



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - EE 184801

PERANCANGAN DAN PERMODELAN SISTEM HIBRIDA  
BATERAI-*SUPERCAPACITOR* PADA SISTEM KONVERSI  
ENERGI ANGIN (SKEA)

Rusdy Saleh  
NRP 0711144000092

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



TUGAS AKHIR - EE 184801

**PERANCANGAN DAN PERMODELAN SISTEM HIBRIDA  
BATERAI-*SUPERCAPACITOR* PADA SISTEM KONVERSI  
ENERGI ANGIN (SKEA)**

Rusdy Saleh  
NRP 0711144000092

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



FINAL PROJECT - EE 184801

**DESIGNING AND MODELING BATTERY-  
SUPERCAPACITOR HYBRID SYSTEM FOR WIND  
ENERGY CONVERSION SYSTEM (WECS)**

Rusdy Saleh  
NRP 0711144000092

Advisers

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

# PERANCANGAN DAN PERMODELAN SISTEM HIBRIDA BATERAI-SUPERCAPACITOR PADA SISTEM KONVERSI ENERGI ANGIN (SKEA)

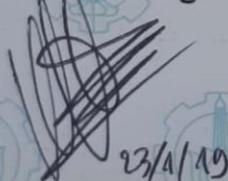
## TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan  
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Pada

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

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I



23/1/19

Vita Lystianingrum, ST., M.Sc., Ph.D.  
NIP. 198208292006042001

Dosen Pembimbing II



25-01-19

Dedet C. Rlawan, ST., M.Eng., Ph.D.  
NIP. 197311192000031001



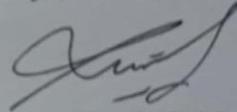
## PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tugas akhir saya dengan judul **“PERANCANGAN DAN PERMODELAN SISTEM HIBRIDA BATERAI-SUPERCAPACITOR PADA SISTEM KONVERSI ENERGI ANGIN”** adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan 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, Januari 2019



Rusdy Saleh  
0711144000092

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# PERANCANGAN DAN PERMODELAN SISTEM HIBRIDA BATERAI-SUPERCAPACITOR PADA SISTEM KONVERSI ENERGI ANGIN (SKEA)

Nama mahasiswa : Rusdy Saleh

Dosen Pembimbing I : Vita Lystianingrum, ST., M.Sc., Ph. D.

Dosen Pembimbing II : Dedet C. Riawan, ST., M. Sc., Ph. D.

## Abstrak:

Berkurangnya cadangan sumber energi listrik primer serta minimnya akses listrik bagi daerah 3T di Indonesia, mendorong pengembangan energi baru dan terbarukan. Energi angin menjadi salah satu energi yang dipertimbangkan sebagai pemasok energi listrik alternatif. Di sisi lain energi angin memiliki karakteristik yang *intermittent*, sehingga menghasilkan daya listrik yang fluktuatif. Salah satu metode yang digunakan untuk memperbaiki fluktuasi daya pada sistem turbin angin adalah dengan memanfaatkan sistem penyimpanan energi. Media penyimpanan energi yang paling umum digunakan adalah baterai, namun baterai merupakan salah satu titik terlemah dari sistem Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) karena siklus pemakaiannya yang rendah. Sehingga muncul beberapa metode untuk melindungi baterai dari gangguan eksternal, sekaligus menghilangkan fluktuasi daya yang terjadi. Penggunaan *supercapacitor* sebagai komplemen dari baterai dapat memperpanjang siklus pemakaian baterai dan menghasilkan daya yang bisa digunakan oleh beban. Tugas akhir ini memuat mengenai perancangan sistem penyimpanan energi secara hibrida antara baterai dan *supercapacitor* pada turbin angin. Serta berfokus pada manajemen pembagian daya pada sistem hibrida dengan topologi *semi-active* dan membandingkannya dengan konfigurasi *single storage* (baterai) pada kecepatan angin dan kebutuhan beban yang bervariasi.

