnetic cylindrical poles capable of producing a voltage of 214 V or -2,7% of voltage in effect in Indonesia according to Indonesia National Standard (SNI) no. 04-0227-2003 as much as -10%. While frequency produced by generator of 50,5 Hz or accordance with the utmost limit frequency permitted by the minister energy and mineral resource (Permen ESDM) no. 4 2009 as much as 50,5 Hz. Generator AC 1 phasa afford to cover an electrical load 3 watt. This is apparent from drop voltage of 214 V frequency 50 Hz be 204 V frequency 50 Hz or amounting 10 V (4,85%) in accordance with PUIL 2011 about drop voltage allowed by 5%.

Keywords: Generator AC 1 phasa, neodymium magnet, scale model, steam power plant

DAFTAR ISI

	Halaman
LEMBAR PENGESAHAN	ii
HALAMAN PERNYATAAN.....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
ABSTRAK	v
ABSTRACT.....	vi
DAFTAR ISI.....	vii
DAFTAR GAMBAR.....	x
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR LAMPIRAN.....	xv
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang Masalah	1
1.2 Identifikasi Masalah.....	4
1.3 Batasan Masalah.....	5
1.4 Rumusan Masalah	5
1.5 Tujuan Penelitian	5
1.6 Kegunaan Penelitian.....	6
BAB II KAJIAN TEORITIK DAN KERANGKA BERFIKIR	
2.1 Deskripsi Konseptual	7
2.1.1 Generator SinkronMasalah	7
2.1.2 Konstruksi Generato Sinkron.....	8
2.1.2.1 Rotor.....	10
2.1.2.2 Stator	13
2.1.2.3 Kawat Email.....	22
2.1.3 Generator Sinkron Tanpa Beban.....	23
2.1.4 Generator Sinkron Berbeban.....	26
2.1.5 Magnet Permanen.....	28

2.1.6	Generator Sinkron Magnet Permanen	30
2.1.7	Metode Memiringkan Magnet (<i>Skewing Magnet</i>)	39
2.1.8	Penurunan Tegangan (<i>Drop Voltage</i>)	43
2.2	Prosedur Penelitian	47

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1	Tempat dan Waktu Penelitian	50
3.2	Alat dan Bahan Penelitian	51
3.2.1	Pemodelan Tiga Dimensi (3D) PLTU	51
3.2.2	Stator	51
3.2.3	Rotor.....	52
3.3	Diagam Alir Penelitian.....	53
3.3.1	Penentuan Karakteristik Material	56
3.3.1.1	Magnet Permanen.....	56
3.3.1.2	Rotor Generator.....	57
3.3.1.3	Lilitan Stator	61
3.3.1.4	Arus Phasa.....	70
3.3.1.5	Resistansi Kawat Email	70
3.3.1.6	Tegangan Phasa.....	73
3.3.2	Tahapan Pembuatan Generator	74
3.3.3	Tahapan Pengujian Tegangan dan Daya Keluaran	77
3.3.4	Tahapan Perhitungan Rugi-Rugi Generator.....	77
3.4	Teknik dan Prosedur Pengumpulan Data.....	78
3.4.1	Pengujian Daya Generator	78
3.4.2	Pengujian Rugi-Rugi Tembaga.....	79
3.4.3	Pengujian Efisiensi Generator.....	82
3.5.	Teknik Analisis Data.....	82

BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1	Deskripsi Hasil Penelitian	84
4.1.1	Hasil Pengukuran Generator Tanpa Beban	88
4.1.2	Hasil Pengukuran Generator Berbeban	89
4.1.3	Hasil Pengukuran Hambatan dan Induktansi Generator	89
4.2	Analisis Data Penelitian	90
4.2.1	Pengukuran Generator Tanpa Beban	90
4.2.2	Pengukuran Generator Berbeban	94
4.3	Aplikasi Hasil Penelitian.....	102

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1	Kesimpulan	103
5.2	Saran.....	104

DAFTAR PUSTAKA	105
-----------------------------	------------

LAMPIRAN.....	107
----------------------	------------

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Konstruksi Generator Sinkron	9
Gambar 2.2 Rotor Kutub Menonjol	11
Gambar 2.3 Rotor Kutub Silindris	12
Gambar 2.4 Stator Generator	13
Gambar 2.5 Konstruksi Generator Sinkron.....	14
Gambar 2.6 Kumbaran Spiral	15
Gambar 2.7 Kumbaran Terpusat	16
Gambar 2.8 Penampang Melintang Alur Kumbaran Jerat	17
Gambar 2.9 Belitan pada Alur Kumbaran Jerat	18
Gambar 2.10 Penampang Melintang Alur Kumbaran Terpusat.....	18
Gambar 2.11 <i>Pitch Factor</i>	21
Gambar 2.12 Rangkaian Ekuivalen Generator Sinkron Tanpa Beban.....	24
Gambar 2.13 Kurva Karakteristik Generator Sinkron Tanpa Beban	25
Gambar 2.14 Pengaruh Faktor Daya Beban Terhadap GGL Armatu Tanpa Beban	25
Gambar 2.15 Karakteristik Generator Sinkron Berbeban	26
Gambar 2.16 Rangkaian Ekuivalen Generator Sinkron Berbeban.....	28
Gambar 2.17 Generator Sinkron Fluks Aksial dan Radial.....	31
Gambar 2.18 Beberapa kemungkinan posisi magnet permanen pada rotor, (a) lurus, (b) digeser dari posisi a, (c) digeser dari posisi b, (d) digeser dari posisi c	40
Gambar 2.19 Model 3D Dari Rotor GMP.....	40
Gambar 2.20 Kemiringan Satu Kutub Magnet	40
Gambar 2.21 Bentuk Gelombang Torsi <i>Cogging</i> Sebesar Satu Kutub Pada Tiga Posisi Kemiringan Magnet.....	41
Gambar 2.22 Toleransi Tegangan Pelayanan yang Dijinkan.....	44

Gambar 3.1	<i>Flowchart</i> Pembuatan Generator	55
Gambar 3.2	Dimensi Magnet Neodymium	56
Gambar 3.3	Dimensi Rotor Motor Listrik.....	57
Gambar 3.4	Dimensi Rotor Tanpa Magnet	58
Gambar 3.5	Penempatan Magnet Pada Rotor	59
Gambar 3.6	Dimensi Rotor Dengan Magnet	59
Gambar 3.7	Desain Rotor 3 Dimensi	60
Gambar 3.8	Desain Rotor Generator secara Vertikal.....	60
Gambar 3.9	Spesifikasi Desain Generator	62
Gambar 3.10	(A) Beitan Sebelum di <i>Pitch Factor</i> dan (B) Beitan Setelah di <i>Pitch Factor</i>	64
Gambar 3.11	Rancang Alur Stator Secara Melintang	65
Gambar 3.12	Rancang Alur Stator Generator	65
Gambar 3.13	Inti Alur Stator Generator	68
Gambar 3.14	Dimensi Alur Stator Generator	68
Gambar 3.15	Desain Lilitan Alur Stator Generator 3 Dimensi.....	69
Gambar 3.16	Dimensi Alur 1-4 pada Stator.....	71
Gambar 3.17	Rancang Generator 3 Dimensi	74
Gambar 3.18	Bagian dalam Generator 3 Dimensi	75
Gambar 3.19	Pemasangan Generator pada Maket PLTU	76
Gambar 3.20	Pemasangan Generator pada Maket PLTU	76
Gambar 3.21	Pengukuran Hambatan Generator	80
Gambar 3.22	Pengukuran Induktansi Generator.....	80
Gambar 4.1	Generator Sinkron 3VA	84
Gambar 4.2	Komponen-Komponen Generator Sinkron	84
Gambar 4.3	Rotor Pada Generator	85
Gambar 4.4	Stator Pada Generator (a) Tampak Samping, (b) Tampak Atas.....	85
Gambar 4.5	Maket PLTU.....	86
Gambar 4.6	Pemasangan Generator dengan Turbin	86
Gambar 4.7	Generator Dan Turbin Saat Terhubung.....	87

Gambar 4.8 Generator Dan Turbin Saat Terlepas.....	87
Gambar 4.9 Turbin Uap	88

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1. Standarisasi Putaran Mesin Serempak 50Hz Menurut Hütte.....	10
Table 2.2. Kemampuan Hantar Arus Kawat Email	23
Tabel 2.3. Perbandingan Karakteristik Magnet Permanen	29
Tabel 2.4 Sifat Fisik Magnet NdFeB	30
Table 2.5 Koefisien Steinmentz Histerisis	38
Table 2.6 Perbandingan Torsi <i>Cogging</i> GMP Hasil Simulasi dan Uji GMP Terkoppel Motor Penggerak.....	42
Table 2.7 Tegangan Nominal antara 100-1000 V	44
Table 3.1 Karakteristik Magnet NdFeB	56
Table 3.2 Karakteristik Rotor Generator.....	61
Table 3.3 Parameter Menghitung Lilitan Stator	63
Table 3.4 Daftar Lilitan Pada Alur Stator.....	64
Table 3.5 Rancang Generator Pada Maket PLTU.....	74
Table 3.6 Pengujian Generator Tanpa Beban	78
Table 3.7 Pengujian Generator Berbeban	79
Table 3.8 Pengukuran Hambatan Pada kumparan Stator	80
Table 3.9 Pengukuran Induktansi Pada kumparan Stator.....	81
Table 3.10 Perhitungan Rugi Tembaga.....	82
Table 3.11 Perbedaan Tegangan Perhitungan dengan Pengukuran	83
Table 4.1 Data Turbin Uap	87
Table 4.2 Pengukuran Pada Generator Tanpa Beban.....	88
Table 4.3 Pengukuran Generator Berbeban	89
Table 4.4 Pengukuran Hambatan Pada Kumparan Stator	90
Table 4.5 Pengukuran Induktansi Pada Generator Berbeban.....	90
Table 4.6 Pengukuran Pada Generator Tanpa Beban.....	91
Table 4.7 Perbedaan Tegangan Perhitungan dengan Pengukuran	93
Table 4.8 Perhitungan Rugi Tembaga.....	97

Table 4.9 Perhitungan Efisiensi Generator	99
Table 4.10 Presentase Penurunan Tegangan Berbeban	100
Table 4.11 Torsi Pada Generator	101
Table 4.12 Spesifikasi Generator AC 1 Phasa	102

LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran 1. Dokumentasi Pembuatan Rotor dan Stator Generator	107
Lampiran 2. Pengukuran Induktansi dan Resistansi Stator Generator.....	110
Lampiran 3. Pengukuran Generator Tanpa Beban.....	112
Lampiran 4. Pengukuran Generator Berbeban	116
Lampiran 5. Data Perhitungan Tegangan Induksi.....	118
Lampiran 6. Data Perhitungan Regulasi Tegangan.....	122
Lampiran 7. Data Perhitungan Torsi Generator	125
Lampiran 8. <i>Datasheet</i> Instrumen.....	128

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Kebutuhan energi listrik di Indonesia setiap tahunnya mengalami peningkatan. Menurut Rancangan Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PT PLN (Persero) (<http://www.pln.co.id> diakses 22 Oktober 2015 pukul 20.24 WIB), penjualan tenaga listrik PLN tahun 2014 sebesar 197,3 TWh dengan kapasitas terpasang pembangkit PLN dan IPP di Indonesia adalah 43.457 MW. Salah satu pembangkit yang berkontribusi membangkitkan energi listrik yaitu Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Hingga November 2014, PLTU telah membangkitkan energi listrik sebesar 19.545 MW.

Konversi energi tingkat pertama yang berlangsung dalam PLTU adalah konversi energi primer menjadi energi panas (kalor) yang mana terjadi pada ruang bakar dari ketel uap (*Boiler*) PLTU. Energi panas ini kemudian dipindahkan ke dalam air yang ada pada pipa ketel untuk menghasilkan uap yang dikumpulkan dalam drum dari ketel yang selanjutnya mengalir ke turbin uap. Dalam turbin uap, energi uap dikonversikan menjadi energi mekanis penggerak generator dan akhirnya energi mekanik dari turbin uap dikonversikan menjadi energi listrik oleh generator (Marsudi,2005:100).

Umumnya, PLTU menggunakan generator sinkron dengan sistem penguat terpisah sebagai penghasil medan magnet pada rotor dimana sumber energi listrik DC dihasilkan baik dari generator DC ataupun meregulasi dari output generator.

Penggunaan sistem eksitasi pada generator memiliki beberapa kelemahan. Pada sistem eksitasi dengan sikat (*brush excitation*) harus dilakukan pemeriksaan sikat arang secara berkala dan timbulnya percikan bunga api saat putaran tinggi. Pada sistem eksitasi tanpa sikat (*brushless excitation*) harus memiliki sistem proteksi terhadap hubung singkat atau gangguan hubung tanah di rotor. Apabila terdapat gangguan pada rotor yang sedang berputar dapat menimbulkan distorsi medan magnet sehingga menimbulkan vibrasi (getaran) yang berlebih pada unit pembangkit.

Magnet permanen adalah salah satu material dengan aplikasi yang luas pada berbagai macam industri di Indonesia dan merupakan material yang sangat strategis. Magnet permanen adalah suatu bahan yang dapat menghasilkan medan magnet yang besarnya tetap tanpa adanya pengaruh dari luar atau disebut magnet alam karena memiliki sifat kemagnetan yang tetap. Pemanfaatan magnet permanen dapat diaplikasikan pada berbagai peralatan, salah satunya yaitu generator listrik.

Pada generator, penempatan magnet permanen dibedakan berdasarkan arah aliran fluksnya. Berdasarkan arah aliran fluks yang dihasilkan oleh magnet permanen, maka generator sinkron ini diklarifikasikan menjadi dua yaitu generator sinkron dengan fluks radial dan generator sinkron dengan fluks aksial. Mengacu pada Azka (Skripsi,2013:22) generator magnet permanen fluks aksial merupakan generator magnet permanen yang memiliki arah medan fluks sejajar dengan sumbu putar. Sedangkan generator magnet permanen fluks radial merupakan generator magnet permanen yang memiliki arah medan fluks searah dengan arah putaran rotor.

Generator magnet permanen fluks axial memiliki sejumlah keunggulan yang berbeda dari generator fluks radial, yaitu mereka dapat dirancang untuk memiliki rasio daya tinggi sehingga rasio bahan inti berkurang, planar dan mudah disesuaikan dengan kondisi udara, mengurangi kebisingan dan tingkat getaran. Selain itu, arah jalan airgap fluks dapat bervariasi, sehingga mengurangi topologi tambahan.

Generator magnet permanen fluks radial memiliki keunggulan yaitu mudah dalam pemasangan magnet permanen ke inner-rotor serta memiliki struktur yang mirip dengan motor DC maupun motor AC yang berada di digunakan sehari-hari.

Berdasarkan proses terjadi energi listrik pada generator, maka diperlukan simulasi untuk mengetahui atau menjelaskan prinsip kerja dari generator. Untuk mengimplementasikan simulasi dari kinerja sebuah generator maka diperlukan pembuatan generator dalam skala kecil.

Seorang maketor Professional, Keith Day menegaskan dalam tulisannya model making: Model Builder Supply (MBS) "*Scale model are still the most effective and instant way of completely communicating a concept, in spite of the advances in computerization*". Media dua dimensi yang menggambarkan bentuk tiga dimensi seperti video ataupun poster memang cara yang baik untuk penyampaian informasi, namun menurut penulis media tersebut masih kurang efektif dibandingkan dengan maket. Seperti yang diungkapkan oleh Keith day model skala atau maket masih lebih efektif karena beberapa kelebihanannya yaitu maket bersifat nyata, terwujud, jelas dan dapat teraba sehingga penyampaian informasinya dapat terkomunikasikan dengan baik. Hal ini juga didukung oleh penelitian seorang mahasiswa UI bahwa mahasiswa yang menggunakan maket

sebagai media presentasinya tidak membutuhkan waktu yang lama untuk menjelaskan gagasan ide dari desainnya dibandingkan dengan mahasiswa yang tidak menggunakan maket.

Bertitik tolak dari uraian di atas, maka penulis tertarik untuk membuat generator AC 1 fasa dengan menggunakan magnet permanen sebagai penghasil medan magnet. Arah fluks magnet yang digunakan yaitu fluks radial dengan memanfaatkan motor listrik yang dirancang dan dibuat menjadi generator sinkron fluks radial dengan magnet permanen sebagai penghasil fluks magnet. Sehingga fluks magnetik yang dihasilkan selalu konstant serta dapat diaplikasikan pada energi mekanik yang kecil, khususnya pada maket PLTU ini.

1.2 Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dipaparkan sebelumnya, dapat dijabarkan beberapa masalah yang dapat diidentifikasi, yaitu:

1. Pembuatan generator AC 1 Fasa dengan fluks radial.
2. Kemampuan generator AC 1 Fasa untuk menghasilkan energi listrik sebesar 3,21VA dengan faktor daya 0,93.
3. Terdapat perbedaan kerapatan fluks magnet terhadap celah udara antara stator dan rotor.
4. Penggunaan generator pada maket PLTU sebagai media pembelajaran pada mata kuliah generator listrik.
5. Daya yang dihasilkan oleh generator mampu tersinkronisasi oleh jaringan listrik PLN
6. Terdapat perubahan kecepatan putar rotor generator dengan penggunaan beban listrik berlebih.

1.3 Batasan Masalah

Dari uraian permasalahan yang telah diidentifikasi, untuk lebih menspesifikasikan penelitian dilakukan pembatasan ruang lingkup penelitian sebagai berikut :

1. Generator yang dirancang hanya digunakan pada maket PLTU.
2. Tipe generator adalah generator sinkron magnet permanen fluks radial.
3. Generator yang akan dibuat adalah generator 1 phase berdaya 3,21 VA dengan faktor daya 0,93.
4. Menggunakan stator dari motor listrik asinkron berdaya 17 watt.
5. Celah udara yang digunakan sebesar 0,6 mm atau 0,0006 m.

1.4 Rumusan Masalah

Berdasarkan identifikasi masalah dan batasan masalah yang telah dikemukakan sebelumnya, maka dapat dituliskan rumusan masalah penelitian ini: “Apakah generator AC 1 Phasa dengan rotor kutub silindris hasil rancang bangun mampu menghasilkan daya 3,21 VA dengan faktor daya 0,93?”.

1.5 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah untuk menghasilkan generator AC 1 Phasa dengan rotor kutub silindris berdaya 3 VA dengan faktor daya 0,93.

1.6 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat bermanfaat baik dari segi keilmuan maupun segi praktis. Adapun kegunannya sebagai berikut:

1. Dari segi keilmuan, hasil penelitian ini diharapkan dapat bermanfaat dan memberikan kontribusi khususnya pada ilmu pendidikan agar dapat menjadi sebuah media pembelajaran. Pada program studi pendidikan teknik elektro, penelitian ini dapat dijadikan sebagai alat peraga pada mata kuliah Pembangkit Energi Listrik.
2. Dari segi praktis, hasil penelitian ini diharapkan menjadi referensi bagi produsen generator untuk membuat generator mampu menghasilkan energi listrik dengan energi kinetik yang kecil.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Deskripsi Konseptual

2.1.1 Generator Sinkron

Generator sebagai komponen utama pada pembangkit listrik berfungsi mengubah energi mekanik yang dihasilkan oleh turbin menjadi energi listrik. Menurut Kadir (2010:95), dalam bentuknya yang sederhana sebuah generator listrik terdiri atas magnet dan kumparan. Apabila terdapat suatu gerak relatif antara kedua komponen, garis-garis gaya magnet memotong belitan-belitan kumparan dan suatu Gaya Gerak Listrik (GGL) akan dibangkitkan.

Generator sinkron adalah generator yang menggunakan prinsip induksi elektromagnetik dalam pengoperasiannya. Jika rotor generator sinkron diputar pada suatu kecepatan tertentu disebut sebagai putaran sinkron dan belitan medan pada rotornya dialiri arus sehingga menghasilkan fluks yang turut berputar memotong belitan jangkar yang terdapat pada bagian stator, maka sebagai akibat adanya perubahan fluks persatuan waktu yang dirasakan oleh belitan jangkar akan menghasilkan perbedaan tegangan listrik.

Dalam teori generator sinkron dari Universitas Sumatera Utara (www.wahyukr.staff.gunadarma.ac.id, diakses 21 januari 2016), besarnya tegangan induksi yang dibangkitkan pada stator diturunkan dari Hukum Faraday yang menyatakan gaya gerak listrik induksi yaitu:

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (2.1)$$

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

$$= -N \omega \phi_{maks} \cos \omega t$$

Bila: $\omega = 2\pi f \longrightarrow$ maka $= -N(2\pi f)\phi_{maks} \cos \omega t$

Bila: $f = \frac{np}{120} \longrightarrow$ maka $= -N\left(2\pi \frac{np}{120}\right)\phi_{maks} \cos \omega t$

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

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

$$= \frac{4,44Npn\phi_{maks}}{120}$$

Bila: $K = \frac{4,44Np}{120}$ maka : $E_{eff} = Kn\phi_{maks}$

(2.2)

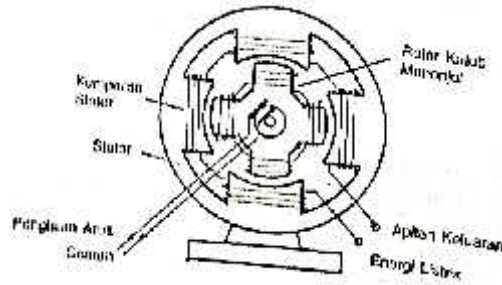
dimana:

E_{eff}	= ggl Induksi (volt)	n	= putaran (rpm)
N	= jumlah lilitan	f	= frekuensi (Hz)
K	= konstanta	ϕ_{maks}	= fluks magnetik (weber)
P	= jumlah kutub		

2.1.2 Konstruksi Generator Sinkron

Ada dua komponen utama penyusun generator sinkron, yaitu stator dan rotor. Stator merupakan bagian dari generator yang diam, dimana tempat tegangan induksi dibangkitkan. Sedangkan rotor merupakan bagian dari generator yang menghasilkan medan magnet.

Dari buku Kadir (2010:95), secara umum terdapat dua tipe konstruksi. Pada salah satu tipe, sistem magnet berada dalam keadaan stasioner atau tidak bergerak sedangkan armature kumparan yang berputar di dalam medan magnet. Pada tipe kedua, armature kumparan yang tidak bergerak sedangkan magnet terpasang pada suatu poros yang bergerak mengelilingi kumparan.



Gambar 2.1. Konstruksi Generator Listrik
Sumber : Buku Pembangkit Tenaga Listrik, 2010

Pada gambar 2.1. memperlihatkan skema prinsip sebuah generator listrik. Bagian poros yang terpasang di tengah-tengah dengan medan magnet yang terletak pada tiap sisinya dikenal sebagai rotor. Rotor terletak di dalam sebuah rumah dilengkapi dengan kumparan. Karena rumah ini merupakan bagian generator yang tidak bergerak maka dinamakan stator. Apabila poros rotor tersambung pada sebuah penggerak mula dan diputar, medan magnet yang turut berputar akan memotong kumparan-kumparan stator sehingga didalam kumparan stator akan diinduksikan gaya gerak listrik dan membangkitkan energi listrik.

2.1.2.1. Rotor

Rotor merupakan bagian dari generator listrik yang berputar pada sumbu porosnya dan menghasilkan medan magnet. Kecepatan putar rotor ditentukan dengan rumus:

$$n = \frac{60 \times f}{p} \quad (2.3)$$

dengan :

f = frekuensi (Hz);

n = jumlah putaran per menit;

p = jumlah pasangan kutub.

Tabel 2.1. Standarisasi Putaran Mesin Serempak 50 Hz Menurut Hütte

2p	N (ppm)	2p	n (ppm)
2	3.000	(28)	(214)
4	1.500	32	188
6	1.000	(36)	(167)
8	750	40	150
10	600	48	125
12	500	(56)	(107)
16	375	64	94
20	300	(72)	(83)
24	250	80	75

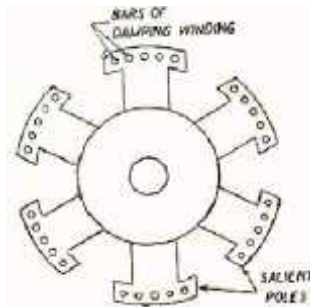
Sumber : Buku Mesin Serempak, 1983

Pada tabel 2.1. apabila sebuah generator listrik menghasilkan frekuensi $f = 50$ Hz dengan satu pasang kutub ($p=1$) maka memerlukan kecepatan putar (n) sebesar 3000 putaran per menit dan apabila sebuah generator listrik menghasilkan frekuensi $f=50$ Hz dengan tiga pasang kutub ($p=6$) maka memerlukan kecepatan putar (n) sebesar 1000 (Kadir, 1983: 29).

