



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**ANALISIS UNJUK KERJA RANCANG BANGUN  
GENERATOR AXIAL CAKRAM TUNGGAL SEBAGAI  
PEMBANGKIT LISTRIK TURBIN ANGIN POROS  
VERTIKAL TIPE SAVONIUS**

**SKRIPSI**

**ANDRE PASCA ATMOJO**

**0706166604**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO  
DEPOK  
JULI 2011**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**ANALISIS UNJUK KERJA RANCANG BANGUN  
GENERATOR AXIAL CAKRAM TUNGGAL SEBAGAI  
PEMBANGKIT LISTRIK TURBIN ANGIN POROS  
VERTIKAL TIPE SAVONIUS**

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat memperoleh gelar sarjana**

**ANDRE PASCA ATMOJO**

**0706166604**

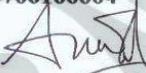
**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO  
DEPOK  
JULI 2011**

**HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS**

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

**Nama : Andre Pasca Atmojo**

**NPM : 0706166604**

**Tanda Tangan : **

**Tanggal : 4 Juli 2011**

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh,

Nama : Andre Pasca Atmojo

NPM : 0706166604

Program Studi : Teknik Elektro

Judul Skripsi : Analisis Unjuk Kerja Rancang Bangun Generator Axial Cakram  
Tunggal sebagai Pembangkit Listrik Turbin Angin Poros Vertikal  
Tipe Savonius

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr-Ing. Eko Adhi Setiawan, ST, MT



Penguji : Prof. Dr. Ir. Rudy Setiabudy, DEA



Penguji : Aji Nur Widyanto, ST, MT



Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 4 Juli 2011

## KATA PENGANTAR

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

1. Dr-Ing Eko Adhi Setiawan, ST, MT. selaku dosen pembimbing yang telah meluangkan waktunya untuk memberikan arahan, bimbingan, dan semangat yang tak ternilai sehingga skripsi ini dapat diselesaikan.
2. Dr. Hj. Marnis, SE, MS. yang selalu memberikan dukungan, semangat, dan doa sebagai ibu yang tidak bisa dibandingkan dengan apapun.
3. Keluarga penulis, Ayah Eko Atmojo, kakak Alvin Octory Atmojo, dan adik Anggia Suci Ramadhini, yang selalu memberikan motivasi lebih untuk menyelesaikan skripsi ini.
4. Teman-teman seperjuangan selama masa-masa perkuliahan, Difi Nuary, Ade Hidayat, Fajar, Bebe, Aul, Tio, Templang, dan lain-lain yang tidak bisa disebutkan satu persatu yang telah banyak bertukar pikiran dan memberikan masukan yang berguna serta semangat yang luar biasa.
5. Teman-teman asisten Laboratorium Konversi Energi Listrik yang banyak memberikan masukan kepada penulis.

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

Depok, Juli 2010

Andre Pasca Atmojo

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

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

Nama : Andre Pasca Atmojo

NPM : 0706166604

Program Studi : Teknik Elektro

Departemen : Teknik Elektro

Fakultas : Teknik

Jenis Karya : Skripsi

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

**ANALISIS UNJUK KERJA RANCANG BANGUN GENERATOR AXIAL  
CAKRAM TUNGGAL SEBAGAI PEMBANGKIT LISTRIK TURBIN  
ANGIN POROS VERTIKAL TIPE SAVONIUS**

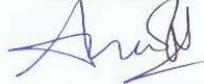
beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Non Eklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia / formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada Tanggal : 4 Juli 2011

Yang menyatakan



Andre Pasca Atmojo

## ABSTRAK

Nama : Andre Pasca Atmojo

Program Studi : Teknik Elektro

Judul : Analisis Unjuk Kerja Rancang Bangun Generator Axial Cakram Tunggal Sebagai Pembangkit Listrik Turbin Angin Poros Vertikal Tipe Savonius

Saat ini turbin angin kecepatan rendah terus mengalami kemajuan, terutama pada daerah dengan kecepatan angin yang rendah. Berbagai jenis generator dicoba untuk menghasilkan energi listrik yang maksimal pada turbin jenis ini, diantaranya adalah generator axial cakram tunggal, dinamo sepeda, generator dc, dan alternator mobil. Pada pembahasan skripsi ini diketahui generator yang cocok untuk turbin angin ini adalah generator axial cakram tunggal dan dinamo sepeda, oleh karena itu selanjutnya akan dibahas mengenai unjuk kerja masing-masing generator khususnya generator axial cakram tunggal dan dinamo sepeda dalam hal kecepatan putar generator, tegangan yang dibangkitkan, dan daya yang dihasilkan. Kedua generator tersebut akan dibandingkan sebagai pembangkit yang paling efisien pada turbin angin kecepatan rendah tipe savonius. Hasil dari pengukuran menunjukkan bahwa rancang bangun generator axial cakram tunggal lebih baik dibandingkan dengan dinamo sepeda dalam hal kecepatan putar generator, tegangan yang terinduksi, dan daya yang dihasilkan.

Kata kunci :

Turbin angin, generator sinkron, generator axial cakram tunggal, dinamo sepeda.

## ABSTRACT

Nama : Andre Pasca Atmojo

Program Studi : Electrical Engineering

Title : Analysis Performance Design and Build of Single Disc Axial Generator as a Generator in Savonius Vertical Axis Wind Turbine

Nowadays the low speed wind turbine continues to progress, especially at the area which has a low wind speed. Various types of generator are being experimented to improve the electrical power in this turbine, for example are single disc axial generator, bicycle's dynamo, DC generator, and car's alternator. In this bachelor thesis, single disc axial generator and bicycle's dynamo are the most fit generator that can be used in this wind turbine, so this thesis will explain about performance from each generator (axial generator and bicycle dynamo) which like the speed of generator, induction voltage, and the power from generator. Both of them will be compared as a most efficient generator in savonius low speed wind turbine. Hasil dari pengukuran menunjukkan bahwa rancang bangun generator axial cakram tunggal lebih baik dibandingkan dengan dinamo sepeda dalam hal kecepatan putar generator, tegangan yang terinduksi, dan daya yang dihasilkan. Result of the measurement indicate that single disc axial generator is better than bicycle's dynamo in case of speed of generator, induction voltage, and power.

Keywords :

Wind turbine, synchronous generator, single disc axial generator, bicycle's dynamo.

## DAFTAR ISI

HALAMAN SAMPUL.....	i
HALAMAN JUDUL.....	ii
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	iii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iv
KATA PENGANTAR.....	v
LEMBAR PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH.....	vi
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT.....	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR TABEL.....	xiv
<b>BAB 1 PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Tujuan.....	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Metodologi Penelitian.....	4
1.5 Sistematika Penulisan.....	4
<b>BAB 2 LANDASAN TEORI.....</b>	<b>6</b>
2.1 Angin Sebagai Sumber Energi.....	6
2.1.1 Energi Kinetik Angin.....	6
2.1.2 Daya Angin.....	8
2.2 Teknologi Pemanfaatan Sumber Angin.....	8
2.3 Pembangkit Listrik Tenaga Angin.....	9
2.3.1 Subsistem Konversi.....	10
2.3.2 Subsistem Pengaturan.....	12
2.3.3 Subsistem Penyimpan.....	13
2.4 Dinamo Sepeda.....	14
2.4.1 Umum.....	14
2.4.2 Konstruksi Dinamo Sepeda.....	14
2.5 Generator Axial.....	15

2.5.1 Umum.....	15
2.5.2 Konstruksi Generator Axial.....	16
2.5.3 Tipe-Tipe Generator Axial.....	18
2.6 Prinsip Kerja Dinamo Sepeda Dan Generator Axial .....	21
2.6.1 Dinamo Sepeda Dan Generator Axial Tanpa Beban.....	22
2.6.2 Dinamo Sepeda Dan Generator Axial Berbeban.....	23
2.7 Perbandingan Generator Flux Axial Dengan Generator Flux Radial....	25
<b>BAB 3 PERANCANGAN DAN PENGUJIAN.....</b>	<b>26</b>
3.1 Konfigurasi Sistem.....	26
3.2 Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Angin Tipe Savonius.....	27
3.2.1 Perancangan Sudu Turbin.....	27
3.2.2 Perancangan Generator.....	28
3.2.3 Perancangan Rangkaian Rectifier.....	28
3.2.4 Pemakaian Controller.....	28
3.2.5 Pemakaian Accumulator.....	29
3.3 Konfigurasi Generator.....	30
3.3.1 Jenis Dan Kapasitas Dinamo Sepeda.....	30
3.3.1.1 Rotor Dinamo Sepeda.....	30
3.3.1.2 Stator Dinamo Sepeda.....	31
3.3.2 Jenis Dan Kapasitas Generator Axial.....	31
3.3.2.1 Rotor Generator Axial Cakram Tunggal.....	32
3.3.2.2 Stator Generator Axial Cakram Tunggal.....	33
3.4 Parameter.....	34
3.4.1 Kecepatan Generator Terhadap Kecepatan Angin Dan Turbin.	34
3.4.2 Tegangan Generator Terhadap Kecepatan Angin.....	34
3.4.3 Arus Yang Mengalir Pada Saat Pembebanan Aki Terhadap Kecepatan Angin.....	35
3.4.4 Karakteristik Daya Elektris Generator Terhadap Kecepatan Angin.....	35
3.5 Prosedur Uji Coba.....	35
<b>BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>	<b>37</b>
4.1 Data Percobaan.....	37

4.2 Hasil Percobaan .....	40
4.2.1 Kecepatan Generator Terhadap Kecepatan Angin Dan Turbin.	40
4.2.2 Tegangan Generator Terhadap Kecepatan Angin.....	41
4.2.3 Arus Yang Mengalir Pada Saat Pembebanan Aki Terhadap Kecepatan Angin.....	43
4.2.4 Karakteristik Daya Elektris Generator Terhadap Kecepatan Angin.....	45
4.3 Analisa.....	46
4.3.1 Kecepatan Generator Terhadap Kecepatan Angin Dan Turbin.	46
4.3.2 Tegangan Generator Terhadap Kecepatan Angin.....	47
4.3.3 Arus Dan Daya Yang Disuplai Pada Saat Pembebanan Aki Terhadap Kecepatan Angin.....	50
<b>BAB 5 KESIMPULAN.....</b>	<b>52</b>
<b>DAFTAR ACUAN.....</b>	<b>53</b>
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>	<b>54</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>55</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Arah Pergerakan Angin.....	6
Gambar 2.2 Diagram Blok Klasifikasi Jenis SKEA.....	8
Gambar 2.3 Skema Pemanfaatan PLTB.....	9
Gambar 2.4 Turbin Angin Poros Horizontal Dan Poros Vertikal.....	10
Gambar 2.5 Roda Gigi Pada Transmisi Turbin.....	11
Gambar 2.6 Generator Sinkron 3 fasa.....	12
Gambar 2.7 Baterai Aki.....	13
Gambar 2.8 Dinamo Sepeda.....	14
Gambar 2.9 Generator Axial.....	16
Gambar 2.10 Stator <i>Overlapping</i> .....	17
Gambar 2.11 Stator <i>Non-overlapping</i> .....	17
Gambar 2.12 Generator Axial Cakram Tunggal.....	19
Gambar 2.13 Generator Axial Stator Ganda.....	20
Gambar 2.14 Arah Fluks Pada Tipe Eksternal Stator.....	20
Gambar 2.15 Struktur Generator Axial <i>Multi Stage</i> .....	20
Gambar 2.16 Arah Fluks pada Tipe N-S Genrator Aksial <i>Multi Stage</i> .....	21
Gambar 2.17 Rangkaian Pengganti Generator Sinkron.....	24
Gambar 2.18 Penyebaran Fluks Generator Konvensional Dan Axial.....	25
Gambar 3.1 Konfigurasi Sistem Turbin Angin.....	26
Gambar 3.2 Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Angin Kecepatan Rendah.....	27
Gambar 3.3 Transmisi Turbin Dan Generator.....	27
Gambar 3.4 Rangkaian Penyearah Gelombang Penuh.....	28
Gambar 3.5 Controller.....	29
Gambar 3.6 Baterai Aki 12 V 3,5 Ah.....	29
Gambar 3.7 Dinamo Sepeda 12V 6 W.....	30
Gambar 3.8 Rotor Pada Dinamo Sepeda.....	30
Gambar 3.9 Stator Pada Dinamo Sepeda.....	31
Gambar 3.10 Generator Axial Cakram Tunggal.....	32
Gambar 3.11 Surfaced Mounted Rotor Generator Axial Cakram Tunggal.....	33
Gambar 3.12 Stator Generator Axial Cakram Tunggal.....	33
Gambar 4.1 Grafik Kecepatan Generator Terhadap Kecepatan Angin.....	40

Gambar 4.2 Grafik Kecepatan Generator Terhadap Kecepatan Turbin.....	40
Gambar 4.3 Grafik Tegangan AC Generator Tanpa Beban Terhadap Kecepatan Angin.....	41
Gambar 4.4 Grafik Tegangan DC Generator Tanpa Beban Terhadap Kecepatan Angin.....	41
Gambar 4.5 Grafik Tegangan AC Generator Berbeban Aki Terhadap Kecepatan Angin.....	42
Gambar 4.6 Grafik Tegangan DC Generator Berbeban Aki Terhadap Kecepatan Angin.....	42
Gambar 4.7 Grafik Arus AC Generator Axial Pada Saat Pembebanan Aki Terhadap Kecepatan Angin.....	43
Gambar 4.8 Grafik Arus DC Generator Axial Pada Saat Pembebanan Aki Terhadap Kecepatan Angin.....	43
Gambar 4.9 Grafik Arus AC Dinamo Sepeda Pada Saat Pembebanan Aki Terhadap Kecepatan Angin.....	44
Gambar 4.10 Grafik Arus DC Dinamo Sepeda Pada Saat Pembebanan Aki Terhadap Kecepatan Angin.....	44
Gambar 4.11 Grafik Karakteristik Daya Generator Axial Terhadap Kecepatan Angin.....	45
Gambar 4.12 Grafik Karakteristik Daya Dinamo Sepeda Terhadap Kecepatan Angin.....	45
Gambar 4.13 Kurva Demagnetisasi Bahan Ferimagnetik.....	48

## DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Spesifikasi Rotor Dinamo Sepeda.....	37
Tabel 4.2 Spesifikasi Stator Dinamo Sepeda.....	38
Tabel 4.3 Spesifikasi Rotor Generator Axial Tipe Cakram Tunggal.....	38
Tabel 4.4 Spesifikasi Stator Generator Axial Tipe Cakram Tunggal.....	39



## **BAB 1**

### **PENDAHULUAN**

#### **1.1 Latar Belakang**

Krisis energi dewasa ini telah menjadi suatu masalah yang paling hangat diperbincangkan oleh masyarakat dunia, termasuk di Indonesia. Bagaimana tidak, menurut sebuah penelitian, Indonesia adalah bangsa yang termasuk dalam anggota OPEC, organisasi pengekspor minyak dunia yang dalam 10 tahun lagi akan kehabisan stok bahan bakar minyak dan dalam 30 tahun kedepan, bahan bakar gas yang kini menjadi pilihan pemerintah untuk menanggulangi masalah krisis energi lewat program konversi minyak tanah ke gas, juga akan habis. Tentunya jika tidak ada persiapan untuk menghadapi krisis ini, bukan tidak mungkin masyarakat dunia, terutama Indonesia yang negaranya sampai saat ini belum melakukan tindak nyata dalam mempersiapkan krisis energi, akan menjadi masyarakat yang terisolasi. Mempunyai uang untuk membeli energi, tetapi tidak ada energi yang dapat dibeli.

