



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - EE 184801

**EVALUASI PENGGUNAAN PENYIMPAN ENERGI *HYBRID*  
BATERAI-SUPERKAPASITOR PADA PEMBANGKIT  
LISTRIK TENAGA ANGIN**

Saiful Anshoruddin  
NRP 07111440000116

Dosen Pembimbing  
Vita Lystianingrum, ST., M.Sc., Ph.D.  
Dedet C. Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2019



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - EE 184801

**EVALUASI PENGGUNAAN PENYIMPAN ENERGI *HYBRID*  
BATERAI-SUPERKAPASITOR PADA PEMBANGKIT  
LISTRIK TENAGA ANGIN**

Saiful Anshoruddin  
NRP 07111440000116

Dosen Pembimbing  
Vita Lystianingrum, ST., M.Sc., Ph.D.  
Dedet C. Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2019



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - EE 184801

## EVALUATION OF HYBRID ENERGY STORAGE SYSTEM BATTERY-SUPERCAPACITOR USAGE IN WIND POWER GENERATION

Saiful Anshoruddin  
NRP 07111440000116

Advisors  
Vita Lystianingrum, ST., M.Sc., Ph.D.  
Dedet C. Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING  
Faculty of Electrical Technology  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2019

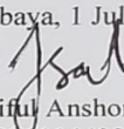
## PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan tugas akhir saya dengan judul “**EVALUASI PENGGUNAAN PENYIMPAN ENERGI HYBRID BATERAI-SUPERKAPASITOR PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA ANGIN**” adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diizinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku

Surabaya, 1 Juli 2019

  
Saiful Anshoruddin  
07111440000116



**EVALUASI PENGGUNAAN PENYIMPAN ENERGI  
HYBRID BATERAI-SUPERKAPASITOR PADA  
PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA ANGIN**

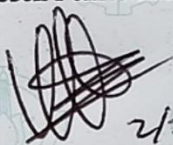
**TUGAS AKHIR**

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan  
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Pada**

**Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga  
Departemen Teknik Elektro  
Fakultas Teknologi Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

**Menyetujui:**

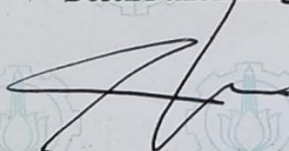
**Dosen Pembimbing I**



2/7/19

**Vita Lystianingrum, S.T., M.Sc., Ph.D.**  
NIP 19820892006042001

**Dosen Pembimbing II**



**Dedet C. Riawan, S.T., M.Eng., Ph.D.**  
NIP 197311192000031001





# EVALUASI PENGGUNAAN PENYIMPAN ENERGI HYBRID BATERAI-SUPERKAPASITOR PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA ANGIN

Nama mahasiswa : Saiful Anshoruddin  
Dosen Pembimbing I : Vita Lystianingrum, ST., M.Sc., Ph.D.  
Dosen Pembimbing II : Dedet C. Riawan, ST., M.Sc., Ph.D.

## ABSTRAK

Pembangkit listrik tenaga angin merupakan salah satu jenis pembangkit alternatif untuk menggantikan pembangkit-pembangkit dengan tenaga fosil. Energi angin memiliki potensi yang sangat besar untuk dimanfaatkan sebagai pembangkit. Akan tetapi, di balik potensinya energi angin terkenal dengan ketidakstabilannya. Sehingga, tidak mudah untuk mengonversi energi angin menjadi energi listrik. Salah satu cara untuk mengatasi ketidakstabilan pada sistem konversi energi angin adalah dengan memberikan sebuah penyimpan energi yang bertugas sebagai penjaga tegangan pada sisi beban. Penyimpan energi yang umum digunakan saat ini adalah baterai. Tetapi, baterai tidak dapat bekerja dengan baik pada fluktuasi angin yang tinggi karena kerapatan daya dan respon dinamis baterai yang cenderung rendah. Oleh karena itu, dibutuhkan sebuah komponen yang dapat mengatasi kekurangan baterai. Kapasitor super memiliki kerapatan daya dan respon dinamis yang tinggi sehingga tepat untuk dijadikan komponen komplementer baterai supaya dapat mengatasi ketidakstabilan dari energi angin. Gabungan antara baterai dan kapasitor super ini biasa disebut dengan Sistem Penyimpan Energi Hibrida (*Hybrid Energy Storage System*). Tugas akhir ini mengevaluasi pengaruh dari penyimpan energi hibrida terhadap arus dan tegangan pada baterai. Dengan cara membandingkan arus dan tegangan keluaran pada baterai saat bekerja sendiri dan saat digabungkan dengan kapasitor super. Berdasarkan simulasi yang dilakukan pada tugas akhir ini kapasitor super mempercepat respon dinamis dari sistem penyimpan energi dan melindungi baterai dari daya frekuensi tinggi karena kapasitor super dapat menyerap daya berfrekuensi tinggi.

**Kata kunci :** kapasitor super, baterai, hibrida, pembangkit listrik tenaga angin



*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# EVALUATION OF HYBRID STORAGE SYSTEM BATTERY-SUPERCAPACITOR USAGE IN WIND POWER GENERATION

**Student Name** : Saiful Anshoruddin  
**Advisor I** : Vita Lystianingrum, ST., M.Sc., Ph.D.  
**Advisor II** : Dedet C. Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.

## ABSTRACT

*Wind power generation is one of alternatives power to generate electricity besides to replace fossil fuel. Wind energy has great potential. But, behind all of it potential it famously known by its unstability. That is make the conversion from wind energy to electricity is not easy. One of the ways to overcome instability in the wind energy conversion system is to provide an energy storage that acts as a voltage regulator at load side. Energy storage that is commonly used today is a battery. However, the battery cannot work properly at high wind fluctuations due to the low power density and dynamic response of the battery. Therefore we need a component that can overcome the shortage of batteries. Supercapacitors have high power density and dynamic response so that it is appropriate to be used as a complementary component of the battery in order to overcome the instability of wind energy. This combination of batteries and supercapacitors is commonly called the hybrid energy storage system (HESS). This final project evaluates the effect of hybrid energy storage on current and voltage on the battery. By comparing the output current and voltage on the battery when working alone and when combined with a supercapacitor. Based on the simulations carried out in this final project, supercapacitors increase the dynamic response of energy storage systems and protect battery from high frequency power because supercapacitors can absorb high frequency power.*

**Keywords** : *supercapacitor, battery, hybrid, wind power plant*

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **KATA PENGANTAR**

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang senantiasa memberikan rahmat dan hidayah sehingga penyusunan buku Tugas Akhir ini dapat diselesaikan. Tak lupa shalawat dan salam selalu tercurahkan untuk Rasulullah Muhammad SAW beserta keluarga dan sahabat-sahabatnya.

Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi persyaratan menyelesaikan pendidikan Sarjana di Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember dengan judul:

### **EVALUASI PENGGUNAAN PENYIMPAN ENERGI HYBRID BATERAI-SUPERKAPASITOR PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA ANGIN**

Penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih kepada beberapa pihak yang telah membantu dalam penyusunan buku Tugas Akhir ini:

1. Allah SWT atas segala limpahan rahmat-Nya dan atas izin-Nya dapat menyelesaikan buku Tugas Akhir.
2. Orang tua dari penulis, Sajimin dan Siti Ruchul Amanatun yang selalu memberikan dukungan dalam setiap kesempatan dan menjadi motivasi yang kuat dalam menyelesaikan pendidikan Sarjana penulis.
3. Ibu Vita Lystianingrum, ST., M.Sc., Ph.D. dan Bapak Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D. selaku dosen pembimbing dari penulis yang selalu membimbing dari awal pengerjaan data dan buku Tugas Akhir ini.
4. Bapak Dr. Eng. Ardyono Priyadi S.T., M. Eng. selaku Kepala Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
5. Seluruh dosen dan karyawan Departemen Teknik Elektro ITS yang telah memberikan banyak ilmu dan menciptakan suasana belajar yang luar biasa.
6. Saudara dari penulis, Isna Amalia Fitriyani dan Umi Latifah yang selalu memberikan semangat dan dukungan moral kepada penulis.
7. Teman-teman e-54 yang selalu menemani kehidupan penulis dari awal perkuliahan hingga saat ini.
8. Octavian Nur Fauzi, Deny Andika, Rusdy Saleh, Aditya Setyadi yang selalu menjadi teman berdiskusi mengenai tugas akhir penulis dan menjadi teman dalam mengerjakan tugas akhir ini siang dan malam.

9. *Shift* malam LIPIST Octavian Nur Fauzi, Heryanto Hartra, Angga Prasetya, Fahmi Nur Faishal yang telah menemani penulis dalam menyelesaikan tugas akhir terutama di malam hari.
10. Asisten LIPIST dan KE yang telah menjadi teman selama pengerjaan tugas akhir.
11. Teman teman perantauan *Kontrakan Blok H.13 dan Kost J-1* yang selalu menemani penulis dalam berbagai hal selama di Surabaya.
12. *Arek Warkop Hello Kitty* dalam menjadi teman berkeluh kesah di setiap malam.
13. Dan semua pihak yang membantu penyusunan buku Tugas Akhir ini yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Penulis telah berusaha secara maksimal dalam penyusunan buku Tugas Akhir ini. Kritik yang membangun dan saran sangat diharapkan untuk penyempurnaan ke depannya. Semoga buku ini dapat memberikan manfaat yang luas bagi segala pihak.

Surabaya, 1 Juli 2019

Penulis

## DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN .....	i
LEMBAR PENGESAHAN .....	iii
ABSTRAK .....	v
ABSTRACT .....	vii
KATA PENGANTAR .....	ix
DAFTAR ISI .....	xi
DAFTAR GAMBAR .....	xiii
DAFTAR TABEL .....	xvii
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Permasalahan.....	2
1.3 Tujuan .....	2
1.4 Batasan Masalah .....	2
1.5 Metodologi .....	2
1.6 Sistematika Penulisan .....	3
1.7 Relevansi.....	4
BAB 2 KAJIAN TERKAIT DAN DASAR TEORI .....	5
2.1 Kajian Penelitian Terkait.....	5
2.2 Energi Angin .....	6
2.3 Turbin Angin.....	7
2.3.1 Jenis-Jenis Turbin Angin .....	8
2.3.1.1 Turbin Angin Sumbu Vertikal .....	8
2.3.1.2 Turbin Angin Sumbu Horisontal.....	9
2.4 Generator Sinkron Magnet Permanen .....	11
2.5 Dioda Penyearah Tegangan 3 Fasa .....	13
2.6 Pelacakan Titik Daya Maksimum.....	14
2.7 Konverter Penaik Tegangan .....	15
2.8 Konverter DC-DC Dua Arah.....	18
2.9 Baterai.....	20
2.10 Kapasitor Super .....	24
BAB 3 PERANCANGAN SISTEM KONVERSI ENERGI ANGIN ...	29
3.1 Konfigurasi Sistem Konversi Energi Angin .....	29
3.2 Permodelan Turbin Angin.....	29
3.3 Permodelan Generator Sinkron Magnet Permanen .....	31
3.4 Dioda Penyearah Tegangan 3 Fasa .....	32
3.5 Permodelan Konverter Penaik Tegangan .....	34

3.6	Permodelan Konverter Dua Arah.....	36
3.8.1	Konverter Dua Arah Baterai .....	37
3.8.2	Konverter Dua Arah Kapasitor Super.....	37
3.7	Permodelan Sistem Manajemen Daya .....	38
<b>BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>		<b>41</b>
4.1	Hasil Simulasi Penggunaan Sistem Penyimpan Energi Sebagai Pengatur Tegangan Pada Sistem Konversi Energi Angin.....	41
4.1.1	Kasus 1 : Kecepatan Angin Bervariasi dan Kebutuhan Daya Konstan.....	42
4.1.2	Kasus 2 : Kecepatan Angin Konstan dan Kebutuhan Daya Bervariasi .....	46
4.1.3	Kasus 3 : Kecepatan Angin dan Kebutuhan Daya Bervariasi .....	51
<b>BAB 5 PENUTUP .....</b>		<b>57</b>
5.1	Kesimpulan.....	57
5.2	Saran .....	58
<b>DAFTAR PUSTAKA.....</b>		<b>59</b>
<b>INDEKS .....</b>		<b>63</b>
<b>BIODATA PENULIS.....</b>		<b>65</b>

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b>	Turbin Angin Sumbu Vertikal[9] .....	8
<b>Gambar 2.2</b>	Turbin Angin Sumbu Horisontal[10] .....	10
<b>Gambar 2.3</b>	Rangkaian Ekuivalen Sumbu d .....	12
<b>Gambar 2.4</b>	Rangkaian Ekuivalen Sumbu q .....	12
<b>Gambar 2.5</b>	Penyearah Tegangan 3 Fasa 6 Pulsa Tak Terkontrol .....	13
<b>Gambar 2.6</b>	Algoritma MPPT dengan metode P&O .....	15
<b>Gambar 2.7</b>	Rangkaian Konverter Penaik Tegangan.....	16
<b>Gambar 2.8</b>	Konverter Penaik Tegangan kondisi saklar tertutup .....	16
<b>Gambar 2.9</b>	Konverter Penaik Tegangan Kondisi Saklar Terbuka .....	17
<b>Gambar 2.10</b>	Bentuk Gelombang Konverter Penaik Tegangan.....	18
<b>Gambar 2.11</b>	Prinsip Kerja Konverter Dua Arah .....	19
<b>Gambar 2.12</b>	Kurva Karakteristik Tegangan vs Kapasitas Baterai.....	21
<b>Gambar 2.13</b>	Struktur Baterai Asam Timbal[16] .....	22
<b>Gambar 2.14</b>	Blok Baterai pada MATLAB R2017b[17] .....	22
<b>Gambar 2.15</b>	Kotak Dialog Blok Baterai[17].....	23
<b>Gambar 2.16</b>	Permodelan Baterai[17] .....	24
<b>Gambar 2.17</b>	Karakteristik Tegangan Kapasitor Super Saat Pengisian.....	25
<b>Gambar 2.18</b>	Struktur Kapasitor Super[20] .....	26
<b>Gambar 2.19</b>	Blok Kapasitor Super pada MATLAB R2017b[22] .....	27
<b>Gambar 2.20</b>	Kotak Dialog Blok Kapasitor Super[22] .....	27
<b>Gambar 2.21</b>	Permodelan Kapasitor Super[22].....	28
<b>Gambar 3.1</b>	Permodelan Sistem Konversi Energi Angin.....	29
<b>Gambar 3.2</b>	Permodelan Turbin Angin pada MATLAB.....	30
<b>Gambar 3.3</b>	Kurva Karakteristik Turbin Angin.....	30
<b>Gambar 3.4</b>	Kurva Kecepatan Angin vs Daya Turbin .....	31
<b>Gambar 3.5</b>	Kurva Kecepatan Angin vs Daya PMSG .....	32
<b>Gambar 3.6</b>	Tegangan keluaran penyearah tanpa kapasitor .....	33
<b>Gambar 3.7</b>	Tegangan keluaran penyearah dengan kapasitor .....	33
<b>Gambar 3.8</b>	Riak Tegangan Konverter Penaik Tegangan.....	35
<b>Gambar 3.9</b>	Riak Arus Konverter Penaik Tegangan.....	36
<b>Gambar 3.10</b>	Pengontrol Konverter Dua Arah Baterai .....	37
<b>Gambar 3.11</b>	Pengontrol Konverter Dua Arah Kapasitor super.....	38
<b>Gambar 3.12</b>	Permodelan Sistem Manajemen Daya .....	38
<b>Gambar 4.1</b>	Permodelan Kecepatan Angin Bervariasi .....	42



<b>Gambar 4.2</b> Permodelan Beban Konstan.....	42
<b>Gambar 4.3</b> Riak Tegangan sisi beban pada Sistem Penyimpan Energi Baterai .....	43
<b>Gambar 4.4</b> Riak Tegangan Sisi Beban pada Sistem Penyimpan Energi Hibrida.....	43
<b>Gambar 4.5</b> Daya Angin, Daya Beban, Daya Referensi (Kebutuhan Daya) Kasus 1 dan Daya Baterai pada Sistem Penyimpan Energi Baterai .....	44
<b>Gambar 4.6</b> Daya Angin, Daya Beban, Daya Referensi (Kebutuhan Daya), Daya Kapasitor super, Daya Baterai dan Daya Penyimpan Energi pada Sistem Penyimpan Energi Hibrida .....	44
<b>Gambar 4.7</b> SOC, Arus dan Tegangan Baterai pada Sistem Penyimpan Energi Baterai .....	45
<b>Gambar 4.8</b> SOC, Arus dan Tegangan Baterai pada Sistem Penyimpan Energi Hibrida .....	45
<b>Gambar 4.9</b> SOC, Arus dan Tegangan Kapasitor super pada Sistem Penyimpan Energi Hibrida .....	46
<b>Gambar 4.10</b> Permodelan Kecepatan Angin Konstan .....	47
<b>Gambar 4.11</b> Permodelan Beban Bervariasi.....	47
<b>Gambar 4.12</b> Riak Tegangan Pada Sisi Beban dengan Sistem Penyimpan Energi Baterai .....	48
<b>Gambar 4.13</b> Riak Tegangan Pada Sisi Beban dengan Sistem Penyimpan Energi Hibrida .....	48
<b>Gambar 4.14</b> Daya Angin, Daya Beban, Daya Referensi (Kebutuhan Daya) Kasus 1 dan Daya Baterai pada Sistem Penyimpan Energi Baterai .....	49
<b>Gambar 4.15</b> Daya Angin, Daya Beban, Daya Referensi Kasus 1, Daya Kapasitor super, Daya Baterai dan Daya Penyimpan Energi pada Sistem Penyimpan Energi Hibrida .....	49
<b>Gambar 4.16</b> SOC, Arus dan Tegangan Baterai pada Sistem Penyimpan Energi Baterai .....	50
<b>Gambar 4.17</b> SOC, Arus dan Tegangan Baterai pada Sistem Penyimpan Energi Hibrida .....	50
<b>Gambar 4.18</b> SOC, Arus dan Tegangan Kapasitor super pada Sistem Penyimpan Energi Hibrida .....	51
<b>Gambar 4.19</b> Permodelan Kecepatan Angin Bervariasi.....	52

<b>Gambar 4.20</b> Permodelan Beban Bervariasi .....	52
<b>Gambar 4.21</b> Riak Tegangan Pada Sisi Beban dengan Sistem Penyimpan Energi Baterai.....	53
<b>Gambar 4.22</b> Riak Tegangan Pada Sisi Beban dengan Sistem Penyimpan Energi Hibrida.....	53
<b>Gambar 4.23</b> Daya Angin, Daya Beban, Daya Referensi (Kebutuhan Daya) Kasus 3, Daya Baterai pada Sistem Penyimpan Energi Baterai .	54
<b>Gambar 4. 24</b> Daya Angin, Daya Beban, Daya Referensi (Kebutuhan Daya) Kasus 3, Daya Kapasitor super, Daya Baterai dan Daya Penyimpan Energi pada Sistem Penyimpan Energi Hibrida.....	54
<b>Gambar 4.25</b> SOC, Arus dan Tegangan Baterai pada Sistem Penyimpan Energi Baterai.....	55
<b>Gambar 4.26</b> SOC, Arus dan Tegangan Baterai pada Sistem Penyimpan Energi Hibrida.....	55
<b>Gambar 4.27</b> SOC, Arus dan Tegangan Kapasitor super pada Sistem Penyimpan Energi Hibrida .....	56

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 3.1</b> Parameter Turbin Angin.....	31
<b>Tabel 3.2</b> Parameter PMSG .....	32
<b>Tabel 3.3</b> Parameter Penyearah.....	32
<b>Tabel 3.4</b> Parameter Konverter Penaik tegangan .....	34
<b>Tabel 3.5</b> Parameter Konverter Dua arah .....	36

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Kerusakan lingkungan yang disebabkan oleh pemanasan global memunculkan banyaknya usaha untuk menyelamatkan lingkungan. Salah satu usaha yang dapat dilakukan adalah dengan beralih dari energi fosil, seperti batu bara yang digunakan untuk pembangkitan tenaga listrik ke energi baru yang lebih ramah lingkungan. Salah satu energi ramah lingkungan yang sangat pesat perkembangannya adalah energi angin. Pembangkitan listrik dengan menggunakan angin setiap tahun semakin meningkat dari 74 GW pada tahun 2006 menjadi 487 GW pada tahun 2016[1]. Ini disebabkan karena investasi yang lebih murah dan teknologi pembuatan turbin angin yang sudah baik, serta tingkat efisiensi yang tinggi. Akan tetapi, di balik semua kelebihan energi angin memiliki kekurangan yaitu, kontrol yang sangat sulit. Selain itu, daya keluaran dari turbin angin juga sangat fluktuatif. Hal ini dapat menyebabkan masalah ketika langsung diinterkoneksi dengan sistem kelistrikan utama, seperti masalah kualitas, stabilitas, dan keandalan dari sistem kelistrikan tersebut[2]. Menggunakan penyimpanan energi adalah satu cara untuk mengatasi sifat fluktuatif energi angin.