Menurut Azka (Skripsi,2013:8), ada dua tipe rotor yang digunakan pada generator, yaitu rotor dengan kutub menonjol (*salient pole*) dan rotor kutub silindris (*non-salient pole/cylindrical rotor*).

a. Rotor Kutub Menonjol (*salient pole*)

Pada jenis ini, kutub magnet menonjol keluar dari permukaan rotor. kutub-kutub magnet yang menonjol bervariasi, mulai dari 2, 3 serta 4 pasang kutub menonjol. Medan magnet yang dihasilkan oleh kutub stator diperoleh dari magnet permanen ataupun dari belitan-belitan rotor yang dihubungkan pada sumber eksitasi yang berarus searah (DC). Konstruksi dari rotor kutub menonjol dapat dilihat pada gambar 2.2.



Gambar 2.2. Rotor Kutub Menonjol

Sumber: Teori Generator Sinkron, USU

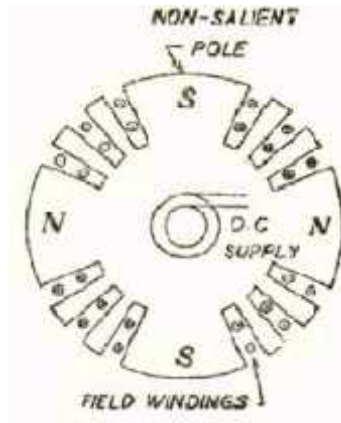
Rotor kutub menonjol umumnya digunakan pada generator sinkron dengan kecepatan putar rendah dan sedang (120-400 rpm). Generator sinkron tipe seperti ini biasanya dikopel oleh mesin diesel atau turbin air pada sistem pembangkit listrik. Rotor kutub menonjol baik digunakan untuk putaran rendah dan sedang karena:

- 1) Kutub menonjol akan mengalami rugi-rugi angin yang besar dan bersuara bising jika diputar dengan kecepatan tinggi.

2) Konstruksi kutub menonjol tidak cukup kuat untuk menahan tekanan mekanis apabila diputar dengan kecepatan tinggi.

b. Rotor Kutub Silindris (*non-salient pole / cylindrical rotor*)

Pada jenis rotor ini, konstruksi kutub magnet rata dengan permukaan rotor. Jenis rotor ini terbuat dari baja tempa halus yang berbentuk silinder yang mempunyai alur-alur terbuat di sisi luarnya. Medan magnet yang dihasilkan oleh kutub stator diperoleh dari magnet permanen ataupun dari belitan-belitan rotor yang dihubungkan pada sumber eksitasi yang berarus searah (DC). Konstruksi dari rotor kutub silindris dapat dilihat pada gambar 2.3.



Gambar 2.3. Rotor Kutub Silindris

Sumber: Teori Generator Sinkron, USU

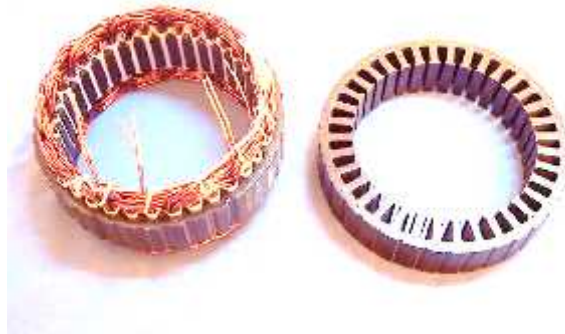
Rotor silinder umumnya digunakan pada generator sinkron dengan kecepatan putar tinggi (1500 atau 3000 rpm) seperti yang terdapat pada pembangkit listrik tenaga uap. Rotor silinder baik digunakan pada kecepatan putar tinggi karena:

1) Konstruksinya memiliki kekuatan mekanik yang baik pada kecepatan putar tinggi

- 2) Distribusi disekeliling rotor mendekati bentuk gelombang sinus sehingga lebih baik dari kutub menonjol.
- 3) Selain itu, distribusi fluks magnet yang dihasilkan mendekati sinusoida sehingga akan menghasilkan bentuk gelombang tegangan yang lebih baik.

2.1.2.2. Stator

Stator generator adalah bagian dari generator berupa kumparan kawat tembaga yang dirancang berbentuk silindris dan akan menerima induksi magnet dari rotor sehingga terdapat aliran fluks magnet yang mengalir pada kumparan tersebut atau arus listrik (A), sedangkan perbedaan jenis kutub magnet yang menginduksi kumparan stator dapat menyebabkan GGL induksi yang berubah-ubah pada ujung-ujung kumparan yang biasa kita sebut sebagai beda potensial atau tegangan (V). Konstruksi dari stator generator dapat dilihat pada gambar 2.4.



Gambar 2.4. Stator Generator

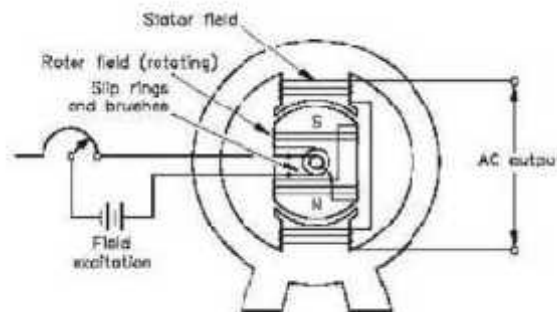
Sumber: www.gasgoo.com

Dalam perancangan, stator terdapat beberapa bagian, antara lain adalah:

a. Rumah stator

Bagian dari stator yang umumnya terbuat dari besi tuang yang berbentuk silinder. Bagian belakang dari rumah stator ini biasanya memiliki sirip-sirip sebagai alat bantu dalam proses pendinginan.

Stator terdiri dari badan generator yang terbuat dari baja yang berfungsi melindungi bagian dalam generator, kotak terminal dan name plate pada generator. Inti stator yang terbuat dari bahan *ferromagnetik* yang berlapis-lapis dan terdapat alur-alur tempat meletakkan lilitan stator. Lilitan stator merupakan tempat untuk menghasilkan tegangan. Sedangkan, rotor berbentuk kutub sepatu (*salient*) atau kutub dengan celah udara sama rata (rotor silindris). Konstruksi dari generator sinkron dapat dilihat pada gambar 2.5.



Gambar 2.5. Konstruksi Generator Sinkron

Sumber:arifsh2009.wordpress.com

b. Inti stator

Bentuk dari inti stator ini berupa cincin laminasi-laminasi yang diikat serapat mungkin untuk menghindari rugi-rugi arus eddy (*eddy current losses*).

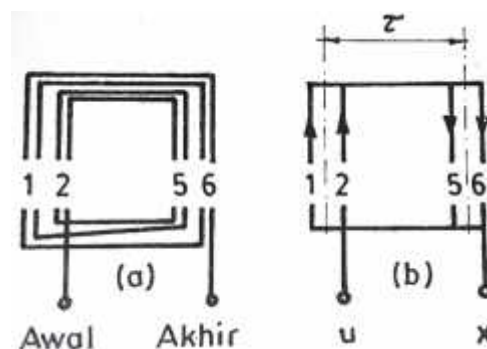
Pada inti ini terdapat slot-slot untuk menempatkan konduktor dan untuk mengatur arah medan magnetnya.

c. Belitan stator

Menurut Kadir (1983:31), bagian stator terdiri dari beberapa batang konduktor yang terdapat di dalam slot-slot dan ujung-ujung kumparan. Masing-masing slot dihubungkan untuk mendapatkan tegangan induksi.

Bentuk kumparan stator dapat dibagi menjadi dua macam, yaitu kumparan jerat atau lilitan bertumpuk dan kumparan terpusat. Kumparan jerat (*Spiral*) banyak digunakan pada motor atau generator dengan kapasitas yang relatif besar.

Penggunaan kumparan jerat pada suatu alur stator disebabkan banyaknya lilitan dalam satu kumparan atau karena tebalnya kawat, sehingga satu sisi belitan dapat diletakkan dalam satu alur melainkan dalam dua alur.

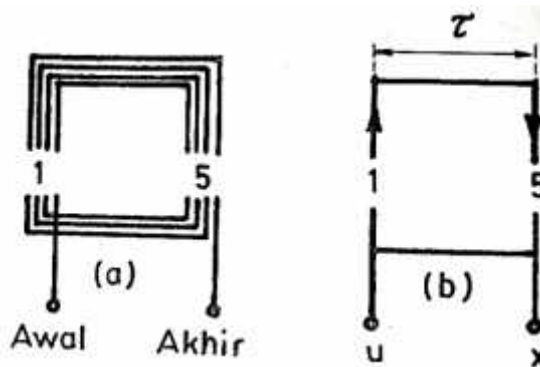


Gambar 2.6. Kumparan Spiral

Sumber : Buku Mesin Serempak, 1983

Pada gambar 2.6., sisi kiri terdapat empat kawat yang mana dua kawat diletakkan pada alur nomor 1, sedangkan dua kawat lainnya diletakkan dalam alur nomor 2. Demikian dengan sisi kanan yang mana dua kawat diletakkan pada alur nomor 5 dan dua kawat lainnya diletakkan pada nomor 6.

Keuntungan penggunaan kumparan jerat adalah bahwa alur-alur dapat menjadi lebih kecil sehingga inti stator juga dapat dibuat menjadi lebih kecil dan mesin menjadi lebih murah. Selain kumparan jerat, juga terdapat kumparan terpusat. Kumparan terpusat (*Concentric*) pada umumnya banyak digunakan untuk motor dan generator dengan kapasitas kecil.



Gambar 2.7. Kumparan Terpusat

Sumber : Buku Mesin Serempak, 1983

Pada gambar 2.7. memperlihatkan suatu kumparan yang terdiri atas empat lilitan. Kumparan tersebut mempunyai dua ujung yaitu ujung awal (u) dan ujung akhir (x). Sisi kiri kumparan yang terdiri dari empat kawat diletakkan dalam alur nomor 1 dan sisi kanan dalam nomor 5. Sisi atas dan sisi bawah kumparan dinamakan kepala kumparan.

Untuk menentukan jumlah lilitan yang diperlukan pada tiap tegangan, maka dirumuskan dengan:

$$GpV = \frac{I}{A} \quad (2,4)$$

dimana :

GpV = jumlah lilitan per volt

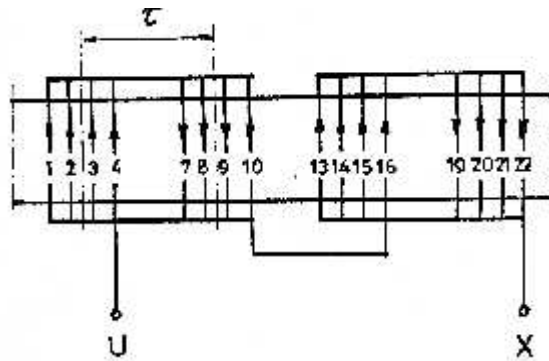
f = frekuensi

A = luas penampang

d. Alur Stator

Alur stator merupakan bagian stator yang berperan sebagai tempat belitan stator ditempatkan.

Menurut Kadir (1983:33), untuk menggambarkan suatu skema belitan, dimisalkan bahwa stator dipotong pada satu sisi, kemudian digelar atau diletakkan secara mendatar. Dalam gambar 2.8, stator dipotong pada garis A-B. Setelah digelar secara mendatar, maka potongan sebelah kiri adalah A-B dan ujung potongan sebelah kanan adalah A'-B'.

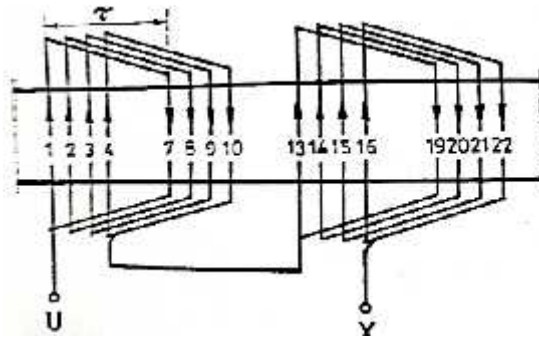


Gambar 2.8. Penampang Melintang Alur Kumparan Jerat

Sumber : Buku Mesin Serempak, 1983

Gambar 2.8. merupakan suatu skema belitan sebuah mesin dengan empat kutub dan belitan terbagi. Dalam skema ini terlihat bahwa stator memiliki empat kutub yang terdiri dari 24 alur. Artinya tersedia 6 alur pada tiap kutubnya. Dari 6 alur, hanya 4 alur yang diberi lilitan.

Untuk mendapatkan bentuk belitan bagian yang sama, pelaksanaan lilitan dapat dilakukan sebagaimana terlihat pada gambar 2.9.

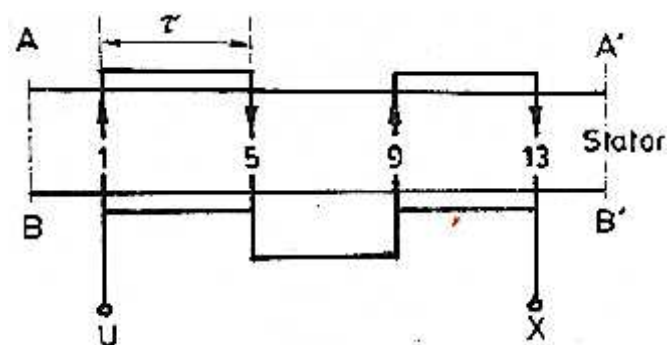


Gambar 2.9. Belitan Pada Alur Kumparan Jerat

Sumber : Buku Mesin Serempak, 1983

Bila belitan bagian terbesar adalah belitan yang terletak dalam alur 1 dan 10, sedangkan yang terkecil terletak dalam alur 4 dan 7. Cara melilit pada skema belitan tersebut adalah bagian belitan paling kiri mengisi alur 1 dan 7, ke kanan alur 2 dan 8, dan seterusnya sehingga semua belitan bagian mempunyai bentuk dan lebar yang sama yaitu enam alur.

Apabila kumparan bagian (jerat) memiliki 2 atau lebih alur pada tiap kutubnya, maka pada kumparan alur terpusat, tiap sisi belitan diletakkan dalam satu alur. Sehingga tiap satu alur membentuk satu kutub.



Gambar 2.10. Penampang Melintang Alur Kumparan Terpusat

Sumber : Buku Mesin Serempak, 1983

Gambar 2.10. memperlihatkan suatu skema belitan stator sebuah mesin empat kutub atau dua pasang kutub ($p=2$) tiap sisi belitan diletakkan dalam satu alur. Karena ada empat sisi yang masing-masing diletakkan dalam satu alur, maka dipergunakan empat alur dimana jumlah kutubnya juga ada empat buah.

Dapat dikatakan bahwa skema belitan ini adalah dari sebuah mesin empat kutub dengan satu alur per kutub. Alur-alur dibagi secara merata sepanjang keliling stator. Dengan demikian antara alur 1 dan 5 terdapat sudut ruang sebesar 90° . Demikian pula antara alur 5 dan 9, antara 9 dan 13 serta antara alur 13 dan 1.

Menurut Aliansyah (Skripsi, 2008: 33) untuk menentukan alur belitan stator langkah-langkah yang harus dilakukan yaitu:

- 1) Menentukan jumlah alur/kutub/fasa yaitu:

$$m = \frac{S}{Fp} \quad (2.5)$$

dimana :

m = jumlah alur tiap kutub

S = jumlah alur

p = jumlah kutub

F = jumlah fasa

2) Menentukan langkah alur (q) yaitu:

Untuk menentukan langkah alur (q), terlebih dahulu harus menentukan jarak kutub utara selatan yang terdekat dalam derajat listrik (Kk) dan derajat mekanik (K'k).

Pada derajat listrik, jarak antara kutub utara selatan yang terdekat selalu sama yaitu 180° listrik (Kk = 180°). sedangkan pada derajat mekanik yaitu:

$$K'_k = \frac{360^\circ}{P} \quad (2.6)$$

Selanjutnya menentukan jarak alur yang terdekat dalam derajat mekanik (B) yaitu:

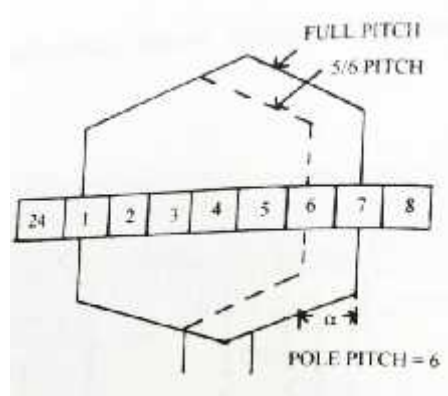
$$B = \frac{360^\circ}{S} \quad (2.7)$$

Maka langkah alur dengan jarak kutub yaitu:

$$q = \frac{K'_k}{B} \quad (2.8)$$

e. *Pitch Factor*

Menurut Rijono (2002: 195), *Pitch Factor* adalah menempati kumparan bentangan penuh atau full pitch dimana bentangan kumparan terletak dalam satu bentangan kutub (pole-pitch) selebar 180°L.



Gambar 2.11. Pitch Factor

Sumber : Buku Dasar Teknik Tenaga Listrik, 2002

Pada gambar 2.11., bentangan kumparan *full-pitch* menempati slot 1-7. Apabila bentangan kumparan ditempatkan pada slot 1-6, berarti bentangan kumparan dipendekkan sebesar ;

$$\alpha = \frac{1}{6} \times 180^\circ$$

$$= 30^\circ$$

atau

$$\alpha = \frac{\text{jumlah pengurangan slot}}{\text{jumlah slot bentangan penuh}} \times 180^\circ \quad (2.9)$$

Dalam keadaan ini besar *pitch factor* (factor kependekan) adalah:

$$k_p = \cos \frac{\alpha}{2} \quad (2.10)$$

$$k_p = \cos \frac{30^\circ}{2}$$

$$= 0,966$$

Ada beberapa keuntungan ada penggunaan *fractional pitch*, yaitu;

- Menghemat pemakaian kawat email untuk pembuatan armature.
- Mengurangi timbulnya distorsi tegangan output akibat adanya harmonisasi GGL armature, sehingga diperoleh gelombang tegangan output dalam bentuk sinus yang lebih bagus.

- c. Karena dapat menghilangkan harmonis frekuensi yang lebih tinggi dari frekuensi dasar (frekuensi output generator), maka akan diperoleh rugi histerisis dan arus pusar menjadi lebih kecil sehingga akhirnya efisiensi generator menjadi bertambah besar.

2.1.2.3. Kawat email

Kawat email adalah kawat tembaga murni yang bagian luarnya dilapisi dengan lumen sebagai isolator dan penahan korosi. Penggunaan kawat email dalam pembuatan motor atau generator mempunyai beberapa keunggulan, antara lain adalah konduktivitas listrik tinggi, tahan korosi, ekspansi panas tinggi, konduktivitas panas tinggi, bisa disolder, mudah dipasang.

Kawat email mempunyai kemampuan hantar arus (KHA) sesuai dengan diameter kawat tersebut. Tabel 2.2 merupakan daftar KHA serta diameter dari kawat email berdasarkan standar *American Wire Gage* (AWG).

Tabel 2.2. Kemampuan Hantar Arus Kawat Email

AWG Gauge	Diameter mm	Maximum Ampere for chassis wiring	Maximum Ampere for Power Transmission	Ohm per km
20	0.8128	11	1.5	33.292
21	0.7239	9	1.2	41.984
22	0.64516	7	0.92	52.9392
23	0.57404	4.7	0.729	66.7808
24	0.51054	3.5	0.577	84.1976
25	0.45466	2.7	0.457	106.1736
26	0.40386	2.2	0.361	133.8568
27	0.36068	1.7	0.288	168.8216
28	0.32004	1.4	0.226	212.872
29	0.28702	1.2	0.182	268.4024
30	0.254	0.86	0.142	338.496
31	0.22606	0.7	0.113	426.728
32	0.2032	0.53	0.091	538.248
33	0.18034	0.43	0.072	678.632
34	0.16002	0.33	0.056	855.752
35	0.14224	0.27	0.044	1079.12
36	0.127	0.21	0.035	1360
37	0.1143	0.17	0.0289	1715
38	0.1016	0.13	0.0228	2163
39	0.0889	0.11	0.0175	2728
40	0.07874	0.09	0.0137	3440

Sumber : <http://widypedia.blogspot.co.id/>

2.1.3 Generator Sinkron Tanpa Beban

Mengacu pada Azka (Skripsi,2013:13), saat generator sinkron diputar dengan kecepatan sinkron dan rotor diberikan arus medan (I_f), maka kumparan jangkar stator akan terinduksi sehingga menghasilkan tegangan (E_0) dengan persamaan berikut

$$E_0 = Kn\Phi \tag{2.11}$$

dimana:

E_0 = tegangan induksi tanpa beban (volt)

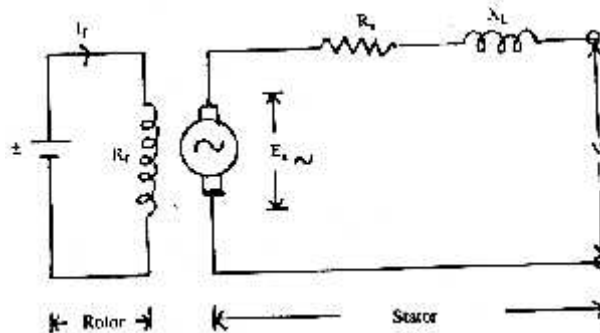
K = konstanta mesin

n = putaran sinkron

Φ = fluks yang dihasilkan I_f (Webber)

Dalam keadaan generator tidak dihubungkan oleh beban, maka arus armature (I_a) tidak mengalir, sehingga tidak ada pengaruh reaksi jangkar. Fluks hanya dihasilkan oleh arus medan (I_f). Fluks magnet yang dihasilkan oleh kumparan rotor tidak seluruhnya tercakup oleh kumparan stator.

Pada kumparan stator terdapat fluks bocor dan hal ini dinyatakan dengan hambatan armature (R_a) dan reaktansi bocor (X_L). Sehingga rangkaian ekivalen dari generator sinkron ditampilkan pada gambar 2.12.



X_L = Fluks Bocor

R_a = Hambatan Armatur

E_0 = Tegangan Induksi Tanpa Beban

V_t = Tegangan Terminal

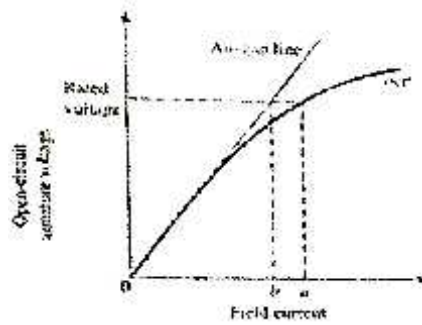
I_f = Arus Medan

R_f = hambatan rotor

Gambar 2.12. Rangkaian Ekivalen Generator Sinkron Tanpa Beban

Sumber : Dasar Teknik Tenaga Listrik, 2002

Jika arus medan (I_f) diubah-ubah, maka akan diperoleh harga E_0 seperti terlihat pada kurva karakteristik pada gambar 2.13.

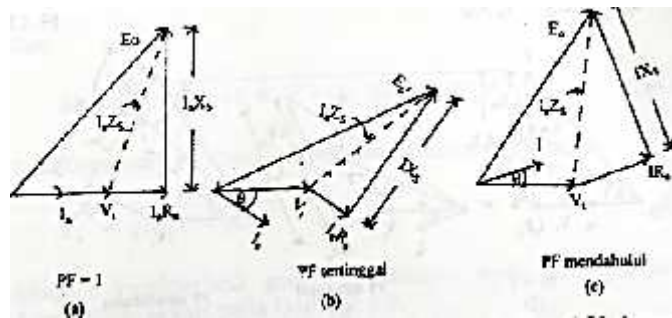


b-a = Tahanan arus beban pada daerah jenuh (*saturated*)
Gambar 2.13. Kurva Karakteristik Generator Sinkron Tanpa Beban
 Sumber : Skripsi, 2013

Bila besarnya arus medan dinaikkan, maka tegangan output juga akan naik sampai titik saturasi, dengan persamaan berikut:

$$E_0 = V_t + I_a(R_a + jX_L) \quad (2.12)$$

Dalam buku Rijono (2002:185), secara vektoris besar GGL armature tanpa beban (E_0) pada factor daya beban = 1, Faktor daya tertinggal dan factor daya mendahului terlihat pada gambar 2.14.