**Kata kunci:** Sistem Konversi Energi Angin, Sistem Penyimpanan Energi, Fluktuasi Daya, *Supercapacitor*, Baterai

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# DESIGNING AND MODELING BATTERY- *SUPERCAPACITOR* HYBRID SYSTEM FOR WIND ENERGY CONVERSION SYSTEM

Student Name : Rusdy Saleh  
Adviser I : Vita Lystianingrum, ST., M.Sc., Ph. D.  
Adviser II : Dedet C. Riawan, ST., M. Sc., Ph. D.

## **Abstract:**

Diminished primary energy resources and limited access to electricity for a remote or isolated area in Indonesia, encourage new and renewable energy (NRE) development. Wind energy become one of those energies that considered as an electric energy supplier alternative. On the other hand, wind energy has an intermittent nature, hence it produces a fluctuating electrical power. One of those methods that have been utilized to fix power fluctuations in wind turbine systems is the use of energy storage system. The most commonly used energy storage is a battery, yet the battery is one of the weakest parts of wind energy conversion systems due to a short lifetime. Therefore, there are some methods to isolate the battery from an external disturbance and eliminate the power fluctuations that emerged. The use of *supercapacitor* as a complement to battery afford to prolong the battery lifetime and produce a decent power for the demand. This final project consists of a hybrid energy storage system design either battery and *supercapacitor* on a wind turbine. And focus on power-sharing management of hybrid system semi-active topology, compared to single storage (battery) configuration on various wind speed and load demand.

**Key Word:** Wind Energy Conversion System, Energy Storage Systems, Power Fluctuations, *Supercapacitor*, Battery

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## KATA PENGANTAR

Rasa syukur yang tak terkira penulis panjatkan pada sang maha pemilik nyawa, pembolak-balik hati, serta pemilik segala sesuatu yang ada di langit dan di bumi, Allah Subhanahu Wata'ala. Atas segala rahmat, karunia, keberkahan yang dilimpahkan pada hambanya hingga hari ini.

Syukur yang tak terkira karena penulis akhirnya mampu menyelesaikan pengerjaan tugas akhir dengan judul **“PERANCANGAN DAN PERMODELAN SISTEM HIBRIDA BATERAI-SUPERCAPACITOR PADA SISTEM KONVERSI ENERGI ANGIN”**.

Tugas Akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan jenjang pendidikan S1 pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Atas selesainya penyusunan tugas akhir ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ibunda Wahidah dan Ayahanda (alm.) dr. Saleh Badar atas segala dukungan, gelontoran doa, semangat serta inspirasinya bagi diri saya.
2. Saudara se-rahim saya, Muvida, Nabila, Muhammad Azmi, dan Akrima Najwa A, yang telah memberikan dukungan moril maupun materiil hingga saya bisa menjalani proses pembelajaran hingga hari ini.
3. Ibu Vita Lystianingrum, ST., M.Sc., Ph. D. dan Bapak Dedet C. Riawan, ST., M. Eng., Ph. D. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, bimbingan, dan masukan dalam penyelesaian tugas akhir ini.
4. Rekan diskusi *supercapacitor*, Octavian Nur Fauzi, Deny Andika Prasetya, Saiful Anshoruddin, Aditya Setiadi, Irfan Reza Wahyudi, dan Rizka Prambudi yang telah menemani dan menjadi rekan bertukar pikiran dalam proses pengerjaan.
5. Kabinet dan fungsionaris HIMATEKTRO SIGAP 16/17 yang telah memberikan banyak pembelajaran berharga dalam proses pendewasaan diri dan pematangan berpikir.
6. Teman-teman seperjuangan e54 yang telah menemani dan menorehkan cerita selama masa kuliah hingga berakhirnya masa studi.

7. Seluruh dosen dan karyawan Departemen Teknik Elektro FTE-ITS memberi banyak wawasan, ilmu pengetahuan, serta menciptakan suasana belajar yang nyaman.

Penulis telah memberikan usaha maksimal bagi terselesaikannya tugas akhir ini. Atas segala kurang dan lebihnya dari pengerjaan tugas akhir ini, semoga dapat menjadi media pembelajaran kedepannya.