Berdasarkan masalah pemakaian energi konvensional yang semakin menipis, penggunaan dan pengembangan energi terbarukan (*renewable energy*) menjadi hal yang sangat penting. Apalagi dengan makin mengglobalnya isu emisi CO<sub>2</sub> yang kontra terhadap pelestarian lingkungan global. Gagap gempita upaya diversifikasi sumber energi mau tidak mau harus merambah Indonesia menyusul ditandatanganinya Inpres No.1/2006 tentang penyediaan dan pemanfaatan bahan bakar nabati. Tentu ini merupakan kondisi yang positif, dimana merupakan momentum yang tepat bagi seluruh komponen bangsa untuk segera memikirkan dan mengambil langkah serius guna pengembangan sumber energi alternatif masa depan.

Salah satu pemanfaatan energi yang sedang berkembang saat ini adalah energi angin. Berdasarkan data dari World Wind Energy Association, sampai dengan tahun 2007 perkiraan energi listrik yang dihasilkan oleh turbin angin

mencapai 93,85 GigaWatts, menghasilkan lebih dari 1% dari total kelistrikan secara global. Diharapkan pada tahun 2010 total kapasitas pembangkit listrik tenaga angin secara global mencapai 170 GigaWatt.

Dalam konteks Indonesia, potensi energi angin sudah sejak lama terlupakan. Negara Indonesia adalah negara kepulauan yang 2/3 wilayahnya adalah lautan dan mempunyai garis pantai terpanjang di dunia yaitu  $\pm 80.791,42$  km dimana merupakan wilayah potensial untuk pengembangan pembangkit listrik tenaga angin. Oleh karena itu solusi yang paling memungkinkan untuk diterapkan saat ini di Indonesia adalah pembangkit listrik tenaga angin atau yang dikenal sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB).

PLTB dapat dimaksimalkan pembedayaannya disekitar pantai di Indonesia. Namun, tidak semua pantai dan daerah dapat dijadikan PLTB, karena perlu dipilih daerah yang memiliki topografi dan keadaan angin yang stabil. Sampai saat ini, kapasitas total yang terpasang diseluruh Indonesia kurang dari 800 kilowatt. Terdapat lima unit kincir angin pembangkit listrik berkapasitas 80 kilowatt yang sudah dibangun. Pada tahun 2007 yang lalu, telah ditambah tujuh unit kincir pembangkit berkapasitas sama di empat lokasi, yaitu Pulau Selayar, Sulawesi Uutara, Nusa Penida, Bali, serta Bangka Belitung. Selain digunakan di daerah pesisir pantai, PLTB juga dapat digunakan di daerah pegunungan dan daratan.

Berdasarkan kondisi kecepatan angin di wilayah Indonesia yang berkisar antara 3 m/s - 6 m/s, dimana nilai tersebut sebenarnya kurang efektif untuk sebuah pembangkit listrik tenaga angin, maka perlu dikembangkan sebuah teknologi turbin angin kecepatan rendah yang memanfaatkan angin berkecepatan rendah menjadi energi listrik yang siap digunakan.

Meskipun energi yang dihasilkan tidak sebesar energi yang berasal dari batu-bara ataupun nuklir, tetapi PLTB kecepatan rendah merupakan solusi yang paling murah dan rendah risiko untuk diterapkan di Indonesia. Diharapkan dengan diberdayakannya pembangkit listrik tenaga angin tersebut di Indonesia, akan

menjadi salah satu sumber energi alternatif dalam menyambut datangnya masa krisis energi yang sebenarnya.

Tidak berbeda dengan pembangkit lainnya, pembangkit listrik tenaga angin mempunyai komponen yang paling penting dalam hal pembangkitan listrik, yaitu generator. Dewasa ini telah banyak jenis generator yang dimanfaatkan untuk perkembangan pembangkit listrik tenaga angin, di antara lainnya adalah dinamo sepeda dan generator axial cakram tunggal. Kedua jenis generator ini merupakan generator yang sering dimanfaatkan dalam hal pembangkitan listrik yang tenaga angin berkapasitas kecil.

Dinamo sepeda yang sudah banyak tersedia dipasaran dan dengan harganya yang relatif murah menjadikan generator jenis ini menjadi suatu keuntungan bagi kita jika ingin menggunakannya sebagai pembangkit. Berbeda halnya dengan generator axial, generator ini sangat jarang ditemukan dalam bentuk produk, sehingga jika ingin menggunakannya kita harus merancang bangun generator itu sendiri.

## **1.2 Tujuan**

Tujuan penulisan skripsi ini adalah untuk mengetahui unjuk kerja dari rancang bangun generator axial cakram tunggal dan dibandingkan dengan dinamo sepeda sebagai pembangkit turbin angin kecepatan rendah berdasarkan kondisi kecepatan angin di Indonesia dengan parameter pembanding adalah kecepatan generator, tegangan induksi, dan daya yang dihasilkan.

## **1.3 Batasan Masalah**

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

- Pembahasan tentang tenaga angin.
- Pembahasan mengenai proses konversi energi kinetis angin menjadi energi listrik.

- Pembahasan mengenai turbin angin yang dirancang bangun.
- Pembahasan mengenai prinsip kerja generator axial cakram tunggal dan dinamo sepeda.
- Penggunaan dinamo sepeda dan rancang bangun generator axial cakram tunggal yang umum digunakan pada pembangkit listrik tenaga angin kecepatan rendah berkapasitas kecil.
- Pembahasan mengenai unjuk kerja masing-masing generator terhadap turbin angin kecepatan rendah berkapasitas kecil.

#### **1.4 Metodologi Penulisan**

Metodologi yang dilakukan dalam penulisan skripsi ini adalah:

- Studi literatur yang bersumber dari buku, penulisan ilmiah, hasil seminar, majalah ilmiah, dan internet.
- Pengamatan, rancang bangun, dan uji coba langsung terhadap generator yang digunakan pada percobaan.

#### **1.5 Sistematika Penulisan**

Untuk memudahkan pembahasan, skripsi ini dibagi dalam 5 bab. Setiap bab mempunyai pokok bahasan tertentu sebagai bagian dari tujuan pembahasan dalam skripsi ini. Pada bab satu adalah bab pendahuluan yang menjelaskan tentang latar belakang masalah, tujuan penulisan, batasan masalah, metodologi penulisan, dan sistematika penulisan. Bab dua menjelaskan landasan teori tentang pengertian energi angin dan potensinya, prinsip kerja pembangkit listrik tenaga angin kecepatan rendah, dan jenis generator yang digunakan pada pembangkit listrik tenaga angin yang dirancang bangun. Bab 3 menjelaskan tentang pemodelan turbin angin yang dirancang bangun, serta indikator kerja beberapa generator yaitu dinamo sepeda dan generator axial yang digunakan pada turbin angin serta parameter-parameter mekanis dan elektromagnetis dari generator-generator tersebut. Bab 4 merupakan hasil dan pembahasan dari percobaan yang

dilakukan terhadap beberapa parameter generator yang diuji pada turbin angin. Bab 5 berisi kesimpulan dari pembahasan yang dilakukan pada bab sebelumnya.



## BAB 2

### LANDASAN TEORI

#### 2.1 Angin Sebagai Sumber Energi

Energi angin sebenarnya telah dimanfaatkan oleh manusia semenjak dahulu, misalnya untuk perahu layar, kincir angin bagi pompa air dan penggilingan gandum, serta pengairan ladang pertanian. Dewasa ini energi angin telah dikembangkan untuk memenuhi kebutuhan listrik manusia yang semakin meningkat melalui proses konversi energi. Rendahnya tingkat polusi yang dihasilkan menjadikan angin sebagai sumber energi yang banyak dikembangkan diseluruh dunia.

Angin adalah udara yang bergerak. Udara tersebut berpindah dari daerah yang tekanan udaranya tinggi ke daerah yang tekanan udaranya rendah. Tekanan udara yang berbeda diakibatkan oleh adanya gaya-gaya gravitasi, perbedaan suhu akibat panas matahari, serta perputaran bumi pada porosnya. Karena angin adalah pergerakan udara yang memiliki massa dan bergerak dengan kecepatan tertentu, maka angin akan memiliki potensi berupa energi dan daya.



**Gambar 2.1 Arah Pergerakan Angin [8]**

##### 2.1.1 Energi Kinetik Angin

Seperti yang kita ketahui energi yang dimiliki oleh angin adalah energi kinetik yaitu, dimana:

$$Ek = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2.1)$$

$E_k$  = energi kinetis angin (joule)

$m$  = massa udara (kg)

$v$  = kecepatan angin (m/s)

dimana persamaan untuk massa udara adalah:

$$m = \rho V \quad (2.2)$$

$\rho$  = massa jenis udara ( $\text{kg/m}^3$ )

$V$  = volume udara ( $\text{m}^3$ )

Besarnya volume udara yang melalui turbin angin dalam waktu tertentu bergantung pada luas sudu permukaan turbin dan panjang lintasan yang ditempuh angin, yaitu:

$$V = A \cdot x \quad (2.3)$$

$A$  = luas sudu permukaan turbin angin ( $\text{m}^2$ )

$x$  = panjang lintasan yang ditempuh angin (m)

Substitusi persamaan (2.2) dan (2.3) ke persamaan (2.1) maka akan menghasilkan persamaan energi kinetis dengan:

$$E_k = \frac{1}{2} \rho A x v^2 \quad (2.4)$$

Maka besar kerapatan energi kinetis adalah energi kinetis yang dihasilkan oleh angin persatuan luas sudu turbin:

$$E = E_k / A$$

$$E = \frac{1}{2} \rho x v^2 \quad (2.5)$$

$E$  = kerapatan energi kinetis ( $\text{joule/m}^2$ )

$\rho$  = massa jenis udara ( $\text{kg/m}^3$ )

$x$  = panjang lintasan yang ditempuh angin (m)

$v$  = kecepatan angin (m/s)

### 2.1.2 Daya Angin

Potensi daya yang dimiliki oleh angin adalah kerapatan energi kinetis angin persatuan waktu:

$$P_w = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} \rho v^2 \frac{dx}{dt}$$

$$P_w = \frac{1}{2} \rho v^3 \quad (2.6)$$

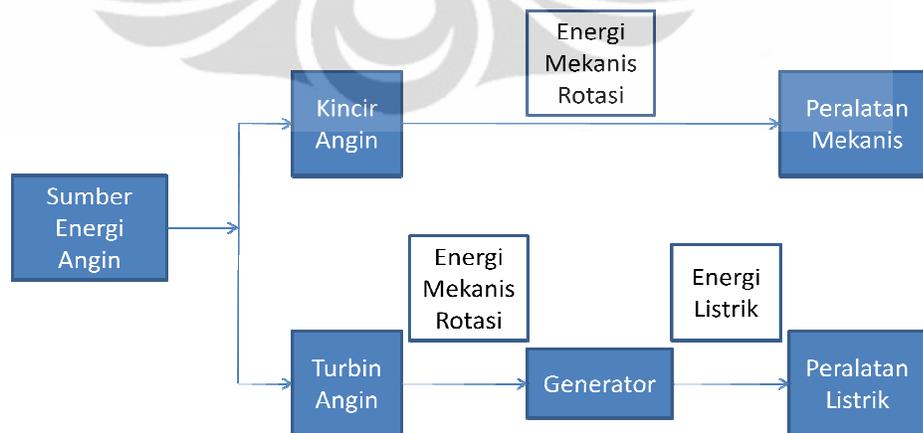
$P_w$  = daya angin (watt/m<sup>2</sup>)

$\rho$  = massa jenis udara (kg/m<sup>3</sup>)

$v$  = kecepatan angin (m/s)

### 2.2 Teknologi Pemanfaatan Sumber Angin

Energi angin banyak dimanfaatkan dalam berbagai bentuk. Salah satunya adalah dengan mengkonversi energi angin tersebut atau lebih dikenal dengan Sistem Konversi Energi Angin (SKEA) yaitu sistem yang mengubah energi angin menjadi bentuk energi lain yang lebih berguna, seperti mekanik, listrik dan sebagainya. Ada dua jenis SKEA yang dikenal dan dimanfaatkan pada saat ini, yaitu SKEA yang menggunakan kincir angin dan SKEA yang menggunakan turbin angin. Klasifikasi SKEA menurut jenisnya ditunjukkan pada Gambar 2.2



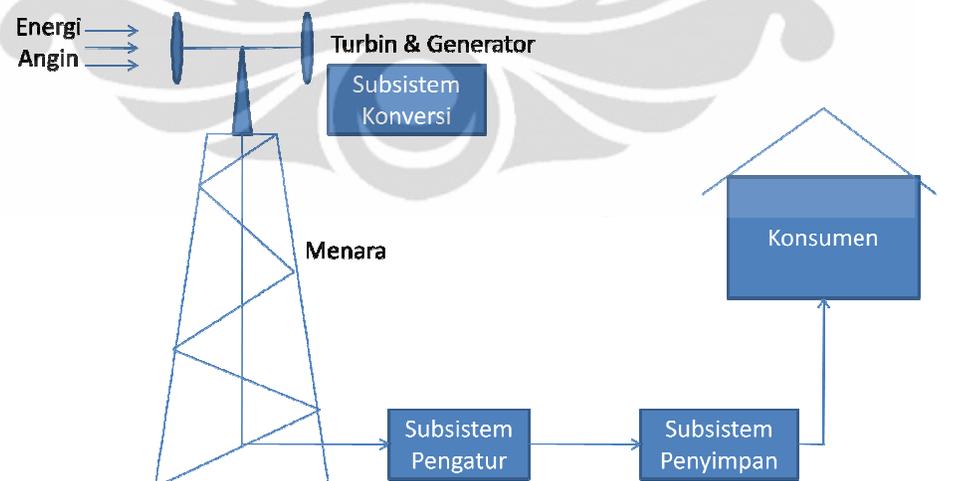
**Gambar 2.2 Diagram Blok Klasifikasi Jenis SKEA [8]**

Baik kincir angin maupun turbin angin, keduanya mengubah energi angin menjadi energi mekanis rotasi. Dengan memanfaatkan energi mekanis ini, maka peralatan-peralatan yang terkopel langsung dengan kincir maupun turbin akan menghasilkan manfaat yang banyak seperti penggunaan pompa, peralatan giling, maupun sebagai penggerak utama generator pada pembangkit listrik tenaga angin untuk menghasilkan listrik.

### 2.3 Pembangkit Listrik Tenaga Angin

Pembangkit listrik tenaga angin atau dikenal dengan pembangkit listrik tenaga bayu adalah suatu sistem yang saling terintegrasi, dimana dapat mengubah energi kinetis yang terdapat pada partikel-partikel udara yang bergerak dengan kecepatan tertentu menjadi energi listrik yang berdaya guna.