Gambar 2.14. Pengaruh Factor Daya (Power Factor) Beban Terhadap GGL Armatur Tanpa Beban
 Sumber : Dasar Teknik Tenaga Listrik, 2002

Dari gambar 2.14. besar GGL armature tanpa beban (E_0) adalah:

$$PF = 1 \text{ (Unity)}$$

$$E_0 = \sqrt{(V_t + I_a \cdot R_a)^2 + (I_a \cdot x_2)^2} \quad (2.13)$$

PF = Tertinggal (*Lagging*)

$$E_0 = \sqrt{(V_t \cdot \cos\theta + I_a \cdot R_a)^2 + (V_t \cdot \sin\theta + I_a X_s)^2} \quad (2.14)$$

PF = Mendahului (*Leading*)

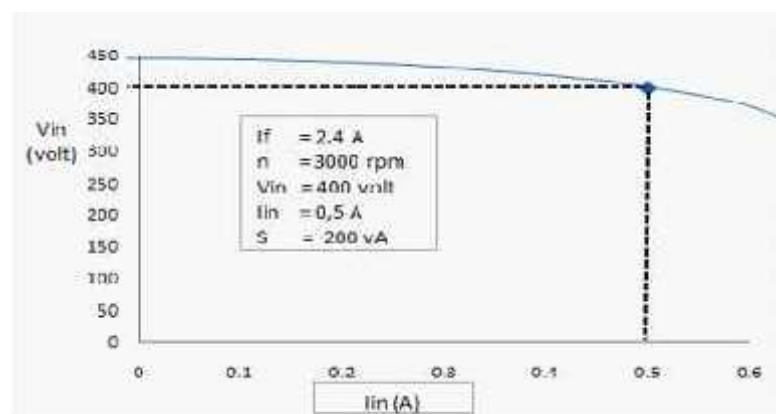
$$E_0 = \sqrt{(V_t \cdot \cos\theta + I_a \cdot R_a)^2 + (V_t \cdot \sin\theta - I_a X_s)^2} \quad (2.15)$$

Adapun besar impedensi sinkron Z_s adalah:

$$Z_s = \sqrt{(R_a)^2 + (X_s)^2} \quad (2.16)$$

2.1.4 Generator Sinkron Berbeban

Menurut Atria (Skripsi 2014), dalam keadaan berbeban, arus armatur akan mengalir dan mengakibatkan terjadinya reaksi jangkar. Reaksi jangkar bersifat reaktif, sehingga dinyatakan sebagai reaktansi dan disebut reaktansi magnet (X_a). reaktansi magnet dan reaktansi fluks bocor (X_L) disebut reaktansi sinkron (X_s). karakteristik generator sinkron berbeban diperlihatkan pada Gambar 2.15.



Gambar 2.15. Karakteristik Generator Sinkron Berbeban

Sumber : Skripsi, 2014

Bila generator di beri beban yang berubah-ubah, maka besarnya tegangan terminal V_t akan berubah-ubah pula. Hal ini disebabkan karena adanya:

- Jatuh tegangan karena resistansi jangkar atau armatur (R_a)

Resistansi jangkar per fasa (R_a) yang dialiri oleh arus jangkar (I_a) menyebabkan terjadinya tegangan jatuh per fasa ($I_a R_a$) yang sefasa dengan arus jangkar (I_a). Akan tetapi, pada praktiknya jatuh tegangan ini diabaikan karena pengaruhnya sangat kecil.

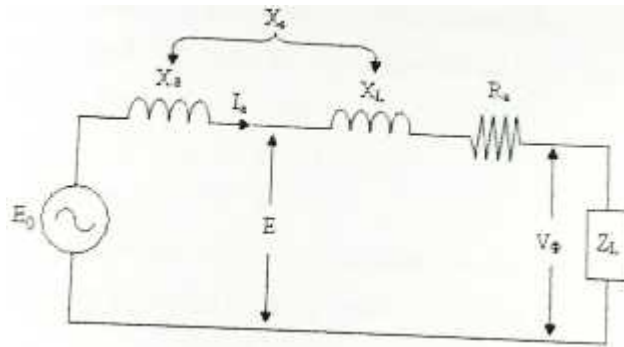
b. Jatuh tegangan karena reaktansi bocor jangkar atau armature (X_L)

Saat arus mengalir melalui penghantar jangkar, sebagian fluks yang terjadi tidak memotong *air gap*, melainkan mengambil jalur lain dan menghubungkan sisi-sisi kumparan. Fluks-fluks tersebut dinamakan fluks bocor (*leakage fluxes*). Fluks bocor tersebut bergerak dengan arus jangkar dan memberikan induktansi sendiri (*self-inductance*) belitan yang disebut reaktansi bocor jangkar.

c. Jatuh tegangan karena reaksi jangkar

Pada saat generator sinkron bekerja pada beban nol tidak ada arus yang mengalir melalui kumparan jangkar (stator), sehingga yang ada pada celah udara hanya fluks arus medan rotor. Namun jika generator sinkron diberi beban, arus jangkar (I_a) akan mengalir dan membentuk fluksi jangkar. Fluksi jangkar ini kemudian mempengaruhi fluksi arus medan dan akhirnya menyebabkan berubahnya harga tegangan terminal generator sinkron yang dikenal dengan reaksi jangkar. Pengaruh yang ditimbulkan oleh fluksi jangkar dapat berupa distorsi, pelemahan medan magnet pada celah udara.

Rangkaian ekuivalen dan karakteristik generator sinkron berbeban diperlihatkan pada gambar 2.16.



Gambar 2.16. Rangkaian Ekivalen Generator Sinkron Beban
 Sumber : Skripsi, 2013

Persamaan tegangan dari model rangkaian diatas adalah;

$$E_0 = V_\phi + I_a R_a + j I_a X_s \quad (2.17)$$

$$X_s = X_L + X_a \quad (2.18)$$

dimana:

E_0 = tegangan induksi pada jangkar (volt)

V_ϕ = tegangan terminal output (volt)

R_a = resistansi jangkar (ohm)

X_s = reaktansi sinkron (ohm)

X_L = reaktansi fluks bocor (ohm)

X_a = reaktansi reaksi jangkar (ohm)

2.1.5 Magnet Permanen

Dalam buku digital yang diterbitkan Universitas Sumatera Utara (www.repository.usu.ac.id, diakses 23 Maret 2016), kata magnet berasal dari *Magnesia*, nama suatu kota di kawasan Asia. Di kota inilah orang-orang Yunani sekitar tahun 600 SM menemukan sifat magnetik dari mineral magnetik.

Secara umum, pengertian magnet adalah kemampuan suatu benda untuk menarik benda-benda lain yang berada disekitarnya.

Satuan intensitas magnet menurut sistem metrik Satuan Internasional (SI) adalah Tesla dan SI unit untuk total fluks magnetik adalah weber (1 weber/m = 1 tesla) yang mempengaruhi luasan satu meter persegi.

Magnet permanen adalah suatu bahan yang dapat menghasilkan medan magnet yang besarnya tetap tanpa adanya pengaruh dari luar atau disebut magnet alam karena memiliki sifat kemagnetan yang tetap. Magnet permanen dibuat orang dalam berbagai bentuk dan dapat dibedakan menurut jenis bahannya seperti *Nikel Aluminium* dan paduan *Cobalt* (alnico), *Stronsium Ferit* atau *Barium Ferrite* (ferit), *Samarium Cobalt* (SmCo) dan *Neodymium Iron Boron* (NdFeB).

Perbandingan karakteristik dari bahan yang digunakan pada magnet permanen dapat dilihat pada tabel 2.3. :

Tabel 2.3. Perbandingan Karakteristik Magnet Permanen

Material	Induksi Remanen (Br) (Tesla)	Koersifitas (Hc) (MA/m)	Energi Produk (BH_{max}) (kJ/m³)
Sr Ferit	0,43	0,20	34
Alnico 5	1,27	0,05	44
Alnico 9	1,05	0,12	84
SmCo ₅	0,95	1,30	176
Sm ₂ Co ₁₇	1,05	1,30	208
Nd ₂ Fe ₁₄ B	1,36	1,03	350

Sumber: Definisi Magnet, USU

Karakteristik magnet yang dimiliki NdFeB lebih baik dibandingkan dengan magnet permanen lainnya, seperti *Ferit*, *Alnico* dan *Samarium Cobalt*.

BH_{max} yang dimiliki dapat berkisar antara 30 MGOe (238,7 kJ/m³) sampai dengan 52 MGOe (413,8 kJ/m³). Berdasarkan keunggulan dari bahan ini, maka bahan ini menjadi pioneer untuk diaplikasikan pada peralatan elektronik, motor listrik atau generator, sensor, industri otomotif, industri petrokimia dan produk peralatan kesehatan. Karena memiliki karakteristik magnet yang tinggi, maka dalam aplikasinya magnet NdFeB memiliki dimensi dan volume yang kecil. Tabel 2.4 merupakan sifat fisik dari magnet Neodymium.

Tabel 2.4. Sifat Fisik Magnet NdFeB

Specified	SI
Curie Temperature	310-370 ⁰ C
Maximum operating Temperature	80-200 ⁰ C
Resistivity	160 μ ohm.cm
Hardness	560-580 Hv
Density	7,40g/cm ³
Relative recoil permeability	1,05 μ_{rec}
Saturation field Strength	30-40 kOe
Temperature Coefficient of Br	-0,12 ~ -10%/ ⁰ C
Temperature Coefficient of iHc	-0,6 %/ ⁰ C

Sumber: Definisi Magnet, USU

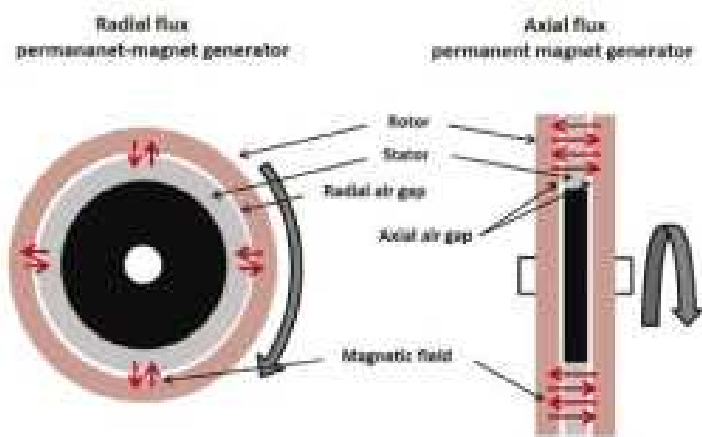
2.1.6 Generator Sinkron Magnet Permanen

Kebutuhan generator saat ini semakin meningkat dalam memenuhi ketersediaan listrik. Penelitian-penelitian mulai banyak dikembangkan untuk mendapatkan generator yang mampu dioperasikan pada putaran tinggi dan rendah. Generator sinkron magnet permanen (*Permanent Magnet Synchronous Generator* atau PMSG) adalah generator yang menggunakan magnet permanen untuk menghasilkan medan magnet.

Prinsip kerja PMSG hamper sama dengan generator sinkron pada umumnya. Yang membedakan terletak pada sumber medan magnet yang dihasilkan pada rotor. Pada generator sinkron biasa medan magnet pada rotor dihasilkan oleh arus searah (*Direct Current*) yang mengalir pada kumparan rotor. Sedangkan pada

PMSG, medan magnet dihasilkan oleh magnet permanen sehingga medan magnet yang terdapat pada generator selalu tetap.

Berdasarkan arah aliran fluks yang dihasilkan oleh magnet permanen, maka generator sinkron ini diklarifikasikan menjadi dua yaitu generator sinkron dengan fluks radial dan generator sinkron dengan fluks aksial. Gambar 2.17 merupakan perbedaan antara generator sinkron fluks aksial dan radial.



Gambar 2.17. Generator Sinkron Fluks Aksial dan Radial

Sumber:ugmmagatrika.wordpress.com

Mengacu pada Azka (Skripsi,2013:22) generator magnet permanen fluks aksial merupakan generator magnet permanen yang memiliki arah medan fluks sejajar dengan sumbu putar. Sedangkan generator magnet permanen fluks radial merupakan generator magnet permanen yang memiliki arah medan fluks searah dengan arah putaran rotor.

Untuk menentukan besarnya gaya gerak listrik (GGL) induksi pada generator fluks radial, dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2.19):

$$E_{ph} = 4,44 f N_c k_w k_s \Phi \frac{N_s}{N_{ph}} \quad (2.19)$$

$$f = \frac{n \cdot P}{120} \quad (2.20)$$

dimana:

E_{ph} = Tegangan fasa (volt)

F = frekuensi (Hz)

N_c = jumlah lilitan per coil

K_w = factor lilitan (1, kisaran penuh)

K_s = factor kemiringan (0,984)

Φ = fluks magnet (Webber)

N_s = jumlah kumparan/slot

N_{ph} = jumlah phasa

n = putaran (rpm)

P = jumlah kutub magnet

Beberapa factor yang mempengaruhi besar GGL induksi yaitu:

a. Kecepatan perubahan medan magnet

Semakin cepat perubahan medan magnet, maka GGL induksi yang ditimbulkan semakin besar.

b. Banyaknya lilitan

Semakin banyak lilitan, maka GGL induksi yang ditimbulkan semakin besar. Untuk menentukan jumlah lilitan yang digunakan pada generator, dapat menggunakan persamaan (2.4).

c. Kekuatan magnet

Semakin kuat gejala kemagnetannya, maka GGL induksi yang timbul semakin besar. Kerapatan fluks celah udara sangat dipengaruhi oleh dimensi stator dan magnet permanen. Besarnya kerapatan fluks celah udara B_g dihitung dengan persamaan (2.21):

$$B_g = \frac{C\emptyset}{1 + \frac{\mu_r k_c k_{ml}}{PC}} B_r \quad (2.21)$$

Carter coefficient k_c ,

$$k_c = \left[1 - \frac{W_{st}}{r_s} + \frac{4l'_g}{\pi r_s} \ln \left(1 + \frac{W_{st}\pi}{4l'_g} \right) \right]^{-1} \quad (2.22)$$

$$l'_g = l_g + \frac{l_m}{\mu_r} \quad (2.23)$$

Leakage coefficient k_{ml}

$$k_{ml} = 1 + \frac{4l_m}{\pi \mu_r \alpha_m r_p} \ln \left[1 + \pi \frac{l_g}{(1 - \alpha_m) r_p} \right] \quad (2.24)$$

Permeance coefficient PC

$$PC = \frac{l_m}{\mu_0} \quad (2.25)$$

Flux concentration factor $C\emptyset$

$$C\emptyset = \frac{2\alpha_m}{1 + \alpha_m} \quad (2.26)$$

$$\alpha_m = \frac{r_m}{r_p} \quad (2.27)$$

Luasan magnet dihitung dengan persamaan (2.28):

$$A_m = \frac{\pi (r_o^2 - r_i^2) - r_f (r_o - r_i) Nm}{Nm} \quad (2.28)$$

dimana:

A_m = luasan magnet (m^2)

r_o = radius luar magnet (m)

r_i = radius dalam magnet (m)

N_m = jumlah magnet

τ_f = jarak antar magnet (m)

Maka diperoleh fluks maksimum yang dihasilkan dengan persamaan

(2.29) adalah :

$$\Phi = B_g A_m \quad (2.29)$$

dimana:

Φ = fluks magnet (Webber)

B_g = fluks magnet maksimal (T)

A_m = luas permukaan magnet (m^2)

Output tegangan yang dihasilkan oleh generator sinkron lebih kecil dibandingkan gaya gerak listrik yang ditimbulkan oleh generator. Hal ini dikarenakan terdapat rugi-rugi tahanan yang ditimbulkan oleh belitan pada stator generator. Besarnya resistansi belitan dihitung dengan persamaan (2.31):

$$R_{ph} = \frac{\rho_{Cu} N_C L_C}{A_{Cu}} \frac{N_g}{N_{ph}} \quad (2.30)$$

$$R_{ph} = \frac{\rho_{Cu} N_C \left(2 \left(\frac{\pi n D_i}{2 p} \right) + 2 L_i \right)}{A_{Cu}} \frac{N_g}{N_{ph}} \quad (2.31)$$

dimana :

R_{ph} = resistansi per fasa ()

ρ_{Cu} = massa jenis tembaga ($1,72 \times 10^{-8}$ m)

N_c = jumlah lilitan per kumparan

L_c = panjang satu belitan (m)

A_{Cu} = luas tembaga (m^2)

N_s = jumlah kumparan/slot

N_{ph} = jumlah fasa

L_i = panjang efektif stator (m)

r_{Cu} = jari-jari tembaga (m)

Besarnya arus yang dialirkan oleh generator dihitung dengan persamaan (2.33):

$$I_s = \frac{1}{2} A_{ss} k_{fll} J \quad \left(d_s = \sqrt{\frac{4A_s}{\pi}} \right) \quad (2.32)$$

$$I_{ph} = \frac{I_s}{N_c} \quad (2.33)$$

dimana:

I_s = arus pada slot (A)

A_{ss} = luas alur stator (m^2)

k_{fll} = *space factor* (0.3-0.5)

J = kerapatan arus (A/m^2)

I_{ph} = arus fasa (A)

d_s = diameter kawat lilitan (m)

Maka diperoleh daya generator yang dihasilkan dengan persamaan (2.35)

adalah :

$$V_0 = E_{ph} - \frac{I_{ph} R_{ph}}{\cos\varphi} \quad (2.34)$$

$$P_o = V_o I_{ph} \quad (2.35)$$

dimana:

V_o = Tegangan output (volt)

E_{ph} = Tegangan fasa (volt)

R_{ph} = resistansi per fasa ()

I_{ph} = arus fasa (A)

P_o = Daya output (watt)

Untuk torsi yang dibutuhkan agar rotor pada generator dapat berputar dapat dihitung dengan persamaan (2.36):

$$T_{gen} = \frac{P_{gen} \times 9.55}{n} \quad (2.36)$$

dimana :

T_{gen} = Torsi (Nm)

P_{gen} = daya generator (W)

n = putaran pada poros rotor generator (rpm)

Untuk menentukan presentase perubahan tegangan terminal alternator dari kondisi berbeban nol menjadi kondisi berbeban penuh atau disebut sebagai regulasi tegangan, dapat dihitung dengan persamaan (2.37) yaitu:

$$VR = \frac{V_{NL} - V_{FL}}{V_{FL}} \times 100\% \quad (2.37)$$

dimana:

V_{NL} = Tegangan tanpa beban (V)

V_{FL} = Tegangan berbeban (V)

Pada saat generator terhubung dengan beban listrik, daya keluaran generator telah mengalami berbagai penyusutan diakibatkan berbagai macam rugi-rugi. Rugi-rugi yang ditimbulkan generator seperti rugi tembaga dan rugi inti besi.

Mengacu pada Azka (Skripsi,2013:35), rugi tembaga disebabkan oleh arus beban mengalir pada kawat tembaga. Rugi tembaga bergantung pada beban karena arus beban selalu berubah-ubah. Persamaan untuk menghitung rugi tembaga adalah :

$$P_{cu} = I_{ph}^2 R_{ph} \quad (2.38)$$

dimana :

P_{cu} = rugi tembaga (watt)

I_{ph}^2 = arus (A)

R_{ph} = tahanan pada kumparan stator ()

Menurut Aliansyah (Skripsi, 2008: 33), rugi inti besi disebut juga rugi magneti yang terdiri dari histerisis dan rugi arus eddy yang timbul dari perubahan kerapatan fluks pada besi generator. Besarnya rugi histerisis (P_h) dihitung dengan persamaan:

$$P_h = \eta_h \cdot B_{max}^{1.6} \cdot f \cdot v \quad (\text{watt}) \quad (2.39)$$

dimana :

η_h = koefisien steinmetz histerisis

B = kerapatan fluks (Wb/m²)

f = frekuensi (Hz)

v = volume inti (m³)

Berdasarkan persamaan 2.39, nilai koefisien Steinmentz histerisis dapat dilihat pada tabel 2.5.

Tabel 2.5. Nilai Koefisien Steinmentz Histerisis

Bahan	$\eta_h(\text{joule/m}^3)$
Sheet steel	502
Silicon steel	191
Hard cast steel	7040
Cast steel	750 – 3000
Cast iron	2700 - 4000

Sumber: Skripsi, 2008

Dari persamaan diatas, besar koefisien steinmentz histerisis, kerapatan fluks dan volume inti selalu constant sehingga nilai rugi histerisis merupakan fungsi dari frekuensi atau ditulis:

$$P_h = f \quad (2.40)$$

Jadi, makin besar frekuensi sinyal tegangan output makin besar rugi histerisis yang diperoleh.

Adapun rugi arus eddy itung dengan persamaan :

$$P_c = k \cdot B_{max}^2 \cdot f^2 \cdot t^2 \cdot v \quad (2.41)$$

Dimana :

K = constant arus pusar yang tergantung pada ketebalan laminasi masing-masing lempengan dan volume inti armature.

Oleh karena nilai k dan b adalah constant, maka besar kecilnya rugi arus eddy tergantung pada nilai frekuensi kuadrat atau ditulis :

$$P_c = f^2 \quad (2.42)$$

Oleh karena itu, efisiensi generator merupakan perbandingan antara daya output dengan daya input.

$$\eta = \frac{P_o}{P_{in}} \times 100\% \quad (2.43)$$

Dimana :

P_o = daya output generator

P_{in} = daya total generator

$P_{in} = P_o + P_{loss}$

$P_{loss} = P_h + P_c$

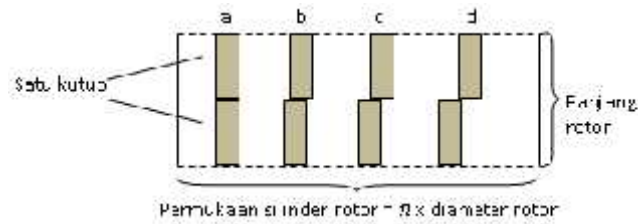
2.1.7 Metode Memiringkan Magnet (*Skewing Magnet*)

Dalam perancangan pembuatan generator, torsi yang dihasilkan generator dipengaruhi oleh beberapa factor salah satunya adalah torsi cogging. Menurut Devon R., torsi cogging merupakan interaksi antara alur inti stator dengan kutub magnet permanen pada rotor sehingga menghasilkan kecenderungan untuk rotor menyelaraskan energi relatif rendah pada penawaran posisi terhadap slot stator. Torsi *cogging* ini menyebabkan getaran, kebisingan dan kecepatan yang sifatnya flukutatif.

Menurut Bianchi, N. dan S. Bolognani (2002), Salah satu teknik untuk mengurangi torsi *cogging* adalah dengan memiringkan alur-alur stator (*slot skewing*) atau memiringkan magnet permanen (*magnet skewing*) dengan sudut kemiringan tertentu.

Fitriana et.al (2009) melakukan analisis torsi *cogging* pada prototip generator magnet permanen. Pada Penelitian ini, Torsi *cogging* dianalisis pada tiga posisi kemiringan magnet, yaitu: lurus, maksimum (kemiringan satu kisar alur) dan di antara kedua posisi tersebut untuk mendapatkan posisi magnet paling

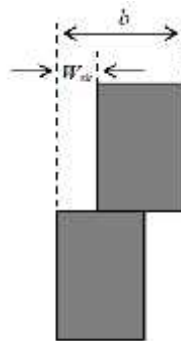
optimum seperti pada gambar 2.18 dan model 3 dimensi dapat ditampilkan pada gambar 2.19.



Gambar 2.18. Beberapa kemungkinan posisi magnet permanen pada rotor, (a) lurus, (b) digeser dari posisi a, (c) digeser dari posisi b, (d) digeser dari posisi c.



Gambar 2.19. Model 3D dari rotor GMP

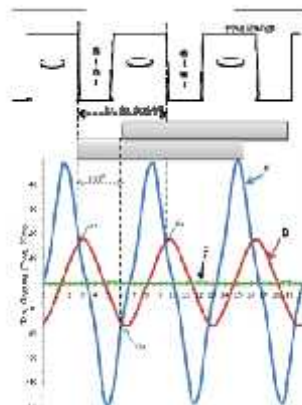


Gambar 2.20. Kemiringan satu kutub magnet
 Sumber: Fitriana, Pudji Irasari, Muhammad Kasim

Dengan dimensi satu buah magnet, panjang x lebar x tebal adalah (50,8 x 16 x 12) mm, besarnya nilai W_{sk} seperti gambar 2.20 yang akan dianalisis diambil pada tiga posisi kemiringan magnet yang berbeda yaitu:

- Posisi A dimana $W_{sk} = 0 = 0.0$, posisi magnet lurus tanpa kemiringan, $b =$ lebar magnet = 16 mm.
- Posisi B dimana $W_{sk} = 5 \text{ mm} = 0.58$ atau *skewing* 58% dari kisar alur (slot pitch), $b = 21\text{mm}$.
- Posisi C dimana $W_{sk} = 8,6 \text{ mm} = 1.0$ atau *skewing* 100% dari kisar alurnya, $b = 24,6 \text{ mm}$.

Dari hasil simulasi pada ketiga posisi kemiringan magnet, diperoleh hasil bahwa lebar magnet 16 mm (kurva A) menghasilkan torsi *cogging* maksimum sebesar 49 Nm. Setelah posisi magnet diubah dengan cara mengatur lebar antar magnet menjadi 21 mm, dengan sudut ask $3,88^\circ$ atau $W = 5 \text{ mm}$ maka torsi *cogging* berkurang nilai puncaknya dari 49 Nm menjadi 18 Nm. Pada posisi C dimana rotor digeser sejauh 8,6 mm atau sebesar 100% kisar alurnya, memberikan hasil bahwa torsi *cogging* dapat berkurang sepenuhnya dengan hasil 0,1 Nm (kurva C). Hasil simulasi dapat dilihat pada gambar 2.21.



Gambar 2.21. Bentuk gelombang torsi *cogging* sebesar satu kutub pada tiga posisi kemiringan magnet

Sumber: Fitriana, Pudji Irasari, Muhammad Kasim

Hasil eksperimen pada tabel 2.6. diperoleh hasil bahwa pada posisi kemiringan 0.0 s dan 0.58 s, torsi hasil perhitungan analitik dan eksperimen menunjukkan nilai yang hampir sama, yaitu 49,5 Nm dan 20,4 Nm. Sedangkan pada posisi kemiringan 1.0 terjadi perbedaan nilai torsi yang cukup besar, sebesar 34,3 Nm.