Surabaya, Januari 2019

Rusdy Saleh  
0711144000092

## DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN .....	v
TUGAS AKHIR .....	v
KATA PENGANTAR .....	xi
DAFTAR ISI .....	xiii
DAFTAR GAMBAR .....	xv
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 .....	3
1.6 Sistematika Penulisan .....	3
1.7 Relevansi.....	4
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI .....	5
2.1 Kajian Pustaka dan Penelitian Terkait .....	5
2.2 Energi Angin .....	7
2.3 Sistem Konversi Energi Angin (SKEA) .....	8
2.4 Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) .....	9
2.5 Penyearah ( <i>Rectifier</i> ) Tiga Fasa .....	10
2.6 Konverter <i>Boost</i> .....	12
2.7 Penyimpan Energi .....	15
2.7.1 Baterai .....	16
2.7.2 <i>Supercapacitor</i> .....	17
2.8 Konverter Bidirectional .....	18
BAB 3 PERANCANGAN SISTEM.....	21
3.1 Konfigurasi Sistem Konversi Energi Angin .....	21
3.2 Kecepatan Angin .....	22
3.3 Model Turbin Angin .....	23
3.4 Model PMSG .....	25
3.5 Penyearah Dioda Tiga Fasa.....	26
3.6 Model Konverter <i>Boost</i> .....	27
3.7 Manajemen Penyimpan Energi .....	29
3.8 Model Konverter <i>Bidirectional</i> .....	30
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN .....	33
4.1 Topologi Penyimpan Energi .....	33

4.2	Hasil Simulasi <i>Energy Storage</i> sebagai <i>Power Smoothing</i> dalam Sistem Konversi Energi Angin.....	34
4.2.1	Skenario (1) Kecepatan Angin Berubah dan Kebutuhan Daya Konstan.....	34
4.2.2	Skenario (2) Kecepatan Angin Konstan dan Kebutuhan Daya Berubah.....	39
4.2.3	Skenario (3) Kecepatan Angin Berubah dan Kebutuhan Daya Berubah.....	42
BAB 5 KESIMPULAN .....		47
5.1	Kesimpulan.....	47
5.2	Saran.....	47
DAFTAR PUSTAKA.....		49
BIODATA PENULIS.....		55

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2. 1</b>	Topologi penyimpan energi hibrida pada sistem konversi energi angin (a) <i>Passive Topology</i> (b) <i>Supercapacitor Semi-Active Topology</i> (c) <i>Battery Semi-Active Topology</i> (d) <i>Active Topology</i> [7].....	6
<b>Gambar 2. 2</b>	Peta potensi kecepatan angin rata-rata pada ketinggian 50m di Indonesia [11] .....	8
<b>Gambar 2. 3</b>	Model Sederhana PMSG dalam sumbu dq .....	9
<b>Gambar 2. 4</b>	Schematic Penyearah 3 Fase .....	11
<b>Gambar 2. 5</b>	Konverter <i>Boost</i> .....	12
<b>Gambar 2. 6</b>	Konverter <i>Boost</i> mode konduksi ( <i>switch on</i> ).....	13
<b>Gambar 2. 7</b>	Konverter <i>Boost</i> mode padam ( <i>switch off</i> ) .....	14
<b>Gambar 2. 8</b>	Grafik daya terhadap energi pada beberapa teknologi penyimpan energi [4] .....	16
<b>Gambar 2. 9</b>	Konverter <i>Bidirectional</i> .....	18
<b>Gambar 2. 10</b>	Mode <i>boost</i> pada konverter <i>bidirectional</i> .....	19
<b>Gambar 2. 11</b>	Mode <i>buck</i> pada konverter <i>bidirectional</i> .....	19
<b>Gambar 3. 1</b>	Sistem Konversi Energi Angin dengan Sistem Penyimpan Hibrida.....	21
<b>Gambar 3. 2</b>	Grafik Kecepatan Angin.....	22
<b>Gambar 3. 3</b>	Kurva Karakteristik Turbin Angin .....	24
<b>Gambar 3. 4</b>	Perbandingan daya mekanik aktual dan referensi dari Turbin .....	25
<b>Gambar 3. 5</b>	Daya elektrik PMSG .....	26
<b>Gambar 3. 6</b>	Daya keluaran <i>Rectifier</i> .....	27
<b>Gambar 3. 7</b>	Permodelan konverter <i>boost</i> pada simulink Matlab.....	27
<b>Gambar 3. 8</b>	Hasil Simulasi Konverter <i>Boost</i> .....	29
<b>Gambar 3. 9</b>	Skenario <i>Power Sharing</i> pada baterai dan <i>supercapacitor</i> .....	30
<b>Gambar 3. 10</b>	Strategi kontrol <i>Supercapacitor</i> .....	31
<b>Gambar 4. 1</b>	Topologi <i>Single storage (battery only)</i> .....	33
<b>Gambar 4. 2</b>	Topologi <i>semi-active</i> .....	33
<b>Gambar 4. 3</b>	Permodelan Kecepatan Angin Variatif.....	35
<b>Gambar 4. 4</b>	Permodelan Kebutuhan Daya Konstan.....	35
<b>Gambar 4. 5</b>	Perbandingan tegangan DC <i>link</i> pada skenario 1.....	36