Baterai adalah salah satu penyimpanan energi yang umum digunakan pada sistem pembangkit listrik tenaga angin. Baterai merupakan penyimpanan energi yang memiliki kapasitas energi yang besar. Akan tetapi, memiliki kekurangan yaitu, kapasitas dayanya kecil dan respon dinamik yang rendah.

Selain baterai, kapasitor super juga dapat digunakan sebagai penyimpanan energi untuk sistem pembangkit listrik tenaga angin. Kapasitor super memiliki kerapatan daya yang tinggi dan respon dinamik yang baik. Akan tetapi, kerapatan energinya rendah[3].

Sistem penyimpanan energi yang sedang dikembangkan saat ini adalah sistem penyimpanan energi hibrida (*Hybrid Energy Storage System*) yang menggabungkan antara penyimpanan energi baterai dan kapasitor super. Dengan menggabungkan baterai dan kapasitor super. Maka, kekurangan dari masing-masing penyimpanan energi tersebut dapat ditutupi.

Tugas akhir ini meneliti tentang penggunaan sistem penyimpanan energi hibrida pada sistem pembangkit listrik tenaga angin melalui simulasi, strategi kontrol dari sistem penyimpanan energi hibrida agar dapat diketahui pengaruh penambahan kapasitor super terhadap arus dan

tegangan baterai, serta perbandingan jika sistem pembangkit listrik tenaga angin ini hanya memakai baterai saja sebagai penyimpanan energi.

## **1.2 Permasalahan**

Permasalahan yang akan dibahas pada tugas akhir ini adalah:

1. Bagaimana manajemen daya baterai-kapasitor super sistem penyimpanan energi hibrida pada pembangkit listrik tenaga angin agar dapat mengatasi daya keluaran pembangkit listrik tenaga angin yang fluktuatif?
2. Bagaimana pengaruh dari penambahan kapasitor super terhadap arus dan tegangan baterai?

## **1.3 Tujuan**

Tujuan yang ingin dicapai pada tugas akhir ini adalah:

1. Melakukan simulasi manajemen daya baterai-kapasitor super sistem penyimpanan energi hibrida pada pembangkit listrik tenaga angin untuk mengatasi daya keluaran dari pembangkit listrik tenaga angin yang fluktuatif.
2. Mengetahui perbedaan arus dan tegangan *charge/discharge* pada baterai antara sistem penyimpanan energi baterai dan sistem penyimpanan energi hibrida.

## **1.4 Batasan Masalah**

Batasan masalah pada tugas akhir ini adalah :

1. Model baterai dan kapasitor super yang digunakan pada tugas akhir ini adalah model ideal.
2. Blok-blok yang digunakan pada simulasi tugas akhir ini merupakan blok yang terdapat pada MATLAB/Simulink R2017b.
3. Pengontrol yang digunakan pada konverter dua arah merupakan pengontrol PI.

## **1.5 Metodologi**

Metodologi yang digunakan pada penelitian ini dapat dijabarkan sebagai berikut:

1. Studi Pustaka  
Studi pustaka yang dilakukan, yaitu mengenai sistem turbin angin dan media penyimpanan energi dengan cara mengumpulkan referensi-referensi seperti buku dan jurnal.

2. Penentuan Parameter  
Pada tahap ini penulis melakukan penentuan parameter-parameter terkait yang akan dipakai dalam pengerjaan tugas akhir ini, seperti parameter dari turbin angin, generator, dan kecepatan angin yang akan disimulasikan pada tugas akhir ini.
3. Simulasi  
Pada tahap ini penulis melakukan simulasi untuk mendapatkan data-data yang diharapkan dengan menggunakan perangkat lunak MATLAB/Simulink R2017b.
4. Analisis dan pengolahan data  
Pada tahap ini penulis melakukan analisis dan mengolah data yang didapat dari hasil simulasi. Dan memberikan kesimpulan mengenai studi penggunaan sistem penyimpanan energi hibrida baterai-kapasitor super pada pembangkit listrik tenaga angin.
5. Penyusunan buku tugas akhir  
Penyusunan buku didasarkan dari awal hal yang telah dilakukan, melampirkan data uji, serta analisis yang telah dilakukan hasil simulasi. Sehingga mendapatkan kesimpulan dari penelitian yang telah dilakukan.

## **1.6 Sistematika Penulisan**

Sistematika penulisan dalam tugas akhir ini terdiri atas lima bab dengan uraian sebagai berikut:

- BAB 1** : Pendahuluan  
Bab ini membahas tentang penjelasan mengenai latar belakang, permasalahan dan batasan masalah, tujuan, metode penelitian, sistematika penulisan, dan relevansi.
- BAB 2** : Kajian Pustaka  
Bab ini membahas mengenai dasar teori yang digunakan untuk menunjang penyusunan tugas akhir ini.
- BAB 3** : Perancangan Sistem Konversi Energi Angin  
Bab ini membahas mengenai model dari komponen-komponen yang akan dipakai dalam simulasi tugas akhir ini.
- BAB 4** : Hasil dan Pembahasan  
Bab ini membahas hasil simulasi tentang penggunaan penyimpanan energi hibrida pada pembangkit listrik tenaga angin.



## BAB 5 : Penutup

Bab ini membahas mengenai kesimpulan dan saran yang dapat diambil dari pengujian yang telah dilakukan.

### **1.7 Relevansi**

Tugas akhir ini diharapkan dapat memberi manfaat untuk penelitian selanjutnya mengenai penggunaan sistem penyimpan energi hibrida baterai-kapasitor super pada sistem energi baru terbarukan.

## **BAB 2**

### **KAJIAN TERKAIT DAN DASAR TEORI**

Pada bab ini akan membahas tentang dasar teori dan penelitian terkait yang sudah pernah dilakukan khususnya mengenai sistem konversi energi angin dan penyimpanan energi hibrida baterai-kapasitor super. Bab ini terdiri dari 10 subbab diantaranya adalah kajian pustakan dan penelitian terkait pada subbab 2.1. Energi angin pada subbab 2.2. Lalu teori mengenai komponen-komponen yang akan dipakai pada subbab 2.3-2.10.

#### **2.1 Kajian Penelitian Terkait**

Dalam subbab ini akan dibahas mengenai kajian pustaka dan penelitian yang pernah dilakukan terkait dengan sistem konversi energi angin yang menggunakan penyimpanan energi.

Dalama disertasinya[4], Ratna Ika Putri melakukan penelitian tentang strategi kontrol optimal pada sistem konversi energi angin. Pada penelitiannya ia membandingkan beberapa metode kontrol untuk mengetahui metode yang paling efisien untuk mendapatkan daya maksimum dari turbin angin yang dihubungkan ke generator sinkron magnet permanen (*Permanent Magnet Synchronous Generator*). Simulasi pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak MATLAB/Simulink.

Dalam jurnalnya[5], Nishad Mendis melakukan penelitian tentang algoritma manajemen energi pada sistem penyuplai daya di daerah terpencil. Pada panelitiannya ia membuat sebuah strategi pembagian daya untuk baterai dan kapasitor super. Tujuannya adalah supaya baterai dapat mengatasi fluktuasi berfrekuensi rendah. Sedangkan kapasitor super dapat mengatasi fluktuasi berfrekuensi tinggi. Dalam jurnal ini juga dicantumkan metode untuk menentukan kapasitas dari masing-masing penyimpan energi supaya mendapatkan performa maksimal dari sistem penyimpanan energi hibrida. Simulasi pada penelitian ini dilakukan dengan perangkat lunak MATLAB/Simulink.

Dalam jurnalnya[6], Sathish Kumar melakukan penelitian tentang strategi kontrol untuk sistem penyimpanan energi hibrida baterai kapasitor super. Keunggulan dari sistem penyimpanan ini adalah respon dinamik baterai yang lambat dapat ditutupi dengan adanya kapasitor super. Strategi kontrol ini juga berguna untuk memperpanjang umur baterai dan mengurangi kejenuhan pada baterai.

## 2.2 Energi Angin

Energi angin merupakan sebuah sumber energi terbarukan yang dapat dimanfaatkan untuk membangkitkan listrik. Energi angin merupakan salah satu bentuk dari energi matahari. Angin terbentuk pemanasan atmosfer yang tidak merata oleh matahari, variasi pada permukaan bumi dan rotasi bumi.

Energi angin merupakan sumber energi yang paling cepat bertumbuh kedua untuk pembangkitan listrik di dunia. Menurut data dari Yayasan Energi Angin (*Wind Energy Foundation*) kapasitas energi angin yang terpasang di seluruh dunia mencapai 539.581 MW pada akhir 2017. Energi angin dapat berkembang secara pesat karena saat ini teknologi pembuatan turbin angin sudah sangat baik dan efisiensi dari energi angin yang tinggi.

Berdasarkan Rencana Umum Energi Nasional, pada tahun 2025 pemerintah menargetkan kapasitas terpasang pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB) di Indonesia sebesar 1,8 GW. Mengingat potensi angin yang sangat besar di Indonesia, yaitu sekitar 60,6 GW dengan kecepatan angin  $\geq 4$  m/detik. Potensi terbesar terdapat di Nusa Tenggara Timur, yakni sebesar 10,1 GW. Jika potensi tersebut dapat dimanfaatkan dengan baik, maka kebutuhan listrik di daerah tersebut dapat terpenuhi dan dapat menyuplai kebutuhan listrik daerah lain yang mengalami kekurangan pasokan listrik.

Proses pembangkitan listrik memanfaatkan energi angin adalah sebagai berikut. Energi angin akan memutar turbin angin, lalu turbin angin akan memutar rotor generator sehingga generator akan membangkitkan listrik. Terdapat beberapa faktor yang dapat mempengaruhi besarnya energi listrik yang dapat dibangkitkan dari energi angin.

- a) Diameter rotor  
Diameter rotor berbanding lurus dengan besarnya daya yang dibangkitkan. Semakin panjang diameter rotor semakin besar pula daya listrik yang dapat dibangkitkan.
- b) Kecepatan angin  
Kecepatan angin adalah energi utama yang akan memutar rotor sehingga kecepatan angin berpengaruh terhadap daya yang dibangkitkan.
- c) Jenis generator  
Ada beberapa jenis generator yang digunakan untuk sistem konversi energi angin, masing-masing generator memiliki

karakteristik tersendiri. Sehingga jenis generator berpengaruh terhadap besarnya daya yang dibangkitkan.

## 2.3 Turbin Angin

Turbin angin adalah alat yang digunakan untuk mengubah energi angin menjadi energi listrik. Angin akan memutar bilah turbin, gerakan dari bilah turbin akan memutar rotor pada generator yang akan menghasilkan energi listrik.

Menurut referensi[7], daya dari energi angin dan daya menanak angin dapat dituliskan dengan persamaan berikut:

$$P_w = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v_w^3 \quad (2.1)$$

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v_w^3 C_p \quad (2.2)$$

$\rho$  adalah kerapatan udara (kg/m<sup>3</sup>)

$R$  adalah jari-jari rotor (m)

$v_w$  adalah kecepatan angin (m/detik)

$C_p$  adalah koefisien daya

Koefisien daya merupakan gambaran dari efisiensi dari turbin angin dalam mengubah energi kinetik angin menjadi energi putaran yang memutar rotor pada generator. Karena tidak mungkin untung mengubah energi kinetik secara utuh menjadi energi putar. Nilai maksimum dari  $C_p$  adalah 0,59 atau disebut juga sebagai batas Betz. Turbin angin tidak akan dapat bekerja bila nilai  $c_p$  melebihi batas Betz.

Hubungan antara perbandingan kecepatan ujung (*tip speed ratio*), sudut angguk (*pitch angle*) dan koefisien daya dapat dituliskan dengan persamaan berikut:

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left( \frac{c_2}{\lambda_1} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{\frac{-c_5}{\lambda_1}} + c_6 \lambda \quad (2.3)$$

$$\frac{1}{\lambda_1} = \frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1} \quad (2.4)$$

Sudut angguk dan perbandingan kecepatan ujung sangat dipengaruhi oleh kecepatan angin dan kecepatan putar rotor.

$$\lambda = \frac{R \omega_r}{V_w} \quad (2.5)$$

Torsi mekanik yang dihasilkan oleh turbin dapat diketahui dengan persamaan berikut:

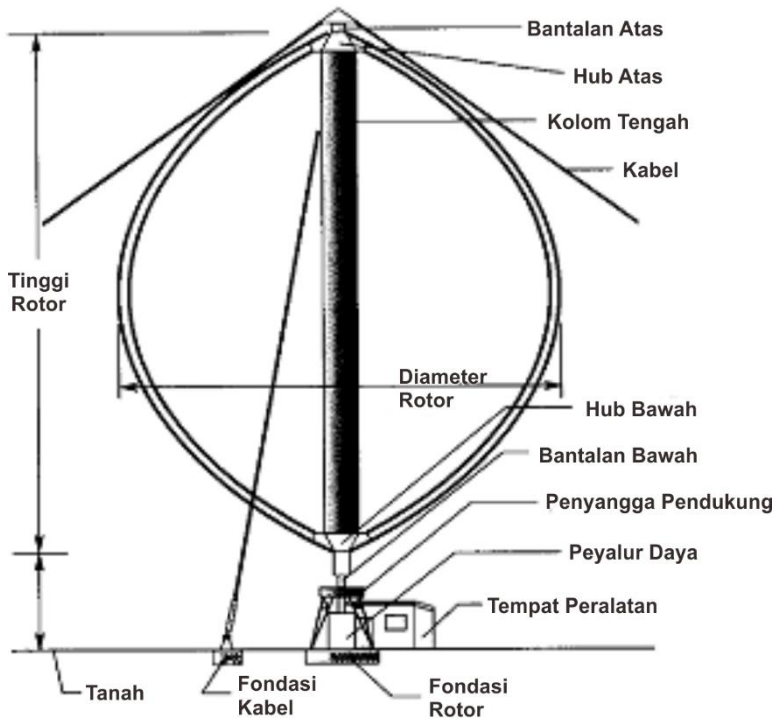
$$T_m = \frac{P_m}{\omega_r} \quad (2.6)$$

### 2.3.1 Jenis-Jenis Turbin Angin

Berdasarkan posisi antara baling-baling dan sumbu putarnya turbin angin dibedakan menjadi dua, yaitu turbin angin sumbu vertikal (TASV) dan turbin anign sumbu horisontal (TASH). Masing-masing turbin angin memiliki kelebihan dan kekurangan[8].

#### 2.3.1.1 Turbin Angin Sumbu Vertikal

Turbin angin sumbu vertikal memiliki poros rotor yang vertikal. Fungsinya adalah supaya penempatan rotor tidak perlu diarahkan ke arah angin bertiup, turbin jenis ini sesuai untuk daerah dengan arah angin yang sangat variatif atau memiliki turbulensi.



**Gambar 2.1** Turbin Angin Sumbu Vertikal[9]

Dengan sumbu vertikal, generator dan komponen primer lainnya dapat ditempatkan dekat dengan permukaan tanah, sehingga menara tidak perlu menyangga yang membuat pemeliharaan relatif mudah. Kekurangan dari turbin angin jenis ini adalah efisiensi yang cenderung lebih rendah dibandingkan turbin angin sumbu horisontal akibat kecepatan angin dekat permukaan tanah yang relative lebih rendah.

Kelebihan dari turbin angin sumbu vertikal :

1. Turbin dapat diletakkan di dekat tanah sehingga lebih mudah untuk menjaga bagian yang bergerak.
2. Tidak memerlukan mekanisme pengarah.
3. Turbin dapat dibuat pada lokasi yang melarangi struktur tinggi.

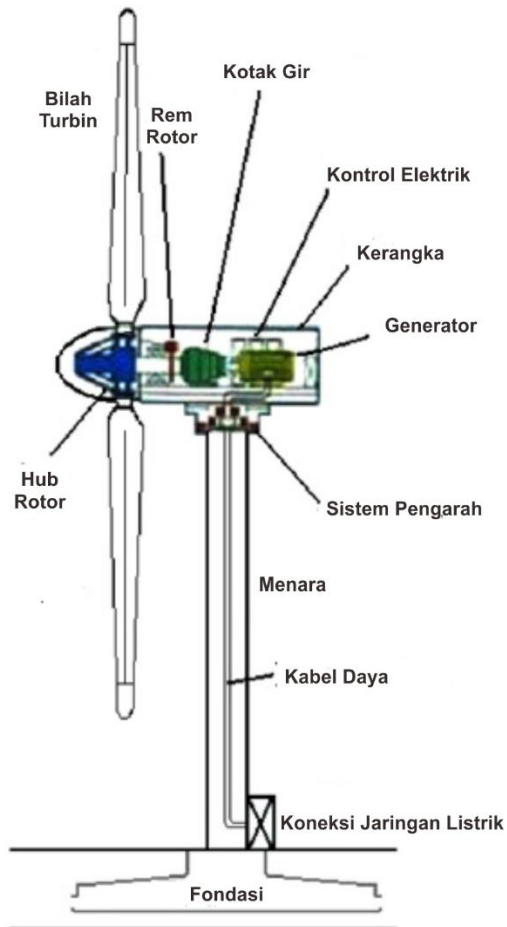
Kekurangan turbin angin sumbu vertikal :

1. Karena rotor berada di tempat yang rendah, kecepatan yang dapat dimanfaatkan kurang optimal.

### ***2.3.1.2 Turbin Angin Sumbu Horisontal***

Desain turbin angin sumbu horisontal mirip dengan kincir angin karena memiliki bilah turbin dan baling-baling yang berputar pada sumbu vertikal.

Turbin angin horisontal memiliki poros rotor dan generator pada puncak menara dan harus diarahkan ke arah angin bertiup. Turbin yang berukuran kecil di arahkan ke arah datangnya angin dengan menggunakan sistem pengarah yang terletak di rotor. Untuk turbin yang berukuran besar dilengkapi dengan sensor yang terhubung motor servo dan kotak gir. Sensor berfungsi untuk mengarahkan bilah turbin sesuai dengan arah angin, sedangkan kotak gir merubah kecepatan putar rotor untuk ditransfer ke generator menjadi lebih cepat.



**Gambar 2.2** Turbin Angin Sumbu Horisontal[10]

Karena menara penyangga turbin ini menghasilkan turbulensi pada bagian belakang, biasanya menara ini dibuat mengarah ke arah angin dari depan. Bilah turbin dibuat kaku supaya tidak terdorong ke menara ketika angin kencang.