Tabel 2.6. Perbandingan torsi *cogging* GMP hasil simulasi dan uji GMP terkopel motor penggerak

Kemiringan Magnet Permanen			Torsi (N.m.)	
Posisi	α_{sk} ($^{\circ}$)	W_{sk} (mm)	Prediksi	Eksperimen
0.0 λ_s	0	0	49	49,5
0.58 λ_s	3,88	5	18	20,4
1.0 λ_s	6,67	8,6	0,1	34,3

Sumber: Fitriana, Pudji Irasari, Muhammad Kasim

Menurut Wu et.al (2000), idealnya torsi dapat tereduksi sepenuhnya (hampir mendekati nol), jika kemiringan dibuat sama besar dengan kisar alur dengan konsekuensi terjadi penurunan daya pada keluaran GMP. Eksperimen menunjukkan, bahwa saat kemiringan dibuat sama besar dengan kisar alur, torsi *starting* tidak menunjukkan hasil yang sesuai dengan prediksi perhitungan. Yang terjadi adalah adanya distorsi harmonik yang cukup besar pada tegangan keluaran GMP, hal inilah yang menyebabkan penurunan kualitas daya GMP.

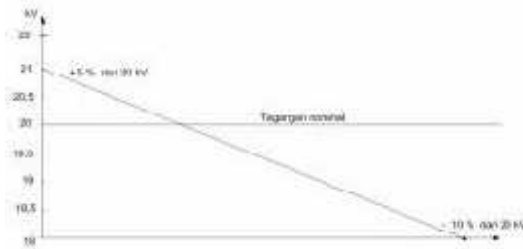
Perbedaan torsi yang cukup besar dan munculnya distorsi harmonik pada posisi kemiringan 100% kisar alur kemungkinan disebabkan oleh:

- Susunan magnet secara *discrete magnet segment* yang digunakan membutuhkan presisi dan ketelitian dalam menggeser magnet dengan tepat. Pergeseran sebesar 0,1 mm saja akan merubah dan mempengaruhi torsi *cogging* saat *starting* GMP.
- Konfigurasi lilitan yang digunakan pada prototip ini adalah bentuk kisar penuh (*full pitch*), artinya rasio jumlah alur stator dengan kutub rotor (*span* kutub) berupa nilai integer.
- Pergeseran magnet yang terlalu jauh mengakibatkan distribusi medan magnetik yang tidak seragam (*nonuniformly*) walaupun dalam simulasi telah diasumsikan karakteristik magnet sama sehingga distribusi medan magnet seragam.

2.1.8 Penurunan Tegangan (*Drop Voltage*)

Penurunan tegangan merupakan besarnya tegangan yang hilang pada suatu penghantar. Penurunan tegangan pada saluran tenaga listrik secara umum berbanding lurus dengan panjang saluran dan beban serta berbanding terbalik dengan luas penampang penghantar. Besarnya Penurunan tegangan dinyatakan baik dalam persen atau besaran Volt. Besarnya batas atas dan bawah ditentukan oleh kebijaksanaan perusahaan kelistrikan. Perhitungan penurunan tegangan praktis pada batas tertentu dengan hanya menghitung besarnya tahanan masih dapat dipertimbangkan, namun pada system jaringan khususnya pada sistem tegangan menengah masalah induktansi dan kapasitansinya diperhitungkan karena nilainya cukup berarti (PT.PLN (Persero), 2010: hal 20).

Sesuai dengan standar tegangan yang ditentukan oleh PLN (SPLN), perancangan jaringan dibuat agar jatuh tegangan di ujung diterima 10%. Grafik toleransi tegangan pelayanan yang diijinkan ditunjukkan pada gambar 2.22.



Gambar 2.22. Toleransi tegangan pelayanan yang diijinkan.

(Sumber: Jurnal Hardianto)

Grafik diatas menunjukkan pada tegangan menengah atau 20 kV hanya diijinkan +5% atau setara dengan 21 kV dan -10% atau setara dengan 18 kV. Selain itu, untuk tegangan rendah atau 220/380 hanya diijinkan +5% atau setara dengan 230/400 V dan -10% atau setara dengan 200/350 V seperti yang dikutip pada Standar Nasional Indonesia (SNI) No. 04-0227-2003 (2003; hal: 4). Tabel 2.7 merupakan tegangan nominal sesuai dengan Standar Nasional Indonesia.

Tabel 2.7. Tegangan nominal antara 100 sampai 1000 V

Sistem fase tiga empat kawat atau tiga kawat	
Tegangan nominal (V)	
	230/400 ¹⁾
	400/690 ¹⁾
	1.000

¹⁾ Tegangan nominal sistem 220/380 V yang ada harus dikembangkan menuju nilai yang direkomendasikan yaitu 230/400 V. Periode transisi paling lambat tahun 2003. Selama periode ini, sebagai langkah pertama, penyuplai tenaga listrik di negara yang mempunyai sistem 220/380 V harus mengganti ke dalam julat tegangan 230/400 V dengan toleransi +5%, -10 %. Pada akhir periode transisi ini, toleransi 230/400 V ± 10% harus telah tercapai; setelah periode ini, pengurangan julat ini akan dipertimbangkan.

Sumber: Standar Nasional Indonesia

Selain dari Standar Nasional Indonesia, persyaratan teknik sistem distribusi juga diatur dalam Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral (Permen ESDM) no. 04 tahun 2009 tentang aturan distribusi tenaga listrik. Dalam persyaratan ini, frekuensi nominal sistem adalah 50 Hz dan frekuensi normal mempunyai rentang antara 49,5 Hz sampai dengan 50,5 Hz. Selain itu, tegangan sistem distribusi harus dijaga pada batas-batas kondisi normal yaitu maksimal +5% dan minimal -10% dari tegangan nominal.

Dalam Peraturan Umum Instalasi Listrik (PUIL) 2011 yang dikeluarkan oleh Badan Standarisasi Nasional (BSN) tentang Generator Darurat (hal: 576), generator harus memenuhi ketentuan yang berlaku. Pada saat dimasukkan beban penuh penurunan voltase sebaiknya tidak melebihi 25% dan dalam waktu 0,5 detik voltase sudah pulih kembali dalam batas 5% dari voltase normal.

Menurut Jurnal Penelitian Hardianto (vol. 15, hal: 3), Penurunan tegangan pada jaringan disebabkan adanya rugi tegangan akibat hambatan listrik (R) dan reaktansi (X). Penurunan tegangan phasor V_d pada suatu penghantar yang mempunyai impedansi (Z) dan membawa arus (I) dapat dijabarkan sesuai persamaan 1.

$$V_d = I \cdot Z \quad (2.44)$$

Pembahasan ini yang dimaksudkan dengan Penurunan tegangan (V) adalah selisih antara tegangan kirim (V_k) dengan tegangan terima (V_r), maka Penurunan tegangan ditunjukkan pada persamaan 2.

$$\Delta V = (V_k) - (V_r) \quad (2.45)$$

Adanya resistansi pada penghantar maka tegangan yang diterima konsumen (V_r) akan lebih kecil dari tegangan kirim (V_s), sehingga Penurunan tegangan (V_{drop}) merupakan selisih antara tegangan pada pangkal pengiriman (*sending end*) dan tegangan pada ujung penerimaan (*receiving end*) tenaga listrik. Penurunan tegangan relatif dinamakan regulasi tegangan V_R (*voltage regulation*) dan dinyatakan oleh persamaan 2.46.

$$V_R = \frac{V_s - V_r}{V_r} \times 100\% \quad (2.46)$$

Keterangan :

V_s = tegangan pada pangkal pengiriman

V_r = tegangan pada ujung penerimaan

Untuk menghitung penurunan tegangan, diperhitungkan reaktansinya, maupun factor dayanya yang tidak sama dengan satu. Penyederhanaan perhitungan, diasumsikan beban-bebannya merupakan beban fasa tiga yang seimbang dan factor dayanya ($\cos\phi$) antara 0,6 s/d 0,85. Tegangan dapat dihitung berdasarkan rumus pendekatan hubungan sebagai berikut :

$$(V) = I (R \cdot \cos\phi + X \cdot \sin\phi) L \quad (2.47)$$

dengan :

I = Arus beban (Ampere)

R = Tahanan rangkaian (Ohm)

X = Reaktansi rangkaian (Ohm)

Hambatan listrik pada penghantar dipengaruhi oleh 3 faktor yaitu panjang, luas penampang dan jenis bahan. Hambatan berbanding lurus dengan panjang benda, semakin panjang maka semakin besar hambatan suatu benda. Hambatan juga berbanding terbalik dengan luas penampang benda, semakin luas penampangnya maka semakin kecil hambatannya.. Hambatan juga berbanding lurus dengan jenis benda (hambatan jenis) semakin besar hambatan jenisnya maka semakin besar hambatan benda itu. Secara matematika dapat dituliskan :

$$R = \frac{\rho L}{A} \quad (2.48)$$

dengan:

ρ = hambatan jenis (ohm/m)

L = adalah panjang benda (m)

A = adalah luas penampang (m²) biasanya luas penampang bentuknya lingkaran.

2.2 Prosedur Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode deskriptif dengan pendekatan kuantitatif. Adapun jenis penelitiannya yaitu rekayasa teknik yang meliputi perencanaan, analisis kebutuhan, perancangan dan pembuatan generator AC 1 phasa. Dalam proses pembuatan generator magnet permanen fluks radial, peneliti terlebih dahulu menentukan motor listrik yang akan dirubah menjadi generator sinkron. Selanjutnya menentukan diameter stator, luas alur stator serta ketebalan kawat email yang digunakan. Pengukuran terkait penentuan spesifikasi dari generator sinkron dilakukan di Lab. Bengkel Mekanik Universitas Negeri Jakarta.

Tahapan selanjutnya yaitu dengan merumuskan daya maksimal yang mampu dihasilkan oleh generator sinkron. Penentuan daya yang dihasilkan generator juga termasuk penentuan diameter dan jumlah lilitan kawat email yang digunakan, langkah menggulung lilitan stator, menentukan magnet permanen yang digunakan pada generator ini serta menghitung impedansi yang ditimbulkan oleh lilitan kawat email sehingga diperoleh daya maksimal yang mampu dihasilkan.

Setelah diperoleh hasil perhitungan untuk membuat generator, dilanjutkan dengan pembuatan generator yang sesuai dengan perhitungan. Pembuatan generator dimulai dengan menggulung kumparan stator serta meletakkan pada alur stator sesuai dengan desain yang sudah dirancang. Dilanjutkan dengan membuat rotor generator dengan magnet permanen sebagai penghasil fluks magnet. Hingga penggabungan antara stator dan rotor generator.

Setelah proses pembuatan generator, langkah selanjutnya yaitu pengujian generator. Pengujian generator yang pertama dilakukan dengan cara mengukur impedansi yang dihasilkan lilitan stator generator. Pada pengukuran ini menggunakan alat ukur LCR meter dengan cara menghubungkan kedua probe dengan kedua terminal generator.

Pengujian generator kedua yaitu menghubungkan generator dengan turbin uap dan boiler. Setelah semua komponen terhubung, maka boiler mulai bekerja yaitu menghasilkan uap yang bertekanan dan dialirkan menuju turbin. Sehingga turbin dapat berputar. Karena turbin dan generator berada pada satu poros, maka kecepatan putar pada turbin sama besar dengan kecepatan putar rotor generator.

Setelah kecepatan putar rotor generator konstan serta tegangan dan frekuensi sesuai dengan jala-jala PLN, dilanjutkan dengan pengujian beban listrik

menggunakan lampu LED. Pada pengujian generator dengan beban listrik dilakukan di lab. Pengukuran Listrik Universitas Negeri Jakarta. Adapun instrument penelitian pada saat pengujian beban listrik yaitu menggunakan Tachometer yang berfungsi mengukur kecepatan putar rotor generator, Voltmeter AC untuk mengukur tegangan yang dihasilkan generator, Ampermeter untuk mengukur arus yang mengalir ke beban listrik, Hertzmeter untuk mengukur frekuensi yang dihasilkan generator serta lampu LED berdaya 1, 2, 3, 5, 7, dan 9 watt sebanyak 1 buah.

Setelah diperoleh hasil data, maka dibuat kesimpulan dari hasil percobaan ini baik berupa kalimat deskriptif maupun tabulasi. Kesimpulan dari hasil percobaan ini berisi daya maksimal yang dihasilkan oleh generator, besarnya rugi-rugi generator pada tiap-tiap beban serta kecepatan putar rotor untuk menyesuaikan tegangan jala-jala pada PLN.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode deskriptif analisis dengan pendekatan kuantitatif. Adapun jenis penelitian yang digunakan yaitu rekayasa teknik yang meliputi perencanaan, analisis kebutuhan, perancangan dan pembuatan generator AC 1 phasa. Dalam proses pembuatan generator magnet permanen fluks radial, peneliti terlebih dahulu menentukan motor listrik yang akan dirubah menjadi generator sinkron. Selanjutnya menentukan diameter stator, luas alur stator serta ketebalan kawat email yang digunakan. Pengukuran terkait penentuan spesifikasi dari generator sinkron dilakukan di Lab. Bengkel Mekanik Universitas Negeri Jakarta.

Setelah menghasilkan generator, dilakukan pengujian menggunakan motor listrik sebelum dipasang pada maket PLTU. Untuk menguji coba generator menggunakan motor listrik dilakukan di Lab. Motor Listrik Universitas Negeri Jakarta.

Penelitian ini dilaksanakan selama 8 bulan, yaitu pada bulan Maret – Desember 2016, Semester 103 dan 104 Tahun Akademik 2016. Tahap awal dalam melaksanakan penelitian ini yaitu dengan mempelajari metode dan teori-teori yang berhubungan dengan generator dan dilanjutkan dengan perencanaan, pembuatan alat dan analisis hasil kerja dari generator.

3.2 Alat dan Bahan Penelitian

Pada proses pembuatan generator diperlukan alat dan bahan yang sesuai dengan komponen-komponen generator seperti stator dan rotor serta pembuatan model tiga dimensi PLTU.

3.2.1 Pemodelan Tiga Dimensi (3D) PLTU

Pemodelan tiga dimensi (3D) PLTU menggunakan beberapa perangkat lunak yaitu:

1. *Microsoft Word 2010*
2. *Sketch Up 2015*
3. *Paint*

3.2.2 Stator

Karena rumah stator serta alur stator telah ditentukan yaitu dengan menggunakan motor listrik, maka tahapan pembuatan selanjutnya yaitu membuat gulungan stator.

Adapun alat yang digunakan untuk membuat gulungan stator yaitu:

1. *Hand sakle elektrik wind thread machine*
2. Obeng
3. Palu
4. Jangka Sorong
5. Multimeter
6. Solder
7. Sikat Kawat

Sedangkan bahan yang diperlukan untuk membuat gulungan stator adalah:

1. Kawat Email
2. Kertas Nomex (Prespan)
3. Kertas Gosok (Amplas)
4. Kabel NYAF
5. Kuas
6. Timah
7. Selongsong Kabel (*slove*)
8. Benang
9. Lak (Isolasi cair)

3.2.3 Rotor

Kerangka rotor yang digunakan dari rotor motor listrik, namun untuk magnet permanen menggunakan magnet NdFeB. Adapun alat yang digunakan untuk membuat rotor adalah:

1. Mesin bubut
2. Jangka Sorong
3. Kikir

Sedangkan bahan yang diperlukan untuk membuat rotor adalah:

1. Magnet NdFeB
2. *Lacker*
3. Kertas Gosok (Amplas)
4. Lem Besi

3.3 Diagram Alir Penelitian

Dalam proses pembuatan generator magnet permanen fluks radial, peneliti terlebih dahulu melakukan studi literature mengenai karakteristik generator, magnet permanen, serta generator dengan magnet permanen sebagai penghasil fluks magnet. Setelah berbagai sumber literature diperoleh, selanjutnya peneliti mencari informasi tentang motor listrik yang dirubah menjadi generator, proses memodifikasi serta penentuan motor listrik yang tepat untuk dijadikan generator listrik. Tahapan selanjutnya yaitu menentukan spesifikasi dari motor listrik tersebut. Adapun bagian-bagian yang digunakan dari motor listrik yaitu bagian rumah stator serta alur stator serta kerangka rotor. Setelah diperoleh data dimensi dari rumah stator, alur stator serta kerangka rotor, selanjutnya menentukan spesifikasi ulang untuk menghasilkan generator listrik dengan magnet permanen fluks radial. Adapun bagian-bagian yang ditentukan yaitu menentukan alur belitan stator, jumlah lilitan per volt, magnet permanen yang digunakan serta tegangan yang dihasilkan oleh generator tersebut. Selanjutnya dilakukan proses pembuatan generator. Pembuatan generator dimulai dengan menggulung kumparan stator serta meletakkan pada alur stator sesuai dengan desain yang sudah dirancang. Dilanjutkan dengan membuat rotor generator dengan magnet permanen sebagai penghasil fluks magnet. Hingga penggabungan antara stator dan rotor generator. Setelah proses pembuatan generator, langkah selanjutnya yaitu pengujian generator. Pengujian generator yang pertama dilakukan dengan cara mengukur impedansi yang dihasilkan lilitan stator generator. Pada pengukuran ini menggunakan alat ukur LCR meter dengan cara menghubungkan kedua probe dengan kedua terminal generator. Pengujian generator kedua yaitu

menghubungkan generator dengan turbin uap dan boiler. Setelah semua komponen terhubung, maka boiler mulai bekerja yaitu menghasilkan uap yang bertekanan dan dialirkan menuju turbin. Sehingga turbin dapat berputar. Karena turbin dan generator berada pada satu poros, maka kecepatan putar pada turbin sama besar dengan kecepatan putar rotor generator. Setelah kecepatan putar rotor generator konstan serta tegangan dan frekuensi sesuai dengan jala-jala PLN, dilanjutkan dengan pengujian beban listrik menggunakan lampu LED. Pada pengujian generator dengan beban listrik dilakukan di lab. Pengukuran Listrik Universitas Negeri Jakarta. Adapun instrument penelitian pada saat pengujian beban listrik yaitu menggunakan Tachometer yang berfungsi mengukur kecepatan putar rotor generator, Voltmeter AC untuk mengukur tegangan yang dihasilkan generator, Ampermeter untuk mengukur arus yang mengalir ke beban listrik, Hertzmeter untuk mengukur frekuensi yang dihasilkan generator serta lampu LED berdaya 1, 2, 3, 5, 7, dan 9 watt sebanyak 1 buah. Setelah diperoleh hasil data, maka dibuat kesimpulan dari hasil percobaan ini baik berupa kalimat deskriptif maupun tabulasi. Kesimpulan dari hasil percobaan ini berisi daya maksimal yang dihasilkan oleh generator, besarnya rugi-rugi generator pada tiap-tiap beban serta kecepatan putar rotor untuk menyesuaikan tegangan jala-jala pada PLN.

Adapun flowchart pembuatan generator dapat dilihat pada gambar 3.1.



Gambar 3.1. Flowchart Pembuatan Generator

3.3.1. Penentuan Karakteristik Material

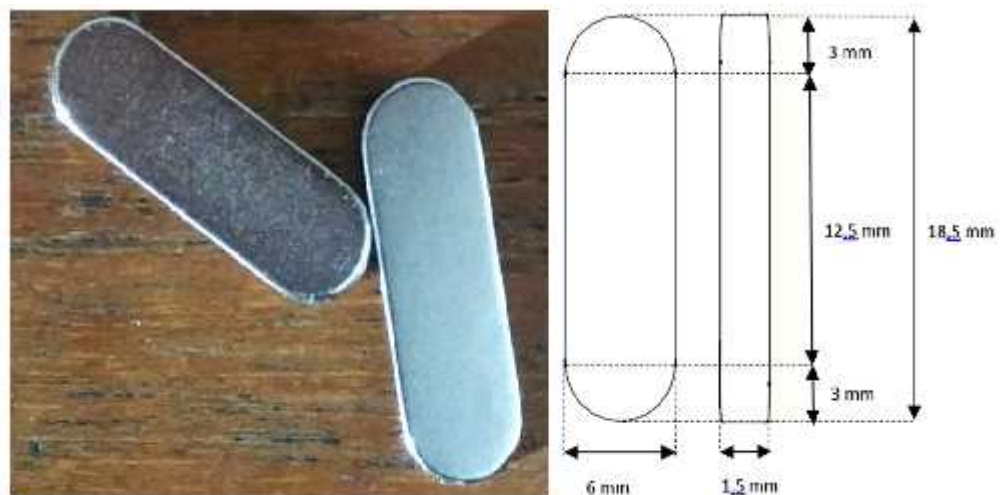
3.3.2.1. Magnet Permanen

Magnet permanen yang digunakan adalah NdFeB dengan karakteristik teknis diperlihatkan pada tabel 3.1.

Tabel 3.1. Karakteristik Magnet NdFeB

Parameter	Besaran	satuan
Kerapatan fluks remanensi (B_r)	1,36	Tesla
Curie Temperature (T_c)	310	$^{\circ}\text{C}$
Max. Working Tememp. (T_w)	80	$^{\circ}\text{C}$
Produk BH_{\max}	30	MGOe
Corective Force (H_c)	1,03	MA/m

Adapun dimensi magnet neodymium yang digunakan pada penelitian ini yaitu panjang x lebar x tebal sebesar 18,5 mm x 6 mm x 1,5 mm sebanyak 36 buah. Untuk lebih rinci dimensi magnet permanen dapat dilihat pada gambar 3.2.

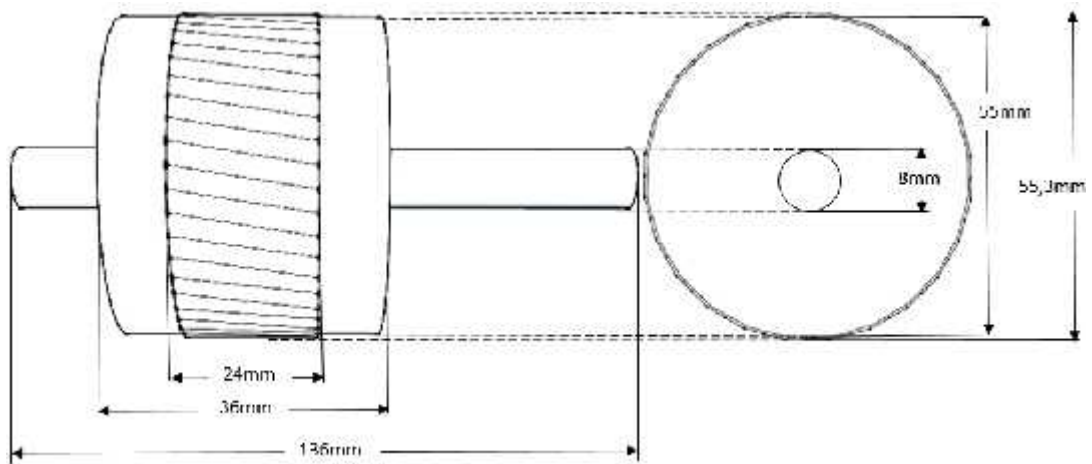


Gambar 3.2. Dimensi Magnet Neodymium

Sumber : Dokumen Pribadi

3.3.2.2. Rotor Generator

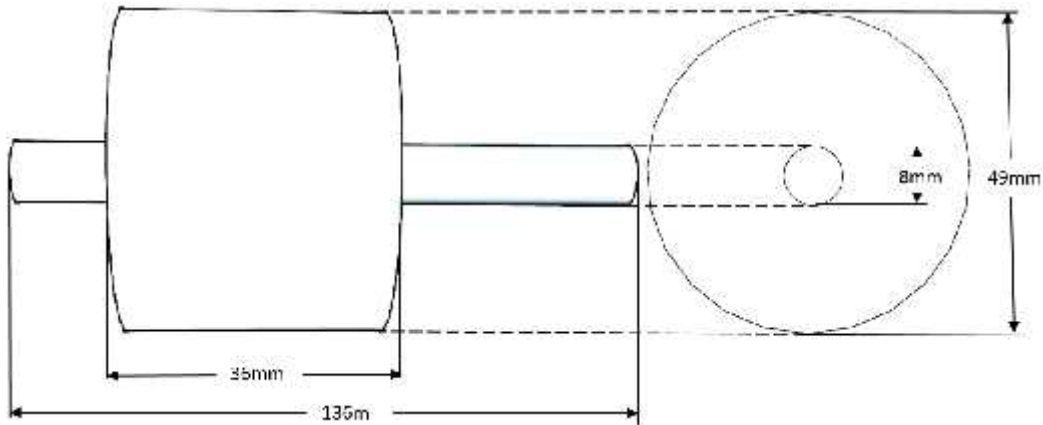
Bahan dasar yang digunakan untuk pembuatan rotor generator ini menggunakan rangka rotor pada motor listrik. Sebelum dilakukan pembubutan atau pengurangan diameter pada rotor, dilakukan proses pengukuran untuk menentukan diameter rotor sehingga jarak antara rotor dan stator (celah udara) sesuai dengan perancangan yaitu 0,6 mm. Gambar 3.3. merupakan dimensi rotor motor listrik.