Energi angin yang yang ditangkap oleh sudu-sudu turbin angin diubah menjadi energi mekanis rotasi oleh turbin. Turbin yang dikopel dengan rotor dari generator ini mengakibatkan rotor berputar dan menghasilkan listrik pada generator. Energi listrik yang dihasilkan kemudian dikontrol dan disimpan melalui subsistem pengatur dan penyimpanan kemudian disuplai kepada konsumen seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2.3



**Gambar 2.3 Skema Pemanfaatan PLTB [8]**

Untuk pembangkit listrik tenaga angin dengan kecepatan rendah secara garis besar mempunyai fungsi dan cara kerja yang sama dengan pembangkit listrik tenaga angin lainnya. Hanya saja perbedaannya, turbin angin kecepatan rendah ini beroperasi pada daerah yang mempunyai kecepatan angin rata-rata yang rendah. Maka dari itu untuk memaksimalkan energi listrik yang dihasilkan, dilakukan modifikasi beberapa peralatan seperti pada sudu-sudu, transmisi, generator, dan peralatan penunjang lainnya.

### 2.3.1 Subsistem Konversi

Subsistem konversi berfungsi untuk mengubah energi dalam bentuk mekanis rotasi hingga menjadi energi listrik. Subsistem ini terdiri dari komponen-komponen sistem sudu turbin, transmisi, dan generator.

#### a. Sudu Turbin

Sudu turbin adalah komponen dari turbin angin yang berfungsi untuk menangkap energi angin yang akan dikonversi menjadi gerak turbin. Bentuk sudu turbin sangat berpengaruh terhadap daya mekanis yang akan dihasilkan. Ada berbagai macam bentuk turbin yang bisa disesuaikan dengan kebutuhan angin pada daerah tertentu, seperti turbin dengan poros vertikal biasanya digunakan pada daerah yang mempunyai kecepatan angin yang rendah sedangkan sudu dengan poros horizontal digunakan pada daerah dengan kecepatan angin yang relatif tinggi.



(a)

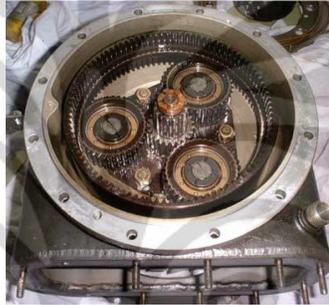


(b)

**Gambar 2.4 (a) Turbin Angin Poros Horizontal, (b) Turbin Angin Poros Vertikal [8]**

## b. Transmisi

Transmisi berfungsi untuk mempercepat putaran poros generator. Subsistem ini digunakan karena biasanya kecepatan putaran turbin yang dihasilkan dari energi angin belum mencapai kecepatan putaran yang dikehendaki untuk operasi putaran rotor pada generator. Dengan menggunakan perbandingan roda gigi (*gear ratio*) pada turbin dan rotor, maka kecepatan yang dihasilkan turbin akan dapat dimaksimalkan oleh rotor dari generator.



**Gambar 2.5 Roda Gigi Pada Transmisi Turbin [10]**

## c. Generator

Generator berfungsi untuk mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Rotor pada generator terkopel dengan turbin, sehingga turbin menjadi penggerak utamanya. Berdasarkan struktur dan cara kerja generator inilah energi mekanis rotasi pada rotor akan dikonversi menjadi energi listrik. Energi listrik yang dihasilkan generator dapat berupa arus bolak-balik (AC) ataupun arus searah (DC) tergantung dari generator yang dipakai nantinya.

Ada dua cara yang diperlukan dalam merancang generator agar menghasilkan energi listrik yang diinginkan, yaitu:

1. Menambah jumlah kumparan medan atau menggunakan magnet permanen yang kuat.
2. Mempertinggi putaran rotor sesuai dengan rating generator.



**Gambar 2.6 Generator Sinkron 3 fasa [2]**

Kebanyakan generator dirancang dengan memilih salah satu atau menggabungkan kedua cara tersebut, namun untuk generator dari unit turbin angin umumnya dipilih cara kedua, yaitu mempertinggi putaran magnet, sehingga yang terpasang tidak terlalu besar dan berat. Untuk pokok bahasan generator, akan dibahas pada subbab selanjutnya.

### 2.3.2 Subsistem Pengaturan

Subsistem ini berfungsi sebagai pengatur energi listrik yang dihasilkan generator dan disimpan dalam baterai. Ada beberapa komponen yang terdapat pada subsistem pengaturan ini, yaitu:

#### a. Rectifier

Rectifier digunakan bila generator menghasilkan arus bolak-balik (AC). Alat ini berfungsi untuk menyearahkan arus, yaitu mengubah arus bolak-balik (AC) menjadi arus searah (DC), karena sebelum disimpan ke dalam baterai, arus listrik dari generator harus diubah menjadi arus searah.

#### b. Inverter

Inverter merupakan alat yang berfungsi sebagai pengubah arus listrik searah (DC) menjadi arus listrik bolak-balik (AC). Inverter digunakan pada keluaran baterai. Alat ini dibutuhkan bila beban yang disuplai adalah beban AC.

### c. Pengatur Tegangan

Pengatur tegangan atau biasa disebut *voltage regulator* berguna untuk mengatur masuknya tegangan ke dalam baterai sehingga sesuai dengan kapasitas tegangan baterai. Bila muatan baterai telah berkurang atau habis, maka baterai harus diisi kembali dan hubungan baterai ke beban harus segera terputus.

### d. Pemutus Tenaga

Pemutus tenaga berfungsi untuk memutuskan hubungan dari generator ke baterai. Hal ini dilakukan ketika muatan baterai telah penuh dan baterai tidak perlu dimuati lagi.

### e. Pemutus Beban

Pemutus beban berfungsi untuk menjaga sistem agar tidak kelebihan beban. Bila beban berlebih, maka hubungan beban segera diputus.

## 2.3.3 Subsistem Penyimpanan

Untuk menjaga agar listrik tetap menyala meskipun tidak ada angin, maka diperlukan alat yang berfungsi untuk menyimpan energi listrik. Subsistem yang digunakan pada sistem ini adalah baterai aki (*accumulator*). Penggunaan aki dalam subsistem penyimpanan dikarenakan oleh beberapa alasan, yaitu:

- Kapasitasnya dapat disesuaikan dengan kebutuhan
- Tegangan yang dikeluarkan stabil
- Mudah diperoleh
- Perawatan mudah
- Harga terjangkau oleh masyarakat pemakai



**Gambar 2.7 Baterai Aki [9]**

## 2.4 Dinamo Sepeda

### 2.4.1 Umum

Dinamo sepeda merupakan mesin listrik yang mengubah energi mekanik menjadi energi listrik dengan menggunakan prinsip induksi elektromagnetis. Mesin ini merupakan generator sinkron yang berkapasitas kecil tergantung dari spesifikasinya seperti 6V 6W, 12V 6W, 12V 12W, dan lain-lain . Pada sepeda, alat ini memanfaatkan putaran roda sepeda untuk menghasilkan listrik yang akan menyuplai beban berupa lampu. Tegangan yang dihasilkan dinamo bergantung kepada besarnya putaran sepeda yang memutar rotor dinamo. Semakin besar putaran maka semakin besar pula tegangan yang dihasilkan. Pada saat berputar dengan kecepatan ratingnya, tegangan yang dihasilkan dinamo adalah 13-14 volt. Dengan nilai tegangan itu, maka beban berupa lampu 12 V dapat menyala. Apabila perputaran ban sepeda sangat kencang dan tegangan yang dihasilkan sangat besar, maka beban yang berupa lampu dapat putus atau rusak jika tidak ada penambahan jumlah beban lainnya. Oleh karena itu dinamo sepeda biasanya dirancang berdasarkan kecepatan putar ban agar dapat menghasilkan tegangan yang sesuai dengan bebannya.

### 2.4.2 Konstruksi Dinamo Sepeda

Konstruksi dinamo sepeda sama seperti konstruksi generator sinkron pada umumnya. Hanya saja pada bagian rotor, dinamo sepeda menggunakan magnet permanen agar tidak memerlukan lagi arus eksitasi dari luar.



**Gambar 2.8 Dinamo Sepeda [10]**

### 1. Stator

Stator terdiri dari inti stator dan kumparan stator dan diletakkan pada frame depan dan belakang. Pada inti stator, dibuat dari beberapa lapis plat besi tipis. Inti stator ini akan mengalirkan flux magnet yang disuplai oleh inti rotor, sehingga flux magnet akan menghasilkan efek yang maksimum pada saat melalui kumparan stator. Hanya saja penggunaan inti besi ini akan membuat magnet pada rotor menjadi tertarik menuju inti stator yang akan membuat rotor tidak berputar bebas.

### 2. Rotor

Rotor berfungsi untuk membangkitkan medan magnet. Rotor berputar bersama poros, karena gerakannya maka disebut dengan medan magnet berputar. Medan magnet tersebut dihasilkan oleh magnet permanen yang menempel pada rotor. Oleh karena itu dinamo sepeda tidak memerlukan lagi arus eksitasi dari luar.

### 3. Air Gap

Celah udara pada generator merupakan tempat berpindahnya fluks magnet pada magnet permanen dan menginduksi ke kumparan stator. Sehingga pada celah udara ini terjadi mekanisme perpindahan atau konversi energi dari mekanik menjadi elektrik. Tentunya besar atau lebarnya celah udara ini mempengaruhi penginduksian ke kumparan stator.

Pada umumnya beban yang disuplai oleh dinamo merupakan beban AC, maka dari itu tegangan keluaran dari dinamo ini tidak perlu diubah menjadi tegangan DC. Tetapi jika beban yang ingin disuplai merupakan beban DC, maka diperlukan rangkaian penyearah untuk mengkonversi tegangan AC menjadi DC.

## 2.5 Generator Axial

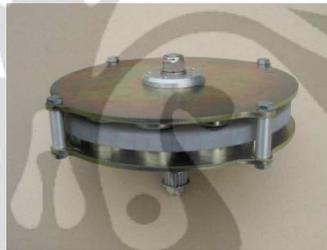
### 2.5.1 Umum

Generator fluks aksial adalah suatu mesin yang mengkonversikan energi mekanik menjadi energi listrik yang menghasilkan arus bolak-balik serta terdiri dari stator dan rotor dengan memiliki arah aliran fluks yang memotong stator

secara aksial. Mesin ini berbeda dengan generator-generator konvensional lainnya yang aliran fluksnya memotong stator secara radial.

### 2.5.2 Konstruksi Generator Aksial

Generator fluks aksial ini mempunyai konstruksi yang sama dengan generator sinkron atau konvensional pada umumnya, memiliki stator, rotor dan air gap. Hanya saja perbedaannya pada aliran fluks dan generator fluks aksial memiliki kecenderungan melebar diameternya untuk memperbesar daya keluarannya. Bentuk serta jumlah stator dan rotornya pun dapat dimodifikasi sesuai dengan kebutuhan yang akan digunakan.



**Gambar 2.9 Generator Axial [1]**

#### 1. Stator

Generator fluks aksial mempunyai berbagai macam bentuk variasi stator diantaranya adalah stator dengan inti besi berbentuk torus dan stator tanpa inti besi.

Stator dengan bentuk torus biasanya digunakan pada penggerak dengan putaran tinggi. Tipe ini memiliki inti besi di tengahnya yang selanjutnya dililitkan oleh kumparan.

Untuk stator tanpa inti besi, biasanya digunakan untuk putaran rendah dan torsi beban yang rendah. Tentunya hal ini disebabkan oleh tidak adanya inti besi yang terdapat didalamnya. Pada stator tanpa inti besi susunan kumparannya terbagi menjadi 2 macam, ada yang tersusun secara *overlapping* dan *non-overlapping*. Pada stator yang susunan kumparannya secara *overlapping* susunan kumparannya berada tumpang tindih dengan

kumparan yang lainnya. Tentunya dengan susunan phasa yang berbeda pada tiap kumparannya.



**Gambar 2.10 Stator *Overlapping* [2]**

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



**Gambar 2.11 Stator *Non-overlapping* [2]**

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

## 2. Rotor

Rotor pada generator axial berfungsi sebagai tempat medan magnet utama dihasilkan. Pada rotor, tidak diperlukan arus eksitasi dari luar

karena medan magnet yang dihasilkan berasal dari magnet permanen. Rotor juga terdiri dari plat besi yang berfungsi sebagai tatakan penyanggah magnet permanen. Desain generator dengan tanpa inti besi di tengah stator, tentunya berhubungan dengan besar dan volume dari magnet permanennya. Tentunya hal ini sesuai dengan besarnya celah udara yang terdapat pada stator dengan alasan menjaga kerapatan fluks magnet pada statornya. Akan tetapi, kekurangannya justru akan menjadi lebih mahal untuk biaya konstruksinya karena membutuhkan magnet yang lebih besar.

### 3. Air Gap

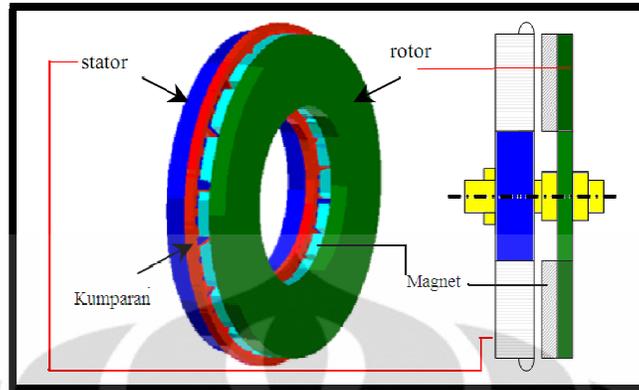
Air gap merupakan celah udara pada generator antara rotor dan stator dimana area ini merupakan tempat berpindahnya fluks magnet pada magnet permanen dan menginduksi ke kumparan di stator. Besar atau lebarnya celah udara mempengaruhi penginduksian ke kumparan stator. Pada generator fluks aksial celah udara bisa saja lebih dari satu tergantung banyaknya stator atau rotor yang digunakan pada generator tersebut yang tentunya berbeda dengan celah udara pada generator konvensional pada umumnya.

#### 2.5.3 Tipe-Tipe Generator Axial

Generator fluks aksial dapat dibedakan menjadi beberapa tipe berdasarkan jumlah stator dan rotor yang digunakan, diantaranya: generator fluks aksial rotor tunggal stator tunggal (cakram tunggal), generator fluks aksial rotor ganda dan stator tunggal (eksternal rotor), generator fluks aksial stator ganda dan rotor tunggal (internal rotor), dan generator fluks aksial rotor dan stator banyak.

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

Generator ini terdiri dari sebuah rotor dan sebuah stator yang mempunyai 3 jenis stator yaitu *slotted stator*, *slotless stator*, dan *saliant pole stator*. Rotornya terdiri dari sebuah piringan besi kuat yang terdapat magnet di permukaannya.