Kelebihan turbin angin sumbu horisontal :

1. Karena turbin angin jenis ini memiliki menara yang tinggi, kekuatan angin yang didapat akan lebih besar. Pada beberapa

daerah, setiap kenaikan 10 meter akan mendapat kenaikan kekuatan angin sebesar 20% dan kenaikan daya sebesar 34%.

2. Efisiensi yang lebih tinggi karena turbin selalu bergerak tegak lurus terhadap arah angin dan menerima daya sepanjang putaran.

Kekurangan turbin angin sumbu horisontal:

1. Dibutuhkan konstruksi menara yang kuat. Karena komponen-komponen utama seperti bilah turbin, generator dan kotak gir diletakkan di atas menara.
2. Membutuhkan kontrol untuk mengarahkan bilah turbin ke arah angin.

## 2.4 Generator Sinkron Magnet Permanen

Generator adalah sebuah alat yang berfungsi mengubah energi mekanik menjadi energi listrik dan bekerja berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Berdasarkan sinkronisasi putaran listrik dan mekanisnya generator dapat dibedakan menjadi 2 jenis, yaitu generator sinkron dan generator asinkron.

Generator sinkron adalah generator yang memiliki kecepatan putar listrik dan mekanis sama. Salah satu jenis dari generator sinkron adalah generator sinkron magnet permanen. Generator sinkron magnet permanen (*Permanent Magnet Synchronous Generator*) atau PMSG umumnya digunakan pada sistem turbin angin kecil karena memiliki ukuran yang kecil, keandalan yang tinggi, kerapatan yang dayanya tinggi, dan tidak membutuhkan pemeliharaan yang rumit. Generator jenis ini tidak membutuhkan sistem eksitasi karena eksitasinya berasal dari magnet permanen yang terletak pada rotor.

Hubungan antara frekuensi dan kecepatan pada generator sinkron dituliskan dalam persamaan berikut :

$$N_s = N_r = \frac{120f}{p} \quad (2.7)$$

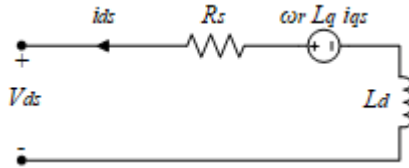
$N_s$  adalah kecepatan medan stator

$N_r$  adalah kecepatan medan rotor

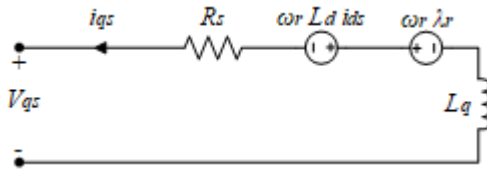
$f$  adalah frekuensi (Hz)

$p$  adalah jumlah kutub





**Gambar 2.3** Rangkaian Ekuivalen Sumbu d



**Gambar 2.4** Rangkaian Ekuivalen Sumbu q

Model dinamik PMSG dapat digambarkan dengan rangkaian ekuivalen dq seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.3 dan 2.4 Berdasarkan rangkaian ekuivalen tersebut maka persamaan tegangan sumbu dq dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$v_{ds} = -i_{ds} \cdot R_s + \omega_r \cdot L_q \cdot i_{qs} - p \cdot L_d \cdot i_{ds} \quad (2.8)$$

$$v_{qs} = -i_{qs} \cdot R_s + \omega_r \cdot L_d \cdot i_{ds} + \omega_r \lambda_r - p \cdot L_q \cdot i_{qs} \quad (2.9)$$

$v_{ds}$  adalah tegangan stator sumbu d

$v_{qs}$  adalah tegangan stator sumbu q

$i_{ds}$  adalah arus stator sumbu d

$i_{qs}$  adalah arus stator sumbu q

$R_s$  adalah resistansi belitan ( $\Omega$ )

$p$  adalah jumlah kutub

$L_d$  adalah induktansi belitan sumbu d (H)

$L_q$  adalah induktansi belitan sumbu q (H)

$\lambda_r$  adalah fluks rotor

$\omega_r$  adalah kecepatan rotasi elektrik PMSG (rad/detik)

Torsi elektromagnetik dari PMSG dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$T_e = \frac{3p}{2} (i_{qs} \cdot \lambda_r + i_{ds} \cdot i_{qs} (L_d + L_q)) \quad (2.10)$$

Kecepatan rotor PMSG dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\omega_r = \frac{P}{J_s} (T_e - T_m) \quad (2.11)$$

$T_e$  adalah Torsi Elektrik

$T_m$  adalah Torsi Mekanik

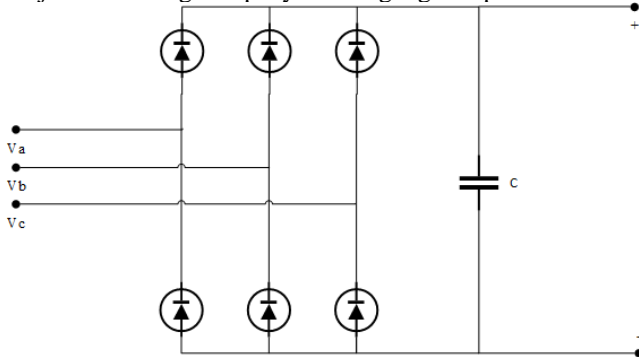
$J_s$  adalah Momen Inersia rotor

Daya elektrik yang dihasilkan PMSG dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$P = 1,5(v_{ds} \cdot i_{ds} + v_{qs} \cdot i_{qs}) \quad (2.12)$$

## 2.5 Dioda Penyearah Tegangan 3 Fasa

Penyearah tegangan adalah sebuah komponen elektronika daya yang berfungsi untuk mengubah gelombang bolak-balik (AC) menjadi gelombang searah (DC). Ada berbagai jenis penyearah tegangan tiga fasa berdasarkan banyak pulsa, antara lain 3 pulsa, 6 pulsa, dan 12 pulsa. Berdasarkan metode operasinya penyearah terbagi menjadi 3 jenis. Yaitu, tidak terkontrol, terkontrol sebagian, dan terkontrol penuh[11]. Pada subbab ini akan dijelaskan mengenai penyearah tegangan 6 pulsa tidak terkontrol.



**Gambar 2.5** Penyearah Tegangan 3 Fasa 6 Pulsa Tak Terkontrol

Penyearah jenis ini memiliki mekanisme kerja sebagai berikut. Tiga dioda pada penyearah ini akan menghasilkan gelombang tegangan positif, sedangkan tiga dioda lainnya akan menghasilkan gelombang tegangan negatif. Nilai amplitudo pada penyearah ini adalah nilai maksimum tegangan antar fasa dan tegangan rata-rata keluaran DC dari penyearah jenis ini adalah luas dari gelombang tegangan.

Dioda akan aktif bergantian sesuai dengan sudut konduksi  $2\pi/3$ , sehingga tegangan keluaran rata-rata yang dihasilkan penyearah ( $V_{dc}$ ) ini dapat dinyatakan dengan persamaan berikut :

$$V_{DC} = \frac{6}{2\pi} \int_{\pi/3}^{2\pi/3} V_m \sin(\omega t) d(\omega t) \quad (2.13)$$

$$V_{DC} = V_m \frac{3}{\pi} \quad (2.14)$$

$V_m$  adalah tegangan masukan maksimum

Penambahan kapasitor setelah dioda penyearah 3 fasa berfungsi untuk memperhalus tegangan keluaran dioda yang telah disearahkan.

Berdasarkan referensi[4], Nilai kapasitor untuk mendapat riak tegangan yang diinginkan dapat diketahui melalui persamaan berikut.

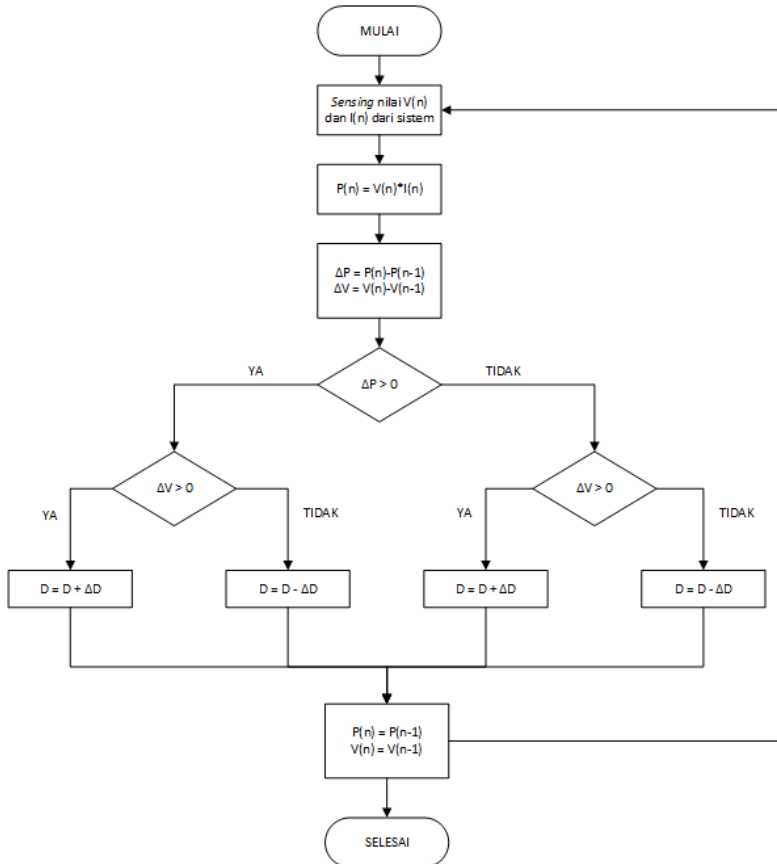
$$\Delta V_{DC} = \frac{V_m}{6fRC} \quad (2.15)$$

$$C = \frac{V_m}{6fR\Delta V_{DC}} \quad (2.16)$$

## 2.6 Pelacakan Titik Daya Maksimum

Pelacakan Titik Daya Maksimum (*Maximum Power Point Tracking*) atau MPPT adalah sebuah algoritma yang digunakan untuk mencari nilai daya maksimum yang dapat dihasilkan oleh sebuah sistem turbin angin[12]. MPPT bekerja untuk mencari nilai tegangan maksimal sehingga daya keluaran yang didapat dari turbin angin merupakan daya yang maksimal sehingga efisiensi dari sistem konversi energi angin menjadi tinggi dan menurunkan rugi-rugi daya pada sistem tersebut.

Salah satu metode yang digunakan oleh MPPT adalah mengusik dan amati (*perturb and observe*) atau P&O. Metode ini adalah sebuah teknik optimisasi yang digunakan untuk mencari titik maksimum dari sebuah fungsi yang diberikan. Metode ini digunakan pada sistem turbin angin untuk menentukan titik operasi maksimal dari sistem turbin angin sehingga daya yang dihasilkan oleh sistem menjadi maksimal. Prinsip kerja metode ini adalah dengan cara mengganggu variabel kontrol dengan ukuran langkah yang kecil dan mengamati hasil perubahan terhadap fungsi target sampai mencapai titik maksimal dari fungsi tersebut[13].



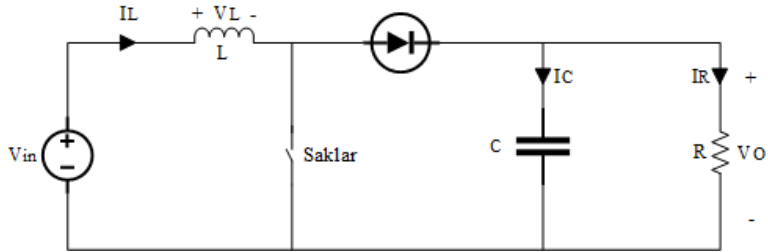
**Gambar 2.6** Algoritma MPPT dengan metode P&O

## 2.7 Konverter Penaik Tegangan

Konverter DC-DC merupakan sebuah alat yang dapat mengubah level tegangan DC masukan menjadi level tegangan DC keluaran yang diinginkan. Level tegangan dapat diatur sesuai kebutuhan dengan cara mengubah nilai siklus kerja. Salah satu jenis konverter DC-DC adalah konverter penaik tegangan.

Konverter penaik tegangan adalah sebuah konverter DC-DC yang dapat mengubah tegangan keluaran menjadi lebih besar daripada tegangan masukan ( $V_o > V_{in}$ ). Komponen-komponen konverter penaik tegangan

diantaranya adalah, tegangan sumber ( $V_{in}$ ), saklar, dioda, kapasitor C, induktor, dan resistor R.



**Gambar 2.7** Rangkaian Konverter Penaik Tegangan

Terdapat 2 kondisi pada konverter penaik tegangan, yaitu kondisi ada saklar tertutup dan kondisi pada saat saklar terbuka.

1. Kondisi saklar tertutup

Pada saat kondisi saklar tertutup induktor akan terhubung langsung dengan  $V_{in}$ , maka induktor akan mengalami proses pengisian.

$$\begin{aligned}
 V_{in} &= V_L \\
 V_{in} &= L \frac{di}{dt} \\
 V_{in} &= L \frac{\Delta i_L(on)}{t_{on}} \\
 V_{in} &= L \frac{\Delta i_L(on)}{DT} \\
 \Delta i_L(on) &= \frac{V_{in}DTs}{L} \tag{2.17}
 \end{aligned}$$

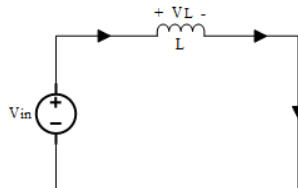
$D$  adalah Siklus kerja

$T$  adalah Waktu saklar konduksi

$V_{in}$  adalah Tegangan masukan (V)

$L$  adalah Induktansi (H)

$\Delta i_L$  adalah Riak arus (A)

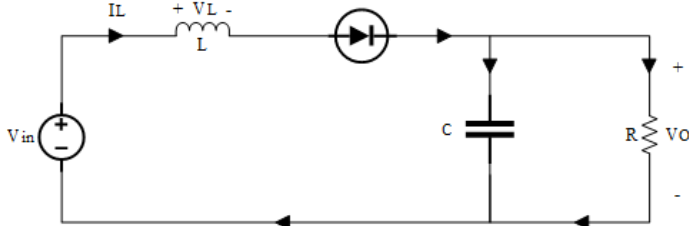


**Gambar 2.8** Konverter Penaik Tegangan kondisi saklar tertutup

## 2. Kondisi saklar terbuka

Pada saat kondisi saklar terbuka maka  $V_{in}$  akan terangkai seri dengan induktor dan resistor. Induktor yang pada awalnya dalam keadaan pengisian akan menjadi sumber arus atau sumber tegangan  $V_L$  dan resistor akan berperan sebagai beban yang akan disuplai oleh dua sumber tegangan  $V_{in}$  dan  $V_L$ .

$$\begin{aligned}
 V_{in} &= V_L + V_o \\
 V_{in} &= L \frac{di}{dt} + V_o \\
 V_{in} &= L \frac{\Delta i_L(off)}{t_{off}} + V_o \\
 V_{in} &= L \frac{\Delta i_L(off)}{(1-D)T} + V_o \\
 \Delta i_L(off) &= \frac{(V_{in}-V_o)(1-D)Ts}{L}
 \end{aligned} \tag{2.18}$$



**Gambar 2.9** Konverter Penaik Tegangan Kondisi Saklar Terbuka

Saat keadaan stabil, total perubahan arus pada induktor sama dengan nol.

$$\Delta i_L(on) + \Delta i_L(off) = 0 \tag{2.19}$$

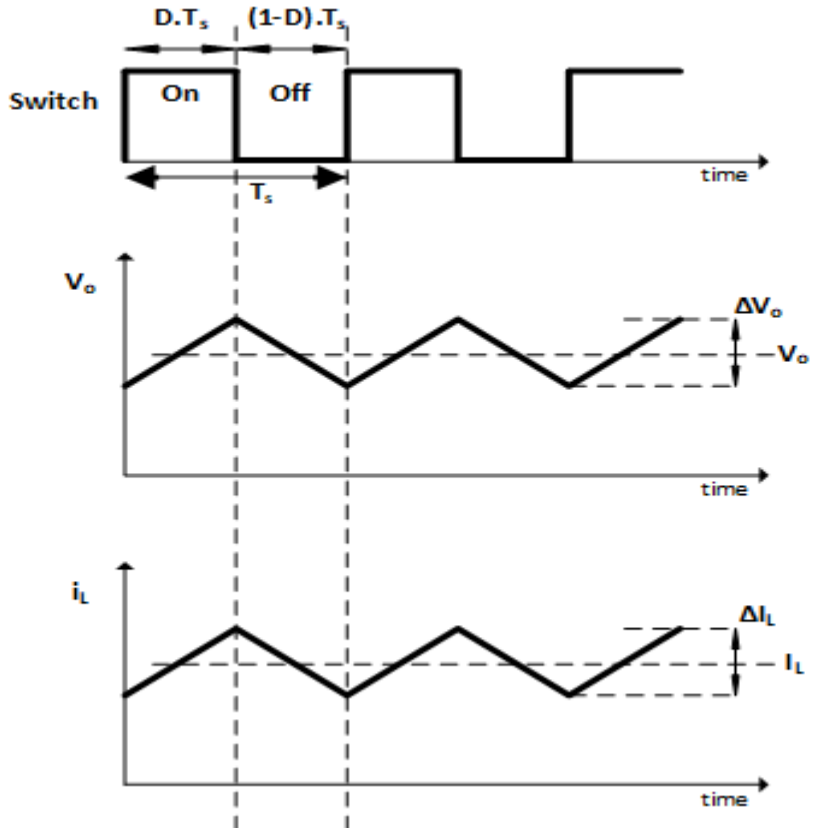
Dengan menyubstitusikan persamaan (2.17) dan (2.18) ke persamaan (2.19). Maka diperoleh persamaan sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 \frac{V_{in}DTs}{L} + \frac{(V_{in}-V_o)(1-D)Ts}{L} &= 0 \\
 V_{in}(D + 1 - D) - V_o(1 - D) &= 0 \\
 V_o &= \frac{V_{in}}{1-D}
 \end{aligned} \tag{2.20}$$

Komponen induktor dan kapasitor pada rangkaian konverter penaik tegangan dapat dihitung dengan menggunakan rumus berikut :

$$L = \frac{V_{in} \cdot D}{\Delta i_L \cdot f_s} \tag{2.21}$$

$$C = \frac{D}{R \left( \frac{\Delta V_o}{V_o} \right) f_s} \tag{2.22}$$



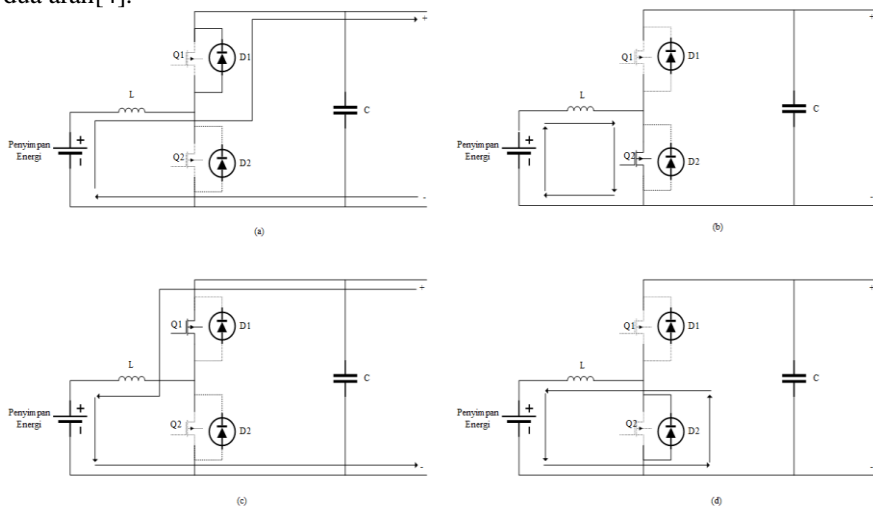
**Gambar 2.10** Bentuk Gelombang Konverter Penaik Tegangan

## 2.8 Konverter DC-DC Dua Arah

Konverter DC-DC dua arah adalah sebuah konverter yang dapat bekerja dua arah. Serta dapat bekerja dalam mode penaik tegangan ataupun penurunan tegangan. Pada sistem penyimpanan energi konverter jenis ini bertindak sebagai perantara dalam proses pengisian dan pengosongan untuk dapat memenuhi kebutuhan daya yang dibutuhkan oleh beban pada sistem.