Gambar 3.3. Dimensi Rotor Motor Listrik

Sumber: Dokumen Pribadi

Setelah dilakukan pengukuran, maka dapat ditentukan besarnya pengurangan pada rotor tersebut. Adapun dimensi rotor yang digunakan untuk meletakkan magnet permanen dapat dilihat pada gambar 3.4.



Gambar 3.4. Dimensi Rotor Tanpa Magnet

Sumber : Dokumen Pribadi

Untuk peletakkan magnet pada rotor memerlukan 6 buah magnet pada setiap kutub magnet dan dilakukan pergeseran magnet (*magnet skewing*) seperti pada gambar 3.5. Besarnya pergeseran magnet sama besar dengan jarak antar magnet (τ_f).

Jarak antar magnet (τ_f) pada penelitian ini ditentukan oleh keliling rotor, busur magnet (τ_m) serta jumlah magnet yang digunakan. Keliling rotor yang akan digunakan sebesar :

$$\text{keliling rotor} = \pi \times D_{\text{rotor}}$$

$$\text{keliling rotor} = 3.14 \times 54$$

$$\text{keliling rotor} = 169,56 \text{ mm}$$

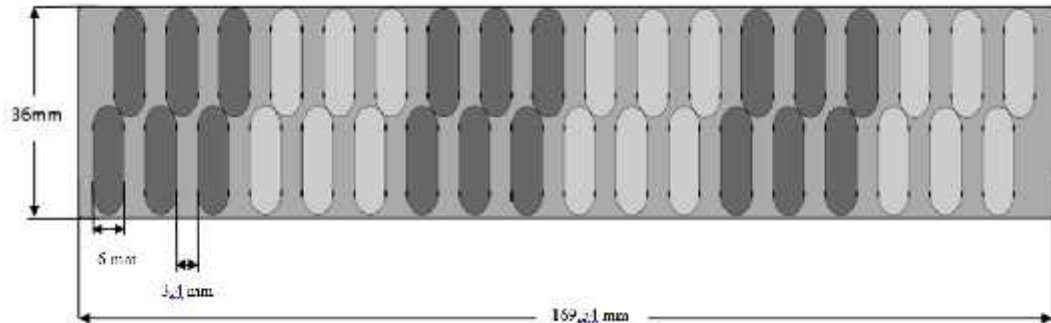
Karena jumlah magnet yang digunakan sebanyak 18 pasang, maka pergeseran magnet yang digunakan sebesar:

$$\text{keliling rotor} = ((N_m \times \tau_m) + (N_m \times W_{sk}))$$

$$169,56 = ((18 \times 6) + (18 \times W_{sk}))$$

$$W_{sk} = \frac{169,56 - 108}{18}$$

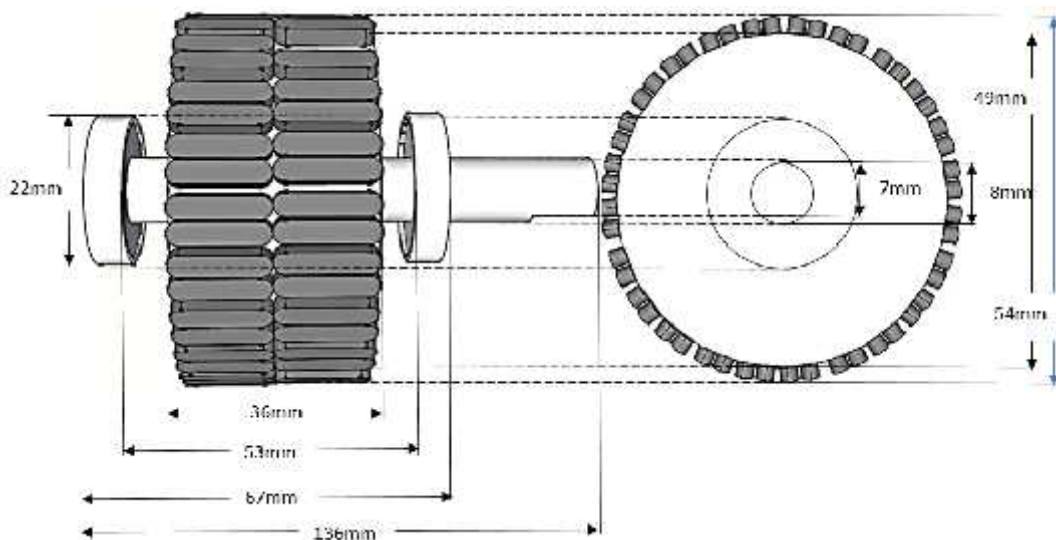
$$W_{sk} = 3,42mm$$



Gambar 3.5. Penempatan Magnet Pada Rotor

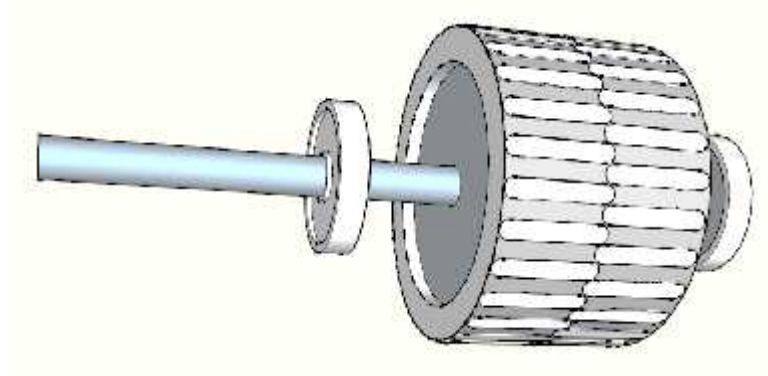
Sumber : Dokumen Pribadi

Dengan jarak antar magnet (W_{sk}) sebesar 3,42 mm, maka dimensi rotor dengan magnet permanen dapat dilihat pada gambar 3.6 dan 3.7 merupakan desain rotor 3 dimensi.



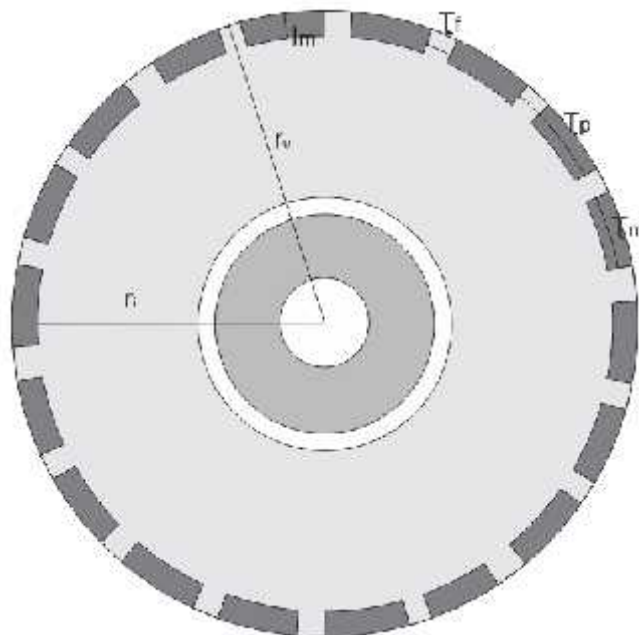
Gambar 3.6. Dimensi Rotor Dengan Magnet

Sumber : Dokumen Pribadi



Gambar 3.7. Desain Rotor 3 Dimensi
 Sumber : Dokumen Pribadi

Gambar 3.8. merupakan desain rotor secara vertikal dan tabel 3.2. merupakan karakteristik rotor generator.



- r_o = jari-jari luar magnet (m)
- r_i = jari-jari dalam magnet (m)
- p = kisar kutub stator (m)
- m = busur magnet (m)
- f = jarak antar magnet (m)
- l_m = panjang radial magnet

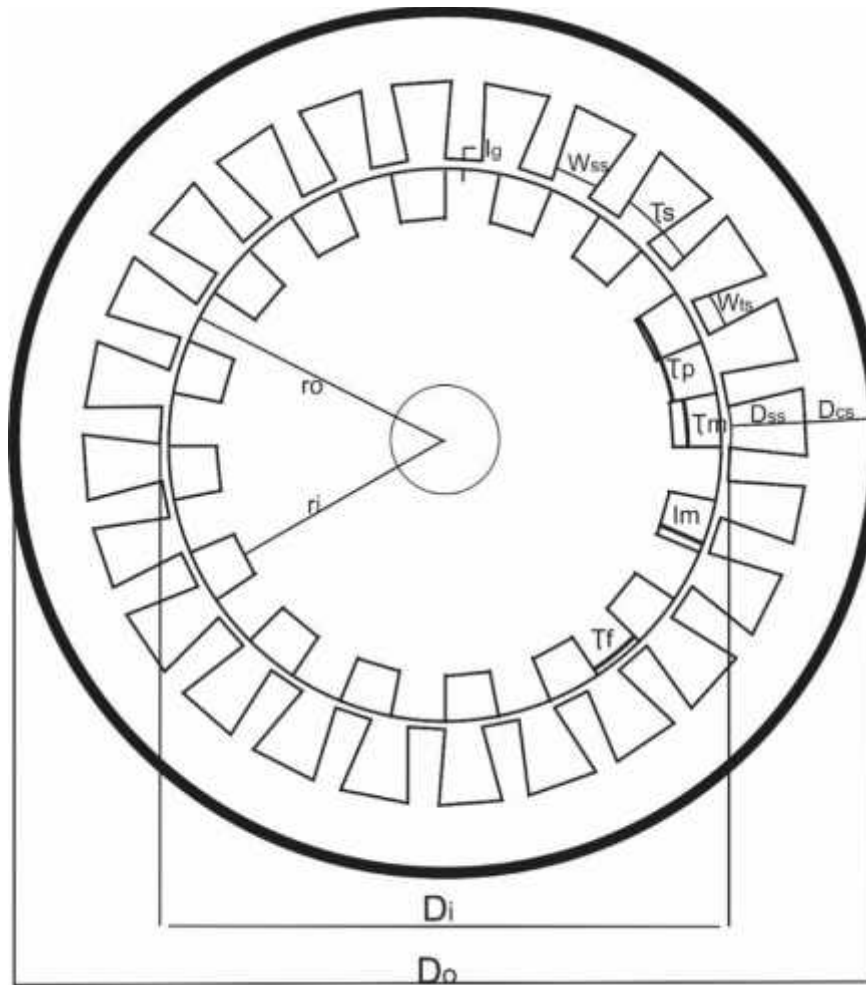
Gambar 3.8. Desain Rotor Generator secara Vertikal
 Sumber : Dokumen Pribadi

Tabel 3.2. Karakteristik Rotor Generator

Parameter	Besaran	satuan
Jari-jari luar magnet (r_o)	0,027	m
Jari-jari dalam magnet (r_i)	0,0245	m
Busur magnet (τ_m)	0,006	m
Kisar kutub stator (τ_p)	0,0094	m
Panjang radial magnet (l_m)	0,0015	m
Jarak antar magnet (τ_f)	0,0034	m
Jumlah magnet	36	
Jumlah kutub magnet	6	

3.3.2.3. Lilitan stator

Untuk dapat menentukan jumlah lilitan stator yang digunakan serta diameter kawat email, maka ditentukan parameter yang telah ada baik pada stator maupun rotor. Gambar 3.9. merupakan spesifikasi desain generator sedangkan tabel 3.3. merupakan parameter menghitung lilitan stator.



Keterangan :

- D_o = diameter luar stator (m)
- D_i = diameter dalam stator (m)
- r_o = jari-jari luar magnet (m)
- r_i = jari-jari dalam magnet (m)
- D_{cs} = lebar yoke stator (m)
- D_{ss} = kedalaman alur stator (m)
- W_{ss} = lebar alur stator (m)
- W_{ts} = lebar gigi stator (m)
- s = kisar alur stator (m)
- p = kisar kutub stator (m)
- m = busur magnet (m)
- f = jarak antar magnet (m)
- I_m = panjang radial magnet
- I_g = panjang radial celah udara (m)

Gambar 3.9. Spesifikasi Desain Generator

Sumber : Dokumen Pribadi

Tabel 3.3. Parameter Menghitung Lilitan Stator

Parameter	Besaran	satuan
Kerapatan fluks remanensi (B_r)	1,36	Tesla
Diameter luar stator (D_0)	0,0924	m
Diameter dalam stator (D_i)	0,0552	m
Lebar alur stator (W_{ss})	0,006	m
Kisar alur stator (τ_s)	0,008	m
Panjang radial celah udara (I_g)	0,0006	m
Kedalaman Alur Stator (D_{ss})	0,01	m
Lebar Yoke Stator (D_{cs})	0,0075	m
Lebar Gigi Stator (W_{ts})	0,002	m
Jumlah slot (N_s)	24	
Jumlah fasa (N_{ph})	1	

Sebelum menentukan jumlah lilitan per volt pada stator, ditentukan alur belitan stator. Pada pembuatan generator sinkron ini menggunakan 6 kutub stator, maka:

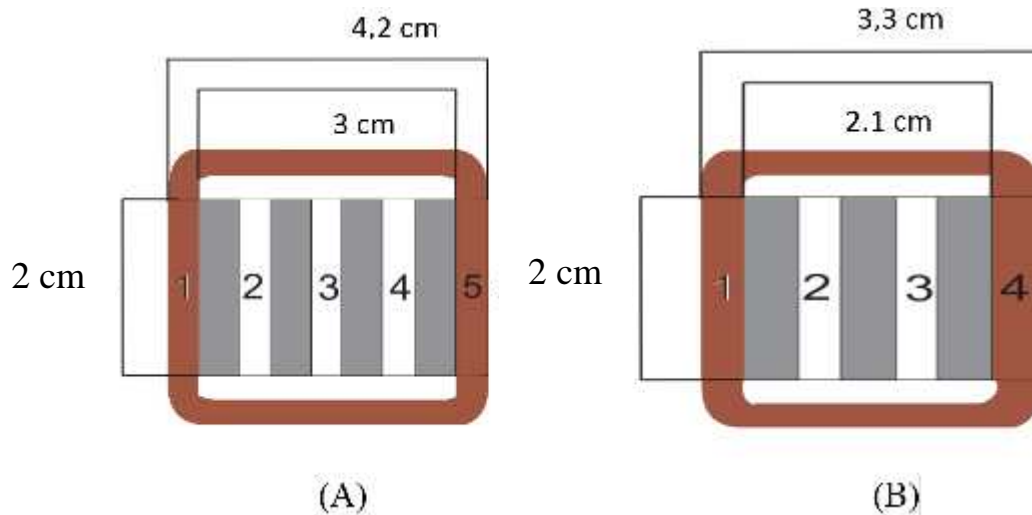
$$K'_k = \frac{360^\circ}{p} = \frac{360^\circ}{6} = 60^\circ$$

$$B = \frac{360^\circ}{S} = \frac{360^\circ}{24} = 15^\circ$$

$$q = \frac{K'_k}{B} = \frac{60^\circ}{15^\circ} = 4$$

Untuk 1 langkah belitan terletak pada alur 1 dan 5.

Karena diameter stator yang akan digunakan kecil, maka dilakukan pergeseran alur stator (*pitch factor*) sebanyak 1 alur. Maksudnya, apabila 1 langkah belitan terletak pada alur 1 dan 5, maka digeserkan menjadi alur 1 dan 4. Gambar 3.10. menampilkan belitan sebelum dan sesudah dilakukan *pitch factor*.



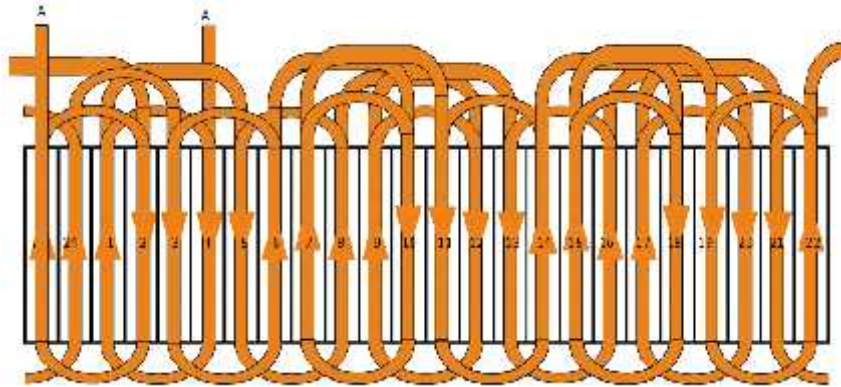
Gambar 3.10. (A) Belitan Sebelum Di *Pitch Factor* dan (B) Belitan Setelah Di *Pitch Factor*

Sumber : Dokumen Pribadi

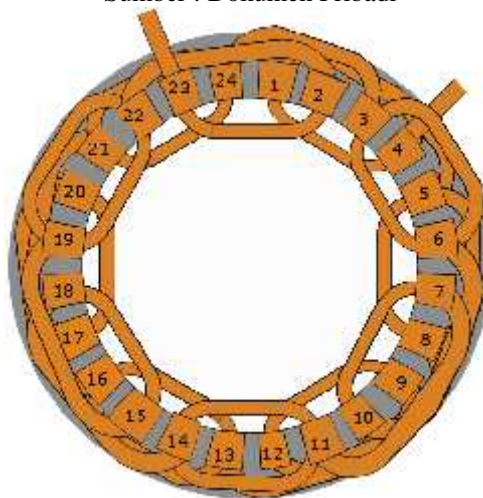
Pada belitan alur stator ini menggunakan tipe Terpusat (*Concentric*) yang mana masing-masing 1 kutub stator terdapat 4 alur stator, sehingga pada alur stator terdapat 12 kumparan dan 24 alur yang digunakan. Adapun daftar lilitan pada alur stator dapat dilihat pada tabel 3.4. dan gambar 3.11. dan 3.12. merupakan rancang alur stator.

Tabel 3.4. Daftar Lilitan Pada Alur Stator

1 – 4	3 – 6
5 – 8	7 – 10
9 – 12	11 – 14
13 – 16	15 – 18
17 – 20	19 – 22
21 – 24	23 – 2



Gambar 3.11. Rancang Alur Stator Secara Melintang
 Sumber : Dokumen Pribadi



Gambar 3.12. Rancang Alur Stator Generator
 Sumber : Dokumen Pribadi

Besar nilai *pitch factor* (k_p/k_w) adalah:

$$\alpha = \frac{\text{jumlah pengurangan slot}}{\text{jumlah slot bentangan penuh}} \times 180^\circ$$

$$\alpha = \frac{1}{4} \times 180^\circ$$

$$\alpha = 45^\circ$$

$$k_p = \text{Cos.} \frac{\alpha}{2}$$

$$k_p = \text{Cos.} \frac{45}{2}$$

$$= 0,87$$

Setelah menentukan alur belitan stator, maka dilanjutkan dengan menentukan jumlah lilitan pada tiap alur stator. Untuk menentukan jumlah lilitan pada tiap alur, terlebih dahulu mengetahui fluks magnet yang dihasilkan magnet neodymium (NdFeB) yang dihitung dengan persamaan:

Faktor konsentris fluks C_ϕ dan fraksi magnet α_m

$$\alpha_m = \frac{r_m}{r_p}$$

$$\alpha_m = \frac{0.006}{0.0094} = 0,63$$

$$C_\phi = \frac{2\alpha_m}{1+\alpha_m}$$

$$C_\phi = \frac{2 \times 0,63}{1+0,63} = 0,7$$

Koefisien Permanen PC

$$PC = \frac{l_m}{l_g C_\phi}$$

$$PC = \frac{0.0015}{0.0006 \times 0,7} = 3,5$$

Leakage coefficient k_{ml}

$$k_{ml} = 1 + \frac{4l_m}{\pi \mu_r \alpha_m r_p} \ln \left[1 + \mu \frac{l_g}{(1-\alpha_m)r_p} \right]$$

$$k_{ml} = 1 + \frac{4 \times 0.0015}{3,14 \times 1,1 \times 0,63 \times 0,0094} \ln \left[1 + 3,14 \frac{0,0006}{(1-0,63)0,0094} \right]$$

$$k_{ml} = 1,11$$

Carter coefficient k_c ,

$$l'_g = l_g + \frac{l_m}{\mu_r}$$

$$l'_g = 0,0006 + \frac{0,0015}{1,1} = 0,002$$

$$k_c = \left[1 - \frac{W_{ss}}{r_s} + \frac{4l'_g}{\pi r_s} \ln \left(1 + \frac{W_{ss}\pi}{4l'_g} \right) \right]^{-1}$$

$$k_c = \left[1 - \frac{0.006}{0.008} + \frac{4 \times 0.002}{3.14 \times 0.008} \ln \left(1 + \frac{3.14 \times 0.006}{4 \times 0.006} \right) \right]^{-1}$$

$$k_c = 1.1$$

Maka kerapatan fluks celah udara sebesar:

$$B_g = \frac{c\phi}{1 + \frac{\mu_r k_c k_{ml}}{PC}} B_r$$

$$B_g = \frac{0.7}{1 + \frac{1.1 \times 1.1 \times 1.1}{3.5}} 1.36$$

$$B_g = 0.5 \text{ Tesla}$$

Fluks magnet sebesar

$$\phi = B_g A_m$$

$$\phi = B_g \cdot (\pi (r_o^2 - r_i^2) - \tau f (r_o - r_i) Nm)$$

$$\phi = 0.5 \cdot (3.14 (0.027^2 - 0.0245^2) - 0.0034 (0.027 - 0.0245) 18)$$

$$\phi = 1.27 \times 10^{-4} \text{ webber}$$

Karena tegangan yang diinginkan telah diketahui yaitu sebesar 220V serta jumlah kumparan (N_s) sebanyak 12 kumparan, maka jumlah lilitan (N_c) sebesar:

$$E_{ph} = 4.44 f N_c k_w k_s \phi \frac{N_s}{N_{ph}}$$

$$220 = 4.44 \times 50 \times N_c \times 0.87 \times 0.984 \times 1.27 \times 10^{-4} \times \frac{12}{1}$$

$$N_c = 760 \text{ lilitan}$$

atau

$$N_{total} = 760 \times 12$$

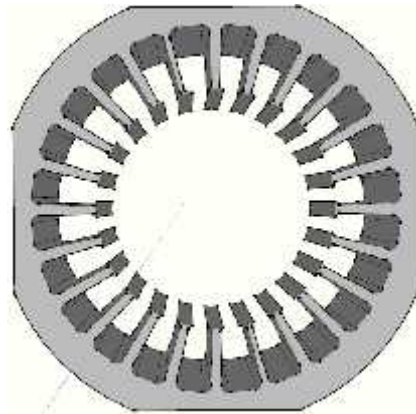
$$N_{total} = 9120 \text{ lilitan}$$

Maka, jumlah lilitan per volt pada generator sebesar:

$$GpV = \frac{9120}{220}$$

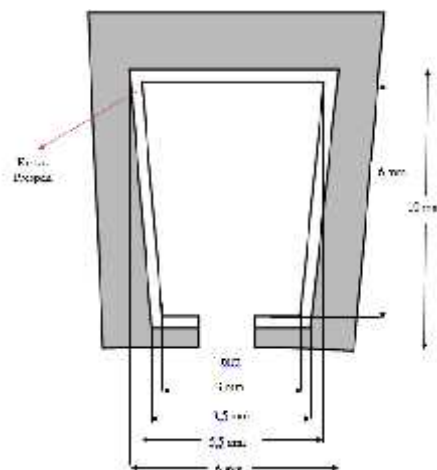
$$GpV = 41,5 \text{ lilitan/volt}$$

Untuk menentukan diameter kawat yang digunakan, terlebih dahulu harus menentukan luas alur stator serta luas dari kawat tembaga tersebut. Pada penentuan luas alur stator, dimensi yang diperlukan seperti gambar 3.13. dan 3.14.



Gambar 3.13. Inti Alur Stator Generator

Sumber : Dokumen Pribadi



Gambar 3.14. Dimensi Inti Alur Stator Generator

Sumber : Dokumen Pribadi

Adapun luas alur stator yaitu:

$$L_{stator} = \left(\frac{(3 + 5,5) \times 6}{2} \right)$$
$$L_{stator} = 25,5 \text{ mm}^2$$

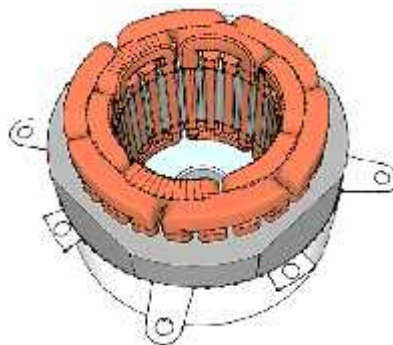
Luas kawat email yang digunakan adalah:

$$A_{cu} = \frac{L_{stator}}{760}$$
$$A_{cu} = \frac{25,5}{760}$$
$$A_{cu} = 0,3 \times 10^{-1} \text{ m}^2 \text{ atau } 0,03 \text{ mm}^2$$

Untuk diameter kawat yang digunakan adalah:

$$A_{cu} = \frac{1}{4} \pi \cdot d^2$$
$$d = \sqrt{\frac{4A_{cu}}{\pi}}$$
$$d = \sqrt{\frac{4 \times 0,03}{3,14}}$$
$$d = 0,19 \text{ mm}$$

Karena diameter kawat email yang ada dipasaran sebesar 0,18mm, maka diameter kawat email yang digunakan adalah 0,18mm. gambar 3.15. merupakan desai lilitan stator generator 3 dimensi.