<b>Gambar 4. 6</b>	Perbandingan arus media penyimpanan pada skenario 1	37
<b>Gambar 4. 7</b>	Perbandingan daya media penyimpanan pada skenario 1	38
<b>Gambar 4. 8</b>	Permodelan Kecepatan Angin Konstan .....	39
<b>Gambar 4. 9</b>	Permodelan Kebutuhan Daya Berubah .....	39
<b>Gambar 4. 10</b>	Perbandingan tegangan DC <i>link</i> pada skenario 2 .....	40
<b>Gambar 4. 11</b>	Perbandingan arus media penyimpanan pada skenario 2 .....	41
<b>Gambar 4. 12</b>	Perbandingan daya media penyimpanan pada skenario 2 .....	42
<b>Gambar 4. 13</b>	Perbandingan tegangan DC <i>link</i> pada skenario 3 .....	43
<b>Gambar 4. 14</b>	Perbandingan arus media penyimpanan pada skenario 3 .....	44
<b>Gambar 4. 15</b>	Perbandingan daya media penyimpanan pada skenario 3 .....	45

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 3. 1</b> Parameter Turbin Angin.....	23
<b>Tabel 3. 2</b> Parameter PMSG .....	25
<b>Tabel 3. 3</b> Parameter Konverter Boost .....	28



# **BAB 1**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Memasuki era modern, ternyata masih terdapat lubang besar yang harus ditambal pada sektor energi di Indonesia. Setidaknya terdapat dua permasalahan utama yang terjadi, yaitu semakin berkurangnya cadangan energi fosil yang merupakan sumber energi primer yang dipasok untuk menghasilkan energi listrik, dan minimnya akses masyarakat di daerah 3T (Tertinggal, Terpencil, Terdepan) terhadap energi listrik. Ditinjau dari permasalahan akses, kebijakan pemerintah mulai diarahkan pada pengembangan energi terbarukan yang disesuaikan dengan kearifan lokal tiap daerah seperti energi surya, energi angin, energi laut, energi air, dan sumber energi terbarukan yang lain.[1]

Semenjak ditandatanganinya Paris Agreement pada tahun 2015, Indonesia telah berkomitmen untuk menggenjot pengembangan teknologi energi baru dan terbarukan sebesar 25% hingga tahun 2025. Hal ini sejalan dengan kondisi kelistrikan kita yang memang membutuhkan pengembangan energi baru dan terbarukan di daerah-daerah yang sulit dijangkau jaringan listrik utama. Posalnya per 2016, masih terdapat 12.659 desa dengan sekitar 2.527.469 KK dan 9.926.515 jiwa yang belum menikmati akses listrik. Di mana sebagian besar dari desa itu terletak di Wilayah Indonesia Timur, yang berjumlah sekitar 6.689 desa [2]. Energi surya dan energi angin memiliki peluang yang lebih besar untuk diterapkan di daerah-daerah tersebut. Secara kumulatif potensi energi angin di Indonesia mencapai angka 60,647 MW. [3] Sedangkan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) yang telah terpasang berkisar 1,96 MW dan masih akan terus bertambah [1].