**Gambar 2.12 Generator Axial Cakram Tunggal [3]**

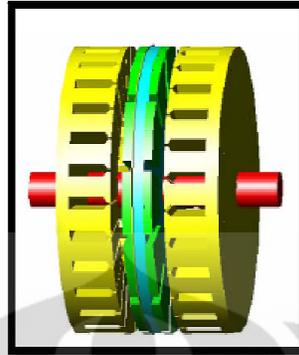
Generator ini biasa digunakan pada torsi kecil. Sehingga sangat efektif, bila digunakan pada turbin angin dengan kapasitas penggerak yang kecil.

## 2. Rotor Ganda dan Stator Tunggal

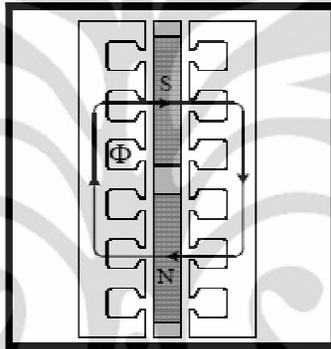
Pada generator tipe ini terdapat dua buah rotor yang mengapit sebuah stator (rotor eksternal). Generator ini dapat dibedakan menjadi dua jenis berdasarkan arah fluksnya yaitu tipe N-S dan tipe N-N. Perbedaannya terletak pada pergerakan fluks dan ukuran diameter statornya. Pada tipe N-S, arah fluks akan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

## 3. Stator Ganda dan Rotor Tunggal

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



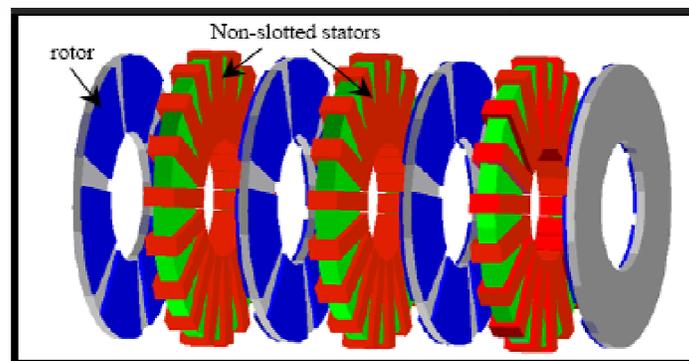
**Gambar 2.13 Generator Axial Stator Ganda [3]**



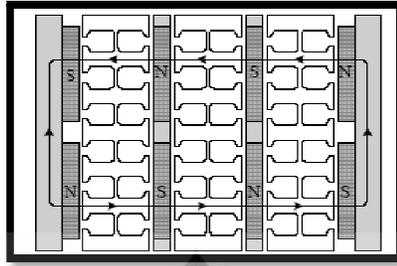
**Gambar 2.14 Arah Fluks Pada Tipe Eksternal Stator [7]**

#### 4. Rotor dan Stator banyak

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



**Gambar 2.15 Struktur Generator Axial *Multi Stage* [7]**



**Gambar 2.16 Arah Fluks pada Tipe N-S Generator Aksial *Multi Stage* [7]**

## 2.6 Prinsip Kerja Dinamo Sepeda dan Generator Axial

Prinsip kerja dinamo sepeda dan generator axial sama dengan prinsip kerja generator sinkron, dimana rotor berperan sebagai penghasil medan dan stator berperan sebagai rangkaian jangkar dimana tegangan dibangkitkan.

Generator bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetis yang mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Dengan demikian energi mekanik akan diberikan pada rotor sehingga dapat menghasilkan energi listrik pada stator.

Pada generator sinkron umumnya, rotor pada generator akan diberikan catu tegangan arus searah. Karena rangkaian rotor generator merupakan suatu rangkaian tertutup, maka pada rotor akan mengalir arus searah yang akan melewati kumparan Rf. Berdasarkan pada Hukum Oersted, ketika arus listrik mengalir pada suatu kumparan, akan timbul medan magnet. Dalam hal dinamo sepeda dan generator axial, konstruksi rotornya terdiri dari magnet permanen sehingga medan magnet bernilai konstan dan tidak perlu eksitasi dari luar. Besarnya nilai medan magnet tergantung dari jenis magnet permanen yang digunakan. Karena pada rotor merupakan bagian yang menghasilkan medan magnet, maka rotor pada generator serempak disebut sebagai penghasil medan magnet utama.

Garis gaya medan magnet yang dihasilkan di rotor akan memotong permukaan kumparan yang ada pada stator. Perpotongan garis gaya medan magnet rotor dengan permukaan kumparan stator akan menghasilkan fluks

magnetis yang melingkupi kumparan kawat stator, berdasarkan persamaan berikut ini:

$$\Phi = B_r A \cos\theta \quad (2.7)$$

$\Phi$  = fluks magnetic

$B_r$  = medan magnet rotor

$A$  = luas permukaan bidang penampang kumparan stator

$\theta$  = sudut antara garis gaya medan magnet rotor dengan garis normal bidang penampang kumparan stator

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

Hal ini akan menyebabkan perubahan nilai fluks magnetik di stator terhadap waktu dan akan menghasilkan tegangan induksi, di dimana:

$$e_{ind} = -N_s \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.8)$$

$e_{ind}$  = ggl induksiyang dibangkitkan di stator

$N_s$  = jumlah lilitan kawat stator

$\Phi$  = fluks magnetik

### 2.6.1 Dinamo Sepeda Dan Generator Axial Tanpa Beban

Dengan memutar generator pada kecepatan tertentu dan rotor menghasilkan medan magnet, maka tegangan ( $E_a$ ) akan terinduksi pada

kumparan jangkar stator. Bentuk hubungannya diperlihatkan pada persamaan berikut.

$$E_a = \sqrt{2} \pi f N \phi \quad (2.9)$$

$E_a$  = Tegangan yang dibangkitkan

$f$  = frekuensi listrik yang dihasilkan

$N$  = Jumlah lilitan pada stator

$\phi$  = fluks yang dihasilkan

Dimana untuk frekuensi yang dihasilkan adalah:

$$f = \frac{nP}{120} \quad (2.10)$$

$f$  = frekuensi listrik yang dihasilkan

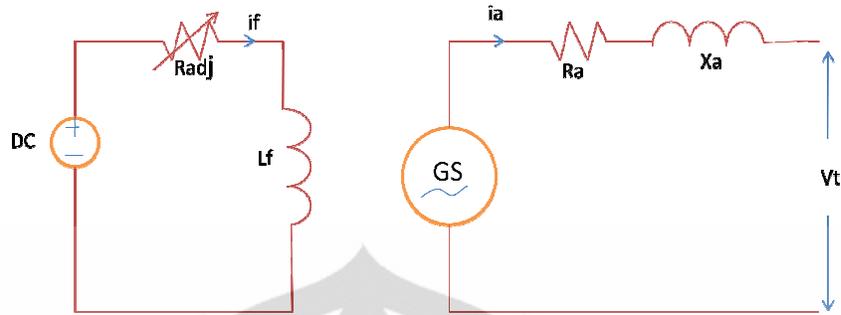
$n$  = kecepatan medan putar rotor (rpm)

$P$  = jumlah kutub pada rotor

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

### 2.6.2 Dinamo Sepeda Dan Generator Axial Berbeban

Dalam keadaan berbeban arus jangkar akan mengalir dan mengakibatkan terjadinya reaksi jangkar. Reaksi jangkar bersifat reaktif karena itu dinyatakan sebagai reaktansi, dan disebut reaktansi magnetisasi ( $X_m$ ). Reaktansi magnetisasi ( $X_m$ ) ini bersama-sama dengan reaktansi fluks bocor ( $X_a$ ) dikenal sebagai reaktansi sinkron ( $X_s$ ). Persamaan tegangan pada generator adalah:



**Gambar 2.17 Rangkaian Pengganti Generator Sinkron**

$$E_a = V + I_a R_a + j I_a X_s \quad (2.11)$$

$$X_s = X_m + X_a \quad (2.12)$$

$E_a$  = tegangan induksi pada jangkar

$V$  = tegangan terminal output

$R_a$  = resistansi jangkar

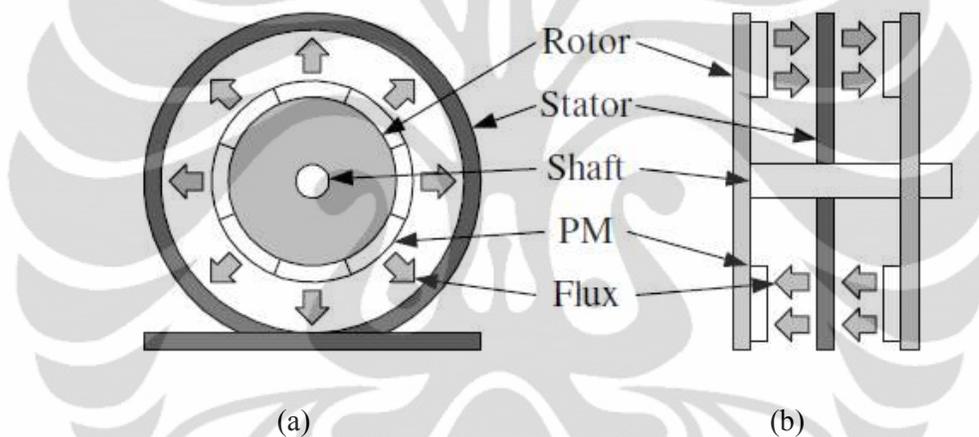
$X_s$  = reaktansi sinkron

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

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

## 2.7 Perbandingan Generator Flux Aksial Dengan Generator Flux Radial

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



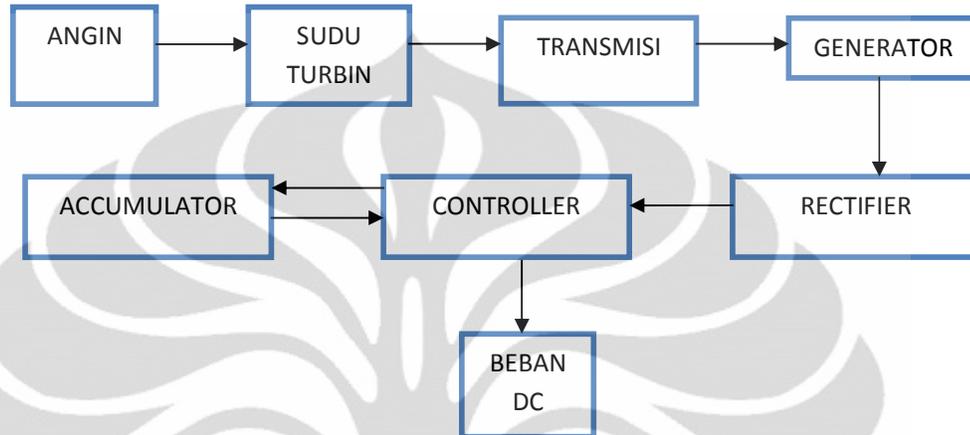
**Gambar 2.18 Penyebaran Fluks Generator Konvensional (a),  
Generator Fluks Aksial(b) [2]**

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

## BAB 3

### PERANCANGAN DAN PENGUJIAN

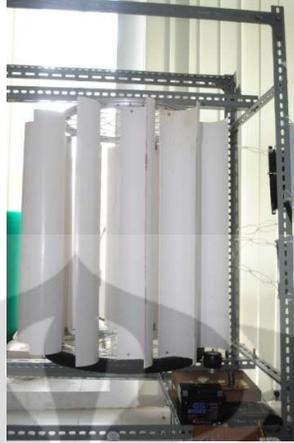
#### 3.1 Konfigurasi Sistem



**Gambar 3.1 Konfigurasi Sistem Turbin Angin**

Pada pembangkit listrik tenaga angin yang dirancang ini, energi angin dimanfaatkan untuk menghasilkan energi listrik. Angin yang bergerak dengan kecepatan tertentu akan ditangkap oleh sudu-sudu turbin savonius yang akan membuat turbin berputar. Transmisi yang memanfaatkan diameter ban sepeda dengan diameter pulley generator mempunyai rasio tertentu sehingga berfungsi sebagai pengkonversi kecepatan putaran turbin menjadi kecepatan rotor generator, oleh karena itu kecepatan putar generator akan menjadi lebih cepat.

Generator yang berputar dengan kecepatan tertentu akan menghasilkan energi listrik AC karena pada perancangan digunakan generator AC, oleh karena itu listrik yang dihasilkan harus diubah menjadi listrik DC melalui rectifier agar bisa mengisi baterai. Sebelum energi listrik tersebut mengisi baterai, tegangannya harus disesuaikan dengan menggunakan controller, hal ini bertujuan agar tegangan tidak melebihi atau kurang dari spesifikasi pengisian baterai. Selanjutnya beban yang digunakan adalah beban DC. Sebelum menyuplai beban, tegangan dari baterai harus masuk ke controller terlebih dahulu agar tegangan dan arus dari baterai dapat disesuaikan terhadap beban.



**Gambar 3.2 Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Angin Kecepatan Rendah**

### **3.2 Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Angin Tipe Savonius**

Pada perancangan dan pembuatan pembangkit listrik tenaga angin ini, terdapat beberapa spesifikasi yang harus disesuaikan terhadap beberapa kondisi yang ingin dicapai, seperti daya mekanis yang dihasilkan turbin, energi listrik pada generator, rectifier, dan beberapa peralatan yang saling terintegrasi lainnya.

#### **3.2.1 Perancangan Sudu Turbin**

Berdasarkan kecepatan angin pada daerah pembangkit listrik yang dirancang, yaitu sekitar 3-6 m/s dimana kecepatan tersebut termasuk kecepatan angin rendah, maka tipe turbin yang cocok adalah tipe savonius, yaitu turbin poros vertikal. Pada perancangan, digunakan pipa paralon yang dipotong dua menjadi setengah lingkaran untuk dijadikan sebagai sudu turbin. Ban sepeda digunakan sebagai kedudukan turbin yang akan berputar nantinya dan akan memutar generator seperti pada Gambar 3.3 berikut.



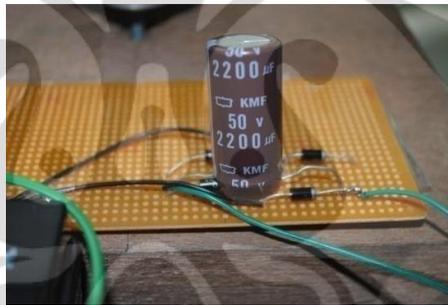
**Gambar 3.3 Transmisi Turbin Dan Generator**

### 3.2.2 Perancangan Generator

Pada percobaan digunakan dua jenis generator berkapasitas kecil yaitu dinamo sepeda dan generator axial. Pembahasan mengenai generator ini akan dibahas pada sub bab berikutnya.

### 3.2.3 Perancangan Rangkaian Rectifier

Tegangan keluaran dari generator yang digunakan adalah berupa tegangan AC, oleh karena itu agar energi listrik yang keluar dari generator dapat mengisi baterai, maka dibutuhkan rangkaian penyearah. Pada perancangan digunakan bridge rectifier yaitu penyearah gelombang penuh. Pada bridge rectifier ini digunakan filter kapasitor yang bertujuan untuk menghilangkan ripple sehingga dihasilkan tegangan DC yang stabil.