Konverter jenis ini bekerja dalam mode penaik tegangan jika terjadi proses pengosongan pada penyimpanan energi. Lalu akan bekerja dalam mode penurunan tegangan jika terjadi proses pengisian pada

penyimpan energi. Berikut ini adalah skema prinsip kerja dari konverter dua arah[4].



**Gambar 2.11** Prinsip Kerja Konverter Dua Arah

Berdasarkan gambar 2.10 prinsip kerja dari konverter dua arah dibagi menjadi 4 bagian, yaitu:

1. Bagian 1 (D1 terhubung, Q1 terputus, D2 terputus, Q2 terputus)  
Bagian ini ditunjukkan oleh gambar a pada bagian ini konverter akan bekerja menyuplai daya dari penyimpan energi ke Sisi beban.
2. Bagian 2 (D1 terputus, Q1 terputus, D2 terputus, Q2 terhubung)  
Bagian ini ditunjukkan oleh gambar b pada bagian ini konverter akan bekerja dalam mode penaik tegangan dan induktor mengalami pengisian sehingga arus dalam induktor akan bertambah.
3. Bagian 3 (D1 terputus, Q1 terhubung, D2 terputus, Q2 terputus)  
Bagian ini ditunjukkan oleh gambar c pada bagian ini konverter akan bekerja pada mode penurunan tegangan dan penyimpan energi akan mengalami proses pengisian. Karena daya akan mengalir dari Sisi beban menuju penyimpan energi.
4. Bagian 4 (D1 terputus, Q1 terputus, D2 terhubung, Q2 terputus)  
Bagian ini ditunjukkan oleh gambar d pada bagian ini menunjukkan keadaan saat arus pada induktor tidak dapat



langsung berubah, sehingga akan dibuang lewat dioda D2 sehingga tegangan pada Sisi beban akan turun dibandingkan dengan tegangan penyimpanan energi.

Menurut referensi[14] parameter konverter dua arah, seperti L dan C dapat diketahui dengan persamaan berikut :

$$L_{min} \geq \frac{D(1-D)^2 V_H^2}{2P_C f} \quad (2.23)$$

$$C = \frac{(1-D)}{8(\% \Delta V) L_{min} f^2} \quad (2.24)$$

$L_{min}$  adalah Nilai minimal induktor (H)

$D$  adalah Siklus kerja

$V_H$  adalah Tegangan tinggi (volt)

$P_C$  adalah Daya beban rendah kritikal (watt)

$f$  adalah Frekuensi pensaklaran (Hz)

$C$  adalah Nilai kapasitor (F)

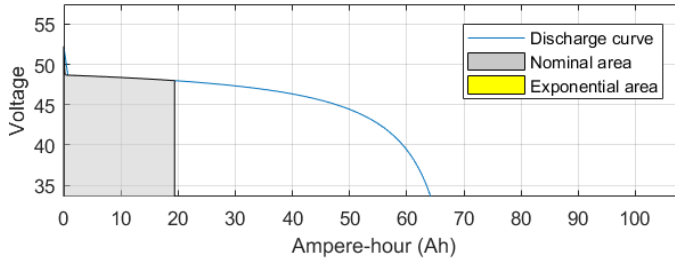
$\% \Delta V$  adalah Riak tegangan (%)

## 2.9 Baterai

Baterai adalah sebuah alat yang dapat menyimpan energi listrik dalam bentuk energi kimia dan mengubahnya menjadi listrik kembali. Baterai memiliki kerapatan energi yang baik. Tetapi, baterai memiliki kelemahan yaitu, kerapatan daya yang rendah dan respon dinamik yang rendah. Serta umur yang relatif lebih pendek jika dibandingkan dengan kapasitor super[15].

Salah satu jenis baterai yang sering digunakan adalah baterai asam timbal (*lead-acid*). Baterai jenis ini memiliki keunggulan harganya relatif murah. Serta memiliki tegangan yang tinggi per selnya. Akan tetapi, ada beberapa kekurangan dari baterai jenis ini. Seperti, baterai ini relatif lebih berat dibanding dengan jenis lain. Serta baterai jenis ini tidak dapat dalam keadaan pengosongan yang terlalu lama tanpa merusak baterai. Dalam tugs akhir ini digunakan baterai asam timbal pada Simulink.

Karakteristik tegangan dari sel baterai dapat berubah. Akan tetapi, perubahan tegangannya tidak terlalu signifikan. Perubahan tegangan ini dapat terjadi seiring dengan menurunnya keadaan muatan listrik (*state of charge*) atau SOC dari sel baterai, pengaruh temperatur dari sel, arus pengisian-pengosongan, dan umur dari baterai. Berikut ini merupakan kurva karakteristik tegangan terhadap kapasitas pada baterai.



**Gambar 2.12** Kurva Karakteristik Tegangan vs Kapasitas Baterai

Untuk menghitung kapasitas baterai yang dibutuhkan pada sistem konversi energi angin dapat menggunakan persamaan berikut[5].

$$Ah\ rating = \frac{\gamma \cdot I_{rated} \cdot t}{60 \cdot k} \quad (2.25)$$

Ah rating adalah kapasitas baterai (Ah)

$\gamma$  adalah banyaknya daya yang akan disuplai oleh baterai dari seluruh kebutuhan daya

t adalah waktu (dalam menit)

$I_{rated}$  adalah arus nominal dari PMSG (A)

k adalah arus pengisian nominal dari baterai

$$I_{rated} = \frac{(P_{PMSG})_{rated}}{\sqrt{3}v_{rated}} \quad (2.26)$$

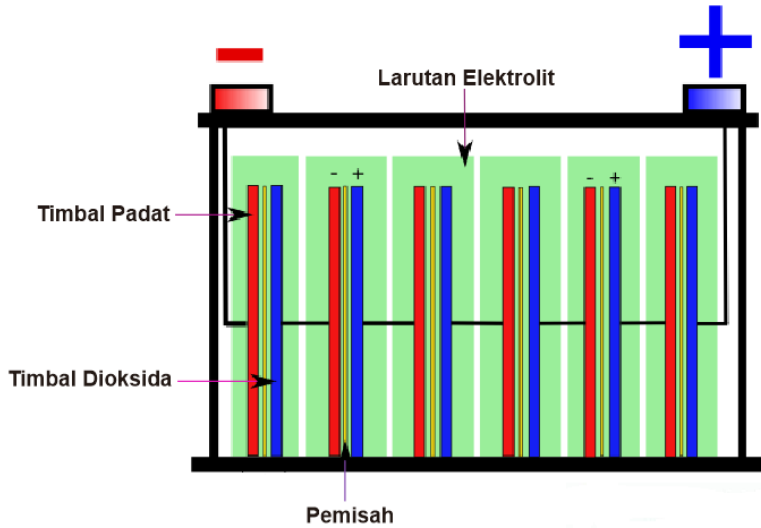
$(P_{PMSG})_{rated}$  adalah daya nominal PMSG (W)

$v_{rated}$  adalah tegangan nominal (V)

dengan memasukkan persamaan (2.26) ke persamaan (2.25) maka diperoleh persamaan:

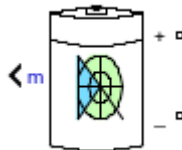
$$Ah\ rating = \frac{\gamma \cdot (P_{PMSG})_{rated} \cdot t}{60 \cdot k \cdot \sqrt{3}v_{rated}} \quad (2.27)$$

Sel baterai asam timbal terbuat dari 3 komponen yaitu, anoda, katoda dan elektrolit. Anoda yang merupakan terminal negatif dan katoda merupakan terminal positif. Pelat negatif terbuat dari timbal padat, dan pelat positif terbuat dari timbal dioksida. Terdapat pemisah diantara pelat negatif dan positif yang berfungsi untuk mencegah kedua pelat bersentuhan. Larutan elektrolit pada baterai asam timbal adalah air dan asam sulfur. Berikut merupakan struktur dari sebuah baterai asam timbal.

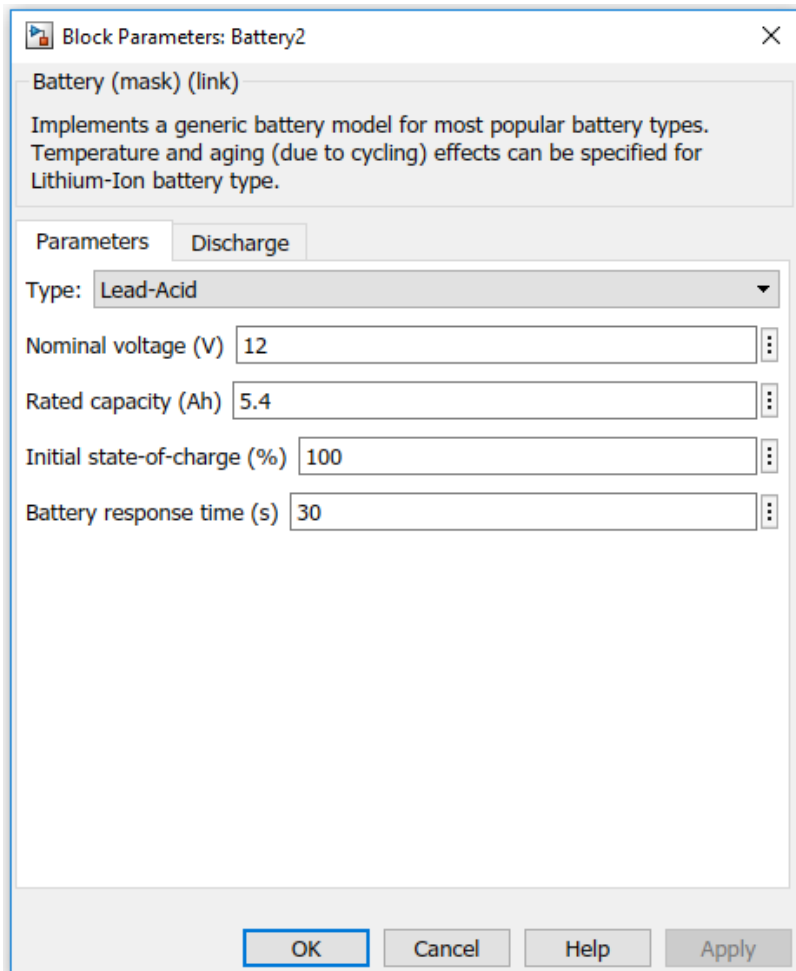


**Gambar 2.13** Struktur Baterai Asam Timbal[16]

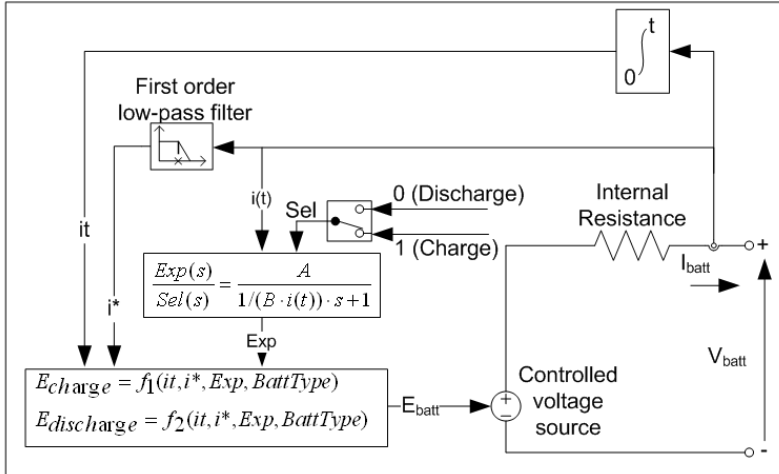
Permodelan baterai yang digunakan pada pengerjaan tugas akhir ini merupakan model baterai pada MATLAB/Simulink R2017b. Berikut ini merupakan gambar blok, kotak dialog, dan permodelan baterai pada MATLAB/Simulink R2017b.



**Gambar 2.14** Blok Baterai pada MATLAB R2017b[17]



**Gambar 2.15** Kotak Dialog Blok Baterai[17]



**Gambar 2.16** Permodelan Baterai[17]

$E_{Batt}$  adalah tegangan non-linear (V)

$E_0$  adalah tegangan konstan (V)

$Exp(s)$  adalah zona eksponensial dinamik (V)

$Sel(s)$  adalah mode baterai, 0 ketika pengosongan dan 1 ketika pengisian

$K$  adalah konstanta polarisasi ( $Ah^{-1}$ )

$i^*$  adalah arus dinamik frekuensi rendah (A)

$i$  adalah arus baterai (A)

$it$  adalah kapasitas ekstraksi (Ah)

$Q$  adalah kapasitas maksimal baterai (Ah)

$A$  adalah tegangan eksponensial (V)

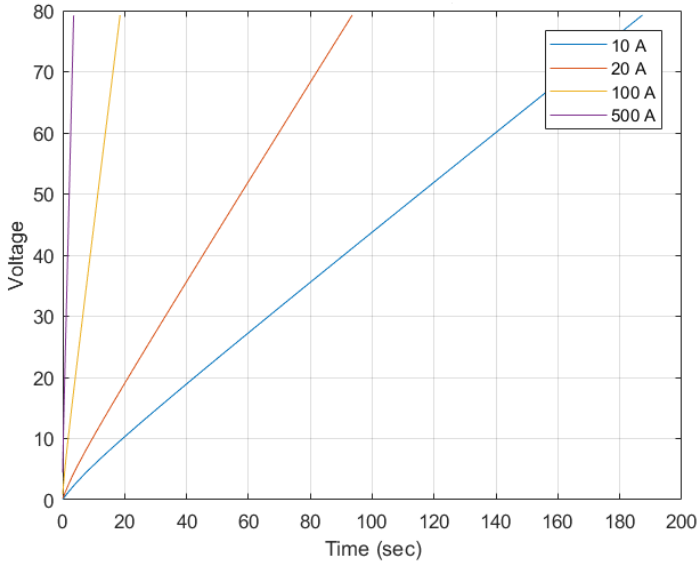
$B$  adalah kapasitas eksponensial ( $Ah^{-1}$ )

## 2.10 Kapasitor Super

Kapasitor super atau superkapasitor merupakan sebuah alat yang dapat menyimpan energi dengan cara menyerap ion elektrolit ke permukaan material elektroda. Proses penyimpanan dan pelepasan energi pada kapasitor super tidak memerlukan reaksi redoks sehingga respon terhadap perubahan potensial sangat cepat[18]. Kapasitor super memiliki kerapatan daya yang tinggi dan respon dinamik yang baik, tetapi memiliki kerapatan energi yang rendah.

Kapasitor super dapat melakukan proses pengisian dan pengosongan lebih cepat dari baterai[19]. Oleh karena itu, kapasitor super sering digunakan sebagai komplemen dari baterai pada sistem dengan yang membutuhkan variasi daya yang cepat. Seperti, pada kendaraan listrik dan pada sistem pembangkit listrik tenaga angin. Pada tugas akhir ini digunakan blok kapasitor super pada Simulink.

Kurva karakteristik tegangan terhadap keadaan muatan listrik (SOC) kapasitor super relatif linear. Ini berarti ketika terjadi proses pengisian pada kapasitor super tegangan akan naik mengikuti kenaikan SOC. Begitu pula ketika proses pengosongan pada kapasitor super, maka tegangan pada kapasitor super akan turun mengikuti penurunan SOC. Berikut ini merupakan kurva karakteristik tegangan terhadap waktu pada saat proses pengisian pada kapasitor super.



**Gambar 2.17** Karakteristik Tegangan Kapasitor Super Saat Pengisian

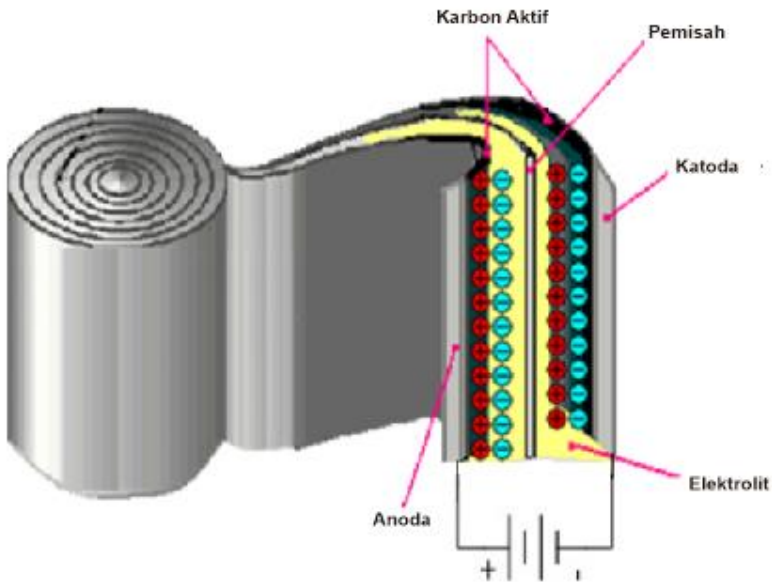
Untuk menghitung kapasitas kapasitor super yang dibutuhkan pada sistem konversi energi angin dapat menggunakan persamaan berikut.

$$C_{sup} = \frac{2 \cdot (P_{PMSG})_{rated} \cdot t}{((v_{sc})_{max})^2 - ((v_{sc})_{min})^2} \quad (2.28)$$

$C_{sup}$  adalah Kapasitas kapasitor super (F)

- $(P_{PMSG})_{rated}$  adalah Daya nominal PMSG (W)  
 $(v_{sc})_{max}$  adalah Tegangan maksimal kapasitor super (V)  
 $(v_{sc})_{min}$  adalah Tegangan minimal kapasitor super (V)

Prinsip dari kapasitor super adalah berdasarkan struktur dari kapasitor lapisan ganda. Pada umumnya sel kapasitor super merupakan struktur simetris yang terdiri dari elektroda yang biasanya terbuat dari karbon aktif, pemisah, penyimpan arus, dan elektrolit.

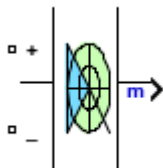


**Gambar 2.18** Struktur Kapasitor Super[20]

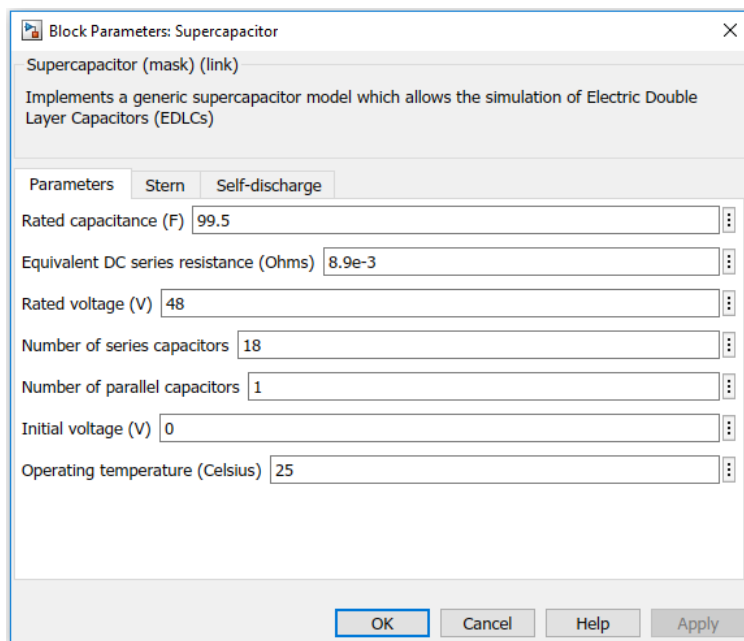
Ketika elektroda berpori pada kapasitor super diberikan tegangan, maka muatan positif akan tersimpan pada elektroda positif, dan muatan negatif akan tersimpan pada elektroda negatif[21].