Gambar 3.15. Desain Lilitan Alur Stator Generator 3 Dimensi

Sumber : Dokumen Pribadi

3.3.2.4. Arus Phasa

Diameter kawat (d_s) yang digunakan pada belitan stator sebesar 0,18 mm, maka kuat hantar arus sebesar 0,43 A. Sehingga rapat arus yang didapat dari belitan sebesar 0,18 mm yaitu :

$$j = \frac{KHA}{A}$$

$$j = \frac{0,43}{3 \times 10^{-8}}$$

$$j = 0,14 \times 10^8 \text{ A/m}^2$$

$$I_s = \frac{1}{2} A_{ss} k_{f(u)} j$$

$$I_s = \frac{1}{2} \times 25,5 \times 10^{-6} \times 0,3 \times 0,14 \times 10^8$$

$$I_s = 53,5 \text{ A}$$

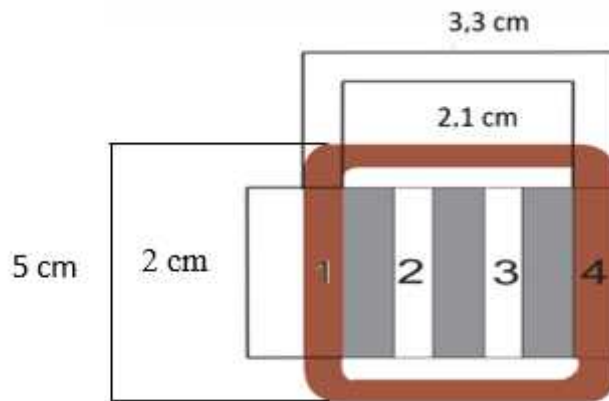
$$I_{ph} = \frac{I_s}{N_c}$$

$$I_{ph} = \frac{15,3}{520}$$

$$I_{ph} = 0,07 \text{ A}$$

3.3.2.5. Resistansi Kawat Email

Setelah memperoleh jumlah lilitan tiap alur serta ketebalan kawat, selanjutnya menghitung panjang kawat email yang digunakan pada 1 kumparan. Pada tiap 1 kumparan menggunakan 2 alur dan jumlah kumparan yaitu 12 belitan.



Gambar 3.16. Dimensi Alur 1-4 pada Stator
 Sumber : Dokumen Pribadi

Seperti pada gambar 3.16., untuk menentukan panjang kawat (L_c), perhitungan keliling belitan dibagi menjadi 2 bagian, yaitu:

Saat 2,1 cm dan 2 cm, maka :

$$L_c = \text{keliling dari 1 belitan}$$

$$L_c = (2 \times 0,02) + (2 \times 0,021)$$

$$L_c = 0,082 \text{ meter}$$

Saat 3,3 cm dan 5 cm, maka :

$$L_c = \text{keliling dari 1 belitan}$$

$$L_c = (2 \times 0,05) + (2 \times 0,033)$$

$$L_c = 0,166 \text{ meter}$$

Maka resistansi per fasa (R_{ph}) pada stator generator yaitu:

Saat 2,1 cm dan 2 cm, maka :

$$R_{ph} = \frac{\rho_{Cu} N_c L_c}{A_{Cu}} \times \frac{N_s}{N_{ph}}$$

$$R_{ph} = \frac{1,72 \times 10^{-8} \times 380 \times 0,082}{5 \times 10^{-8}} \times \frac{12}{1}$$

$$R_{ph} = \frac{1,72 \times 10^{-8} \times 380 \times 0,082 \times 12}{3 \times 10^{-8}}$$

$$R_{ph} = 214,4 \Omega$$

Saat 3,3 cm dan 5 cm, maka :

$$R_{ph} = \frac{\rho_{cu} N_c L_c}{A_{cu}} \times \frac{N_s}{N_{ph}}$$

$$R_{ph} = \frac{1,72 \times 10^{-8} \times 380 \times 0,166}{3 \times 10^{-8}} \times \frac{12}{1}$$

$$R_{ph} = \frac{1,72 \times 10^{-8} \times 380 \times 0,166 \times 12}{3 \times 10^{-8}}$$

$$R_{ph} = 433,9 \Omega$$

Maka, hambatan total dari kedua perhitungan sebesar 648,3 .

Setelah diketahui hambatan pada belitan stator, selanjutnya menghitung besarnya reaktansi induktif pada belitan stator. Besarnya reaktansi induktif belitan yaitu:

$$L_{ph} = \frac{N_c \times \emptyset}{I_{ph}}$$

$$L_{ph} = \frac{760 \times 1,27 \times 10^{-4}}{0,07}$$

$$L_{ph} = 1,4 \text{ H}$$

$$X_L = 2\pi fL$$

$$X_L = 2 \times 3,14 \times 50 \times 1,4$$

$$X_L = 439,6 \Omega$$

Hambatan total atau impedansi (Z) kumparan generator merupakan penjumlahan antara hambatan armature dengan reaktansi induktansi pada stator generator.

$$Z_{ph}^2 = R_a^2 + X_L^2$$

$$Z_{ph} = \sqrt{R_a^2 + X_L^2}$$

$$Z_{ph} = \sqrt{648,3^2 + 439,6^2}$$

$$Z_{ph} = 783,3 \Omega$$

3.3.2.6. Tegangan Phasa

Karena drop tegangan yang diijinkan menurut PUIL 2011 sebesar 5% dari tegangan normal serta factor daya ($\cos\varphi$) yang digunakan sebesar 1 maka besarnya arus dan daya yang dihasilkan oleh generator sebesar:

$$V_0 = 5\% E_{ph}$$

$$V_0 = 5\% \times 220$$

$$V_0 = 209 \text{ V}$$

$$V_0 = E_{ph} - \frac{I_{ph} Z_{ph}}{\cos\varphi}$$

$$209 = 220 - \frac{I_{ph} \times 783,3}{1}$$

$$I_{ph} = 0,014 \text{ A}$$

$$P = I_{ph} \times V_0$$

$$P = 0,014 \times 209$$

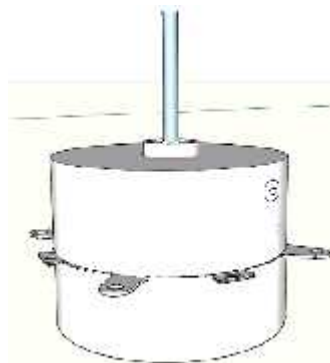
$$P = 3 \text{ VA}$$

3.3.2. Tahapan Pembuatan Generator

Setelah dilakukan perancangan generator berdaya 3 VA, selanjutnya dilakukan tahap pembuatan generator. Pada tahap ini, spesifikasi generator yang akan dirancang terdapat pada table 3.5. serta gambar 3.17. dan 3.18. merupakan rancang generator dan penempatan sator dan rotor generator .

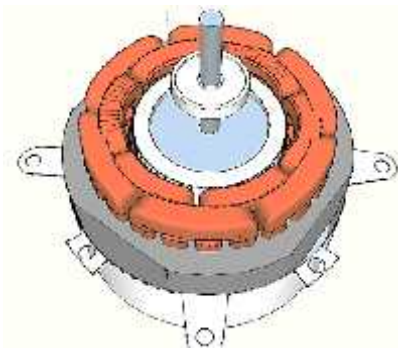
Tabel 3.5. Rancang Generator Pada Maket PLTU

Parameter	Besaran	Satuan
Tegangan Induksi	220	volt
Arus	0,014	ampere
Daya	3	VA
Frekuensi	50	Hz
Kecepatan Putaran	1000	rpm
Jumlah Phasa	1	phasa
Jumlah Lilitan	9120	lilitan
Diameter Kumbaran	0,18	mm
Impedansi Kumbaran	783,3	ohm
Jumlah Slot	24	
Jumlah Kutub Magnet	6	
Jumlah Magnet	36	



Gambar 3.17. Rancang Generator 3 Dimensi

Sumber : Dokumen Pribadi

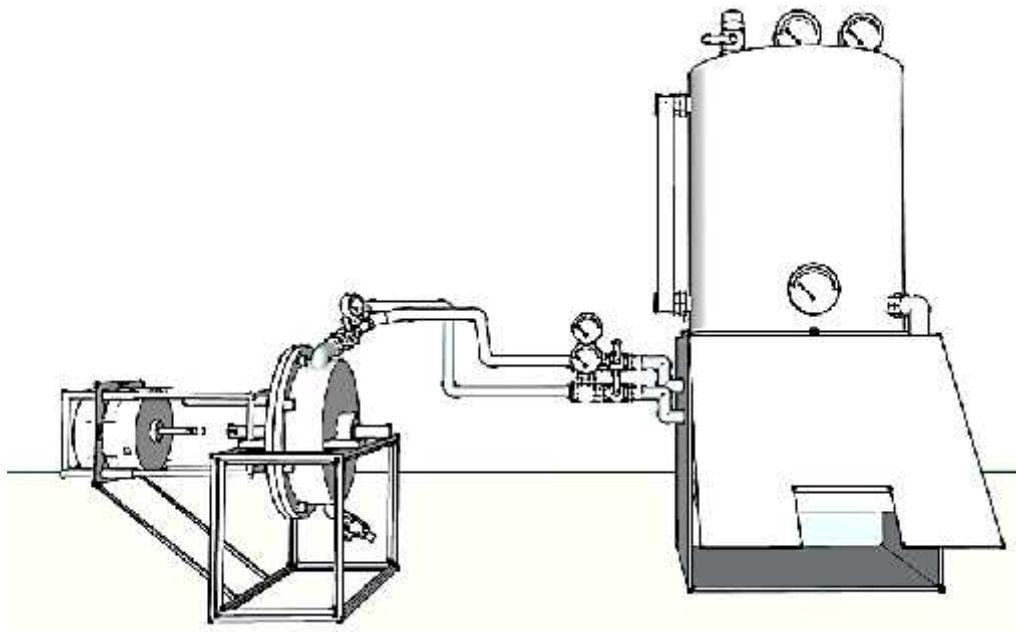


Gambar 3.18. Bagian Dalam Generator 3 Dimensi

Sumber : Dokumen Pribadi

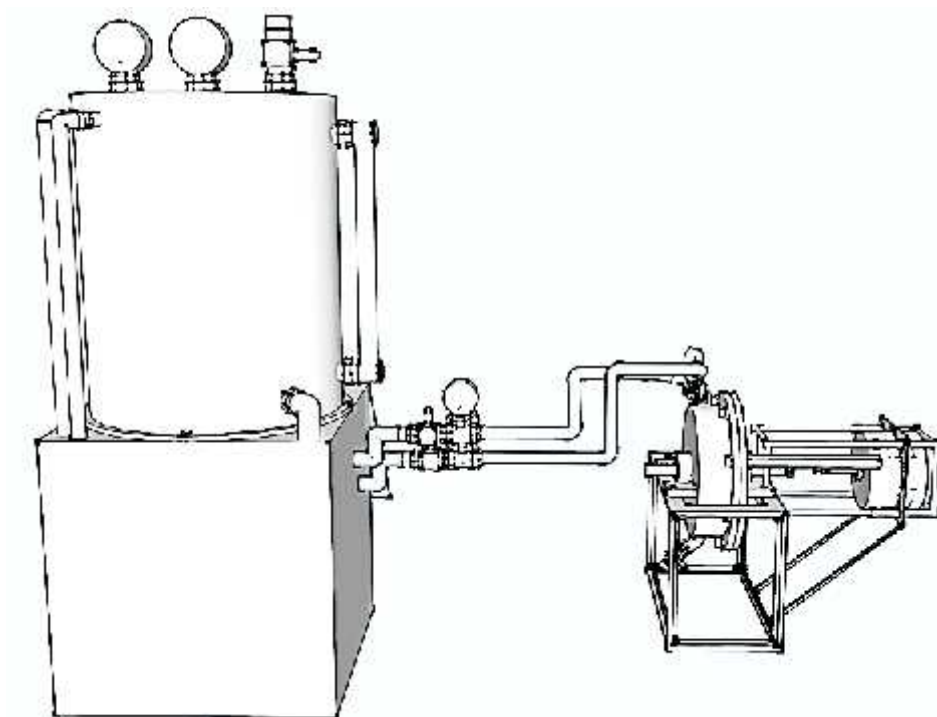
Pada maket PLTU, pemasangan generator dengan turbin berada pada satu poros. Penentuan ini dilakukan agar kecepatan putar rotor generator sama besar dengan kecepatan putar pada turbin.

Untuk merubah besar kecilnya kecepatan putar pada generator dapat diatur dengan cara memperbesar atau memperkecil bukaan katup (valve) pada pipa uap dari boiler menuju turbin uap. Semakin besar bukaan katup, semakin besar pula uap yang mengalir menuju turbin dan semakin cepat putaran turbin dan generator yang dihasilkan. Sedangkan semakin kecil bukaan katup, semakin kecil pula uap yang mengalir menuju turbin dan semakin lambat putaran turbin dan generator yang dihasilkan. Pemasangan generator pada maket PLTU dapat dilihat pada gambar 3.19. dan 3.20.



Gambar 3.19. Pemasangan Generator Pada Maket PLTU

Sumber : Dokumen Pribadi



Gambar 3.20. Pemasangan Generator Pada Maket PLTU

Sumber : Dokumen Pribadi

3.3.3. Tahapan Pengujian Tegangan dan Daya Keluaran

Pengujian tegangan dilakukan dengan 2 cara, yaitu pada saat generator bekerja tanpa beban dan generator bekerja dengan beban.

1. Pada saat generator bekerja tanpa beban, akan diukur tegangan keluaran pada generator dengan frekuensi sebagai parameter. Adapun frekuensi yang akan diambil sebesar 30, 35, 40, 45, 50, dan 55 Hz. Agar frekuensi yang ditentukan dapat tercapai, maka bukaan katup antara boiler dengan turbin harus disesuaikan.
2. Pada saat generator terhubung dengan beban, langkah awal yang dilakukan yaitu mengatur tegangan dan frekuensi output yang dikeluarkan oleh generator. Saat tegangan dan frekuensi output telah sesuai dengan beban, maka beban listrik dapat terhubung oleh generator. Beban listrik yang digunakan yaitu menggunakan lampu LED dengan daya 1, 2, 3, 5, 7 dan 9 watt sebanyak 1 buah.

3.3.4. Tahapan Perhitungan Rugi-Rugi pada Generator

Untuk menentukan perhitungan rugi-rugi pada generator, maka ditentukan beban listrik yang akan digunakan. Karena penggunaan beban listrik yang berbeda dapat menghasilkan nilai rugi-rugi generator yang berbeda pula. Rugi-rugi generator yang akan diukur yaitu rugi rugi tembaga pada kumparan stator.

3.4 Teknik dan Prosedur Pengumpulan Data

Adapun alat bantu penelitian yang digunakan pada penelitian ini yaitu lembar pengamatan hasil uji coba alat yang berisi data pengukuran tegangan, arus, dan daya.

3.4.1 Pengujian Daya Generator

Pengujian daya generator dilakukan untuk mengukur daya yang dihasilkan oleh generator. Pada pengujian ini dilakukan dua langkah, yaitu generator bekerja tanpa beban dan generator bekerja dengan beban. Pada saat generator bekerja tanpa beban, akan diukur tegangan keluaran pada generator dengan frekuensi yang bervariasi, yaitu 30, 35, 40, 45, 50 dan 55 Hz.

Pengujian ini menggunakan alat ukur berupa voltmeter untuk mengukur tegangan yang dihasilkan generator, tachometer untuk mengukur kecepatan putaran generator serta hertzmeter untuk mengukur frekuensi yang dihasilkan oleh generator. Adapun hasil yang diperoleh pada pengukuran ini dicatat pada tabel 3.6.

Tabel 3.6. Pengujian Generator Tanpa Beban

No.	Frekuensi (Hz)	Tegangan output (V)	Kecepatan rotor (RPM)
1.	30		
2.	35		
3.	40		
4.	45		
5.	50		
6.	55		

Pada saat generator terhubung dengan beban, langkah awal yang dilakukan yaitu mengatur tegangan dan frekuensi yang dikeluarkan oleh generator. Saat tegangan dan frekuensi telah sesuai dengan beban, maka beban listrik dapat terhubung oleh generator. Adapun hasil yang diperoleh pada pengukuran ini dicatat pada tabel 3.7.

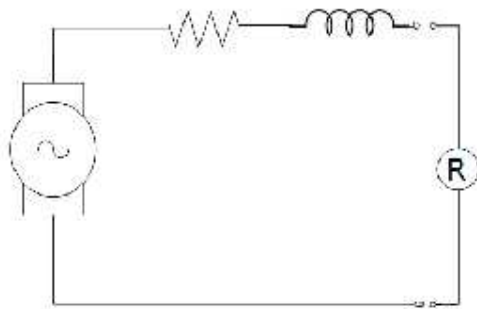
Tabel 3.7. Pengujian Generator Berbeban

No.	Tegangan, Frekuensi (V, Hz)	Jenis Beban	Beban listrik (watt)	Tegangan (volt)	Arus (I)	Frekuensi (Hz)
1.	220, 50	1 lampu LED	1			
2.		1 lampu LED	2			
3.		1 lampu LED	3			
4.		1 lampu LED	5			
5.		1 lampu LED	7			
6.		1 lampu LED	9			

3.4.2 Pengujian Rugi-Rugi Tembaga

Pengujian ini dilakukan dengan menentukan rugi generator yang disebabkan oleh hambatan pada tembaga. Rugi rugi tembaga dipengaruhi oleh impedansi pada kawat email.

Untuk mengukur impedansi pada kawat email generator pertama mengukur hambatan pada kawat email menggunakan alat ukur LCR Meter digital. Pada pengukuran menggunakan LCR Meter, skala yang digunakan menggunakan skala 200, 2000, 20000 dan 200000 . Gambar 3.21. dan 3.22. merupakan rangkaian untuk mengukur hambatan dan induktansi pada lilitan stator.



Gambar 3.21. Pengukuran Hambatan Generator

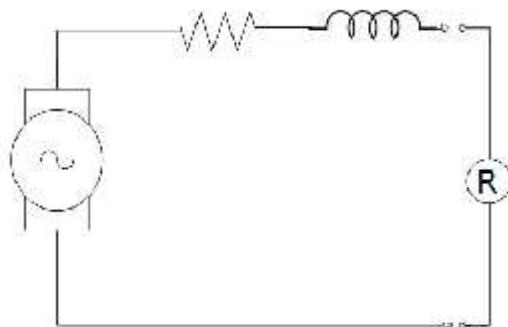
Sumber : Dokumen Pribadi

Adapun hasil yang diperoleh pada pengukuran ini dicatat pada tabel 3.8.

Tabel 3.8. Pengukuran Hambatan Pada Kumparan Stator

No.	Skala ()	Hasil pengukuran ()
1.	200	
2.	2000	
3.	20000	
4.	200000	

Setelah mengukur hambatan pada kawat email, selanjutnya mengukur induktansi pada gulungan kawat email. Pada pengukuran menggunakan LCR Meter, skala yang digunakan menggunakan skala 0,02, 0,2, 2 dan 20 H.



Gambar 3.22. Pengukuran Induktansi Generator

Sumber : Dokumen Pribadi

Tabel 3.9. Pengukuran Induktansi Pada Kumbaran Stator

No.	Skala (H)	Hasil pengukuran (H)
1.	0,02	
2.	0,2	
3.	2	
4.	20	

Setelah melakukan pengukuran hambatan dan induktansi pada kumbaran kawat email selanjutnya menghitung besar impedansi total pada kumbaran kawat email pada generator yaitu:

$$Z^2 = R_a^2 + X_L^2$$

$$Z = \sqrt{R_a^2 + X_L^2}$$

Untuk menghitung besarnya rugi-rugi tembaga digunakan persamaan:

$$P_{cu} = I_{ph}^2 R_{ph}$$

dimana :

P_{cu} = rugi tembaga (watt)

I_{ph}^2 = arus (A)

R_{ph} = tahanan pada kumbaran stator ()

Adapun hasil yang diperoleh pada pengukuran ini dicatat pada tabel 3.10.

Tabel 3.10. Pengujian Rugi Tembaga

No.	Hambatan ()	Beban listrik (watt)	Arus (I)	Rugi Tembaga (W)
1.		1		
2.		2		
3.		3		
4.		5		
5.		7		
6.		9		

3.4.3 Pengujian Efisiensi Generator

Pengujian ini dilakukan dengan membandingkan daya output generator dengan daya total generator. Pada pengujian efisiensi ini, daya generator yang dihitung merupakan daya maksimal yang dihasilkan oleh generator. Untuk menghitung efisiensi generator digunakan persamaan :

$$\eta = \frac{P_o}{P_{in}} \times 100\%$$

3.5 Teknik Analisis Data

Pada pembuatan generator sinkron magnet permanen fluks radial ini, data yang diperoleh berupa data perhitungan serta data pengukuran tegangan yang dihasilkan generator terhadap kecepatan putar rotor. Data yang akan dihasilkan berupa grafik maupun tabulasi data.

Setelah didapat data baik perhitungan dengan pengukuran, maka dapat diperoleh presentase perbedaan dari keduanya. Adapun persamaan yang digunakan yaitu:

$$\% \text{ perbedaan} = \frac{V_{\text{perhitungan}} - V_{\text{pengukuran}}}{V_{\text{perhitungan}}} \times 100$$

Dari persamaan perbedaan tegangan diperoleh hasil perbedaan tegangan dan dipaparkan pada tabel 3.9.

Tabel 3.9. Perbedaan Tegangan Perhitungan Dengan Pengukuran

No.	Putaran (rpm)	Frekuensi (Hz)	Tegangan Pengukuran (V)	Tegangan Perhitungan (V)	Presentase Perbedaan (%)
1.	600	30			
2.	700	35			
3.	800	40			
4.	900	45			
5.	1000	50			
6.	1100	55			

BAB IV

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1 Deskripsi Hasil Penelitian

Dari hasil perhitungan dan perancangan generator AC 1 phasa dengan daya 3 VA, dihasilkan generator seperti pada gambar 4.1. Pada gambar 4.2. merupakan gambar terkait komponen-komponen yang terdapat pada generator, seperti stator, rotor, bearing dan terminal generator yang berupa stopkontak.



Gambar 4.1. Generator Sinkron 3 VA



Gambar 4.2. Komponen-Komponen Generator Sinkron

Rotor generator menggunakan 36 magnet dengan 6 magnet pada tiap kutubnya. Dengan jarak antar magnet sebesar 3,42 mm dan penempatan magnet seperti pada gambar 3.5., maka dihasilkan rotor generator seperti pada gambar 4.3.



Gambar 4.3. Rotor Pada Generator

Stator generator menggunakan 760 lilitan pada tiap alurnya dengan diameter kawat email yang digunakan sebesar 0,18 mm. Langkah alur yang digunakan seperti pada rancangan di gambar 3.11., maka dihasilkan stator generator seperti pada gambar 4.4. Dengan tiap ujung kawat email digabungkan pada kabel dan stopkontak sebagai penghubung ke beban listrik.



(a)



(b)

Gambar 4.4. Stator Pada Generator (a) Tampak Samping (b) Tampak Atas

Setelah dihasilkan generator AC 1 phasa, selanjutnya generator dipasang pada maket PLTU seperti pada gambar 4.5. dan 4.6. Untuk memutarakan generator, boiler harus dipanaskan hingga memperoleh tekanan sebesar 8 kg/cm². Setelah diperoleh tekanan yang diinginkan, katup yang menghubungkan antara boiler dengan turbin dapat dibuka.



Gambar 4.5. Maket PLTU



Gambar 4.6. Pemasangan Generator Dengan Turbin

Sebelum katub uap dibuka, generator dan turbin harus terhubung. Pemasangan antara turbin dengan generator dihubungkan dalam 1 poros sehingga kecepatan putar (RPM) pada turbin sama besar dengan kecepatan putar (RPM) pada generator. Cara untuk generator dapat terhubung dengan turbin yaitu dengan mendorong generator hingga poros generator terhubung dengan poros turbin seperti pada gambar 4.7. dan 4.8.



Gambar 4.7. Generator Dan Turbin Saat Terhubung



Gambar 4.8. Generator dan Turbin Saat Terlepas

Adapun spesifikasi turbin uap dan gambar turbin uap dapat dilihat pada tabel 4.1. dan gambar 4.9.