**Gambar 3.4 Rangkaian Penyearah Gelombang Penuh**

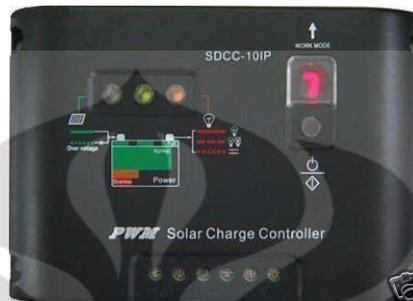
### 3.2.4 Pemakaian *Controller*

*Controller* bertujuan untuk mengatur tegangan keluaran generator yang akan menuju baterai. Tegangan dan arus dari baterai juga akan masuk terlebih dahulu ke *controller* sebelum disuplai ke beban. *Controller* yang digunakan adalah *controller* untuk sel surya dengan spesifikasi 12V/24V 10 A. *Controller* ini mengatur overcharging dan tegangan keluaran dari generator karena jika adanya kelebihan tegangan dan pengisian, maka akan mengurangi umur baterai.

Dalam penggunaan *controller*, yang harus diperhatikan adalah:

- Voltage 12 Volt DC / 24 Volt DC

- Kemampuan arus maksimal dari *controller*, misalnya 5 Ampere atau 10 Ampere.
- Full charge dan low voltage cut



**Gambar 3.5 Controller**

### 3.2.5 Pemakaian *Accumulator*

Karena digunakan generator dengan kapasitas kecil, maka untuk pengisian yang baik dari generator ke baterai, digunakan baterai dengan kapasitas yang kecil yaitu 12V 3,5 Ah. Dari spesifikasi tersebut dapat diketahui bahwa dibutuhkan arus 3,5 A untuk mengisi baterai selama satu jam. Tetapi dalam prakteknya, proses pengisian baterai dilakukan dengan arus yang besarnya sepersepuluh sampai seperduapuluh dari arus Ampere Hour-nya. Jika pada baterai dengan spesifikasi 3,5 Ah, maka besar arus pengisian yang baik adalah antara 0,35 A dan 0,175. Hal ini bertujuan agar baterai tidak cepat panas dan baterai menjadi lebih awet.



**Gambar 3.6 Baterai Aki 12 V 3,5 Ah**

### 3.3 Konfigurasi Generator

#### 3.3.1 Jenis Dan Kapasitas Dinamo Sepeda

Pada pemakaian dinamo sepeda di turbin angin ini, digunakan dinamo sepeda yang mudah didapat dipasaran, yaitu dinamo sepeda dengan merk “Elephant” dengan spesifikasi 12V 6W, ini berarti tegangan dan arus rated yang bekerja pada dinamo ini adalah 12V dan 0,5A dengan daya rated yang disuplai ke beban adalah 6W.



**Gambar 3.7 Dinamo Sepeda 12V 6 W**

##### 3.3.1.1 Rotor Dinamo Sepeda

Dinamo sepeda yang digunakan ini secara umum mempunyai konstruksi sama dengan dinamo sepeda lainnya yaitu rotor sebagai penghasil medan magnet utama dengan menggunakan magnet permanen. Pada dinamo sepeda yang digunakan, panjang poros dari rotornya adalah 80 mm dengan diameter pulley 20mm.



**Gambar 3.8 Rotor Pada Dinamo Sepeda**

Jumlah kutub pada rotornya ada 6 kutub, berarti rotornya mempunyai 3 pasang kutub magnet. Tipe magnet permanen yang digunakan adalah Ferrite tipe ring dengan dimensi diameter luarnya sebesar 25 mm, diameter dalam 18 mm, dan tebalnya 30mm. Air gap antara rotor terhadap statornya yaitu sebesar 1 mm. Sehingga besar medan magnet terhadap air gap adalah 0,4 Tesla. Tipe penyebaran fluks dari rotor ke luas penampang stator yang ditembus adalah radial.

### 3.3.1.2 Stator Dinamo Sepeda

Pada stator terdapat kumparan dimana ggl induksi akan dibangkitkan. Stator pada dinamo sepeda yang digunakan mempunyai 6 kumparan dengan masing-masing kumparan mempunyai 300 lilitan. Tiap kumparan dihubungkan seri agar menguatkan tegangan yang keluar. Pada saat pengukuran hambatan gulungan, didapat nilai 10,8  $\Omega$ . Jenis kawat yang digunakan adalah tembaga dengan hambatan jenisnya adalah  $1,7 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ . Diameter kawat yang digunakan adalah sebesar 0,4 mm. Dengan demikian akan didapatkan panjang kawat yaitu sepanjang 80 m. Jenis statornya adalah stator dengan inti besi dan tegangan keluarannya merupakan tegangan AC satu fasa.

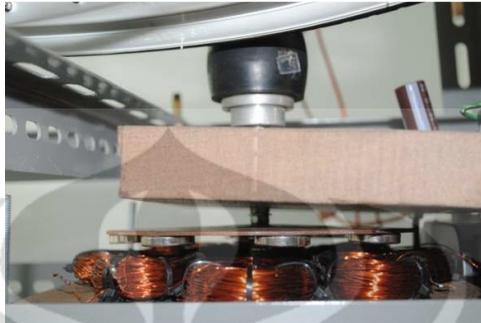


**Gambar 3.9 Stator Pada Dinamo Sepeda**

### 3.3.2 Jenis Dan Kapasitas Generator Axial

Karena sulitnya mencari generator axial yang sudah jadi di pasaran, maka penulis mencoba untuk membangun sendiri generator axial sederhana yang cocok digunakan pada turbin angin dengan kecepatan rendah dan kapasitas daya kecil yaitu generator fluks axial single side atau cakram tunggal yang menggunakan

satu rotor dan satu stator sehingga cocok dengan turbin kecepatan rendah dengan torsi yang kecil.



### 3.10 Generator Axial Cakram Tunggal

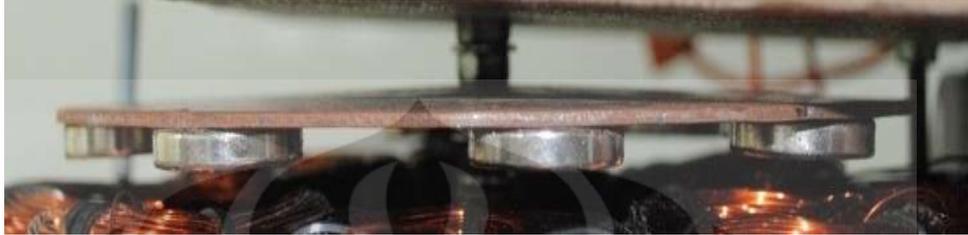
#### 3.3.2.1 Rotor Generator Axial Cakram Tunggal

Rotor pada generator axial adalah sebagai tempat medan magnet utama dihasilkan. Rotor juga terdiri dari plat besi tipis setebal 2 mm dan berdiameter 16,5 cm yang berfungsi sebagai tatakan penyanggah magnet permanen. Poros yang digunakan adalah batang besi diameter 6 mm sepanjang 20 cm yang akan berputar dengan menggunakan bearing. Diameter pulley yang digunakan pada rotor adalah sepanjang 55 mm

Pada rotor medan magnet dihasilkan oleh magnet permanen sehingga tidak diperlukan arus eksitasi. Magnet permanent yang digunakan adalah neodmium-iron-boron NdFeB yaitu magnet yang paling kuat diantara jenis magnet lainnya. Jumlah pasang kutub pada rotor adalah 8 kutub yang diletakkan di tiap ujung lingkaran plat besi. Diameter magnet yang digunakan adalah 25 mm dengan ketebalan 5 mm. Besar air gap antara rotor ke stator adalah 5 mm dan kuat medan magnet dari magnet permanen adalah 1,27 Tesla. Tipe penyebaran fluks dari generator ini adalah axial ini berdasarkan konstruksi dari generator tersebut.

Untuk penempatan posisi magnet, diletakkan secara "Surface-Mounted". Pada tipe bentuk rotor ini magnet permanen ditempelkan pada permukaan penyanggah magnet. Sehingga terlihat adanya celah udara pada rotor tersebut yang berfungsi sebagai ventilasi pada saat rotor berputar lebih cepat yang dapat mengurangi panas dan mengurangi proses demagnetisasi. Tidak hanya itu, konstruksi dan biaya pada rotor ini lebih mudah dan lebih murah daripada

menggunakan rotor dengan magnet permanen “Embedded” yang letak magnetnya tertanam pada plat besi.



**Gambar 3.11 Surfaced Mounted Rotor Generator Axial Cakram Tunggal**

### 3.3.2.2 Stator Generator Axial Cakram Tunggal

Stator pada generator axial merupakan rangkaian jangkar dimana ggl induksi dihasilkan pada bagian ini. Pada rancang bangun generator axial ini digunakan stator tanpa inti besi, karena tipe ini cocok untuk putaran rendah dan torsi beban yang rendah. Hal ini disebabkan oleh tidak adanya inti besi yang terdapat didalamnya yang bisa menyebabkan magnet permanen tertarik ke inti besi tersebut.



**Gambar 3.12 Stator Generator Axial Cakram Tunggal**

Untuk susunan kumparannya disusun secara *non-overlapping*, susunan kumparannya berada sejajar dan berimpit di samping kumparan lainnya. Jumlah kumparan pada stator yang dirancang bangun ada 8 kumparan dengan tiap kumparan dihubung seri yang bertujuan untuk menguatkan tegangan yang akan dihasilkan generator. Masing-masing kumparan mempunyai 400 lilitan dengan diameter kawat tembaga adalah 0,6 mm. Jumlah gulungan di stator akan menentukan besarnya tegangan, arus keluaran, dan daya pada generator tersebut.

Hambatan total dari kumparan adalah  $27,2 \Omega$  dengan tebal kumparan 15 mm. Energi listrik yang dihasilkan pada stator adalah listrik AC satu fasa.

### 3.4 Parameter

#### 3.4.1 Kecepatan Generator Terhadap Kecepatan Angin dan Turbin

Kecepatan putar generator penting diketahui karena hal ini akan mempengaruhi besarnya tegangan yang dihasilkan oleh suatu generator. Kecepatan generator bergantung pada kecepatan angin yang menabrak sudu turbin sehingga turbin bergerak dengan kecepatan tertentu. Turbin yang berputar tersebut mempunyai kondisi terkopel dengan generator melalui sebuah pulley pada poros rotor generator. Kecepatan putar generator dapat bernilai lebih besar atau lebih kecil dibandingkan kecepatan putar turbin, hal ini bergantung pada rasio perbandingan antara diameter turbin dan pulley. Tetapi pada umumnya konstruksi pulley pada generator mempunyai diameter yang lebih kecil daripada diameter turbin yang bertujuan untuk menghasilkan kecepatan putar generator yang lebih tinggi.

#### 3.4.2 Tegangan Generator Terhadap Kecepatan Angin

Jika suatu generator telah dirancang bangun atau bisa dikatakan konstruksinya telah fix, maka besarnya tegangan yang dihasilkan oleh suatu generator bergantung kepada kecepatan generator itu sendiri. Suatu generator dikatakan handal terhadap sistem pembangkitnya apabila mampu memenuhi kebutuhan beban yang ingin digunakan. Apakah daya yang dihasilkan generator tersebut langsung disuplai ke beban atau disimpan ke baterai terlebih dahulu.

Apabila generator dihubungkan ke beban maka akan terjadi perubahan tegangan yang mengakibatkan perubahan putaran generator itu sendiri. Oleh karena itu parameter tegangan ini harus diukur baik dalam keadaan tidak berbeban maupun keadaan berbeban.

### 3.4.3 Arus Yang Mengalir Pada Pengisian Aki Terhadap Kecepatan Angin

Apabila generator yang sedang bekerja pada kecepatan tertentu dihubungkan ke beban atau dalam keadaan close loop, maka arus dengan nilai besaran tertentu akan mengalir pada close loop tersebut. Nilai besaran arus bergantung dari besarnya beban itu sendiri. Arus yang dihitung tersebut adalah arus jangkar yang melewati stator.

### 3.4.4 Karakteristik Daya Elektris Generator Terhadap Kecepatan Angin

Apabila kecepatan generator diubah, maka akan berdampak pada besaran tegangan yang dihasilkan sehingga daya yang disuplai oleh generator juga berubah. Hal ini tentu akan mempengaruhi besarnya arus yang mengalir apabila generator dihubungkan ke beban atau keadaan close loop. Oleh karena itu nilai besaran arus bergantung oleh jenis beban dan kecepatan generator itu sendiri.

## 3.5 Prosedur Uji Coba

Pada proses pengujian, kecepatan angin didapat dari kipas pendingin motor DC brushless yang kecepatannya bisa divariasikan sesuai kebutuhan. Setelah turbin berputar pada suatu nilai kecepatan angin dan diukur dengan anemometer untuk mengetahui kecepatan anginnya, maka generator akan ikut berputar, kecepatan putar ini diukur dengan alat ukur tachometer untuk mengetahui nilai kecepatan putar rpm nya.

Pada saat generator berputar pada kecepatan tertentu, maka generator akan menghasilkan tegangan. Tegangan yang dihasilkan generator akan diukur secara paralel dengan menggunakan multimeter. Tegangan yang diukur adalah tegangan AC yang dihasilkan generator dan tegangan DC setelah disearahkan.

Masih pada kecepatan angin yang sama, generator dihubungkan ke controller untuk mengisi baterai atau dengan kata lain close loop. Langkah selanjutnya ukur tegangan dan arus pada keluaran controller yang akan mengisi baterai tersebut. Hal ini dilakukan untuk mengetahui karakteristik generator terhadap pengisian baterai karena penting diingat bahwa energi angin tidak selalu

tersedia secara berkelanjutan, oleh karena itu energi listrik harus disimpan terlebih dahulu ke baterai sebelum digunakan.

Untuk mengetahui daya yang dihasilkan generator pada kecepatan putar tertentu, generator diberi beban resistor ukur  $0,5 \Omega$  5W. Dari rangkaian tersebut dapat diketahui nilai arus yang mengalir pada beban baterai. Parameter resistor ukur dapat diubah-ubah untuk memastikan besarnya arus yang mengalir pada rangkaian. Dari arus yang didapatkan kita dapat mengetahui besarnya daya generator pada kecepatan putar generator dan kecepatan angin tertentu.

Pengujian tersebut dilakukan berulang dengan variasi kecepatan angin yang berbeda-beda. Hal ini didasari oleh kecepatan angin pada kondisi yang sebenarnya yaitu selalu berubah dan tidak konstan. Alasan lainnya adalah untuk mengetahui unjuk kerja dan karakteristik generator terhadap kecepatan angin tertentu.

Prosedur pengujian tersebut dilakukan baik terhadap dinamo sepeda maupun generator axial yang sudah dirancang bangun. Hal ini bertujuan untuk membandingkan unjuk kerja kedua generator tersebut terhadap turbin angin yang berkapasitas kecil.