Efek dari medan listrik yang disebabkan oleh muatan pada elektroda berpori, muatan yang berlawanan menempel pada permukaan elektroda dan elektrolit, yang menyeimbangkan medan listrik internal pada elektrolit. Jarak antara muatan positif dan negatif sangatlah dekat. Mengakibatkan kapasitor super dapat menyimpan lebih banyak muatan.

Permodelan kapasitor super yang digunakan pada pengerjaan tugas akhir ini merupakan model kapasitor super pada MATLAB/Simulink R2017b. Berikut ini merupakan gambar blok, kotak dialog, dan permodelan kapasitor super pada MATLAB/Simulink R2017b.

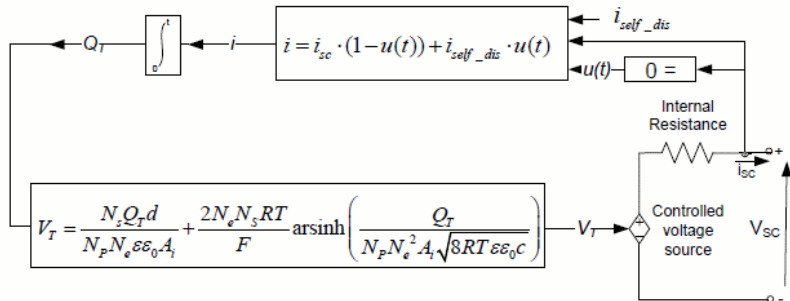


**Gambar 2.19** Blok Kapasitor Super pada MATLAB R2017b[22]



**Gambar 2.20** Kotak Dialog Blok Kapasitor Super[22]





**Gambar 2.21** Permodelan Kapasitor Super[22]

- $A_i$  adalah Luas daerah antara elektroda dan elektrolit ( $m^2$ )
- $c$  adalah Konsentrasi molar ( $mol/m^3$ )
- $r$  adalah Jari-jari molekul (m)
- $F$  adalah Konstanta Faraday
- $i_{sc}$  adalah Arus kapasitor super (A)
- $V_{sc}$  adalah Tegangan kapasitor super (V)
- $C_T$  adalah Kapasitas total (F)
- $R_{sc}$  adalah Hambatan total ( $\Omega$ )
- $N_e$  adalah Jumlah lapisan elektroda
- $N_A$  adalah Konstanta Avogadro
- $N_p$  adalah Jumlah kapasitor super parallel
- $N_s$  adalah Jumlah kapasitor super seri
- $Q_T$  adalah Muatan listrik (C)
- $R$  adalah Konstanta gas ideal
- $T$  adalah Suhu Operasi (K)
- $\epsilon$  adalah Permisivitas material
- $\epsilon_0$  adalah Permisivitas ruang hampa

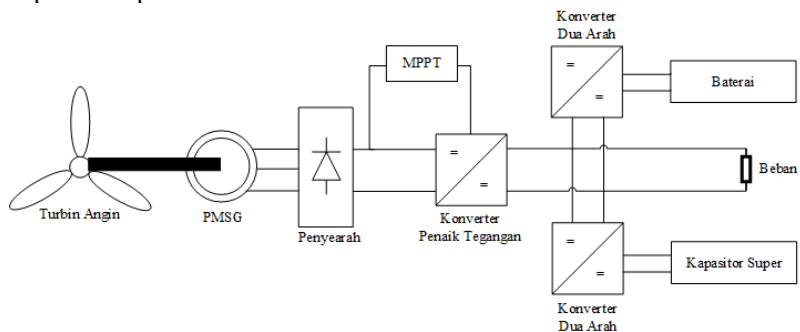
## BAB 3

### PERANCANGAN SISTEM KONVERSI ENERGI ANGIN

Pada bagian ini diuraikan desain dan perancangan serta validasi masing-masing komponen yang akan digunakan pada simulasi penggunaan penyimpanan energi hibrida baterai-kapasitor super pada pembangkit listrik tenaga angin. Pada bab ini pula dicantumkan parameter-parameter yang diperlukan dalam merancang sistem konversi energi angin untuk tugas akhir ini.

#### 3.1 Konfigurasi Sistem Konversi Energi Angin

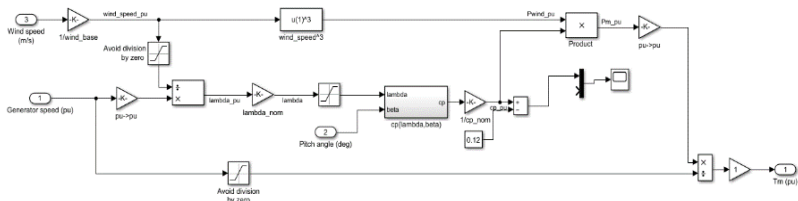
Sistem konversi energi angin yang disimulasikan dalam tugas akhir ini terdiri dari beberapa blok, di antaranya adalah turbin angin, generator sinkron magnet permanen (PMSG), dioda penyearah tegangan 3 fasa, konverter penaik tegangan yang terhubung dengan pengontrol berupa pelacakan titik daya maksimum (MPPT), serta beban resistif yang dihubungkan secara paralel dengan penyimpanan energi berupa baterai dan kapasitor super.



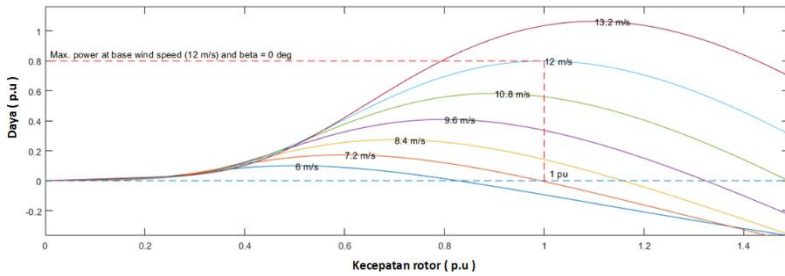
**Gambar 3.1** Permodelan Sistem Konversi Energi Angin

#### 3.2 Permodelan Turbin Angin

Turbin angin merupakan komponen utama dalam sistem konversi energi angin. Turbin angin berfungsi untuk mengubah energi angin menjadi energi mekanik yang akan memutar PMSG. Permodelan turbin angin pada tugas akhir ini menggunakan MATLAB.



**Gambar 3.2** Permodelan Turbin Angin pada MATLAB



**Gambar 3.3** Kurva Karakteristik Turbin Angin

Persamaan (2.2) jika dikonversi kedalam satuan p.u maka, dapat dituliskan sebagai berikut:

$$P_{m\_pu} = k_p \cdot c_p \cdot v_{wind\_pu}^3 \quad (3.1)$$

$P_{m\_pu}$  adalah daya nominal dalam pu pada nilai massa jenis udara dan luas sapuan turbin tertentu.

$k_p$  adalah noinal penguat daya turbin nilainya  $\leq 1$

$c_p$  adalah koefisien daya maksimum dalam pu

Koefisien daya (Cp) pada blok turbin matlab dituliskan sebagai berikut:

$$C_p(\lambda, \beta) = 0,5176 \left( \frac{116}{\lambda_1} - 0,4\beta - 5 \right) e^{-\frac{21}{\lambda_1}} + 0,0068\lambda \quad (3.2)$$

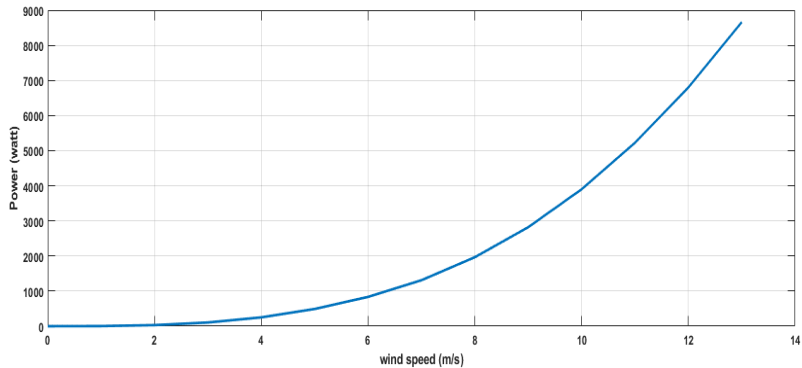
$$\frac{1}{\lambda_1} = \frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1} \quad (3.3)$$

Parameter turbin angin yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

**Tabel 3.1** Parameter Turbin Angin

Rating daya mekanik	8500 W
Daya dasar generator elektrik	8500/0.9 VA
Kecepatana angin dasar	12 m/detik
Daya mekanik maksimum saat kecepatan angin dasar	0,8 pu (6800 watt)

Turbin diuji dengan kecepatan angin berbeda yaitu 0-13 m/detik. Daya keluaran dari turbin angin didapatkan dengan cara mengalikan antara torsi mekanik dengan kecepatan generator. Seperti yang telah dituliskan pada persamaan (2.6). Berikut ini merupakan hasil dari pengujian turbin angin.



**Gambar 3.4** Kurva Kecepatan Angin vs Daya Turbin

### 3.3 Permodelan Generator Sinkron Magnet Permanen

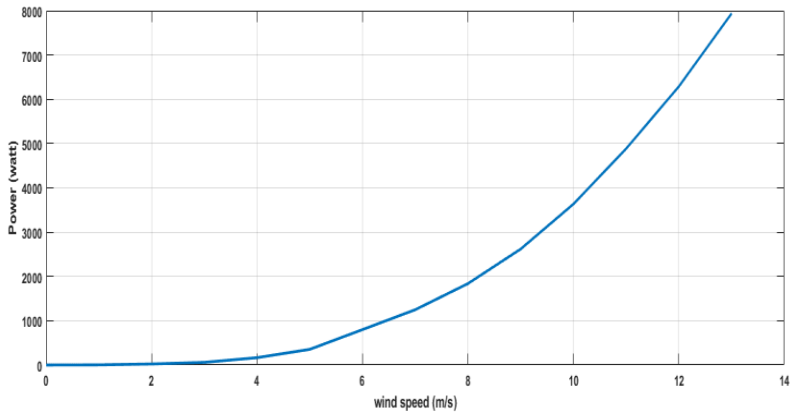
Generator merupakan komponen penting pada sistem konversi energi angin. Generator berfungsi untuk mengubah energi mekanik yang dihasilkan oleh putaran turbin menjadi energi listrik. Salah satu jenis generator yang sering digunakan dalam sistem konversi energi angin adalah generator sinkron magnet permanen (PMSG). Generator jenis ini tidak memerlukan sistem eksitasi karena eksitasinya berasal dari magnet yang terletak pada rotor. Permodelan PMSG pada tugas akhir ini menggunakan Simulink.

Parameter PMSG yang digunakan dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut.

**Tabel 3.2** Parameter PMSG

Resistansi stator	0,09 $\Omega$
Induktansi ( $L_d$ )	8,2 mH
Induktansi ( $L_q$ )	8,2 mH
Pasangan kutub	10
Tegangan maksimum/1000 rpm	785,3751 volt

PMSG diuji dengan menggunakan masukan kecepatan angin bervariasi 0-13 m/detik. Daya keluaran dari PMSG dapat diketahui dengan menggunakan persamaan (2.12). Berikut merupakan hasil dari pengujian PMSG.



**Gambar 3.5** Kurva Kecepatan Angin vs Daya PMSG

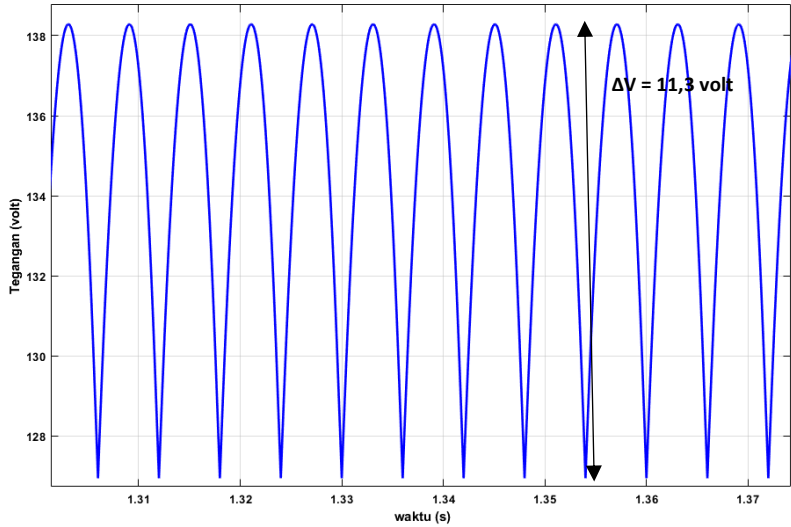
### 3.4 Dioda Penyearah Tegangan 3 Fasa

Untuk mengetahui apakah penyearah bekerja dengan baik maka dilakukan pengujian dengan menggunakan masukan kecepatan angin 12 m/detik. Parameter penyearah adalah sebagai berikut

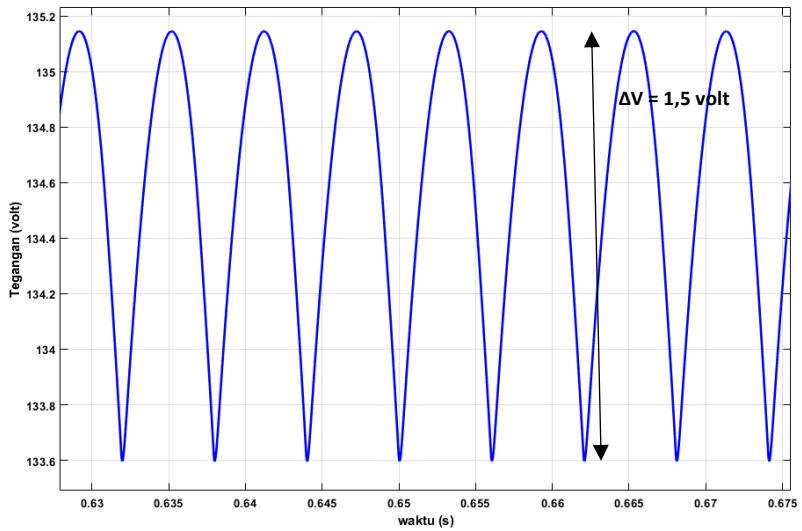
**Tabel 3.3** Parameter Penyearah

$V_m$	140,7 volt
$V_{DC}$	134,37 volt
$\Delta V_{DC}$	$\pm 1\%$
frekuensi	50 Hz
Daya	6800 watt

Berdasarkan persamaan (2.16) diperoleh nilai kapasitor sebesar 0,0148 F



**Gambar 3.6** Tegangan keluaran penyearah tanpa kapasitor



**Gambar 3.7** Tegangan keluaran penyearah dengan kapasitor

Berdasarkan hasil simulasi riak tegangan keluaran penyearah sebelum diberikan kapasitor adalah 11,3 volt. Sedangkan, sesudah ditambahkan kapasitor riak tegangan keluaran mengecil menjadi 1,5 volt. Ini berarti sesuai dengan teori riak tegangan dapat dikurangi dengan menambahkan kapasitor.

### 3.5 Permodelan Konverter Penaik Tegangan

Konverter penaik tegangan pada tugas akhir ini berfungsi untuk mendapatkan daya maksimal dengan mengatur kecepatan generator sesuai dengan siklus kerja optimal berdasarkan kecepatan angin yang menerpa turbin angin. Untuk mendapatkan daya yang maksimal perlu dilakukan perhitungan parameter-parameter pada konverter penaik tegangan. Berikut merupakan nilai-nilai yang ditentukan untuk menghitung parameter konverter penaik tegangan. Nilai tegangan masukan didapat dari pengukuran pada tegangan keluaran PMSG. Pada pengukuran didapat nilai rpm pada kecepatan angin dasar 12 m/detik adalah sebesar 179,140 rpm. Maka nilai tegangan maksimumnya adalah

$$V_m = 179,140 \times \frac{785,3751}{1000}$$

$$V_m = 140,7 \text{ volt}$$

Berdasarkan persamaan (2.14) maka tegangan masukan konverter penaik tegangan adalah

$$V_{dc} = 140,7 \frac{3}{\pi}$$

$$V_{dc} = 134,37$$

**Tabel 3.4** Parameter Konverter Penaik tegangan

Tegangan keluaran	400 V
Tegangan masukan	134,37
Riak tegangan	±1%
Riak arus	±1 A
Frekuensi pensaklaran	5kHz

nilai siklus kerja dapat dihitung sebagai berikut:

$$V_o = V_i \frac{1}{(1 - D)}$$

$$D = 1 - \frac{V_i}{V_o}$$

$$D = 1 - \frac{134,37}{400}$$

$$D = 0.664$$

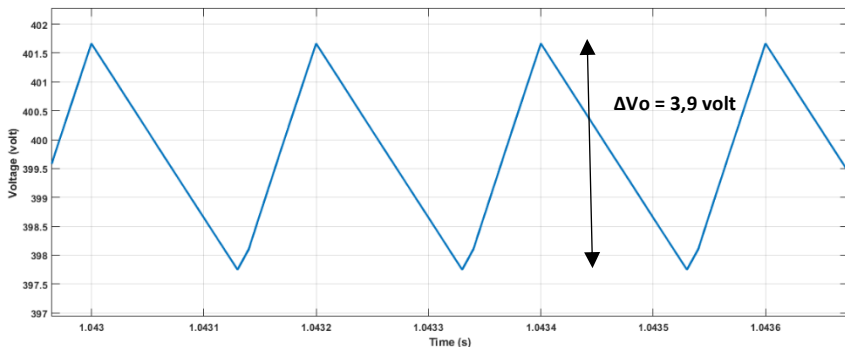
Nilai induktor dapat dicari dengan perhitungan berdasarkan persamaan sebagai berikut:

$$L = V_i \frac{D}{\Delta I f}$$
$$L = \frac{134,37 \cdot 0.664}{1 \cdot 5000}$$
$$L = 0.0178 H$$

$$R = \frac{V_{DC}^2}{P}$$
$$R = \frac{160000}{6800}$$
$$R = 23,53 \Omega$$

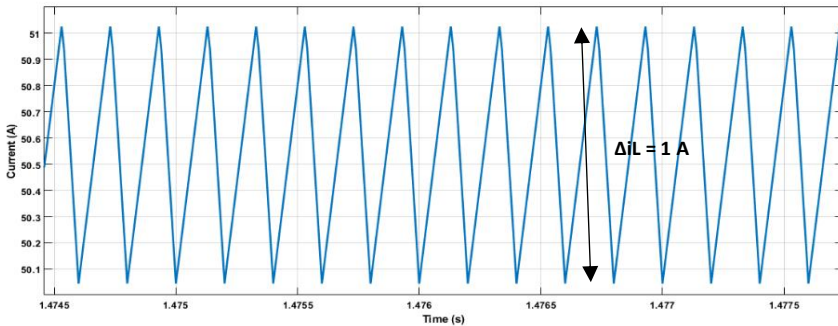
$$C = \frac{(V_o)D}{f \cdot \Delta V \cdot R}$$
$$C = \frac{400 \cdot 0,664}{5000 \cdot 4 \cdot 23,53}$$
$$C = 0,005644638 F$$

Berikut ini merupakan hasil dari pengujian konverter penaik tegangan.