PLTB memiliki karakteristik yang intermittent, sehingga menghasilkan energi listrik yang fluktuatif. Dalam pengoperasiannya, ketika turbin angin tersambung secara langsung menuju beban maka dibutuhkan cadangan energi bila terjadi penurunan kecepatan angin, dan akan ada energi listrik yang terbuang bila beban lebih kecil dibanding energi yang dihasilkan oleh turbin angin. Di sisi lain, turbin angin juga akan menyuplai daya yang fluktuatif menuju beban, dan hal ini dapat menyebabkan kerusakan peralatan. Sehingga media penyimpanan energi menjadi salah satu solusi dari permasalahan tersebut.

Baterai menjadi media penyimpan energi yang paling umum digunakan. Namun, dalam praktiknya baterai memiliki beberapa kekurangan dan merupakan salah titik terlemah dari sebuah PLTB. Hal itu dikarenakan baterai memiliki siklus penggunaan yang terbatas, terlebih ketika tidak diatur dengan baik. Baterai memiliki karakteristik kapasitas energi (Energy Capacity / Wh) yang besar, tetapi kapasitas daya (Power Capacity / W) yang dimiliki kecil, sehingga tidak dapat menangkap lonjakan daya yang terjadi. Penggunaan *supercapacitor* dapat menangani masalah ini, karena karakteristik *supercapacitor* yang memiliki kapasitas daya (Power Capacity / W) yang besar walau dalam jangka waktu yang relatif pendek. Sehingga sistem yang saling berkomplemen ini mampu menyediakan kapasitas daya dan kapasitas energi yang besar.[4]

## 1.2 Permasalahan

Perumusan masalah dari tugas akhir ini adalah :

1. Bagaimana desain serta strategi pengontrolan aliran daya untuk *Hybrid Energy Storage System* (HESS) pada Sistem Konversi Energi Angin (SKEA).
2. Bagaimana perbandingan hasil keluaran yang didapatkan oleh Sistem Konversi Energi Angin (SKEA) dengan menggunakan *Supercapacitor* dan baterai pada skenario kecepatan angin yang bervariasi

## 1.3 Tujuan

Tugas akhir ini bertujuan untuk :

1. Membuat desain dan simulasi kontrol aliran daya untuk *Hybrid Energy Storage System* (HESS) pada Sistem Konversi Energi Angin (SKEA).
2. Membandingkan hasil keluaran yang didapat oleh Sistem Konversi Energi Angin (SKEA) dengan *Hybrid Energy Storage System* (HESS) pada skenario kecepatan angin yang bervariasi.

## 1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam tugas akhir ini adalah :

1. Permodelan dan simulasi menggunakan MATLAB/Simulink R2017b

2. Komponen yang digunakan dalam simulasi adalah komponen ideal
3. Sistem yang dirancang adalah sistem *standalone* atau *offgrid* dengan beban Resistif (R)
4. Nilai pada kontrol PI didapat secara *trial and error*.

## 1.5 Metodologi

Metodologi yang digunakan dalam menyusun penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur  
Menghimpun serta mempelajari berbagai bahan seperti buku, *paper*, *journal* dan beberapa sumber lain yang valid mengenai Sistem Konversi Energi Angin untuk dijadikan sebagai rujukan.
2. Penentuan Parameter  
Menentukan beberapa parameter untuk mendukung pengerjaan tugas akhir ini. Parameter PMSG yang digunakan dalam tugas akhir ini merujuk pada salah satu *paper* acuan.
3. Simulasi Desain  
Melakukan proses pengolahan data menggunakan software Simulink Matlab R2017b untuk mendapatkan pendekatan yang diinginkan sesuai dengan kondisi riil di lapangan dengan beberapa asumsi tambahan.
4. Analisis Hasil Simulasi  
Melakukan pengkajian terhadap hasil simulasi yang dijalankan berdasarkan teori dan tinjauan pustaka yang relevan.
5. Penyusunan Laporan Tugas Akhir  
Melakukan penyusunan seluruh proses dan hasil yang telah dilakukan sepanjang pengerjaan tugas akhir berdasar format penulisan yang telah disesuaikan.