## BAB 4

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Data Percobaan

Pengukuran pada dua generator yaitu dinamo sepeda dan generator axial cakram tunggal dilakukan untuk mengetahui unjuk kerja masing-masing generator terhadap turbin angin kecepatan rendah tipe savonius yang berkapasitas daya rendah. Sebelum melakukan pengukuran, diperlukan data-data dari spesifikasi masing-masing generator yang digunakan, hal ini bertujuan untuk pedoman dalam membandingkan unjuk kerja kedua generator tersebut. Khusus untuk spesifikasi dinamo sepeda, spesifikasi data didapat dari dinamo yang sudah dijual dipasaran, berbeda halnya dengan generator axial yang dirancang terlebih dahulu dengan data yang dapat kita sesuaikan atau variasikan tergantung kebutuhan. Ini disebabkan oleh sulitnya mendapatkan generator axial yang sudah jadi di pasaran. Dalam hal ini dirancang generator axial dengan daya berkapasitas kecil. Berikut tabel data spesifikasi dari masing-masing generator dinamo sepeda dan generator axial.

**Tabel 4.1 Spesifikasi Rotor Dinamo Sepeda**

Spesifikasi Rotor Dinamo Sepeda	
Panjang poros	80 mm
Diameter pulley poros	20 mm
Jumlah pasang kutub magnet	3
Tipe magnet	Alnicos (Al) tipe ring
Diameter luar magnet	25 mm
Diameter dalam magnet	18 mm
Tebal magnet	30 mm
Air gap	1 mm
Besar medan magnet	0,4 Tesla
Tipe penyebaran flux ke stator	Radial

**Tabel 4.2 Spesifikasi Stator Dinamo Sepeda**

Spesifikasi Stator Dinamo Sepeda	
Jenis kawat	Tembaga
Diameter kawat	0,4 mm
Panjang kawat	80 m
Jumlah Kumparan	6
Tebal kumparan	6 mm
Banyak lilitan	300
Hubung antar kumparan	Seri
Besar hambatan total	10,8 $\Omega$
Hambat jenis kawat	$1,7 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$
Tipe Stator	Stator dengan inti besi
Jenis tegangan keluaran	AC 1 fasa

**Tabel 4.3 Spesifikasi Rotor Generator Axial Tipe Cakram Tunggal**

Spesifikasi Rotor Generator Axial Tipe Cakram Tunggal	
Jumlah rotor	1
Panjang poros	200 mm
Diameter pulley	55 mm
Tipe bearing	608zz
Lebar plat besi	165 mm
Tebal plat besi	2 mm
Jumlah pasang kutub	4
Tipe peletakkan magnet	Surface-Mounted
Tipe magnet Permanen	Rare Earth Neodymium Magnet
Diameter magnet	25 mm
Tebal Magnet	5 mm
Besar air gap	3 mm
Besar medan magnet	1,27 Tesla
Tipe penyebaran flux ke stator	Axial

**Tabel 4.4 Spesifikasi Stator Generator Axial Tipe Cakram Tunggal**

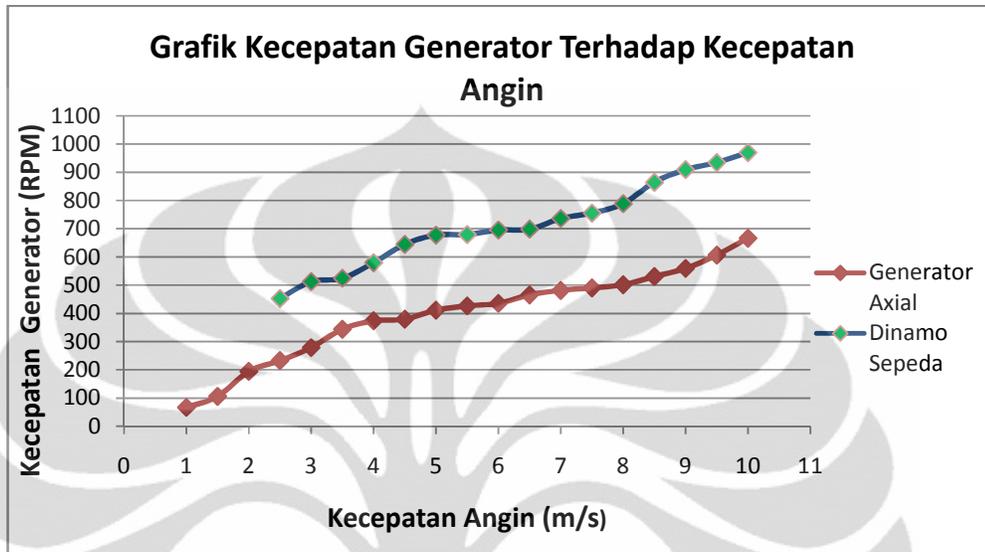
Spesifikasi Stator Generator Axial Tipe Cakram Tunggal	
Jumlah stator	1
Jenis kawat	Tembaga
Diameter kawat	0,6 mm
Panjang kawat	449 m
Jumlah Kumparan	8
Tebal kumparan	15 mm
Banyak lilitan	400
Hubung antar kumparan	Seri
Tipe susunan kumparan	Non Overlapping
Besar hambatan total	27,2 $\Omega$
Hambat jenis kawat	1,7x10 <sup>-8</sup> $\Omega$ .m
Tipe Stator	Stator tanpa inti besi
Jenis tegangan keluaran	AC 1 fasa

Dengan mengacu pada data spesifikasi masing-masing generator baik dinamo sepeda dan generator axial yang dirancang bangun, maka hasil data pengukuran yang akan didapat nantinya adalah berdasarkan hasil dari variasi kecepatan angin yang diubah-ubah menggunakan kipas angin motor DC brushless. Hal ini dilakukan mengingat bahwa baik kecepatan generator, tegangan, dan arus dari generator yang digunakan tergantung dari kecepatan penggerak utamanya yaitu angin yang menggerakkan turbin.

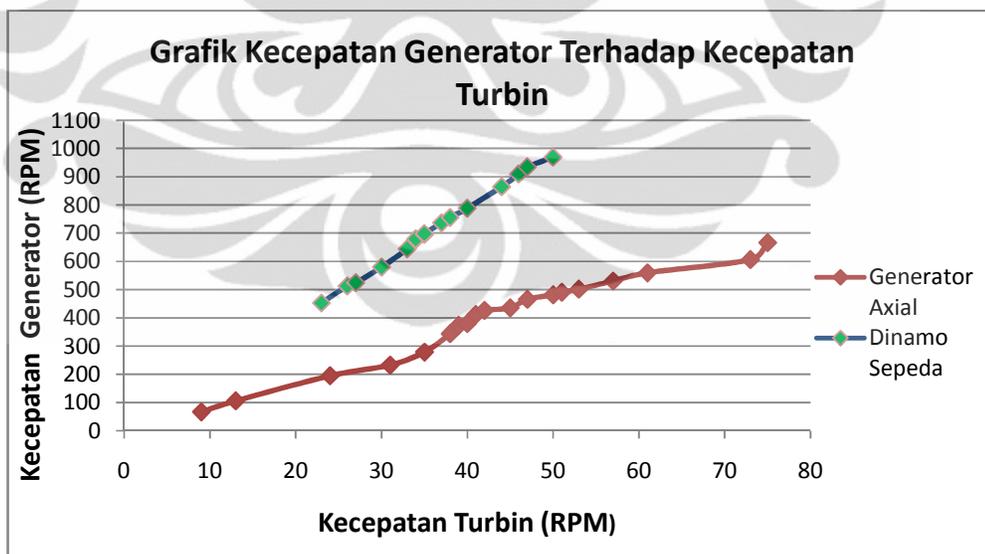
Kecepatan angin yang divariasikan adalah 1-10 m/s. Hal ini didasari oleh kecepatan angin pada daerah khatulistiwa yang berhembus pelan dengan kecepatan angin rata-rata 3-6 m/s. Pada variasi angin kecepatan yang lebih rendah yaitu 1-2 m/s dilakukan untuk mengetahui kapan turbin mulai berputar dan kapan tegangan akan dibangkitkan. Sedangkan pada variasi angin dengan kecepatan 7-10 m/s, hal ini dilakukan untuk mengetahui unjuk kerja sistem pembangkit terhadap angin dengan kecepatan tinggi apabila terjadi badai pada daerah sekitar turbin angin.

## 4.2 Hasil Percobaan

### 4.2.1 Kecepatan Generator Terhadap Kecepatan Angin dan Turbin

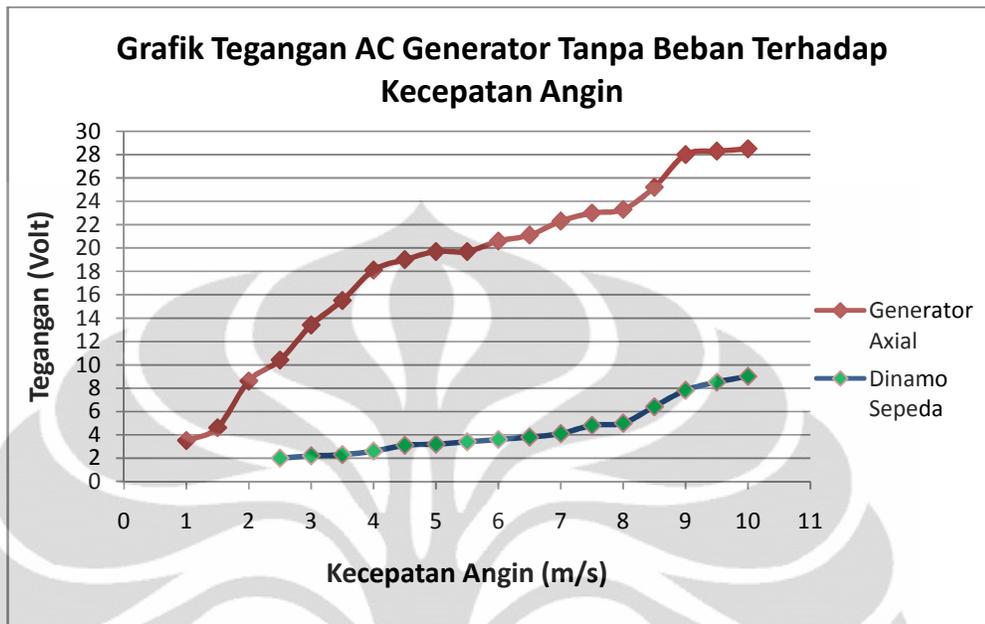


Gambar 4.1 Grafik Kecepatan Generator Terhadap Kecepatan Angin

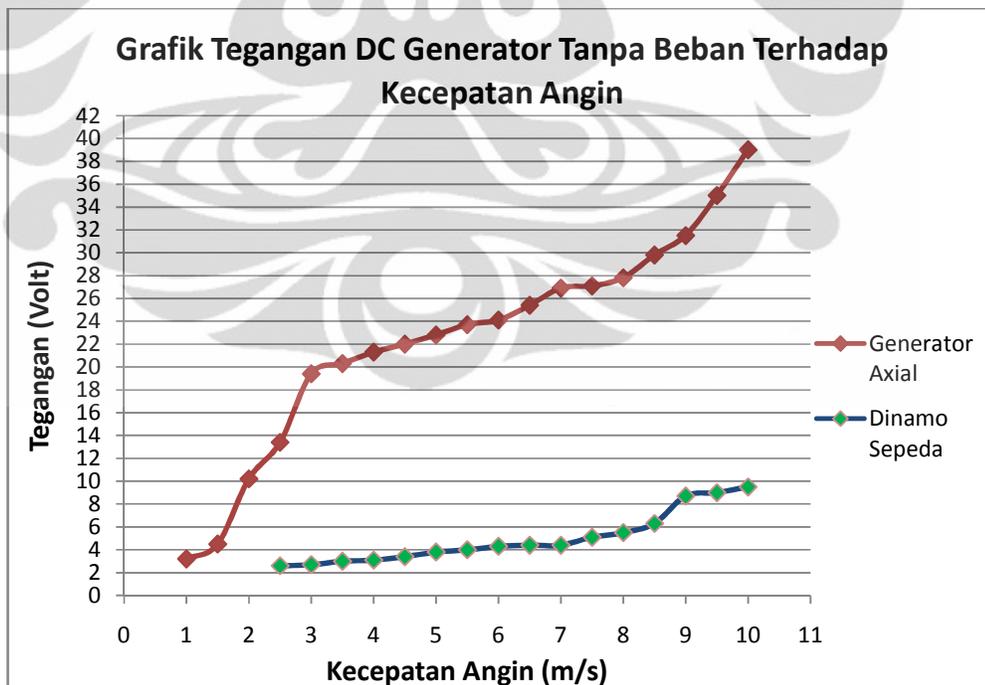


Gambar 4.2 Grafik Kecepatan Generator Terhadap Kecepatan Turbin

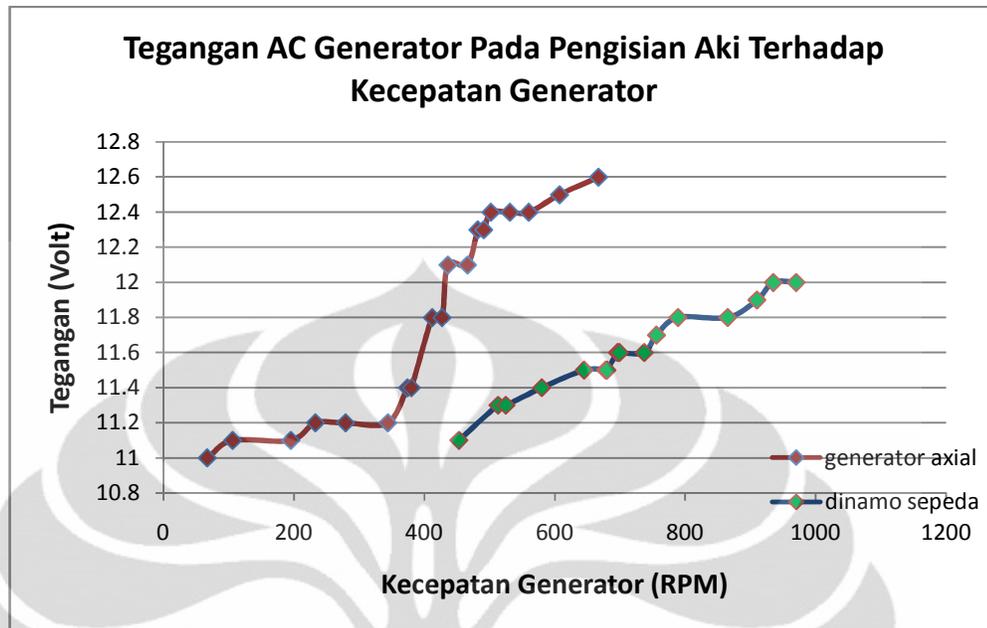
#### 4.2.2 Tegangan Generator Terhadap Kecepatan Angin