Tabel 4.1. Data Turbin Uap

Diameter poros turbin : 25 mm

Tekanan Uap : 8 kg/cm²

Suhu : 170

Putaran : 1500 RPM



Gambar 4.9. Turbin Uap

Setelah generator dan turbin terhubung, katup uap dapat dibuka sesuai dengan kecepatan putar generator dan frekuensi sesuai dengan tabel 3.6. dan 3.7. Adapun hasil pengukuran dan analisis dapat dijabarkan pada subbab 4.1.1.

4.1.1 Hasil Pengukuran Generator Tanpa Beban

Pada pengukuran ini, rotor generator diputar berdasarkan frekuensi yang dihasilkan sehingga kecepatan putar rotor dapat diukur dengan alat ukur *Tachometer*, *Herzmeter* dan *Volt-Amperemeter* dengan spesifikasi alat ukur terdapat pada lampiran 8. Dari hasil pengukuran generator tanpa beban pada lampiran 3, maka diperoleh hasil pengukuran berupa tabulasi yang dapat dilihat pada tabel 4.2.

Tabel 4.2 Pengukuran Pada Generator Tanpa Beban

No.	Frekuensi (Hz)	Kecepatan rotor (RPM)	Tegangan output (V)
1.	30,4	606,8	116
2.	35,5	707,5	138
3.	40,5	809,3	162
4.	45,5	910,8	189
5.	50,5	1006	214
6.	55	1098	239

4.1.2 Hasil Pengukuran Generator Berbeban

Pada pengukuran ini, rotor generator diputar dengan kecepatan konstant serta frekuensi yang dihasilkan sebesar 50,5 Hz. Pengukuran menggunakan alat ukur *herzmeter*, *volt-amperemeter* dan *electronic energy meter* dengan spesifikasi alat ukur terdapat pada lampiran 8. Dari hasil pengukuran generator berbeban pada lampiran 4, maka diperoleh hasil pengukuran berupa tabulasi yang dapat dilihat pada tabel 4.3.

Tabel 4.3 Pengukuran Generator Berbeban

No.	Tegangan, Frekuensi (V, Hz)	Jenis Beban	Beban listrik (watt)	Tegangan (volt)	Arus (I)	Frekuensi (Hz)
1.	214, 50,5	1 lampu LED	1	210	0,005	50,5
2.		1 lampu LED	2	206	0,01	50,5
3.		1 lampu LED	3	204	0,015	50,5
4.		1 lampu LED	5	191	0,03	50,5
5.		1 lampu LED	7	175	0,04	50,5
6.		1 lampu LED	9	164	0,055	50,5

4.1.3 Hasil Pengukuran Hambatan dan Induktansi Generator

Pada pengukuran hambatan dan induktansi pada kumparan stator diukur menggunakan LCR Meter dengan spesifikasi alat ukur terdapat pada lampiran 8. Selector switch mengarah pada ohm () untuk mengukur hambatan dan henry (L) untuk mengukur induktansi. Dari hasil pengukuran induktansi dan hambatan stator generator pada lampiran 2, maka diperoleh hasil pengukuran berupa tabulasi yang dapat dilihat pada tabel 4.4.

Tabel 4.4. Pengukuran Hambatan Pada Kumparan Stator

No.	Skala ()	Hasil pengukuran ()
1.	2000	794
2.	20000	0,79
3.	200000	0,08

Tabel 4.5 Pengukuran Induktansi Pada Generator

No.	Skala (H)	Hasil pengukuran (H)
1.	0,02	-
2.	0,2	-
3.	2	1,474
4.	20	1,47

4.2 Analisis Data Penelitian

4.2.1 Pengukuran Generator Tanpa Beban

Pada pengukuran ini, rotor generator diputar dengan kecepatan yang mampu menghasilkan frekuensi sebesar 30, 35, 40, 45, 50, dan 55 Hz. Pengukuran ini dilakukan untuk mengetahui besarnya tegangan yang dapat dikeluarkan oleh generator dan seberapa besar presentase perbedaan antara tegangan dari hasil perhitungan dan pengukuran. Tabel 4.6. menampilkan hasil perbedaan antara perhitungan dan pengukuran pada kecepatan putar rotor generator.

Tabel 4.6. Pengukuran Generator Tanpa Beban

No.	Frekuensi (Hz)	Kecepatan rotor (RPM)	Kecepatan rotor hitung (RPM)	Tegangan output (V)
1.	30,4	606,8	608	116
2.	35,5	707,5	710	138
3.	40,5	809,3	810	162
4.	45,5	910,8	910	189
5.	50,5	1006	1010	214
6.	55	1098	1100	239

Pada frekuensi 30,4 Hz, kecepatan putar rotor pada hasil perhitungan yaitu:

$$n = \frac{60 \times f}{p}$$

$$n = \frac{60 \times 30,4}{3}$$

n : 608 rpm

Pada frekuensi 35,5 Hz, kecepatan putar rotor pada hasil perhitungan yaitu:

$$n = \frac{60 \times f}{p}$$

$$n = \frac{60 \times 35,5}{3}$$

n : 710 rpm

Pada frekuensi 40,5 Hz, kecepatan putar rotor pada hasil perhitungan yaitu:

$$n = \frac{60 \times f}{p}$$

$$n = \frac{60 \times 40,5}{3}$$

n : 810 rpm

Pada frekuensi 45,5 Hz, kecepatan putar rotor pada hasil perhitungan yaitu:

$$n = \frac{60 \times f}{p}$$

$$n = \frac{60 \times 45}{3}$$

n : 910 rpm

Pada frekuensi 50,5 Hz, kecepatan putar rotor pada hasil perhitungan yaitu:

$$n = \frac{60 \times f}{p}$$

$$n = \frac{60 \times 50,5}{3}$$

n : 1010 rpm

Pada frekuensi 55 Hz, kecepatan putar rotor pada hasil perhitungan yaitu:

$$n = \frac{60 \times f}{p}$$

$$n = \frac{60 \times 55}{3}$$

n : 1100 rpm

Pada saat generator tanpa beban, tegangan induksi (E_0) sama besar dengan tegangan output generator (V_t). Hal ini disebabkan arus armature tidak mengalirkan arus listrik sehingga tidak ada pengaruh reaksi jangkar. Pada gambar 2.12., memperlihatkan rangkaian ekivalen generator tanpa beban. Apabila arus I_a tidak mengalirkan arus, maka besarnya tegangan output sebesar:

$$E_0 = V_t + I_a(R_a + jX_L)$$

$$E_0 = V_t + 0(R_a + jX_L)$$

$$E_0 = V_t$$

Pada perhitungan tegangan generator tanpa beban pada lamiran 5, terjadi perbedaan yang cukup signifikan terhadap hasil pengukuran. Pada saat frekuensi sebesar 30 Hz presentase perbedaan sebesar 13,3%. Frekuensi sebesar 35 Hz presentase perbedaan sebesar 11,7%, saat frekuensi sebesar 40 Hz perbedaan sebesar 9,1%, saat frekuensi sebesar 45 Hz, presentase perbedaan sebesar 5,6 %, saat 50 Hz presentase perbedaan sebesar 3,7 % dan saat frekuensi 55 Hz presentase perbedaan sebesar 1,3%. Adapun tabel perbedaan tegangan dapat dilihat pada tabel 4.7.

Tabel 4.7. Perbedaan Tegangan Perhitungan Dengan Pengukuran

No.	Putaran (rpm)	Frekuensi (Hz)	Tegangan Pengukuran (V)	Tegangan Perhitungan (V)	Presentase Perbedaan (%)
1.	606,8	30,4	116	133,8	13,3%
2.	707,5	35,5	138	156,3	11,7%
3.	809,3	40,5	162	178,3	9,1%
4.	910,8	45,5	189	200,3	5,6%
5.	1006	50,5	214	222,3	3,7%
6.	1098	55	239	242,1	1,3%

Berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI) No. 04-0227-2003, tegangan rendah atau 220/380 hanya diijinkan +5% atau setara dengan 230/400 V dan -10% atau setara dengan 200/350 V. Pada hasil tegangan keluaran generator saat frekuensi 50,5 Hz menghasilkan tegangan 214 V atau -2,7% dari tegangan yang berlaku di Indonesia yaitu sebesar 220 V.

Selain itu, frekuensi yang dihasilkan oleh generator sebesar 50,5 Hz. Sehingga sesuai dengan batas maksimal frekuensi yang diizinkan oleh Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral (Permen ESDM) no. 04 tahun 2009 yaitu sebesar 50,5 Hz.

4.2.2 Pengujian Generator Berbeban

Pada tiap-tiap beban listrik yang digunakan pada generator akan mempengaruhi besarnya arus listrik (I_a) yang mengalir pada kumparan generator. Seperti pada gambar 2.16. merupakan rangkaian ekuivalen generator sinkron berbeban. Pada saat generator berbeban, tegangan output mengalami penurunan tegangan yang disebabkan oleh resistansi jangkar serta reaktansi sinkron. Besarnya penurunan tegangan dapat dilihat pada persamaan berikut ini:

$$E_0 = V_0 + I_a R_a + j I_a X_s$$

Resistansi jangkar dan reaktansi sinkron ditimbulkan oleh rugi-rugi tembaga. Rugi-rugi tembaga sangat dipengaruhi oleh besar-kecilnya arus listrik yang mengalir pada kawat email. Semakin besar arus listrik yang mengalir pada kawat email, maka semakin besar pula rugi-rugi tembaga yang ditimbulkan. Akan tetapi semakin kecil arus listrik yang mengalir pada kawat email, maka semakin kecil pula rugi-rugi tembaga yang ditimbulkan.

Dari hasil pengukuran induktansi pada stator generator, diperoleh nilai sebesar 1,4 H. Apabila generator menghasilkan frekuensi sebesar 50 Hz, maka reaktansi induktif pada stator generator sebesar :

$$X_L = 2\pi fL$$

$$X_L = 2 \times 3.14 \times 50 \times 1,474$$

$$X_L = 462,2 \Omega$$

Pada gambar 4.11. terlihat bahwa antara hambatan armature dan reaktansi induktansi pada stator generator terhubung secara seri. Pada tabel 4.4. diperoleh hasil pengukuran hambatan kawat sebesar 794 ($R = 794$) sehingga hambatan total atau impedansi (Z) kumparan generator merupakan penjumlahan antara hambatan armature dengan reaktansi induktansi pada stator generator.

$$Z^2 = R_a^2 + X_L^2$$

$$Z = \sqrt{R_a^2 + X_L^2}$$

$$Z = \sqrt{794^2 + 462,2^2}$$

$$Z = 919,7 \Omega$$

Pada tabel 4.3. telah dipaparkan hasil pengukuran generator dengan beban bervariasi, yaitu menggunakan lampu LED 1, 2, 3, 5, 7 dan 9 watt. Pada saat menggunakan beban lampu 1 watt dan impedansi sebesar 919,7 , maka besarnya rugi-rugi tembaga pada saat pembebanan lampu 1 watt sebesar:

$$P_{cu} = I_{ph}^2 R_{ph}$$

$$P_{cu} = 0,005^2 \times 919,7$$

$$P_{cu} = 0,023 \text{ watt}$$

Pada saat menggunakan beban lampu 2 watt, rugi-rugi tembaga sebesar

$$P_{cu} = I_{ph}^2 R_{ph}$$

$$P_{cu} = 0,01^2 \times 919,7$$

$$P_{cu} = 0,092 \text{ watt}$$

Pada saat menggunakan beban lampu 3 watt, rugi-rugi tembaga sebesar

$$P_{cu} = I_{ph}^2 R_{ph}$$

$$P_{cu} = 0,015^2 \times 919,7$$

$$P_{cu} = 0,21 \text{ watt}$$

Pada saat menggunakan beban lampu 5 watt, rugi-rugi tembaga sebesar

$$P_{cu} = I_{ph}^2 R_{ph}$$

$$P_{cu} = 0,03^2 \times 919,7$$

$$P_{cu} = 0,71 \text{ watt}$$

Pada saat menggunakan beban lampu 7 watt rugi-rugi tembaga sebesar:

$$P_{cu} = I_{ph}^2 R_{ph}$$

$$P_{cu} = 0,04^2 \times 919,7$$

$$P_{cu} = 1,47 \text{ watt}$$

Pada saat menggunakan beban lampu 9 watt rugi-rugi tembaga sebesar:

$$P_{cu} = I_{ph}^2 R_{ph}$$

$$P_{cu} = 0,055^2 \times 919,7$$

$$P_{cu} = 2,78 \text{ watt}$$

Adapun hasil perhitungan rugi-rugi tembaga pada stator generator dapat dilihat pada tabel 4.8.

Tabel 4.8. Perhitungan Rugi Tembaga

No.	Hambatan ()	Beban listrik (watt)	Arus (I)	Rugi Tembaga (W)
1.	919,7	1	0,005	0,023
2.		2	0,01	0,092
3.		3	0,015	0,21
4.		5	0,03	0,71
5.		7	0,04	1,47
6.		9	0,055	2,78

Efisiensi generator merupakan perbandingan daya output dengan daya input. Sedangkan daya input merupakan penjumlahan dari daya output dengan rugi-rugi daya yang dihasilkan pada generator. Rugi-rugi daya pada generator mencakup pada rugi-rugi tembaga pada kumparan stator generator.

Apabila rugi-rugi tembaga sebesar 0,023 watt pada saat berbeban 1 watt, maka efisiensi generator sebesar :

$$\eta = \frac{P_o}{P_{in}} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{1}{1 + 0,023} \times 100\%$$

$$\eta = 97,7\%$$

Apabila rugi-rugi tembaga sebesar 0,092 watt pada saat berbeban 2 watt, maka efisiensi generator sebesar :

$$\eta = \frac{P_o}{P_{in}} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{2}{2 + 0,092} \times 100\%$$

$$\eta = 95,6\%$$

Apabila rugi-rugi tembaga sebesar 0,21 watt pada saat berbeban 3 watt, maka efisiensi generator sebesar :

$$\eta = \frac{P_o}{P_{in}} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{3}{3 + 0,21} \times 100\%$$

$$\eta = 93,5\%$$

Apabila rugi-rugi tembaga sebesar 0,71 watt pada saat berbeban 5 watt, maka efisiensi generator sebesar :

$$\eta = \frac{P_o}{P_{in}} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{5}{5 + 0,71} \times 100\%$$

$$\eta = 87,5\%$$

Apabila rugi-rugi tembaga sebesar 1,47 watt pada saat berbeban 7 watt, maka efisiensi generator sebesar :

$$\eta = \frac{P_o}{P_{in}} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{7}{7 + 1,47} \times 100\%$$

$$\eta = 82,6\%$$

Apabila rugi-rugi tembaga sebesar 2,78 watt pada saat berbeban 9 watt, maka efisiensi generator sebesar :

$$\eta = \frac{P_o}{P_{in}} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{9}{9 + 2,78} \times 100\%$$

$$\eta = 76,4\%$$

Adapun hasil perhitungan efisiensi generator dapat dilihat pada tabel 4.9.

Tabel 4.9. Perhitungan Efisiensi Generator

No.	Beban listrik (watt)	Rugi Tembaga (W)	Efisiensi generator (%)
1.	1	0,023	97,7
2.	2	0,092	95,6
3.	3	0,21	93,5
4.	5	0,71	87,5
5.	7	1,47	82,6
6.	9	2,78	76,4

Pada saat generator berbeban, tegangan output mengalami penurunan tegangan yang disebabkan oleh resistansi jangkar serta reaktansi sinkron. Untuk menentukan presentase perubahan tegangan terminal alternator dari kondisi berbeban nol menjadi kondisi berbeban penuh atau disebut sebagai regulasi tegangan, dapat dihitung dengan persamaan yaitu:

$$VR = \frac{V_{NL} - V_{FL}}{V_{FL}} \times 100\%$$

Dari hasil perhitungan pada lampiran 6, maka diperoleh hasil perhitungan regulasi tegangan berupa tabulasi yang dapat dilihat pada tabel 4.10.

Tabel 4.10. Presentase Penurunan Tegangan Berbeben

No.	Tegangan, Frekuensi (V, Hz)	Beban listrik (watt)	Arus (I)	Frekuensi (Hz)	Tegangan pengukuran (volt)	Regulasi Tegangan (%)
1.	214, 50	1	0,005	50,5	210	1,9
2.		2	0.01	50,5	206	3,88
3.		3	0,015	50,5	204	4,85
4.		5	0,03	50,5	191	12
5.		7	0,04	50,5	175	23,4
6.		9	0,055	50,5	164	31,7

Menurut Peraturan Umum Instalasi Listrik (PUIL) 2011, penurunan tegangan yang diijinkan tidak boleh lebih dari 5% dari tegangan normal. Berdasarkan tabel 4.10. generator mampu menerima beban listrik sebesar 3 watt. Hal ini dikarenakan presentase penurunan tegangan sebesar 4,85 %.

Untuk torsi yang dibutuhkan agar rotor generator berputar berbanding lurus dengan daya yang dihasilkan generator. Daya generator merupakan penjumlahan dari daya output dengan rugi-rugi daya yang dihasilkan pada generator. Dari hasil perhitungan pada lampiran 7, maka diperoleh hasil perhitungan torsi generator pada beban listrik 1,2,3,5,7 dan 9 watt berupa tabulasi pada tabel 4.11.

Tabel 4.11. Torsi Pada Generator

No.	Beban listrik (watt)	Rugi-rugi Tembaga (watt)	Torsi generator (Nm)
1.	1	0,023	0,009
2.	2	0,092	0,02
3.	3	0,21	0,03
4.	5	0,71	0,054
5.	7	1,47	0,008
6.	9	2,78	0,112

Dari hasil pengujian dan pengukuran terhadap generator AC 1 phasa, dapat ditentukan factor daya yang dihasilkan oleh generator. Besarnya faktor daya dipengaruhi oleh daya nyata berbanding dengan daya semu. Daya nyata yang digunakan merupakan daya maksimal yang diperbolehkan oleh PUIL 2011 sebesar 3 W dan daya semu yang digunakan merupakan daya nyata ditambah dengan rugi-rugi generator yaitu sebesar 3,21 VA, sehingga factor daya sebesar:

$$\cos \phi = \frac{\text{daya nyata}}{\text{daya semu}}$$

$$\cos \phi = \frac{3}{3,21}$$

$$\cos \phi = 0,93$$

Adapun spesifikasi generator AC 1 phasa dapat dilihat pada tabel 4.12.

Tabel 4.12. Spesifikasi Generator AC 1 Phasa

Parameter	Besaran	Satuan
Tegangan induksi	214	volt
Arus	0,016	ampere
Daya	3,21	VA
Frekuensi	50,5	Hz
Factor Daya	0,93	
Kecepatan Putaran	1000	rpm
Jumlah Phasa	1	phasa
Jumlah Lilitan	9120	lilitan
Diameter Kumparan	0,18	mm
Impedansi Kumparan	919,7	ohm
Jumlah Slot	24	
Jumlah Kutub Magnet	6	
Jumlah Magnet	36	

4.3 Aplikasi Hasil Penelitian

Dari segi keilmuan, hasil penelitian generator sinkron fluks radial pada maket PLTU ini diharapkan dapat bermanfaat dan memberikan kontribusi sebagai alat peraga pada mata pelajaran Pembangkit Listrik. Dengan menjadikan sebagai alat peraga pembelajaran, para peserta didik dapat melihat langsung dan memahami cara kerja generator yang digunakan pada pembangkit listrik tenaga uap tanpa mendatangi langsung ke pembangkit listrik.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil uji coba generator pada maket PLTU serta pengolahan data maka dapat disimpulkan:

Generator AC I phasa dengan magnet permanen mampu menanggung beban listrik sebesar 3 watt. Hal ini disebabkan oleh diameter kawat email yang digunakan sebesar 0,18 mm sehingga besarnya impedansi pada kawat email stator generator sebesar 919,7 Ω . Selain itu, hasil dari uji coba generator meliputi:

- a. Pada pengujian tanpa beban, tegangan keluaran generator saat frekuensi 50,5 Hz menghasilkan tegangan 214 V atau -2,7% dari tegangan yang berlaku di Indonesia sesuai dengan Standar Nasional Indonesia (SNI) No. 04-0227-2003 yaitu sebesar -10%.
- b. Frekuensi yang dihasilkan oleh generator sebesar 50,5 Hz atau sesuai dengan batas maksimal frekuensi yang diizinkan oleh Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral (Permen ESDM) no. 04 tahun 2009 yaitu sebesar 50,5 Hz.
- c. Pada pengujian generator berbeban dengan menggunakan lampu berdaya 1, 2, 3, 5, 7, dan 9 watt hanya lampu berdaya 3 watt yang memenuhi karakteristik Peraturan Umum Instalasi Listrik (PUIL) 2011 dengan penurunan tegangan sebesar 10 V atau sebesar 4,85 %.

- d. Efisiensi generator berbanding terbalik dengan besarnya beban listrik yang ditanggung generator. Hal ini dipengaruhi oleh generator yang dirancang hanya berdaya 3 VA, sehingga semakin besar beban listrik yang ditanggung semakin besar pula rugi-rugi generator.
- e. Torsi generator untuk memutar rotor generator berbanding lurus dengan besarnya daya yang diberikan. Pada lampu berdaya 3 watt, torsi yang dibutuhkan sebesar 0,03 Nm. Sedangkan lampu berdaya 9 watt torsi yang dibutuhkan sebesar 0,112 Nm.

5.2 Saran

Penulis memiliki saran untuk para pembaca guna menerangkan dan melengkapi kelemahan dalam pengujian maket PLTU khususnya generator ini yaitu sebagai berikut:

1. Penelitian ini dapat dijadikan referensi kepada para pendidik sebagai media pembelajaran khususnya mata pelajaran Pembangkit Listrik.
2. Dalam membuat alat ini, diperlukan pengujian lanjutan terhadap pengujian torsi yang dihasilkan oleh generator, baik saat tidak berbeban maupun saat berbeban.
3. Dalam pengujian pada penelitian berikutnya dibuat sistem kontrol yang lebih otomatis sehingga sistem pengoperasian dapat dilakukan secara otomatis.

DAFTAR PUSTAKA

- Azka, Mukhdil. (2013). Analisis Perancangan dan Simulasi Generator Sinkron Magnet Permanen Dengan Rotor Berlubang, [*Skripsi*]. Depok: Fakultas Teknik Universitas Indonesia.
- Bambang S. *Menggulung Kembali Kumputan Stator Motor Induksi*, <http://www.mrbangjono.files.wordpress.com>. Diakses 10 April 2016.
- Bianchi, N. dan S. Bolognani. (2002). *Design Techniques for Reducing the Cogging Torque in Surface Mounted PM Motors*, IEEE Trans. On Industry Applications, Vol. 38, No. 5, September/October, 2002. pp 12591265.
- Badan Standarisasi Nasional. (2003). *Tegangan Standar*. <http://monev-pce.hol.es/wp-content/uploads/2014/09/6.-SNI-04-0227-2003.pdf>. Diakses 23 Agustus 2016.
- E.P. Atria. (2014). *Perancangan Dan Pembuatan Generator Fluks Radial Satu Fasa Menggunakan Lilitan Kawat Sepeda Motor Dengan Variasi Diameter Kawat*. <http://repository.unib.ac.id/9199/1/I,II,III,II-14-atr-FT.pdf>. Diakses 28 April 2016.
- Fitriana, Pudji Irasari, Muhammad Kasim. *Analisis Torsi Cogging Pada Prototip Generator Magnet Permanen 1kW/220V/300RPM*. <http://www.telimek.lipi.go.id/xdata/docs/ELDA16.pdf>. Diakses 23 September 2016.
- Hardianto. *Penentuan Penurunan Tegangan Berdasarkan Minimum Spanning Tree Pada Jaringan Listrik Distribusi Primer* <http://download.portalgaruda.org/article.php?article=449872&val=8138&title=Contoh%20Artikel>. Diakses 23 Agustus 2016.
- Kadir, Abdul. (1983). *Mesin Serempak*. Jakarta: Djabatan.
- Kadir, Abdul. (2010). *Pembangkit Tenaga Listrik Edisi Revisi*. Jakarta: UIP.
- Marsudi, Djiteng. (2015). *Pembangkit Energy Listrik*. Jakarta: Erlangga.
- Mustofa. *Perancangan Pembangkit Listrik menggunakan generator magnet permanen dengan motor DC sebagai prime mover*. [http://ejournal.unpak.ac.id/download.php?file=mahasiswa&id=805&name=MUSTOFA%20\(054109026\)%20\(ok\).pdf](http://ejournal.unpak.ac.id/download.php?file=mahasiswa&id=805&name=MUSTOFA%20(054109026)%20(ok).pdf). Diakses 28 April 2016.

- Permen ESDM. (2009). *Aturan Distribusi Tenaga Listrik*. <http://prokum.esdm.go.id/permen/2009/permen-esdm-04-2009.pdf>. Diakses 17 Februari 2017.
- PLN. *RUPTL*. <http://www.pln.co.id>. Diakses 22 Oktober 2015.
- PT PLN (Persero). (2010). *Kriteria Disain Enjinering Konstruksi Jaringan Distribusi Tenaga Listrik*. <http://gp.mca-indonesia.go.id/wp-content/uploads/2015/01/pln-buku-1.pdf>. Diakses 23 Agustus 2016.
- Rijono, Yon. (2002). *Dasar Teknik Tenaga Listrik*. Jakarta: Andi.
- Universitas Sumatera Utara. (2011). *Magnet Permanen*. <http://repository.usu.ac.id/bitstream/123456789/41935/4/Chapter%20II.pdf>. Diakses 23 Maret 2016.
- Wu, W., V. S. Ramsden, T. Crawford, G. Hill. (2000). *A Low-Speed, HighTorque, Direct-Drive Permanent Magnet Generator for Wind Turbines*. IEEE Industrial Application Conference, hal: 147-154.