## 1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam tugas akhir ini terdiri dari lima BAB dengan uraian sebagai berikut :

1. BAB 1 adalah pendahuluan yang terdiri dari latar belakang masalah, perumusan masalah, tujuan, metodologi, sistematika penulisan, dan relevansi
2. BAB 2 menampilkan kajian pustaka, penelitian terdahulu, dan dasar teori yang berkaitan dengan sistem konversi energi angin beserta media penyimpanan hibrida
3. BAB 3 merupakan perancangan dan permodelan sistem konversi energi angin pada tiap-tiap bagian dari sistem.
4. BAB 4 menyajikan hasil simulasi dan analisis data mengenai sistem yang telah dirancang dan dimodelkan
5. BAB 5 merupakan penutup yang terdiri dari kesimpulan dan saran.

## **1.7 Relevansi**

Tugas Akhir ini diharapkan mampu memberikan manfaat terhadap pengembangan sistem konversi energi angin, secara spesifik pada sistem *standalone* yang menggunakan sistem hibrida baterai-*supercapacitor* sebagai media penyimpanan. Diharapkan pula Tugas Akhir ini dapat menjadi pertimbangan dalam hal pemilihan topologi sistem hibrida baterai-*supercapacitor*.

## **BAB 2**

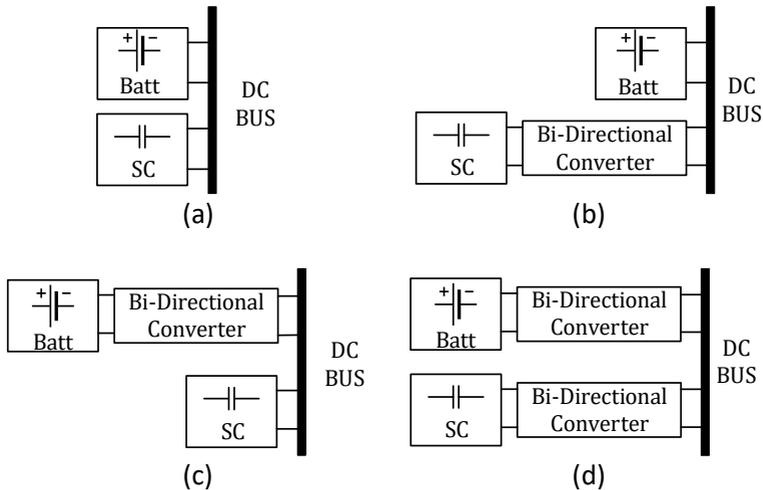
### **KAJIAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI**

Dalam bab ini dipaparkan teori beserta sejumlah penelitian yang terlebih dahulu dilakukan dan berhubungan dengan topik mengenai sistem konversi energi angin menggunakan sistem hibrida baterai-*supercapacitor*. Bagian ini terdiri dari teori dan penelitian terkait energi angin, teknologi turbin angin, *Permanent Magnet-Synchronous Generator* (PMSG), *Rectifier* tiga fasa, konverter DC-DC, sistem hibrida baterai-*supercapacitor*, serta beberapa topologi hibridanya.

#### **2.1 Kajian Pustaka dan Penelitian Terkait**

Beberapa penelitian yang terkait dengan sistem konversi energi angin menggunakan media penyimpan hibrida baterai-*supercapacitor* telah dilakukan oleh beberapa peneliti. Tang Xisheng dkk [5] menganalisis penggunaan media penyimpanan BSHS (*Battery Supercapacitor Hybrid System*) pada Microgrid. BSHS memiliki keunggulan dari segi kerapatan daya yang tinggi, kerapatan energi yang tinggi, dan siklus pemakaian yang panjang, serta merupakan solusi media penyimpanan energi yang efektif pada *MicroGrid*. Melalui strategi pengontrolan, BSHS mampu memperkecil fluktuasi daya pada *MicroGrid* dan memperpanjang umur baterai. Dari hasil eksperimen terbukti efektivitas dari strategi kontrol yang digunakan, dan performa yang sangat baik dari BSHS.