**Gambar 3.8** Riak Tegangan Konverter Penaik Tegangan





**Gambar 3.9** Riak Arus Konverter Penaik Tegangan

Berdasarkan hasil simulasi riak tegangan pada konverter penaik tegangan adalah sebesar 3,9 volt dan riak arus sebesar 1 A. Ini berarti hasil simulasi konverter penaik tegangan sudah sesuai dengan perhitungan.

### 3.6 Permodelan Konverter Dua Arah

Pengontrol konverter dua arah berfungsi untuk mengatur aliran daya dari dan ke sistem penyimpanan energi dengan cara mengatur kondisi saklar. Proses pengisian dan pengosongan dari sistem penyimpanan energi bertujuan untuk menjaga tegangan pada sisi beban dan memenuhi kebutuhan daya yang dibutuhkan oleh beban.

Supaya dapat bekerja sesuai kebutuhan konverter dua arah membutuhkan sebuah pengontrol yang mengatur proses pensaklaran. Pengontrol yang dipakai untuk mengatur kerja dari konverter dua arah ini adalah pengontrol PI. Pada sistem konversi energi angin ini menggunakan dua unit konverter dua arah. Satu unit terhubung dengan baterai dan unit lainnya terhubung dengan kapasitor super.

**Tabel 3.5** Parameter Konverter Dua arah

Tegangan tinggi	400 V
Daya beban ringan kritikal	1000 watt
Riak tegangan	$\pm 1\%$
Siklus kerja	1/3
Frekuensi pensaklaran	25kHz

Menurut referensi[14], siklus kerja 1/3 dipilih supaya memastikan arus induktor dapat beroperasi ketika mode penurunan tegangan dan penaik tegangan sedang berjalan.

Berdasarkan persamaan (2.23) maka:

$$L_{min} \geq \frac{\frac{1}{3} \left(1 - \frac{1}{3}\right)^2 400^2}{2 \times 1000 \times 25000}$$

$$L_{min} \geq 0,5 \text{ mH}$$

Dipilih L sebesar 1 mH

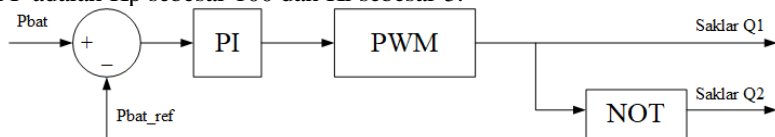
Berdasarkan persamaan (2.24) maka:

$$C = \frac{\left(1 - \frac{1}{3}\right)}{8 \times 0,01 \times 2 \times 10^{-3} \times 25000^2}$$

$$C = 6 \mu F$$

### 3.8.1 Konverter Dua Arah Baterai

Konverter ini bertugas untuk mengatur mode pada baterai untuk mengatur proses tersebut digunakan pengontrol PI. Parameter pengontrol PI adalah Kp sebesar 100 dan Ki sebesar 5.

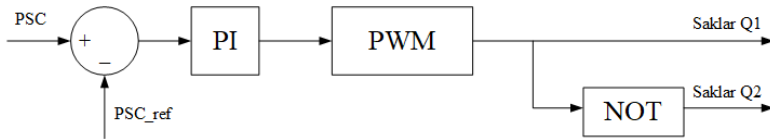


**Gambar 3.10** Pengontrol Konverter Dua Arah Baterai

Pengontrol PI ini bekerja dengan cara membandingkan daya referensi baterai yang telah didapatkan dengan daya baterai. Selisih perbandingan digunakan untuk membangkitkan sinyal modulasi lebar pulsa (*Pulse Width Modulation*) atau PWM yang berfungsi untuk mengatur proses pensaklaran pada saklar Q1 dan Q2 yang menentukan mode pengisian atau pengosongan pada baterai.

### 3.8.2 Konverter Dua Arah Kapasitor Super

Konverter ini bertugas untuk mengatur mode pada kapasitor super untuk mengatur proses tersebut digunakan pengontrol PI. Parameter pengontrol PI adalah Kp sebesar 1000 dan Ki sebesar 50



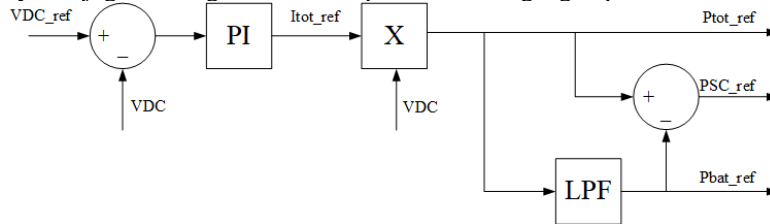
**Gambar 3.11** Pengontrol Konverter Dua Arah Kapasitor super

Pengontrol PI ini bekerja dengan cara membandingkan daya referensi kapasitor super yang telah didapatkan dengan daya kapasitor super. Selisih perbandingan digunakan untuk membangkitkan sinyal modulasi lebar pulsa (*Pulse Width Modulation*) atau PWM yang berfungsi untuk mengatur proses pensaklaran pada saklar Q1 dan Q2 yang menentukan mode pengisian atau pengosongan pada kapasitor super.

### 3.7 Permodelan Sistem Manajemen Daya

Sistem konversi energi angin pada tugas akhir ini menggunakan sistem penyimpanan energi hibrida baterai dan supekapasitor. Oleh karena itu dibutuhkan suatu sistem yang dapat memajemen pembagian besarnya daya yang harus diserap atau dikeluarkan oleh masing-masing penyimpan energi.

Sistem manajemen daya ini bertujuan supaya baterai dapat memenuhi kebutuhan transien daya yang lambat. Sedangkan kapasitor super memenuhi kebutuhan transien daya yang cepat. Sistem manajemen daya ini juga berfungsi untuk mempertahankan tegangan pada Sisi beban.



**Gambar 3.12** Permodelan Sistem Manajemen Daya

Prinsip kerja dari sistem manajemen daya ini adalah dengan membandingkan antara tegangan Sisi beban referensi dan tegangan Sisi beban. Kemudian hasilnya akan melewati sebuah pengontrol PI yang bertindak sebagai kompensator. Parameter dari pengontrol PI adalah  $K_p$  sebesar 1,1 dan  $K_i$  sebesar 0,75. Keluaran dari kompensator merupakan arus total yang harus disuplai oleh sistem penyimpanan energi hibrida. Lalu

arus total ini dikalikan dengan tegangan Sisi beban sehingga menghasilkan kebutuhan daya total yang harus disuplai oleh sistem penyimpan energi hibrida. Kemudian total ini dibagi menjadi kebutuhan transien daya lambat dan kebutuhan transien daya cepat menggunakan tapis lolos rendah (*lowpass filter*). Kebutuhan transien daya lambat akan menjadi daya referensi yang harus disuplai baterai. Sedangkan kebutuhan transien daya cepat akan menjadi daya referensi yang harus disuplai oleh kapasitor super.

Transfer fungsi dari tapis lolos rendah adalah sebagai berikut:

$$H(s) = \frac{\omega_c}{s + \omega_c}$$

$$H(s) = \frac{1}{1 + s/\omega_c}$$

$$\omega_c = 2\pi f_c$$

Batas frekuensi yang digunakan adalah 1 Hz, sehingga:

$$\omega_c = 2\pi \times 1$$

$$\omega_c = 2\pi$$

Maka transfer fungsi dari tapis lolos rendah adalah

$$H(s) = \frac{1}{1 + 0,16s}$$

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **BAB 4**

### **HASIL DAN PEMBAHASAN**

Pada bagian ini, akan dibahas mengenai hasil dan analisis dari simulasi sistem konversi energi angin dengan menggunakan baterai saja sebagai media penyimpanan energi dan menggunakan sistem penyimpan energi hibrida baterai-kapasitor super. Pada simulasi ini akan menggunakan masukan kecepatan angin yang konstan pada 9 m/detik. Serta akan menggunakan kecepatan angin yang bervariasi antara 8 m/detik – 12 m/detik.

Selain menggunakan 2 model masukan kecepatan angin tersebut. Dalam simulasi ini juga akan menggunakan daya beban konstan sebesar 3000 watt. Serta daya beban bervariasi dari 2500 – 3500 watt.

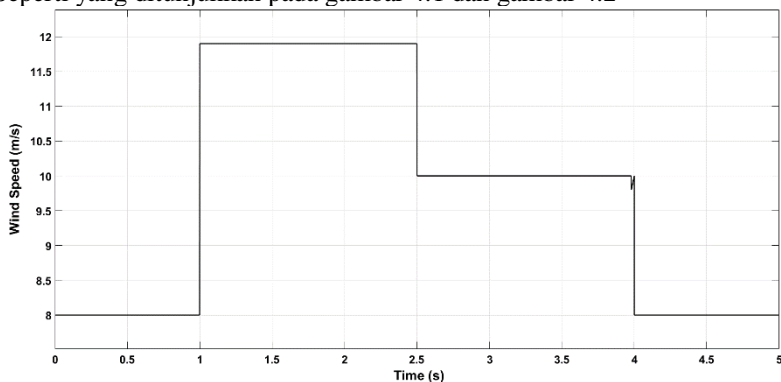
Pada bagian ini akan dibagi menjadi 3 studi kasus. Yaitu, studi kasus pertama menggunakan kecepatan angin bervariasi dan beban konstan. Studi kasus kedua menggunakan kecepatan angin konstan dan beban bervariasi. Sedangkan studi kasus ketiga menggunakan kecepatan angin dan beban yang bervariasi. Lalu dari ketiga studi kasus tersebut akan dilihat pengaruh penambahan kapasitor super terhadap arus dan tegangan dari baterai.

#### **4.1 Hasil Simulasi Penggunaan Sistem Penyimpan Energi Sebagai Pengatur Tegangan Pada Sistem Konversi Energi Angin**

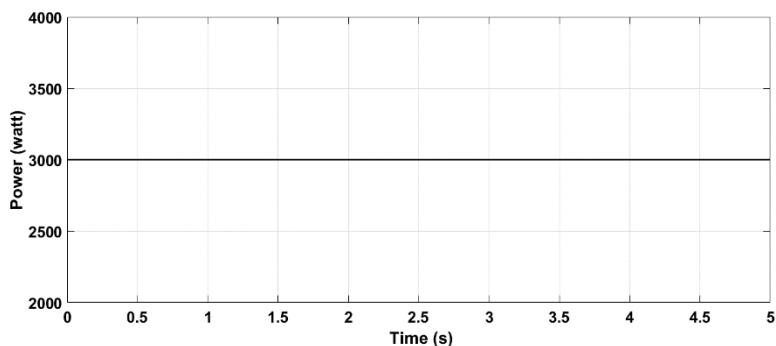
Pada bagian ini akan dilakukan simulasi penggunaan penyimpanan energi baterai maupun hibrida baterai-kapasitor super pada sistem konversi energi angin. Pengontrol konverter dua arah digunakan untuk mempertahankan tegangan pada sisi beban dan memenuhi kebutuhan daya yang dibutuhkan oleh sistem. Untuk mengetahui pengaruh penggunaan penyimpan energi pada sistem konversi angin maka akan dilakukan beberapa studi kasus. Diantaranya kasus pertama pada saat kecepatan angin bervariasi dan kebutuhan daya konstan, kasus kedua pada saat kecepatan angin konstan dan kebutuhan daya bervariasi dan kasus ketiga pada saat kecepatan angin dan kebutuhan daya bervariasi.

### 4.1.1 Kasus 1 : Kecepatan Angin Bervariasi dan Kebutuhan Daya Konstan

Simulasi pertama yang dilakukan adalah dengan memberi kecepatan angin bervariasi pada sistem dan mempertahankan kebutuhan daya konstan. Kecepatan angin yang diberikan ke sistem bervariasi dari 8 m/detik - 12 m/detik serta kebutuhan daya konstan sebesar 3000 watt. Seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.1 dan gambar 4.2



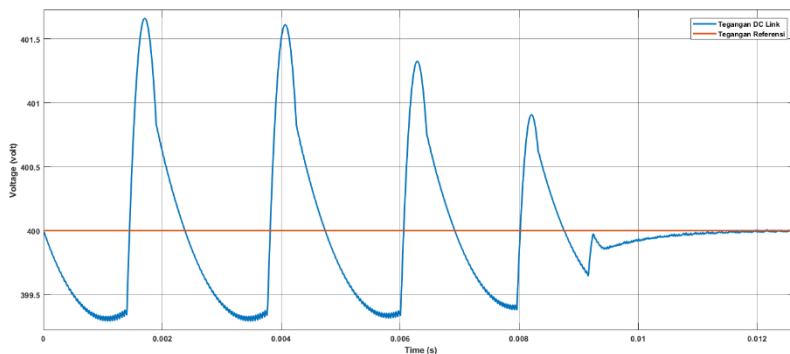
Gambar 4.1 Permodelan Kecepatan Angin Bervariasi



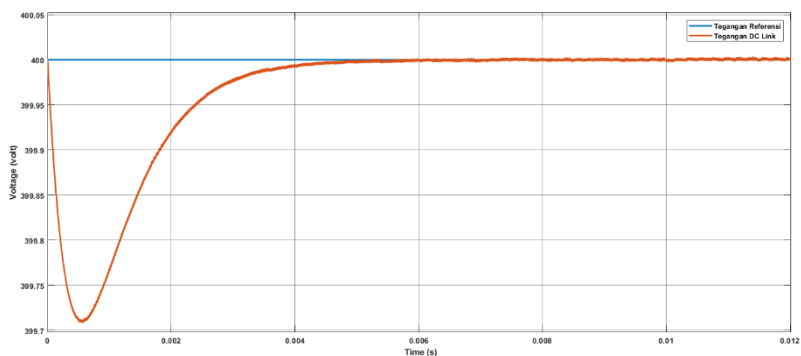
Gambar 4.2 Permodelan Beban Konstan

Pada simulasi ini akan disimulasikan dua jenis penyimpanan energi yang telah disebutkan pada awal subab 4.1 baterai yang dikontrol oleh konverter dua arah. Serta penyimpanan energi hibrida baterai dan kapasitor super yang dikontrol penuh juga oleh konverter dua arah. Pengontrol PI dipakai untuk memberi perintah kepada konverter dua arah supaya

kebutuhan daya pada sistem dapat dipenuhi dan dapat mempertahankan tegangan pada sisi beban. Melalui proses pengisian dan pengosongan pada masing-masing penyimpan energi. Berikut merupakan hasil simulasi pada kasus 1.



**Gambar 4.3** Riak Tegangan sisi beban pada Sistem Penyimpan Energi Baterai

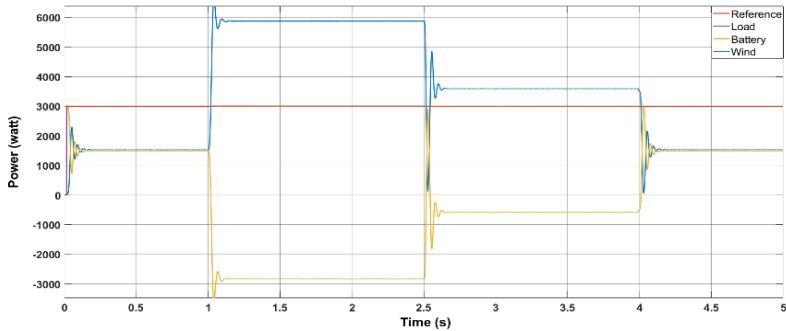


**Gambar 4.4** Riak Tegangan Sisi Beban pada Sistem Penyimpan Energi Hibrida

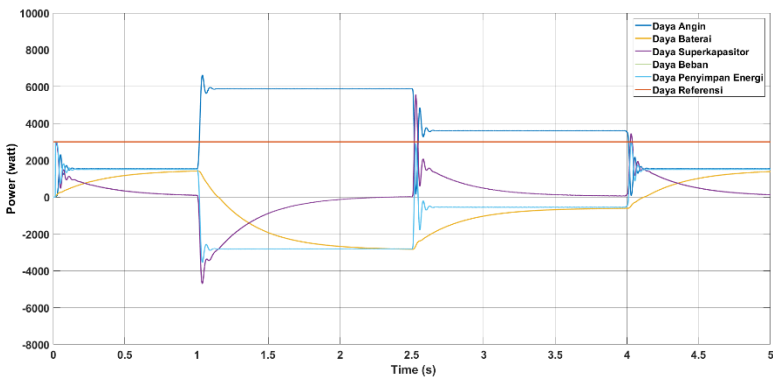
Berdasarkan hasil percobaan tersebut kedua jenis sistem penyimpanan energi sudah dapat menjaga tegangan pada sisi beban pada tegangan 400 volt dengan baik. Artinya pengontrol pada masing-masing sistem penyimpanan energi sudah bekerja dengan baik. Pada sistem



penyimpan energi baterai terdapat riak yang lebih besar daripada yang terdapat pada sistem penyimpanan energi hibrida. Pada sistem penyimpanan energi baterai terdapat riak sebesar 2,4 volt, sedangkan pada sistem penyimpanan energi hibrida hanya sebesar 0,3 volt.



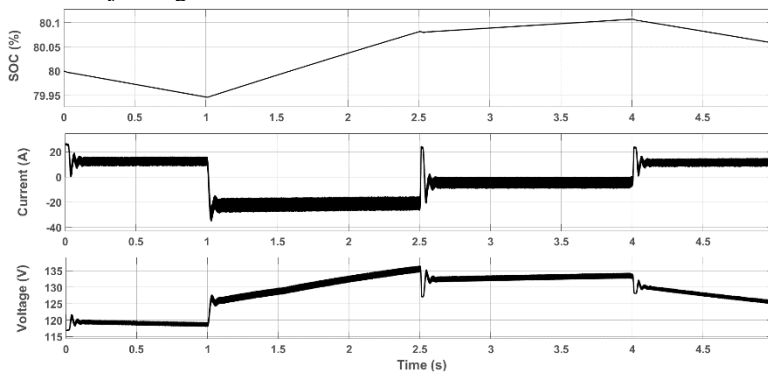
**Gambar 4.5** Daya Angin, Daya Beban, Daya Referensi (Kebutuhan Daya) Kasus 1 dan Daya Baterai pada Sistem Penyimpanan Energi Baterai



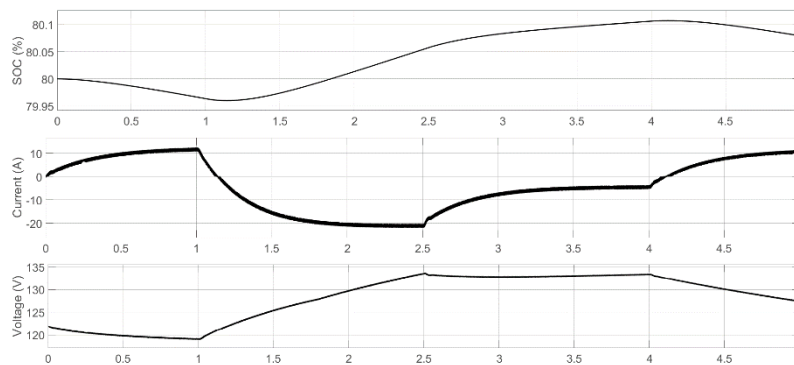
**Gambar 4.6** Daya Angin, Daya Beban, Daya Referensi (Kebutuhan Daya), Daya Kapasitor super, Daya Baterai dan Daya Penyimpanan Energi pada Sistem Penyimpanan Energi Hibrida

Berdasarkan hasil diatas kedua sistem penyimpanan energi dapat memenuhi kebutuhan daya pada beban sebesar 3000 watt dengan baik walaupun kecepatan angin yang masuk ke sistem bervariasi. Pada kedua

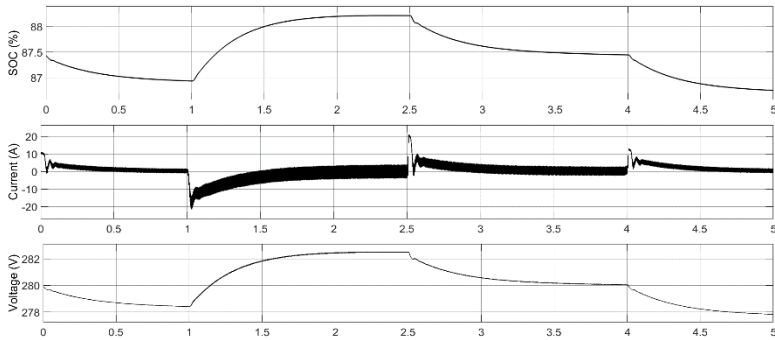
jenis penyimpan energi konverter dua arah akan mengatur supaya penyimpan energi menyuplai daya ke sistem jika daya angin lebih kecil daripada daya beban. Dan akan menyerap daya dari sistem jika daya angin lebih besar daripada daya beban. Oleh karena itu kebutuhan beban pada sistem akan selalu terpenuhi dengan baik. Hal ini menandakan bahwa pengontrol konverter dua arah pada kedua jenis penyimpan energi tersebut telah bekerja dengan baik.