LAMPIRAN

1

(DOKUMENTASI PEMBUATAN ROTOR DAN STATOR GENERATOR)





LAMPIRAN

2

**(PENGUKURAN INDUKTANSI DAN RESISTANSI STATOR
GENERATOR)**



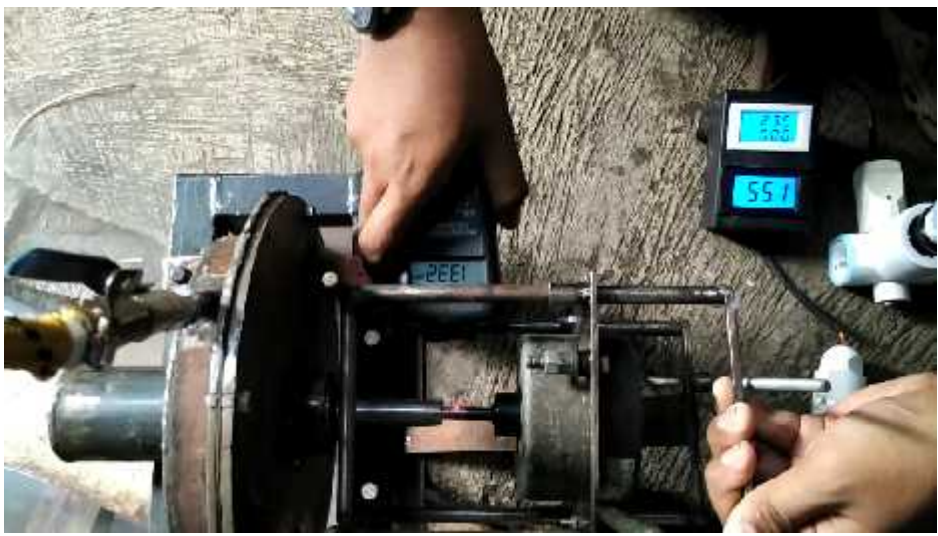
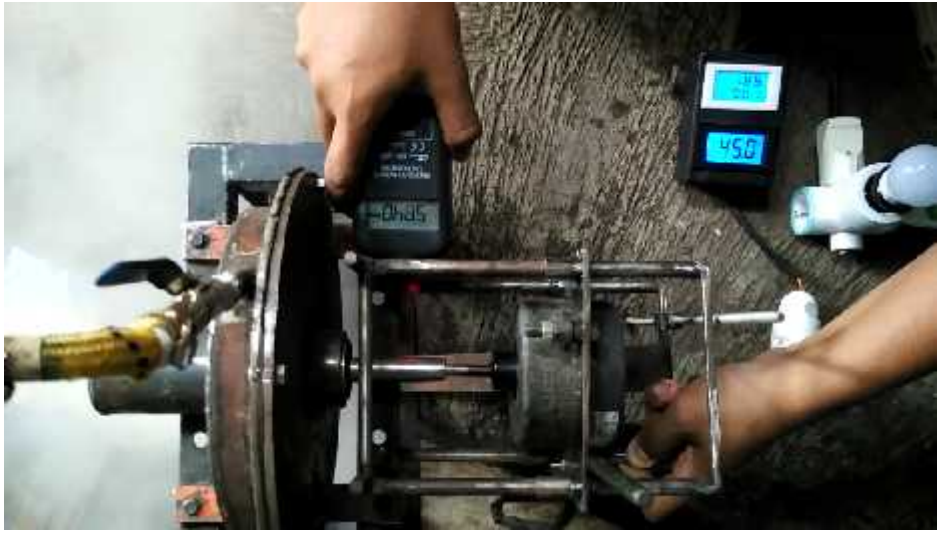
LAMPIRAN

3

(PENGUKURAN GENERATOR TANPA BEBAN)







LAMPIRAN

4

(PENGUKURAN GENERATOR BERBEBAN)



LAMPIRAN

5

(DATA PERHITUNGAN TEGANGAN INDUKSI)

PERHITUNGAN TEGANGAN INDUKSI

Pada saat frekuensi 30,4 Hz

$$E_{ph} = 4,44 f N_c k_w k_s \Phi \frac{N_s}{N_{ph}}$$

$$E_{ph} = 4,44 \times 30,4 \times 760 \times 0,87 \times 0,984 \times 1,27 \times 10^{-4} \times \frac{12}{1}$$

$$E_{ph} = 133,8 \text{ V}$$

$$\% \text{ beda} = \frac{V_{\text{perhitungan}} - V_{\text{pengukuran}}}{V_{\text{perhitungan}}} \times 100$$

$$\% \text{ beda} = \frac{133,8 - 116}{133,8} \times 100$$

$$\% \text{ beda} = 13,3\%$$

Pada saat frekuensi 35,5 Hz

$$E_{ph} = 4,44 f N_c k_w k_s \Phi \frac{N_s}{N_{ph}}$$

$$E_{ph} = 4,44 \times 35,5 \times 760 \times 0,87 \times 0,984 \times 1,27 \times 10^{-4} \times \frac{12}{1}$$

$$E_{ph} = 156,3 \text{ V}$$

$$\% \text{ beda} = \frac{V_{\text{perhitungan}} - V_{\text{pengukuran}}}{V_{\text{perhitungan}}} \times 100$$

$$\% \text{ beda} = \frac{156,3 - 138}{156,3} \times 100$$

$$\% \text{ beda} = 11,7\%$$

Pada saat frekuensi 40,5 Hz

$$E_{ph} = 4,44 f N_c k_w k_s \Phi \frac{N_s}{N_{ph}}$$

$$E_{ph} = 4,44 \times 40,5 \times 760 \times 0,87 \times 0,984 \times 1,27 \times 10^{-4} \times \frac{12}{1}$$

$$E_{ph} = 178,3 \text{ V}$$

$$\% \text{ beda} = \frac{V_{\text{perhitungan}} - V_{\text{pengukuran}}}{V_{\text{perhitungan}}} \times 100$$

$$\% \text{ beda} = \frac{178,3 - 162}{178,3} \times 100$$

$$\% \text{ beda} = 9,1\%$$

Pada saat frekuensi 45,5 Hz

$$E_{ph} = 4,44 f N_c k_w k_s \phi \frac{N_s}{N_{ph}}$$

$$E_{ph} = 4,44 \times 45,5 \times 760 \times 0,87 \times 0,984 \times 1,27 \times 10^{-4} \times \frac{12}{1}$$

$$E_{ph} = 200,3 \text{ V}$$

$$\% \text{ beda} = \frac{V_{\text{perhitungan}} - V_{\text{pengukuran}}}{V_{\text{perhitungan}}} \times 100$$

$$\% \text{ beda} = \frac{200,3 - 189}{200,3} \times 100$$

$$\% \text{ beda} = 5,6\%$$

Pada saat frekuensi 50,5 Hz

$$E_{ph} = 4,44 f N_c k_w k_s \phi \frac{N_s}{N_{ph}}$$

$$E_{ph} = 4,44 \times 50,5 \times 760 \times 0,87 \times 0,984 \times 1,27 \times 10^{-4} \times \frac{12}{1}$$

$$E_{ph} = 220,3 \text{ V}$$

$$\% \text{ beda} = \frac{V_{\text{perhitungan}} - V_{\text{pengukuran}}}{V_{\text{perhitungan}}} \times 100$$

$$\% \text{ beda} = \frac{222,3 - 214}{222,3} \times 100$$

$$\% \text{ beda} = 3,7\%$$

Pada saat frekuensi 55 Hz

$$E_{ph} = 4,44 f N_c k_w k_s \Phi \frac{N_f}{N_{ph}}$$

$$E_{ph} = 4,44 \times 55 \times 760 \times 0,87 \times 0,984 \times 1,27 \times 10^{-4} \times \frac{12}{1}$$

$$E_{ph} = 242,1 \text{ V}$$

$$\% \text{ beda} = \frac{V_{perhitungan} - V_{pengukuran}}{V_{perhitungan}} \times 100$$

$$\% \text{ beda} = \frac{242,1 - 239}{239} \times 100$$

$$\% \text{ beda} = 1,3\%$$

LAMPIRAN

6

(DATA PERHITUNGAN REGULASI TEGANGAN)

PERHITUNGAN REGULASI TEGANGAN

Saat berbeban lampu 1 watt

$$VR = \frac{V_{NL} - V_{FL}}{V_{FL}} \times 100\%$$

$$VR = \frac{214 - 210}{210} \times 100\%$$

$$VR = 1,9\%$$

Saat berbeban lampu 2 watt

$$VR = \frac{V_{NL} - V_{FL}}{V_{FL}} \times 100\%$$

$$VR = \frac{214 - 206}{206} \times 100\%$$

$$VR = 3,88\%$$

Saat berbeban lampu 3 watt

$$VR = \frac{V_{NL} - V_{FL}}{V_{FL}} \times 100\%$$

$$VR = \frac{214 - 204}{204} \times 100\%$$

$$VR = 4,85\%$$

Saat Berbeban Lampu 5 watt

$$VR = \frac{V_{NL} - V_{FL}}{V_{FL}} \times 100\%$$

$$VR = \frac{214 - 191}{191} \times 100\%$$

$$VR = 12\%$$

Saat berbeban lampu 7 watt

$$VR = \frac{V_{NL} - V_{FL}}{V_{FL}} \times 100\%$$

$$VR = \frac{216 - 175}{175} \times 100\%$$

$$VR = 23,4\%$$

Saat berbeban lampu 9 watt

$$VR = \frac{V_{NL} - V_{FL}}{V_{FL}} \times 100\%$$

$$VR = \frac{214 - 164}{164} \times 100\%$$

$$VR = 30,5\%$$

LAMPIRAN

7

(DATA PERHITUNGAN TORSI GENERATOR)

PERHITUNGAN TORSI GENERATOR

Saat berbeban lampu 1 watt

$$T_{gen} = \frac{P_{gen} \times 9,55}{n}$$

$$T_{gen} = \frac{1,023 \times 9,55}{1008}$$

$$T_{gen} = 0,03 \text{ Nm}$$

Saat berbeban lampu 2 watt

$$T_{gen} = \frac{P_{gen} \times 9,55}{n}$$

$$T_{gen} = \frac{2,092 \times 9,55}{1008}$$

$$T_{gen} = 0,02 \text{ Nm}$$

Saat berbeban lampu 3 watt

$$T_{gen} = \frac{P_{gen} \times 9,55}{n}$$

$$T_{gen} = \frac{3,21 \times 9,55}{1008}$$

$$T_{gen} = 0,03 \text{ Nm}$$

Saat berbeban lampu 5 watt

$$T_{gen} = \frac{P_{gen} \times 9,55}{n}$$

$$T_{gen} = \frac{5,57 \times 9,55}{1008}$$

$$T_{gen} = 0,054 \text{ Nm}$$

Saat berbeban lampu 7 watt

$$T_{gen} = \frac{P_{gen} \times 9,55}{n}$$

$$T_{gen} = \frac{8,47 \times 9,55}{1008}$$

$$T_{gen} = 0,08 \text{ Nm}$$

Saat berbeban lampu 9 watt

$$T_{gen} = \frac{P_{gen} \times 9,55}{n}$$

$$T_{gen} = \frac{11,78 \times 9,55}{1008}$$

$$T_{gen} = 0,112 \text{ Nm}$$

LAMPIRAN

8

(DATASHEET INSTRUMEN)

- 1. DATASHEET TACHO METER DIGITAL**
- 2. DATASHEET VOLT-AMPERE METER DIGITAL**
- 3. DATASHEET HERTZ METER DIGITAL**
- 4. DATASHEET ELECTRIC ENERGY METER DIGITAL**
- 5. DATASHEET LAMPU LED IN-LITE**
- 6. DATASHEET LCR METER DIGITAL**

1. DATASHEET TACHO METER DIGITAL



Introduction for DT2234C+ DIGITAL TACHOMETER

DT2234C+ DIGITAL TACHOMETER

Descriptions for DT2234C+ DIGITAL TACHOMETER

Display: 5 digits, 18mm LCD

Test Range: 2.5 to 99,999 RPM
(r/min) Resolution: 0.1 RPM (2.5
to 999.9 RPM)

1 RPM (over 1,000
RPM) Accuracy: + (0.05%+1
digit)

Sampling Time: 0.8 sec. (over 60
RPM) Test Range Select:
Automatic

Detecting Distance: 50 to 500 mm/2 to 20inch
(Laser) Battery: 6F22 9V

Power Consumption: Approx.30mA
(Laser) Operation Temp.: 0 to 50°C
(32 to 122°F)

Size: 131*70*29mm

Weight: 160g (including battery)

Memory: Max. Value, Min. Value, Last Value.

Av da Invernada 12 - Vila Congonhas - CEP 04612-060 - São Paulo - SP Fone /
fax 011 5096 4654

Para honra e glória de **ΧΘΥΣ**

LASER PHOTO/CONTACT TACHOMETER

Model : DT-1236L *ISO-9001, CE,*
IEC1010



Lutron



LUTRON ELECTRONIC

The Art of Measurement

LASER PHOTO/CONTACT TACHOMETER Model : DT-

FEATURES	
World's patent, Multi-functions, one instrument combine Photo Tach.(RPM) & Contact Tach. (RPM, m/min., ft/min.).	High visible LCD display gives RPM reading exactly with no guessing or errors & saves
* Laser light source, long detecting distance.	* This tachometer used the exclusive one chip MICRO-COMPUTER LSI circuit & crystal time base, offer the high accurate measurement & fast sampling time.
* Wide measuring range from 0.5 to 100,000 RPM.	
* 0.1 RPM resolution for the measured value < 1000 RPM.	The use of durable, long lasting components, including a strong, light weight ABS plastic housing, assures almost maintenance free performance for many years.
* High precision with 0.05% accuracy.	
The last value, max., value, min. value will be stored into the memory automatically & can be obtained by pressing Memory Call Button.	The housing cabinet has been carefully shaped to fit comfortable in either hand.

1236L

SPECIFICATIONS			
Measurement & Range	Photo Tachometer : 10 to 99,999 RPM.	Circuit	Exclusive one chip of microcomputer LSI circuit.
	Contact Tachometer : 0.5 to 19,999 RPM.	Operating Temperature	0 - 50 °C (32 - 122 °F).
	Surface Speed : m/min. - 0.05 to 1,999.9 m/min. ft/min. - 0.2 to 6,560 ft/min.	Operating Humidity	Less than 80% R.H.
Resolution	RPM: 0.1 RPM (< 1,000 RPM). 1 RPM (1,000 RPM).	Memory	Last/Max./Min. value.
		Battery	4 x 1.5V AA (UM-3) batteries.
	m/min.: 0.01m/min. (< 100 m/min.). 0.1m/min. (100 m/min.).	Power Consumption	Photo type : Approx. DC 21 mA.
	ft/min.: 0.1 ft/min. (< 1,000 ft/mn.). 1 ft/min. (1,000 ft/mn.).	Contact type :	Contact type : Approx. DC 7 mA.
	Size	215 x 67 x 38 mm. (8.5 x 2.6 x 1.5 inch).	
Weight	280g (0.61 LB) * including batteries.		
Display	5 digits, 10 mm (0.4") LCD.		
Accuracy	± (0.05% + 1 digit), RPM only.		

Detecting distance	5 cm to 200 cm typically. The specification detecting distance (max. 200 cm) are tested under the 1800 RPM & the size of the reflecting tape is 1 cm x 1 cm.	Accessories Included	Carrying case..... 1 PC.
Light Source	1 mW class 2 laser diode.		Reflecting tape marks (600 mm)..... 1 PC.
Time base	Quartz crystal.		RPM adapter (CONE) 1 PC. RPM adapter (FUNEL) 1 PC. Surface speed test wheel 1 PC.
			Operation manual..... 1 PC.

Patent	The DT-1236L had following countries patent & patent pending : USA - 4,823,080 GERMANY - G9015492.4, G8708922.0 TAIWAN - 45478 & other countries patent pending.
--------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

* Appearance and specifications listed in this brochure are subject to change without notice.
0408-DT1236L

2. DATASHEET VOLT-AMPERE METER DIGITAL

Voltmeter + Amperemeter Model D85-2041

Batas Pengukuran Tegangan:	80 - 300V
Batas Pengukuran Arus	: 0-50 A
Akurasi	: $\pm 1\%$
Konsumsi Daya	: < 0,2 watt
Kecepatan Pengukuran	: 0,5 Detik
Display	: LCD, Backlit Biru
Jumlah Digit	: 3 Digit
Dimensi	: 70x40x39 mm



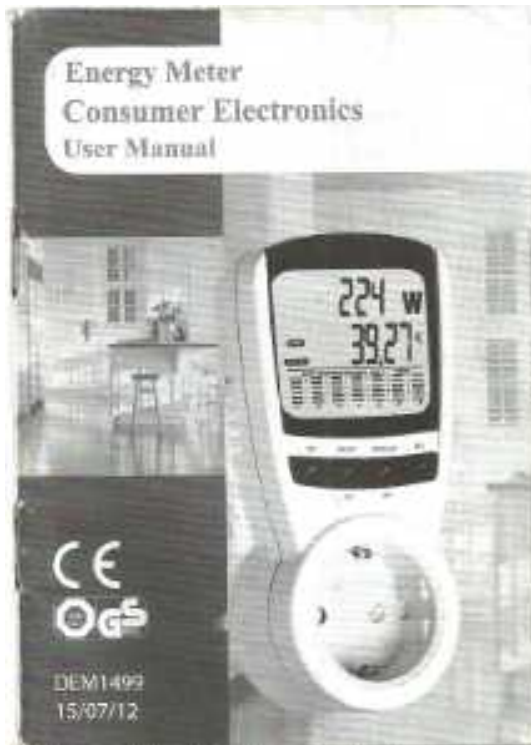
3. DATASHEET HERTZ METER DIGITAL

Digital Hertzmeter Model D69-Hz

Batas Pengukuran Frekuensi:	10Hz-199,9 Hz
Batas Tegangan	: AC 80-300 V
Akurasi	: 0,5%
Display	: LCD, Backlit Biru
Jumlah Digit	: 3 Digit
Dimensi	: 79x43x31 mm



4. DATASHEET ELECTRIC ENERGY METER DIGITAL



See the readings

The following values are displayed:

- V (voltage)
- A (current actual)
- A^{MAX} (maximum current)
- W (absorbed power)
- W^{MAX} (maximum power absorbed)
- A_{OVERLOAD} / W_{OVERLOAD} (current value of overload power value of the overload)
- Hz (Frequency)
- $\cos \phi$ (power factor cos)

27

Technical Data

Input voltage / output voltage: 230 V ~ / 50 Hz
 Power consumption: Max. 16
 Range voltage: 190 V - 270 V
 Current range: 0.01 A - A 19.999
 Power range: 1 W - 3680 W
 Indication of frequency: 46-65 Hz
 Resolution: 0.5 W
 Measurement of consumption: 0.00 to 9999.99 kWh
 Duration of indication: up to 9,999 hours 59 minutes

Since our products are constantly updated and improved technical changes are possible and design.

36

Accuracy of measurement

Volt : $\pm 3\%$ of measurement ^{1) 2) 3)}
 Amperes : $\pm 3\%$ of measurement ± 0.002 A ^{1) 2) 3)}
 Watt : $\pm 3\%$ of measurement ± 1 W ^{1) 2) 3)}
 kWh : $\pm 3\%$ of measurement ± 0.1 kWh ^{1) 2) 3)}
 Factor : $\pm 0.1\%$ power factor measured
 $0.7 \leq \cos \phi \leq 1.0$ ⁴⁾

- 1) Frequency: 46-65 Hz
- 2) Measurement in a normal room temperature
- 3) Distortion of voltage/current < 15%
- 4) Current ≥ 1.00 A/sinusoidal.
 Frequency = 50 or 60 Hz.
 Without electronic circuits

37

5. DATASHEET LAMPU LED

Product family datasheet

IN-LITE BULB SERIES

The INB003 LED Bulb 3W - 1W is the best replacement of a incandescent lamp. It is up to 80% energy efficient and up to 50% less heat generated comparing to a incandescent lamp.



Area of Application

- ✘ Indoor general lighting
- + Table lamps
- ✘ Pendant light fixtures

Product Features

- ✘ High lumen output
- + Low power consumption
- ✘ Long life span
- ✘ High color rendering index
- ✘ eco friendly, contains no mercury, lead or cadmium.

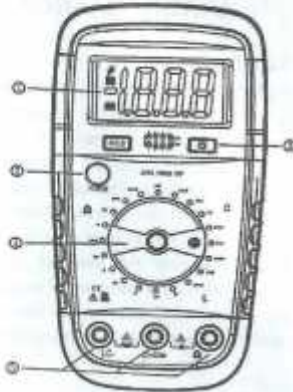


Model	Wattage	Lumens	Color Temp	Beam Angle	CRI	Lamp Base	Voltage	Life Span	Dimmable
INE003	3W	250	3000K/5500K	200	>80	E27	220V-240V	25,000	NO
INE003	5W	430	3000K/5500K	200	>80	E27	220V-240V	25,000	NO
INE003	7W	600	3000K/5500K	200	>80	E27	220V-240V	25,000	NO
INE003	5W	900	3000K/5500K	200	>80	E27	220V-240V	25,000	NO

December 21, 2015
IN-LITE BULB SERIES

6. DATASHEET LCR METER DIGITAL

2. Panel Layout



- ① LCD Display: 3 1/2 digits, character 16MM high
- ② POWER Switch
- ③ Back Light Button Switch: Press this button to switch on back light if the dark circumstance light makes the reading difficult when measuring, the light will be automatically turned off in 5 seconds. Press

2

again to switch it on again, if the battery is in weak power, the light will be dimmed

- ④ Rotary Switch: use this switch to select functions and ranges
- ⑤ Ω Input Jack, LCX Input Jack, COM/LCX Input Jack

2. SPECIFICATION

2.1 GENERAL CHARACTERISTICS

- 2.1.1 3 1/2 digit big LCD max. Indication 1999.
- 2.1.2 Auto-Zero & Auto-Polarity.
- 2.1.3 Over-range: indication of "1" or "1-1".
- 2.1.4 Low battery indication: "E"
- 2.1.5 Power supply : 9V Zinc-carbon battery.
- 2.1.6 Safety standards :
The meter is up to the standards of IEC1010 Double Insulation , Pollution Degree 2 , overvoltage Category II.
- 2.1.7 Temperature for guaranteed accuracy: $23^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$
- 2.1.8 Temperature range :
Operating : 0°C to 40°C Storage : -20°C to 60°C
- 2.1.9 Humidity range :
Operating : max 75%RH Storage: max 80%RH
- 2.1.10 Size: 143x75x32mm
- 2.1.11 Weight: Approx 200g (including battery).

3

- 2.1.12 Accessories :
 - operation manual 1 piece
 - test leads 1 pair
 - packing box 1 piece

2.2 MEASUREMENT SPECIFICATION

Environment:

Temperature : $23^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ relative humidity : max .75%

2.2.1 Resistance

Range	Accuracy	Resolution
20 Ω	$\pm(1.2\% \text{ of rdg} + 30\text{dgt})$	0.01 Ω
200 Ω	$\pm(1.0\% \text{ of rdg} + 20\text{dgt})$	0.1 Ω
2K Ω		1 Ω
20K Ω		10 Ω
200K Ω		100 Ω
2M Ω	$\pm(2.0\% \text{ of rdg} + 20\text{dgt})$	1K Ω
20M Ω	$\pm(2.0\% \text{ of rdg} + 25\text{dgt})$	10K Ω
200M Ω	$\pm(5.0\% \text{ of rdg} + 25\text{dgt})$	100K Ω
2000M Ω	$\pm(10.0\% \text{ of rdg} + 35\text{dgt})$	1M Ω

Overload protection: 250V DC/250Vrms AC for all range.

2.2.2 Capacitance

4

Range	Accuracy	Resolution
2000PF	$\pm(2.5\% \text{ of rdg} + 30\text{dgt})$	1pF
20nF	$\pm(2.5\% \text{ of rdg} + 25\text{dgt})$	10pF
200nF	$\pm(2.5\% \text{ of rdg} + 30\text{dgt})$	100pF
2 μF	$\pm(2.5\% \text{ of rdg} + 30\text{dgt})$	1nF
20 μF		10nF
200 μF		0.1 μF

2.2.3 Inductance

Range	Frequency	Accuracy	Resolution
20mH	100Hz	$\pm(2.5\% \text{ of rdg} + 25\text{dgt})$	0.01mH
200mH	100Hz		0.1mH
2H	100Hz		1mH
20H	100Hz		10mH

2.2.4 Transistor hFE test

Range	Description	Test Condition
-------	-------------	----------------

5