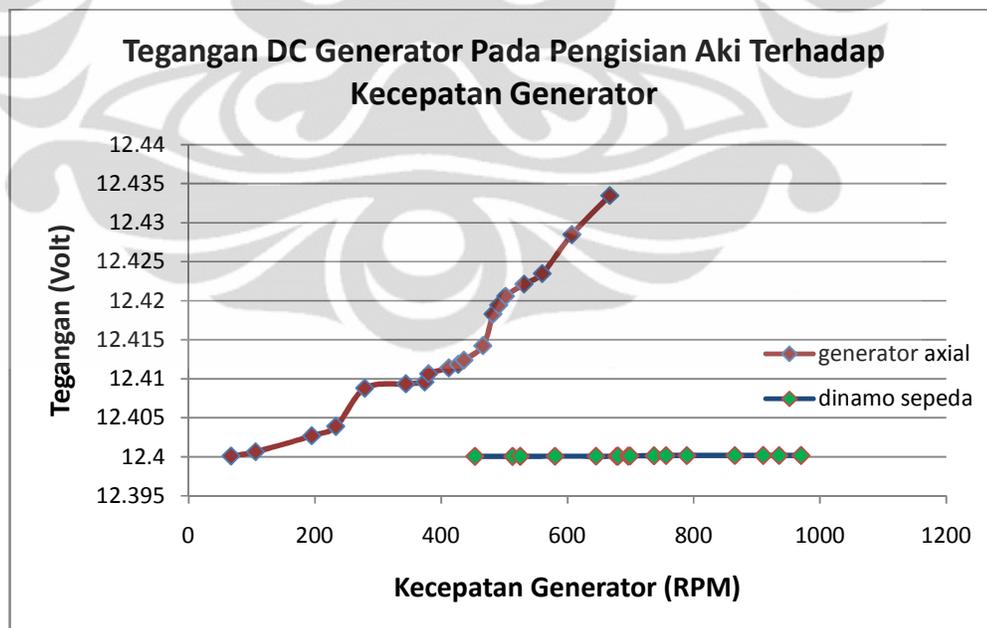
**Gambar 4.3 Grafik Tegangan AC Generator Tanpa Beban Terhadap Kecepatan Angin**



**Gambar 4.4 Grafik Tegangan DC Generator Tanpa Beban Terhadap Kecepatan Angin**

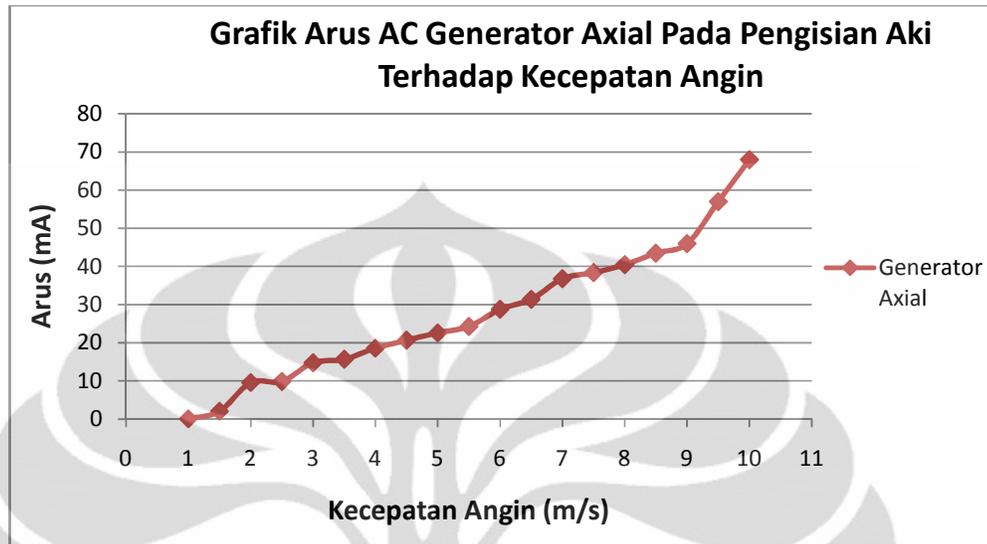


**Gambar 4.5 Grafik Tegangan AC Generator Pada Pengisian Aki Terhadap Kecepatan Generator**

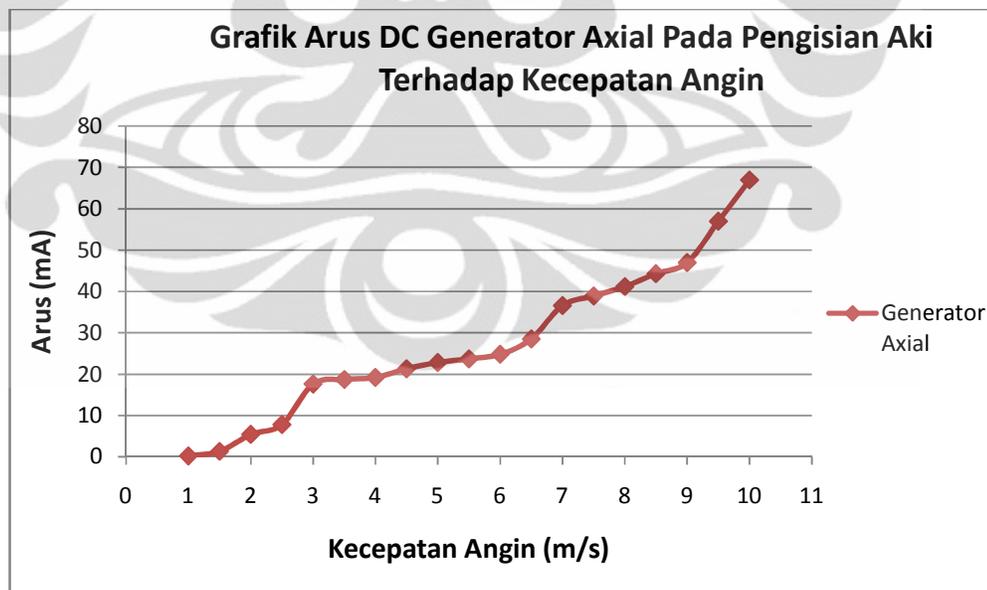


**Gambar 4.6 Grafik Tegangan DC Generator Pada Pengisian Aki Terhadap Kecepatan Generator**

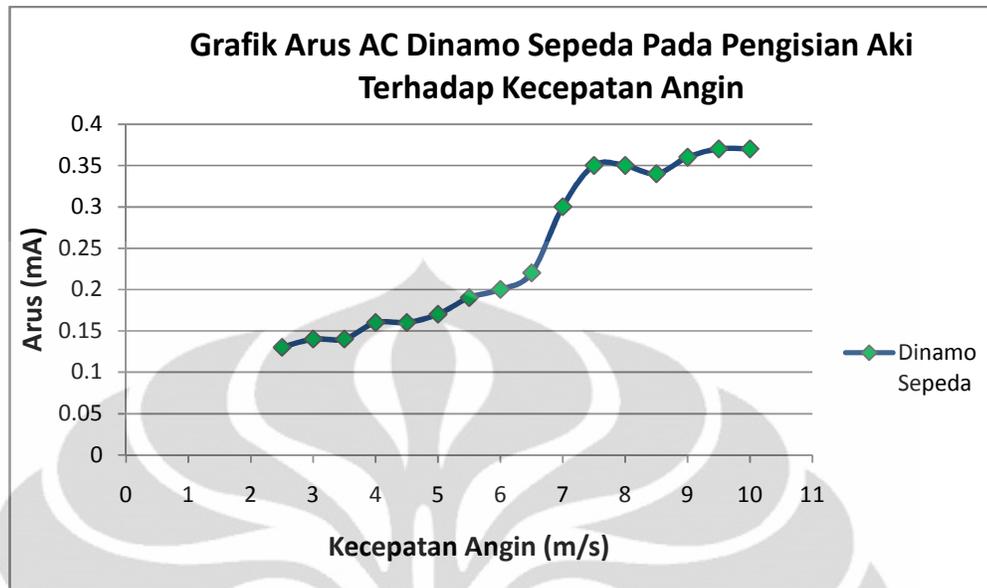
#### 4.2.3 Arus Yang Mengalir Pada Saat Pembebanan Aki Terhadap Kecepatan Angin



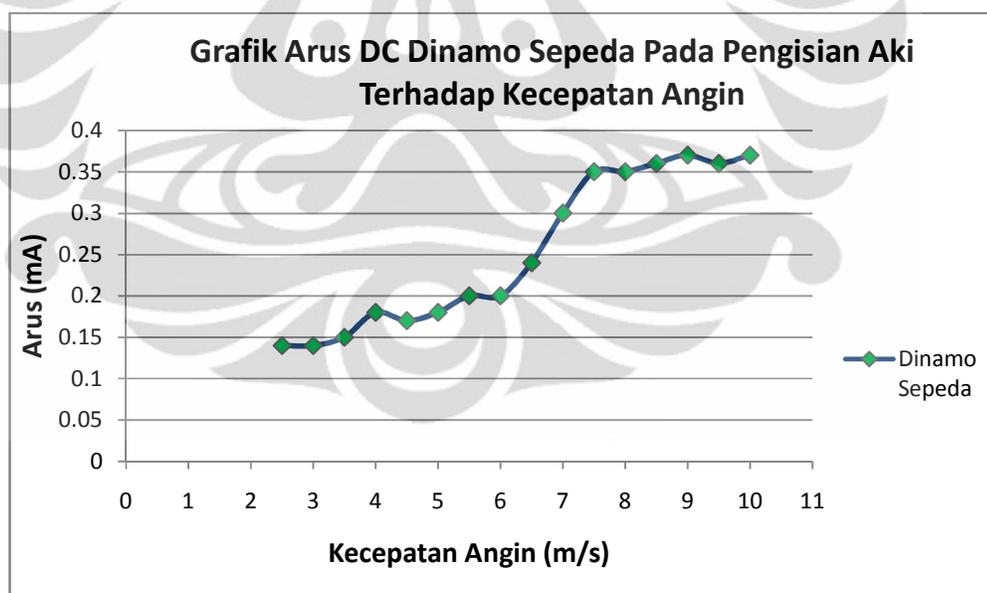
**Gambar 4.7 Grafik Arus AC Generator Axial Pada Pengisian Aki Terhadap Kecepatan Angin**



**Gambar 4.8 Grafik Arus DC Generator Axial Pada Pengisian Aki Terhadap Kecepatan Angin**

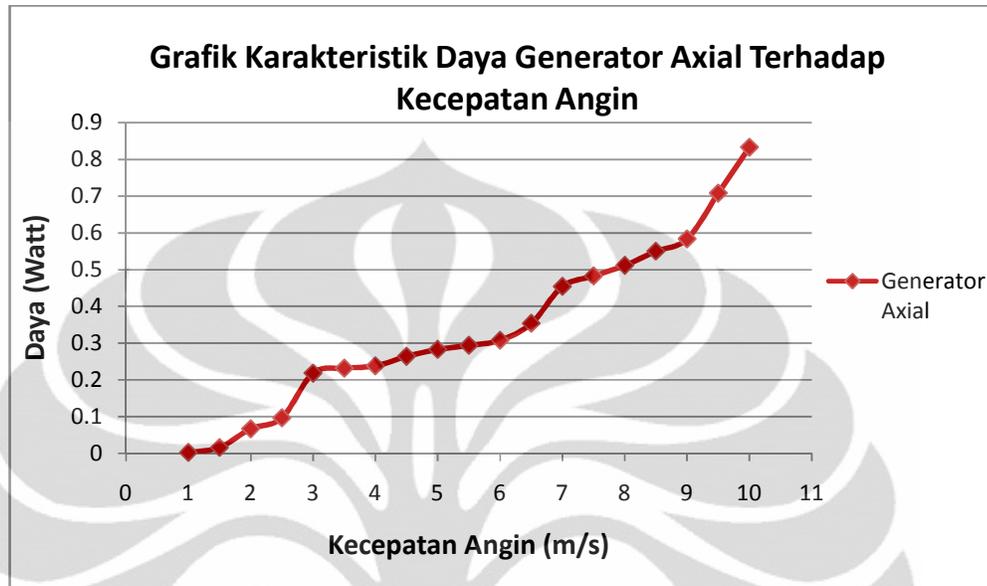


**Gambar 4.9 Grafik Arus AC Dinamo Sepeda Pada Pengisian Aki Terhadap Kecepatan Angin**

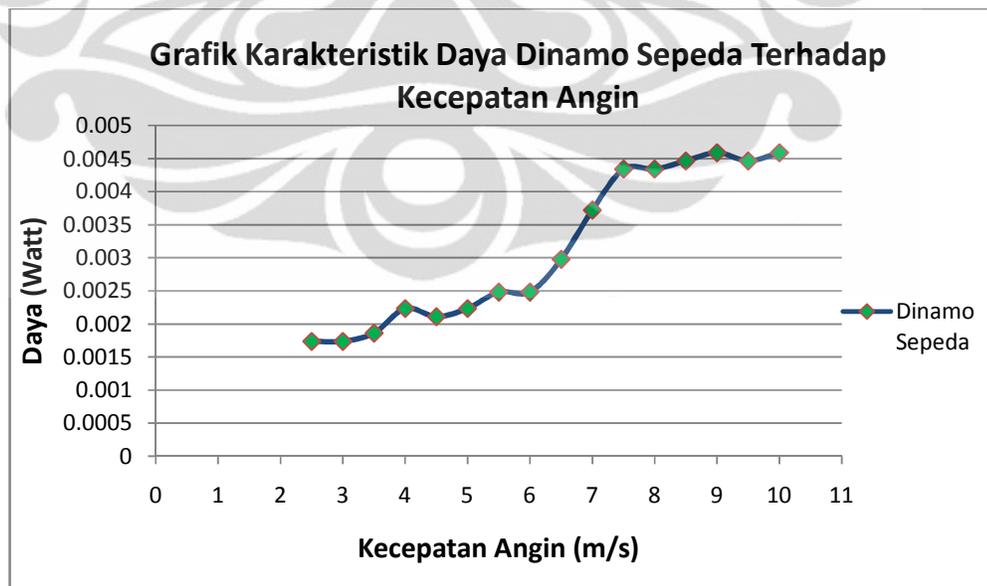


**Gambar 4.10 Grafik Arus DC Dinamo Sepeda Pada Pengisian Aki Terhadap Kecepatan Angin**

#### 4.2.4 Karakteristik Daya Elektris Generator Terhadap Kecepatan Angin



**Gambar 4.11 Grafik Karakteristik Daya Generator Axial Terhadap Kecepatan Angin**



**Gambar 4.12 Grafik Karakteristik Daya Dinamo Sepeda Terhadap Kecepatan Angin**

## 4.3 Analisa

### 4.3.1 Kecepatan Generator Terhadap Angin dan Turbin

Pada subbab ini akan dibahas tentang kecepatan generator yang berputar pada percobaan dan pengukuran. Kecepatan generator sangat dipengaruhi oleh besarnya kecepatan angin yang ditangkap turbin dan transmisi pada turbin. Energi angin akan dikonversi oleh turbin, dan bentuk turbin akan sangat mempengaruhi kecepatan putarnya. Transmisi pada turbin juga merupakan komponen penting yang bertujuan untuk mempercepat putaran generator dengan rasio tertentu.