**Gambar 4.7** SOC, Arus dan Tegangan Baterai pada Sistem Penyimpanan Energi Baterai



**Gambar 4.8** SOC, Arus dan Tegangan Baterai pada Sistem Penyimpanan Energi Hibrida



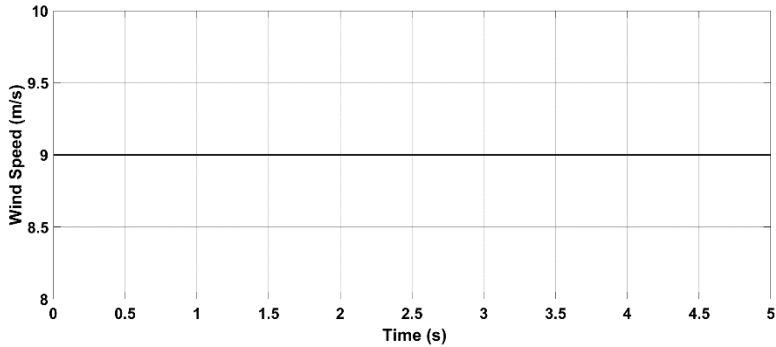
**Gambar 4.9** SOC, Arus dan Tegangan Kapasitor super pada Sistem Penyimpan Energi Hibrida

Dari hasil simulasi pada gambar 4.7 pada sistem penyimpanan energi baterai terdapat lonjakan arus dan tegangan pada saat terjadi perubahan kecepatan angin. Sedangkan pada saat yang sama menggunakan sistem penyimpanan energi hibrida pada gambar 4.8 tidak terdapat lonjakan arus dan tegangan pada sistem penyimpanan energi baterai. Pada detik ke-1 pada sistem penyimpanan energi baterai terdapat lonjakan arus sebesar 52,31 A dan lonjakan tegangan sebesar 10 volt, pada detik ke-2,5 terdapat lonjakan arus sebesar 51,18 A dan lonjakan tegangan sebesar 10,2 volt, dan pada detik ke-4 terjadi lonjakan arus sebesar 33,53 A dan lonjakan tegangan sebesar 6,4 volt. Sedangkan pada sistem penyimpanan energi baterai pada saat terjadi perubahan kecepatan angin arus dan tegangan pada baterai akan naik atau turun secara perlahan. lonjakan terdapat pada arus dan tegangan kapasitor super pada gambar 4.9. Ini menunjukkan lonjakan arus dan daya yang terjadi pada sistem diserap oleh kapasitor super, sehingga kerja dari baterai menjadi lebih ringan dan mengurangi kejenuhan pada baterai sehingga dapat memperpanjang usia pakai baterai.

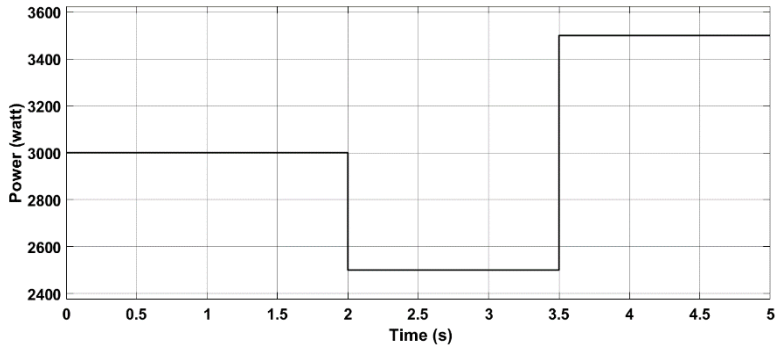
#### 4.1.2 Kasus 2 : Kecepatan Angin Konstan dan Kebutuhan Daya Bervariasi

Simulasi kedua yang dilakukan adalah dengan memberi kecepatan angin konstan pada sistem dan memberikan kebutuhan daya variatif. Kecepatan angin yang diberikan ke sistem adalah konstan sebesar 9 m/detik

serta kebutuhan daya bervariasi dari 2500-3500 watt. Pada detik ke-0 sampai detik ke-2 kebutuhan daya sebesar 3000 watt, kemudian pada detik ke-2 sama detik ke-3,5 besarnya kebutuhan daya adalah 2500 watt sedangkan pada detik ke 3,5 sampai detik ke 5 kebutuhan daya sebesar 3500 watt. Seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.13 dan gambar 4.14

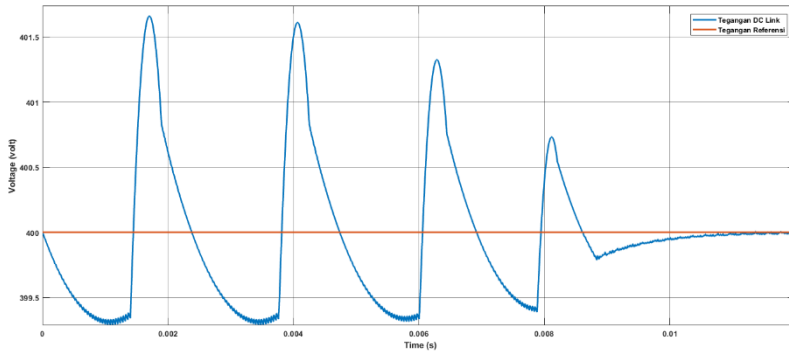


**Gambar 4.10** Permodelan Kecepatan Angin Konstan

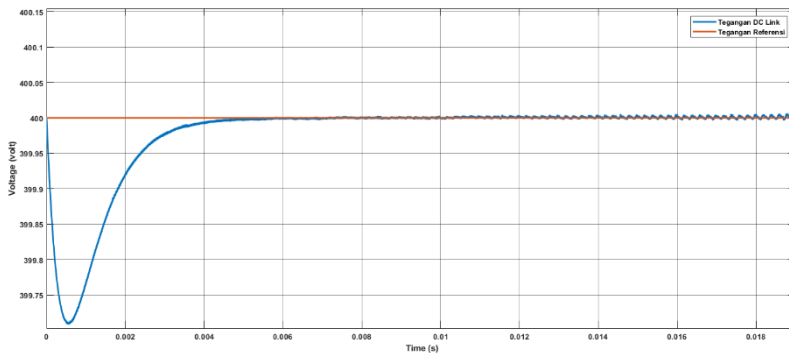


**Gambar 4.11** Permodelan Beban Bervariasi

Pada simulasi ini kedua sistem penyimpanan energi pada kasus 1 akan diuji dengan masukan kecepatan angin dan beban yang berbeda dari kasus sebelumnya. Berikut merupakan hasil dari simulasi kasus 2.

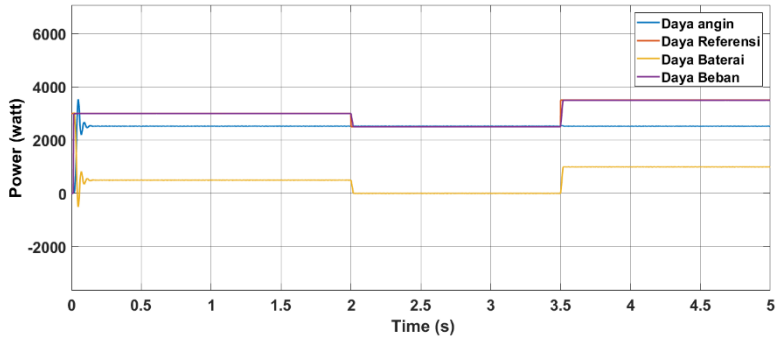


**Gambar 4.12** Riak Tegangan Pada Sisi Beban dengan Sistem Penyimpan Energi Baterai

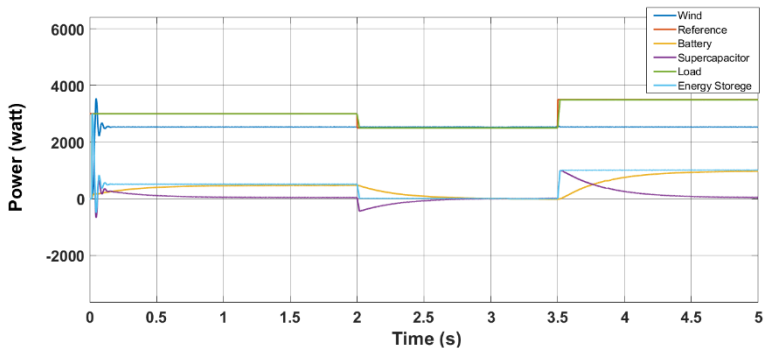


**Gambar 4.13** Riak Tegangan Pada Sisi Beban dengan Sistem Penyimpan Energi Hibrida

Berdasarkan hasil percobaan tersebut kedua jenis sistem penyimpanan energi sudah dapat menjaga tegangan pada Sisi beban pada tegangan 400 volt dengan baik. Artinya pengontrol pada masing-masing sistem penyimpanan energi sudah bekerja dengan baik. Pada sistem penyimpanan energi baterai terdapat riak sebesar 2,4 volt, sedangkan pada sistem penyimpanan energi hibrida hanya sebesar 0,3 volt.



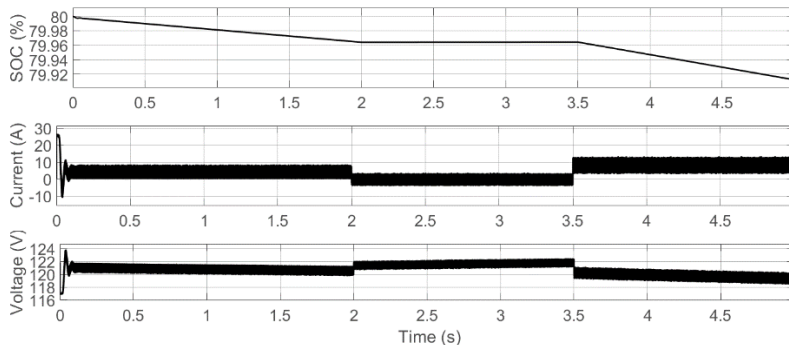
**Gambar 4.14** Daya Angin, Daya Beban, Daya Referensi (Kebutuhan Daya) Kasus 1 dan Daya Baterai pada Sistem Penyimpan Energi Baterai



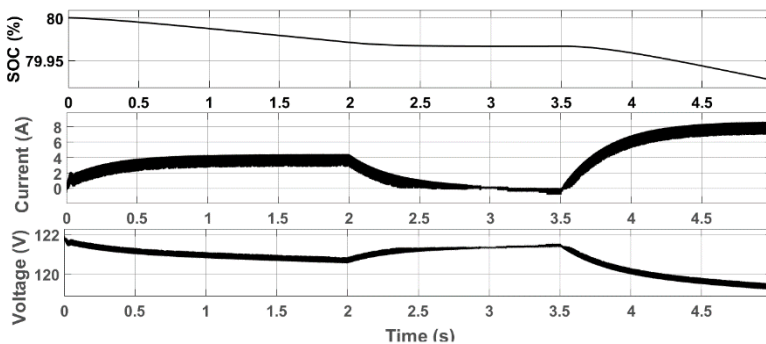
**Gambar 4.15** Daya Angin, Daya Beban, Daya Referensi Kasus 1, Daya Kapasitor super, Daya Baterai dan Daya Penyimpan Energi pada Sistem Penyimpan Energi Hibrida

Berdasarkan hasil diatas kedua sistem penyimpanan energi dapat memenuhi kebutuhan daya pada beban sebesar 3000 watt pada detik ke-0 sampai detik ke-2, 2500 watt pada detik ke-2 sampai detik-3,5 dan 3500 watt pada detik ke-3,5 sampai detik ke-5 dengan baik. Pada kedua jenis penyimpan energi konverter dua arah akan mengatur supaya penyimpan energi menyuplai daya ke sistem jika daya angin lebih kecil daripada daya beban. Dan akan menyerap daya dari sistem jika daya angin lebih besar daripada daya beban. Pada sistem ini berdasarkan hasil simulasi kebutuhan daya pada sistem selalu dapat dipenuhi dengan baik. Menandakan bahwa

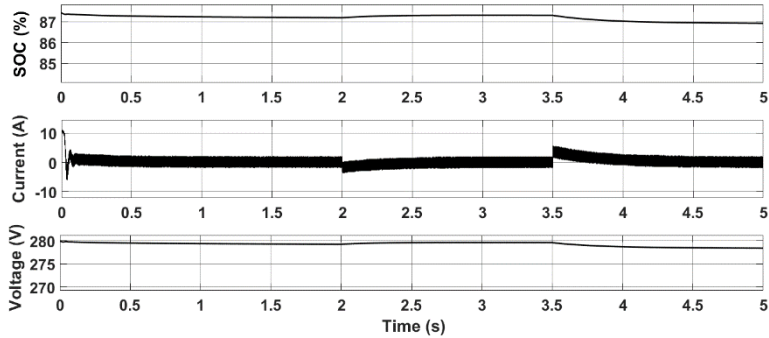
pengontrol konverter dua arah pada kedua jenis penyimpan energi tersebut telah bekerja dengan baik.



**Gambar 4.16** SOC, Arus dan Tegangan Baterai pada Sistem Penyimpan Energi Baterai



**Gambar 4.17** SOC, Arus dan Tegangan Baterai pada Sistem Penyimpan Energi Hibrida



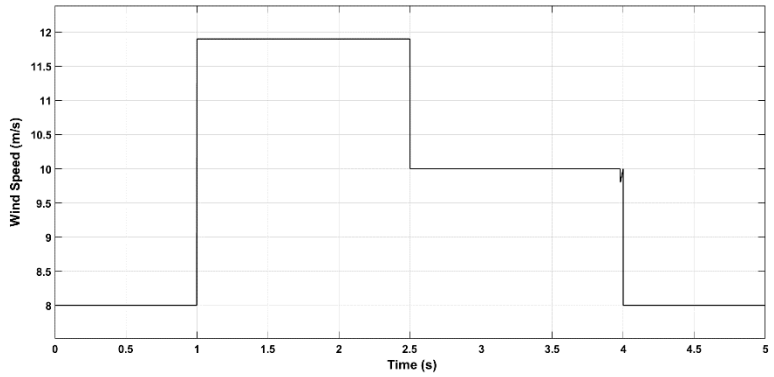
**Gambar 4.18** SOC, Arus dan Tegangan Kapasitor super pada Sistem Penyimpan Energi Hibrida

Dari hasil simulasi pada gambar 4.16 pada sistem penyimpanan energi baterai terdapat lonjakan arus dan tegangan pada saat terjadi perubahan beban. Sedangkan pada saat yang sama menggunakan sistem penyimpanan energi hibrida pada gambar 4.17 tidak terdapat lonjakan arus dan tegangan pada sistem penyimpanan energi baterai. Pada detik ke-2 pada sistem penyimpanan energi baterai terdapat lonjakan arus sebesar 13,02 A dan lonjakan tegangan sebesar 2,2 volt, pada detik ke-3,5 terdapat lonjakan arus sebesar 18,66 A dan lonjakan tegangan sebesar 3,4 volt. Sedangkan pada sistem penyimpanan energi baterai pada saat terjadi perubahan kecepatan angin arus dan tegangan pada baterai akan naik atau turun secara perlahan. lonjakan terdapat pada arus dan tegangan kapasitor super pada gambar 4.18. Ini menunjukkan lonjakan arus dan daya yang terjadi pada sistem diserap oleh kapasitor super, sehingga kerja dari baterai menjadi lebih ringan dan mengurangi kejenuhan pada baterai sehingga dapat memperpanjang usia pakai baterai.

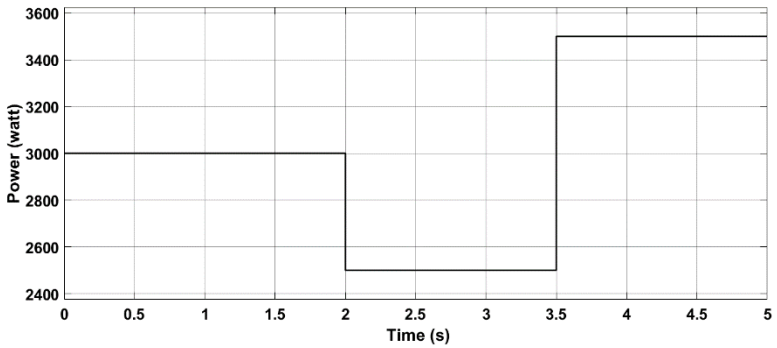
#### 4.1.3 Kasus 3 : Kecepatan Angin dan Kebutuhan Daya Bervariasi

Simulasi ketiga yang dilakukan adalah dengan memberi kecepatan angin bervariasi pada sistem dan memberikan kebutuhan daya yang bervariasi pula. Kecepatan angin yang diberikan ke sistem bervariasi dari 8 m/detik - 12 m/detik serta kebutuhan daya konstan sebesar 2500-3500 watt. Seperti yang ditunjukkan pada gambar



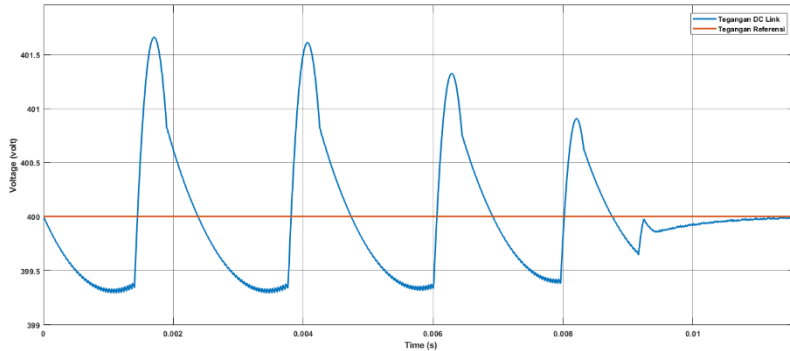


**Gambar 4.19** Permodelan Kecepatan Angin Bervariasi

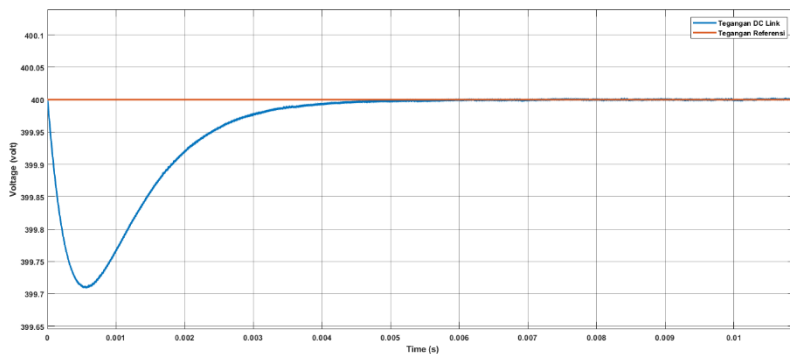


**Gambar 4.20** Permodelan Beban Bervariasi

Berikut ini merupakan hasil dari kasus 3.

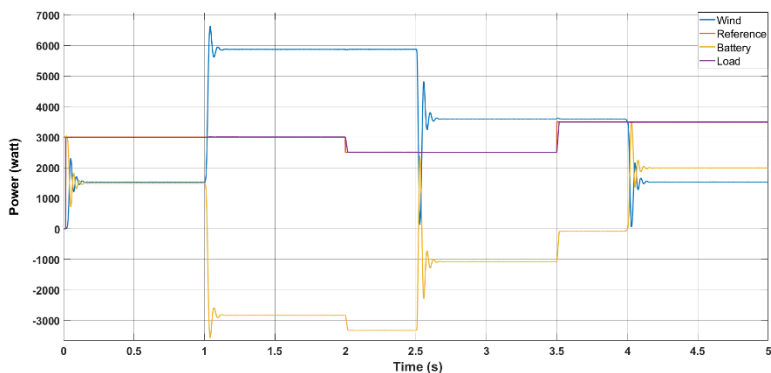


**Gambar 4.21** Riak Tegangan Pada Sisi Beban dengan Sistem Penyimpanan Energi Baterai

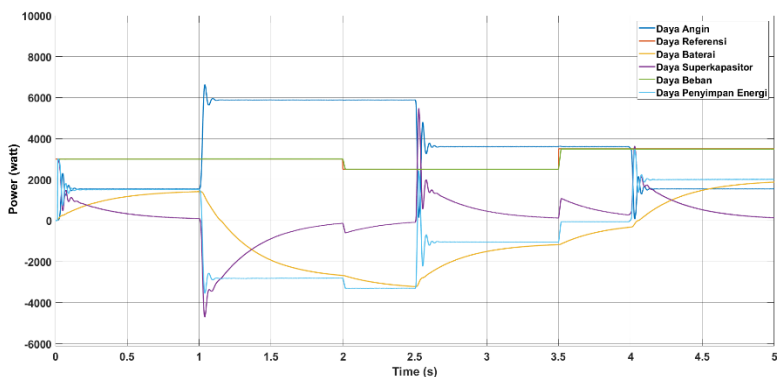


**Gambar 4.22** Riak Tegangan Pada Sisi Beban dengan Sistem Penyimpanan Energi Hibrida

Berdasarkan hasil percobaan tersebut kedua jenis sistem penyimpanan energi sudah dapat menjaga tegangan pada Sisi Beban pada tegangan 400 volt dengan baik. Artinya pengontrol pada masing-masing sistem penyimpanan energi sudah bekerja dengan baik. Pada sistem penyimpanan energi baterai terdapat riak sebesar 2,4 volt, sedangkan pada sistem penyimpanan energi hibrida hanya sebesar 0,3 volt.



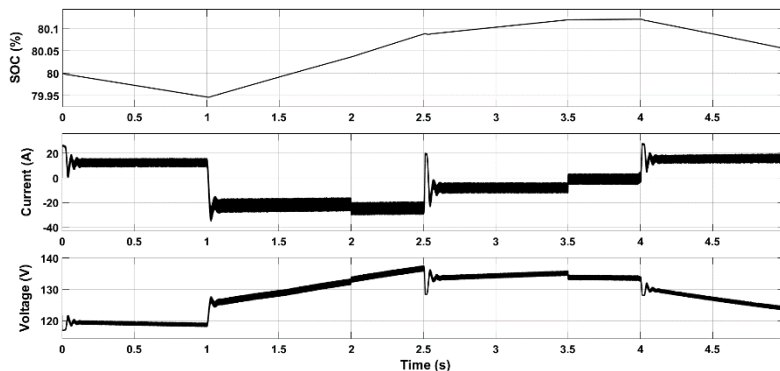
**Gambar 4.23** Daya Angin, Daya Beban, Daya Referensi (Kebutuhan Daya) Kasus 3, Daya Baterai pada Sistem Penyimpanan Energi Baterai



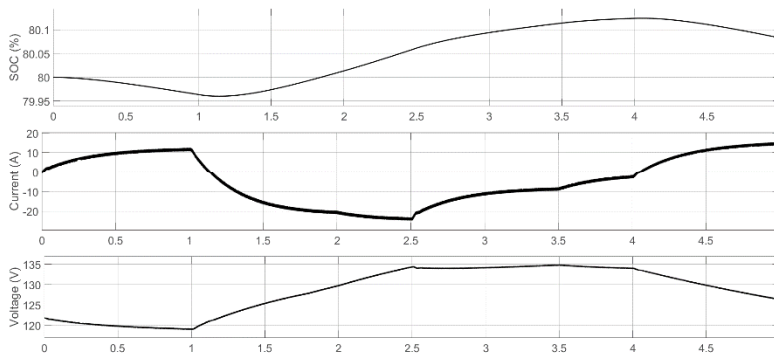
**Gambar 4. 24** Daya Angin, Daya Beban, Daya Referensi (Kebutuhan Daya) Kasus 3, Daya Kapasitor super, Daya Baterai dan Daya Penyimpanan Energi pada Sistem Penyimpanan Energi Hibrida

Dari hasil simulasi diatas kebutuhan daya pada sistem dapat dipenuhi oleh kedua sistem penyimpanan daya dengan baik. Ini menandakan bahwa konverter dua arah dapat mengontrol aliran daya dari dan ke sistem/penyimpanan daya. Daya baterai pada sistem pertama menunjukkan perubahan-perubahan yang ekstrem berbeda dengan daya baterai pada sistem kedua ini dapat menyebabkan baterai menjadi cepat rusak. Terlihat pula

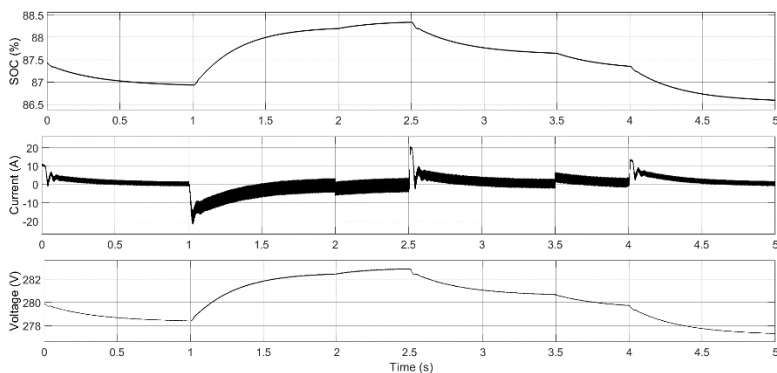
kapasitor super hanya bekerja ketika baterai tidak mampu memenuhi kebutuhan pada beban.



**Gambar 4.25** SOC, Arus dan Tegangan Baterai pada Sistem Penyimpan Energi Baterai



**Gambar 4.26** SOC, Arus dan Tegangan Baterai pada Sistem Penyimpan Energi Hibrida



**Gambar 4.27** SOC, Arus dan Tegangan Kapasitor super pada Sistem Penyimpan Energi Hibrida

Dari hasil simulasi pada gambar 4.25 pada sistem penyimpanan energi baterai terdapat lonjakan arus dan tegangan pada saat terjadi perubahan kecepatan angin dan beban. Sedangkan pada saat yang sama menggunakan sistem penyimpanan energi hibrida pada gambar 4.26 tidak terdapat lonjakan arus dan tegangan pada sistem penyimpanan energi baterai. Pada detik ke-1 pada sistem penyimpanan energi baterai terdapat lonjakan arus sebesar 53,98 A dan lonjakan tegangan sebesar 10 volt, pada detik ke-2 terdapat lonjakan arus sebesar 18,57 A dan lonjakan tegangan sebesar 2,6 volt, pada detik ke-2,5 terdapat lonjakan arus sebesar 51,8 A dan lonjakan tegangan sebesar 9,8 volt, pada detik ke-3,5 terdapat lonjakan arus sebesar 16,96 A dan lonjakan tegangan sebesar 3,5 volt, dan pada detik ke-4 terjadi lonjakan arus sebesar 34,54 A dan lonjakan tegangan sebesar 6,7 volt. Sedangkan pada sistem penyimpanan energi baterai pada saat terjadi perubahan kecepatan angin arus dan tegangan pada baterai akan naik atau turun secara perlahan. Lonjakan terdapat pada arus dan tegangan kapasitor super pada gambar 4.27. Ini menunjukkan lonjakan arus dan daya yang terjadi pada sistem diserap oleh kapasitor super, sehingga kerja dari baterai menjadi lebih ringan dan mengurangi kejenuhan pada baterai sehingga dapat memperpanjang usia pakai baterai.

## **BAB 5**

### **PENUTUP**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan simulasi yang telah dilakukan dengan menggunakan dua jenis sistem penyimpanan energi, yaitu baterai dan hibrida baterai-kapasitor super, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Kapasitor super dapat melindungi baterai dari arus dan tegangan transien yang cepat yang dapat merusak baterai.
2. Berdasarkan hasil yang didapatkan pada sistem penyimpanan energi hibrida. Lonjakan arus dan tegangan yang terjadi pada baterai lebih kecil daripada yang terjadi pada system penyimpanan energi baterai saja.
3. Penggunaan penyimpan energi dapat mengatasi fluktuasi yang berasal dari sisi turbin angin ataupun dari perubahan beban.
4. Pada sistem penyimpanan energi baterai terdapat riak tegangan sisi beban sebesar 2,4 volt. Sedangkan pada sistem penyimpanan energi hibrida riak tegangan sisi beban hanya sebesar 0,3 volt.
5. Pada kasus kecepatan angin bervariasi dan kebutuhan daya tetap. Saat menggunakan sistem penyimpan energi baterai terdapat lonjakan arus dan tegangan pada baterai. Lonjakan arus baterai pada detik ke-1, ke-2,5 dan ke-4 secara berturut-turut adalah sebesar 52,31 A, 51,18 A, dan 33,53 A. Lonjakan arus baterai pada detik yang sama secara berturut-turut adalah sebesar 10 volt, 10,2 volt, dan 6,4 volt. Sedangkan pada sistem penyimpanan energi hibrida tidak ditemui lonjakan arus dan tegangan pada baterai.
6. Pada kasus kecepatan angin konstan dan kebutuhan daya bervariasi. Saat menggunakan sistem penyimpan energi baterai terdapat lonjakan arus dan tegangan pada baterai. Lonjakan arus baterai pada detik ke-2 dan ke-3,5 secara berturut-turut adalah sebesar 13,02 A dan 18,66 A. Lonjakan arus baterai pada detik yang sama secara berturut-turut adalah sebesar 2,2 volt dan 3,4 volt. Sedangkan pada sistem penyimpan energi hibrida tidak ditemui lonjakan arus dan tegangan pada baterai.
7. Pada kasus kecepatan angin bervariasi dan kebutuhan daya bervariasi. Saat menggunakan sistem penyimpan energi baterai terdapat lonjakan arus dan tegangan pada baterai. Lonjakan arus

baterai pada detik ke-1, ke-2, ke-2,5, ke-3,5, dan ke-4 secara berturut-turut adalah sebesar 53,98 A, 18,57 A, 51,8 A, 16,96 A dan 34,54 A. Lonjakan arus baterai pada detik yang sama secara berturut-turut adalah sebesar 10 volt, 2,6 volt, 9,8 volt, 3,5 volt, dan 6,7 volt. Sedangkan pada sistem penyimpan energi hibrida tidak ditemui lonjakan arus dan tegangan pada baterai.

## **5.2 Saran**

Berkaca pada sistem manajemen daya yang masih memiliki kekurangan alangkah baiknya pada penelitian selanjutnya menggunakan sebuah algoritma yang dapat lebih mengurangi lonjakan arus dan tegangan pada baterai.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] “RENEWABLES 2017 GLOBAL STATUS REPORT.” [Online]. Available: <http://www.ren21.net/gsr-2017/>.
- [2] A. Abrantes, “Overview of Power Quality Aspects in Wind Generation,” vol. 80521, no. 2, 2012.
- [3] R. Abdelhedi, A. Sari, and P. Venet, “Optimal power sharing between batteries and supercapacitors in electric vehicles,” pp. 97–103, 2016.
- [4] R. I. K. A. Putri, D. Pembimbing, P. Doktor, D. T. Elektro, and F. T. Elektro, “Pengembangan Strategi Kontrol Optimal Pada PMSG Wind Turbine Melalui Sistem Penyimpan Energi Berbasis Algoritma Swarm Intelligence,” 2017.
- [5] N. Mendis, K. M. Muttaqi, and S. Perera, “Management of Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage and Synchronous Condenser for Isolated Operation of PMSG Based Variable-Speed Wind Turbine Generating Systems,” vol. 5, no. 2, pp. 944–953, 2014.
- [6] S. K. Kollimalla, S. Member, M. K. Mishra, S. Member, and N. L. Narasamma, “Design and Analysis of Novel Control Strategy for Battery and Supercapacitor Storage System,” vol. 5, no. 4, pp. 1137–1144, 2014.
- [7] R. P. Eviningsih *et al.*, “PENGATURAN KONVERTER DC-DC MODIFIED PERTURBATION AND OBSERVATION BIDIRECTIONAL DENGAN MPPT BERBASIS MODIFIED PERTURBATION AND OBSERVATION,” 2017.
- [8] D. A. Ernadi, M. Pujiantara, M. H. Purnomo, J. T. Elektro, and F. T. Industri, “Desain Maximum Power Point Tracking untuk Turbin Angin Menggunakan Modified Perturb & Observe (P&O) Berdasarkan Prediksi Kecepatan Angin,” vol. 3539, no. 2, 2016.
- [9] “Experiments on Horizontal and Vertical Axis Water.” [Online]. Available: <https://nanopdf.com/download/experiments-on->



horizontal-and-vertical-axis-water\_pdf.

- [10] “a typical configuration and main component of horizontal axis geared wind turbine system.” [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/figure/A-typical-configuration-and-main-components-of-horizontal-axis-geared-wind-turbine-system\\_fig1\\_268352644](https://www.researchgate.net/figure/A-typical-configuration-and-main-components-of-horizontal-axis-geared-wind-turbine-system_fig1_268352644).
- [11] M. Ashari, *Sistem Konverter DC : Desain Rangkaian Elektronika Daya*. Surabaya: ITS Press, 2012.
- [12] K. Han and G. Chen, “A Novel Control Strategy of Wind Turbine MPPT Implementation for Direct-drive PMSG Wind Generation Imitation Platform,” vol. 3, pp. 2255–2259.
- [13] M. A. Abdullah, A. H. M. Yatim, C. W. Tan, and R. Saidur, “A review of maximum power point tracking algorithms for wind energy systems,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 5, pp. 3220–3227, 2012.
- [14] K. Chao, M. Tseng, C. Huang, Y. Liu, and L. Huang, “Design and Implementation of a Bidirectional DC-DC Converter for Stand-Alone Photovoltaic Systems The Proposed Bidirectional Buck-Boost Converter,” vol. 2, no. 3, 2013.
- [15] T. Ma, H. Yang, and L. Lu, “Development of hybrid battery – supercapacitor energy storage for remote area renewable energy systems q,” *Appl. Energy*, 2014.
- [16] “What is a Lead-Acid Battery?” [Online]. Available: <https://www.off-grid-europe.com/info/lead-acid-battery/>.
- [17] M. R2017b, “Battery.” p. Implement Generic Battery Model, 2017.
- [18] P. Simon *et al.*, “Where Do Batteries End and Supercapacitors Begin ? To cite this version : HAL Id : hal-00979971,” vol. 343, pp. 1210–1211, 2014.
- [19] F. Béguin, *Supercapacitors: Materials, Systems, and Applications*. 2013.
- [20] P. Svasta, R. Negroiu, and A. Vasile, “Supercapacitors - an

Alternative Electrical Energy Storage device,” pp. 5–9, 2017.

- [21] Y. Tao, “Study on modeling and application of ultracapacitor,” pp. 999–1002, 2014.
- [22] M. R2017b, “Supercapacitor.” p. Implement Generic Supercapacitor Model, 2017.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## INDEKS

### A

Arus, v, 1, 2, 12, 16, 17, 19, 20,  
21, 26, 34, 36, 38, 41, 46, 51,  
56, 57, 58

Asam Timbal, 20

### B

Baterai, 1, 20, 21, 37, 43, 44, 45,  
48, 49, 50, 53, 54, 55

### D

Daya, 13, 14, 20, 26, 31, 32, 36,  
38, 42, 44, 46, 49, 51, 54, 60

Dioda, 13, 14, 16, 20, 29

### E

Efisiensi, 1, 6, 7, 9, 14

Energi Angin, 1

### F

Fluktuasi, v, 5, 57

### G

Generator, 5, 6, 7, 9, 11, 31, 34

### H

Hibrida, v, 1, 2, 3, 4, 5, 29, 38,  
41, 42, 44, 46, 48, 51, 53, 56,  
57, 58

### K

Kapasitor, 14, 16, 17, 20, 26, 32,  
33, 34

Kapasitor Super, v, 1, 2, 3, 4, 5,  
20, 22, 24, 25, 26, 27, 28, 29,  
36, 37, 38, 39, 41, 42, 46, 51,  
55, 56, 57

Kecepatan Angin, 3, 6, 7, 9, 31,  
32, 34, 41, 42, 44, 46, 47, 51,  
56, 57

Koefisien daya, 7, 30

Kontrol, 1, 5, 11, 14

Konverter, 2, 15, 16, 17, 18, 19,  
20, 29, 34, 35, 36, 42, 45, 49,  
54

### M

MATLAB, 2, 3, 5, 29, 30

### P

Pembangkit Listrik Tenaga  
Angin, v, 1, 2, 3, 25, 29

Pengisian, 16, 17, 18, 19, 20, 21,  
25, 36, 37, 38, 43

Pengontrol, 2, 29, 36, 37, 38, 43,  
45, 48, 50, 53

Pengosongan, 18, 20, 25, 36, 37,  
38, 43

Penyimpan Energi, v, 1, 2, 3, 4,  
5, 18, 19, 20, 29, 36, 38, 41,  
42, 43, 44, 46, 47, 48, 49, 51,  
53, 56, 57

Perangkat Lunak, 3, 5

### R

Riak, 14, 34, 36, 44, 48, 53, 57

### S

Simulink, 2, 3, 5, 20, 25, 31

Sistem Konversi Energi Angin,  
3, 29, 41

### T

Tegangan, v, 2, 12, 13, 14, 15,  
16, 17, 18, 19, 20, 21, 25, 26,  
29, 34, 35, 36, 38, 41, 43, 46,  
48, 51, 53, 56, 57, 58

Turbin Angin, 1, 2, 3, 5, 6, 7, 8,  
9, 10, 11, 14, 29, 30, 31, 34,  
57

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **BIODATA PENULIS**



**Saiful Anshoruddin**, lahir di Sragen pada tanggal 22 April 1996. Merupakan anak pertama dari tiga bersaudara dari pasangan Sajimin dan Siti Ruchul Amanatun. Penulis pernah mengenyam pendidikan di SD Negeri Susukan 05 Pagi, MTs Negeri 7 Model Jakarta, dan SMA Negeri 48 Jakarta. Penulis melanjutkan jenjang pendidikan di Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember mulai tahun 2014. Penulis dapat dihubungi melalui alamat email [saifulanshor48@gmail.com](mailto:saifulanshor48@gmail.com).