Pada Gambar 4.1 terlihat bahwa grafik mempunyai bentuk linier. Dengan semakin besar nilai kecepatan angin, maka akan semakin besar kecepatan putar generator yang akan dihasilkan. Pada kecepatan angin 1-2 m/s, terlihat bahwa generator axial berputar pada kecepatan 60-200 rpm, lain halnya dengan dinamo sepeda yang belum bisa berputar pada kecepatan angin tersebut. Hal ini disebabkan oleh torsi mekanis awal dinamo sepeda yang lebih besar daripada torsi mekanis awal generator axial. Torsi mekanis awal dipengaruhi oleh konstruksi generator itu sendiri. Pada dinamo sepeda, konstruksi stator yang mempunyai inti besi yang bertujuan untuk menarik medan magnet yang menembus kumparan stator sangat mempengaruhi gerak rotornya. Walaupun massa dan diameter rotornya relatif kecil, tetapi rotor yang terdiri dari magnet permanen akan tertarik ke inti besi stator sehingga menyebabkan rotor tidak berputar bebas. Butuh torsi awal yang lebih besar untuk menggerakkan dinamo ini. Berbeda dengan dinamo sepeda, generator axial cakram tunggal yang tidak mempunyai inti besi pada statornya menyebabkan rotornya dapat berputar bebas walaupun massa dan diameter rotornya lebih besar daripada dinamo sepeda, sehingga dengan kecepatan angin yang rendah sekalipun generator axial ini sudah dapat berputar.

Pada Gambar 4.2, dapat dilihat bahwa kecepatan putar dinamo sepeda lebih besar daripada kecepatan putar generator axial cakram tunggal. Hal ini dipengaruhi oleh transmisi dari turbin terhadap masing-masing generator. Pada dinamo sepeda rasio perbandingan kecepatan turbin dan generator yang digunakan adalah 1:20 dimana besar jari-jari turbin adalah 20 cm dan jari-jari

pulley adalah 1 cm, sehingga menghasilkan satu putaran turbin sama dengan 20 putaran generator sepeda. Berbeda halnya dengan generator axial yang mempunyai jari-jari pulley sebesar 2,2 cm sehingga perbandingan antara kecepatan putar turbin dan generator axial adalah 1:9.

#### 4.3.2 Tegangan Generator Terhadap Kecepatan Angin

Pada generator yang digunakan di sistem pembangkit ini, tegangan yang dihasilkan masing-masing generator adalah tegangan AC satu fasa. Tegangan generator akan diubah menjadi tegangan DC jika energi listriknya ingin digunakan pada beban DC, seperti pada sistem pembangkit ini yang mengubah tegangan AC menjadi DC melalui bridge rectifier sehingga energi listrik DC akan digunakan untuk mengisi baterai aki.

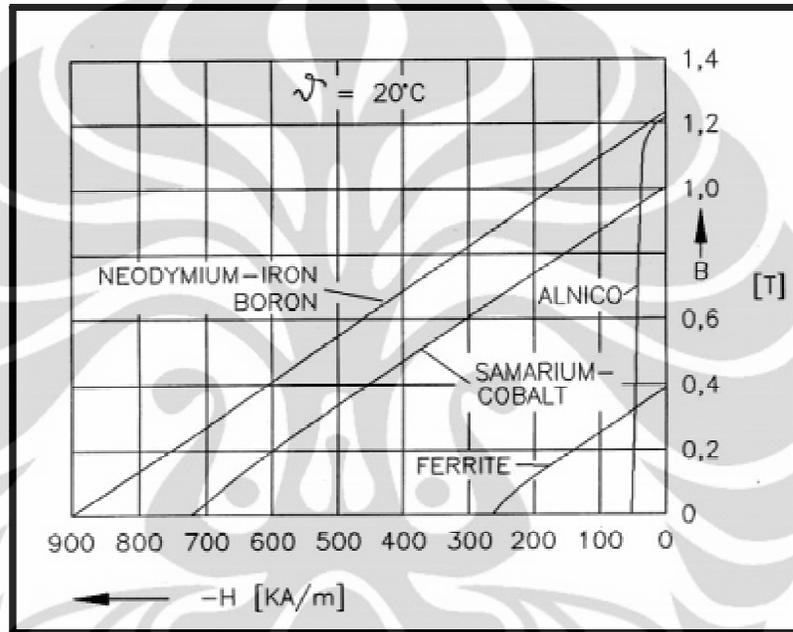
Gambar 4.3 menunjukkan tegangan AC generator tanpa beban, tegangan yang dibangkitkan oleh masing-masing generator mempunyai hubungan yang linear terhadap kecepatan angin. Hal ini sesuai dengan persamaan 2.9 dan 2.10 yaitu semakin besar kecepatan angin, maka semakin besar putaran generator sehingga frekuensi akan semakin besar dan berpengaruh pada tegangan yang dibangkitkan akan semakin besar pula. Pada percobaan, generator axial mempunyai tegangan 3,5 Vac pada kecepatan angin 1 m/s dan 28,5 Vac pada kecepatan angin 10 m/s. Sedangkan dinamo sepeda belum bisa membangkitkan tegangan pada kecepatan angin 1 m/s. Pada kecepatan angin 2,5 m/s dinamo sepeda mulai menghasilkan tegangan sebesar 2 Vac dan 9 Vac pada kecepatan angin 10 m/s.

Untuk besarnya tegangan yang dihasilkan pada kecepatan angin yang sama, generator axial mempunyai ggl induksi yang lebih besar daripada dinamo sepeda. Ada beberapa faktor yang menyebabkan perbedaan ini diantara lain:

1. Besarnya medan magnet dari masing-masing magnet permanen

Pada generator axial yang dirancang bangun, magnet permanen yang digunakan adalah magnet permanen tipe “Rare Earth Neodymium Magnet” yang mempunyai medan magnet jauh lebih kuat dibandingkan dengan medan magnet yang dihasilkan oleh magnet permanen jenis

“Ferrite”. Walaupun ukuran magnet permanen pada generator axial yang dirancang bangun lebih kecil daripada magnet permanen dinamo sepeda, tetapi dengan jenis yang berbeda, maka besar medan magnetnya juga berbeda. Oleh karena itu sesuai dengan persamaan 2.7, besar fluks yang dihasilkan akan berbeda tergantung dari besarnya medan magnet pada tiap generator.



**Gambar 4.13 Kurva Demagnetisasi Bahan Ferimagnetik [5]**

2. Banyaknya kutub magnet pada rotor

Banyaknya kutub pada rotor mempengaruhi besarnya tegangan yang dibangkitkan pada generator. Pada generator yang diuji coba, generator axial yang digunakan mempunyai 8 jumlah kutub sedangkan pada dinamo sepeda mempunyai 6 kutub. Sesuai dengan persamaan 2.10 jika jumlah kutub semakin banyak maka frekuensi dan tegangan yang dibangkitkan akan semakin tinggi.

3. Luas penampang stator yang ditembus oleh medan magnet

Untuk luas penampang stator yang ditembus oleh medan magnet, tergantung dari luas kumparan yang ditembus oleh fluks. Pada generator axial yang dirancang bangun, baik panjang, lebar, dan tebal masing-

masing kumparan mempunyai ukuran hampir lima kali lebih besar daripada luas kumparan pada dinamo sepeda. Oleh karena itu fluks yang dihasilkan oleh generator axial lebih besar daripada dinamo sepeda. Hal ini sesuai dengan persamaan 2.7.

#### 4. Banyaknya lilitan pada kumparan di stator generator

Berdasarkan persamaan 2.9, banyaknya lilitan pada kumparan mempengaruhi besar ggl induksi yang dihasilkan. Semakin banyak lilitan maka semakin besar tegangan yang dibangkitkan. Pada generator axial yang dirancang bangun, tiap kumparan memiliki lilitan sebanyak 400, sedangkan pada dinamo sepeda tiap kumparan mempunyai jumlah lilitan 300.

#### 5. Tipe penyebaran fluks

Seperti yang telah dibahas pada subbab 2.8, pada dinamo dengan arah fluks radial, fluks yang memotong kumparan di stator dan menimbulkan gaya gerak listrik tidak sepenuhnya tertangkap oleh kumparan statornya. Sebagian fluks akan lepas dan menjadi rugi-rugi yang terdapat pada dinamo sepeda. Lain halnya dengan generator aksial yang mempunyai arah penyebaran fluks secara aksial ke kumparan stator sehingga rugi-rugi fluks yang terbuang lebih sedikit.

Pada Gambar 4.4 menunjukkan nilai tegangan AC telah disearahkan melalui penyearah gelombang penuh sehingga menjadi tegangan DC. Hal ini dilakukan agar generator dapat diberi beban DC, dimana dalam skripsi ini generator berfungsi sebagai pengisi baterai aki. Dapat dilihat generator axial dengan kecepatan putar 67-667 rpm dengan kecepatan angin 1-10 m/s sudah bisa mengisi baterai aki dengan tegangan 12 V sedangkan untuk dinamo sepeda kecepatan putar yang dibutuhkan untuk mengisi baterai aki adalah 453-970 rpm dengan kecepatan angin 2,5-10 m/s..

Tidak ada perbedaan yang signifikan antara nilai tegangan  $V_{rms}$  AC dan DC pada kecepatan generator yang sama, hanya saja terdapat beberapa nilai tegangan DC yang mempunyai tegangan  $V_{rms}$  lebih besar daripada tegangan AC sebelumnya, ini disebabkan oleh penggunaan filter kapasitor pada penyearah

gelombang penuh. Kapasitor yang digunakan akan melepaskan muatan dan riak pada tegangan DC dapat berkurang. Hal inilah yang terkadang menyebabkan  $V_{rms}$  DC menjadi sedikit lebih besar daripada tegangan AC awal, hal tersebut tergantung dari jenis dan kapasitas kapasitor yang digunakan.

Pada saat generator diberi beban baterai aki 12,4 V, maka tegangan dari generator akan berkisar antara nilai tegangan baterai aki itu sendiri yaitu sekitar 11-13 V. Sebagai contoh, genertor axial tanpa beban berputar pada kecepatan 380 rpm maka sesuai data akan menghasilkan 22 Vdc. Tetapi jika diberikan beban baterai aki, maka tegangan generator akan drop menjadi 12,41065 Vdc begitu juga dengan kecepatan generator itu sendiri. Dapat kita lihat pada Gambar 4.5 dan 4.6 tegangan DC generator seperti mengikuti tegangan baterai aki. Sebenarnya nilai tegangan dari generator mempunyai nilai yang lebih besar daripada baterai aki walaupun perbedaannya tidak terlalu jauh. Hal ini disebabkan karena generator sebenarnya menyuplai arus ke baterai. Dan besar arusnya tergantung dari daya yang disuplai dan hambatan dari rangkaian jangkar generator.

Dapat dilihat pada persamaan 2.11, pada percobaan reaktansi sinkron dianggap nol dan R adalah resistor ukur dengan ukuran 0,5 ohm dan 5 watt. Karena dihubung beban, maka akan ada arus yang mengalir di stator yang disebut arus jangkar, arus inilah yang akan mengisi baterai. Arus itu akan membentuk medan magnet yang akan melawan medan magnet pembangkitnya, sehingga kecepatan putar generator akan turun dan tegangan akan drop, dalam hal ini tegangan akan drop menjadi tegangan yang bernilai hampir sama dengan tegangan baterai aki. Pada daya yang tetap, tegangan yang turun, maka arus akan menjadi naik. Ini bisa dibuktikan dengan membandingkan tegangan dan arus yang mengalir pada generator dengan diberi beban yang bervariasi.

#### 4.3.3 Arus Dan Daya Yang Disuplai Pada Saat Pembebanan Aki Terhadap

##### Kecepatan Angin

Dengan beban yang tetap yaitu baterai aki, maka besarnya arus yang mengalir ke baterai aki tergantung dari tegangan dan besarnya daya yang disuplai generator. Semakin besar kecepatan generator maka daya yang dihasilkan semakin besar, ini disebabkan oleh besarnya tegangan yang meningkat juga.

Dengan nilai beban yang tetap, maka besar nilai arus akan ikut meningkat.

Gambar 4.7, 4.8, 4.9, dan 4.10 menunjukkan besarnya arus baik generator axial maupun dinamo sepeda. Besar arus yang mengalir ke baterai antara kedua generator itu sangat berbeda jauh, dimana besar arus generator axial berkisar antar 0,2-67 mA baik DC maupun AC. Sedangkan pada dinamo sepeda arus yang mengalir ke baterai aki berkisar antara 0,15-0,37 mA baik DC maupun AC. Perbedaan yang begitu jauh ini disebabkan oleh besarnya daya yang dihasilkan masing-masing generator.

Gambar 4.11 dan 4.12 menunjukkan besar daya dan karakteristiknya. Daya generator axial yang dirancang bangun berkisar antara 0.00248002 Watt hingga 0.8330445 Watt, dan daya dinamo sepeda berkisar antara 0.00173601 Watt hingga 0.00458807 Watt. Karakteristik daya generator axial cakram tunggal dan dinamo sepeda pada kecepatan angin 1-10 m/s menunjukkan hanya terdapat kecepatan angin cut-in dari generator, sedangkan untuk kecepatan rating generator dan kecepatan cut-out dari generator tidak digambarkan karena pada prosedur uji coba, alat ini hanya di uji dengan kecepatan angin yang berkisar antara 1-10 m/s. Dapat diketahui bahwa kecepatan rating dan cut-out dari generator berada pada kecepatan angin diatas 10 m/s.

## BAB 5

### KESIMPULAN

1. Tegangan minimal yang dihasilkan generator axial cakram tunggal adalah 3,2 Vdc dengan kecepatan angin cut-in 1 m/s dan 39 Vdc pada saat kecepatan angin 10 m/s.
2. Daya yang dihasilkan generator axial cakram tunggal pada kecepatan angin 1-10 m/s berkisar antara 2.48002 miliWatt - 833.0445 miliWatt.
3. Generator axial cakram tunggal yang dirancang bangun dapat mengisi baterai aki pada kecepatan 67-677 rpm.
4. Pada kecepatan angin yang tetap, kecepatan generator, tegangan, dan daya yang dibangkitkan dipengaruhi oleh konstruksi generator seperti pulley generator, jenis magnet permanen, banyak kutub, luas kumparan stator, banyak lilitan pada kumpuran, dan tipe penyebaran fluks.
5. Generator axial cakram tunggal yang dirancang bangun mempunyai kehandalan yang lebih baik sebagai pembangkit pada turbin angin kecepatan rendah berkapasitas kecil dibandingkan dengan dinamo sepeda dalam hal pembangkitan tegangan dan daya yang dihasilkan.

## DAFTAR ACUAN

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

## DAFTAR PUSTAKA

- Chapman, Stephen J., *Electric Machinery and Power System Fundamentals*, McGraw-Hill, New York, 2002.
- William H. Hayt dan John A. Buck *“Elektromagnetika”*, Erlangga, Jakarta, 2006.
- Zuhal, *Dasar Tenaga Listrik dan Elektronika Daya*, Gramedia, Jakarta, 1995.