I. Chotia & S. Chowdhury [6] melakukan tinjauan kritis terhadap perbandingan HBSSS (*Hybrid Battery Supercapacitor Storage System*) dengan BSS (*Battery Storage System*), yang diikuti dengan rekomendasi berdasar analisis ekonomi-teknik dari sistem hibrida baterai-*supercapacitor* untuk aplikasi pada sistem energi terbarukan. Hasil analisis menyatakan bahwa HBSSS akan meningkatkan kualitas daya walau membutuhkan pengaturan yang lebih banyak dibanding BSS, sehingga penggunaan HBSSS sangat tepat diaplikasikan pada daerah terpencil dengan sumber energi yang fluktuatif. Peng Yu dkk [7] melakukan tinjauan secara komprehensif mengenai topologi penyimpanan hibrida yang dapat diterapkan dalam sistem konversi energi angin, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.1



**Gambar 2. 1** Topologi penyimpanan energi hibrida pada sistem konversi energi angin (a) *Passive Topology* (b) *Supercapacitor Semi-Active Topology* (c) *Battery Semi-Active Topology* (d) *Active Topology* [7]

Dengan menganalisis karakteristik dari sistem hibrida baterai-*supercapacitor*, diketahui bahwa kombinasi ini mampu menawarkan kerapatan daya yang tinggi, kerapatan energi yang tinggi, dan siklus penggunaan yang lebih lama. Berdasarkan penempatan dari power controller, terdapat 4 topologi hibrida baterai-*supercapacitor* dengan mempertimbangkan stabilitas dari sistem hibrida, dan manfaat dari baterai-*supercapacitor*. Di mana keempat topologi tersebut, memiliki kelebihan dan kekurangannya masing-masing.

Rachma Prilian [8] menganalisis penggunaan konverter DC-DC bidirectional menggunakan MPPT berbasis modified P&O pada baterai dalam sistem turbin angin. Dari percobaan, didapat hasil bahwa konverter bidirectional mampu melakukan pengaturan proses charge dan discharge baterai dengan baik. Hal itu diperlihatkan melalui aliran dayanya yang mampu menyesuaikan kondisi, pada saat kondisi daya sistem turbin angin lebih besar dari kebutuhan beban dan pada saat kondisi kebutuhan beban lebih besar dibanding daya maksimum pada sistem turbin angin. Selain itu, Ratna Ika [9] mengembangkan strategi kontrol optimal pada SKEA untuk mengatur aliran daya konstan pada beban menggunakan media penyimpanan berupa baterai, saat terjadi fluktuasi kecepatan angin.

Berdasar hasil simulasi, sistem dapat menyediakan daya konstan menuju grid sesuai dengan kebutuhan terhadap kecepatan angin dan kebutuhan daya grid yang bervariasi.

## **2.2 Energi Angin**

Energi angin merupakan salah satu sumber energi yang memiliki potensi untuk dikonversi menjadi energi listrik, dengan mengubah energi mekanik yang dihasilkan oleh angin menjadi energi listrik melalui pembangkitan oleh generator. Munculnya energi angin ini diawali oleh perbedaan intensitas penyinaran matahari pada satu wilayah dengan wilayah lain yang berdampak terhadap perbedaan suhu dan tekanan udara, sehingga terjadi pergerakan udara dari daerah dengan tekanan yang lebih tinggi menuju daerah dengan tekanan lebih rendah. Wilayah dengan radiasi matahari yang cukup tinggi, seperti di khatulistiwa akan memiliki kecepatan angin yang lebih rendah dibanding wilayah dengan radiasi matahari yang rendah.

Potensi energi angin dunia yang telah dimanfaatkan hingga tahun 2016 mencapai kapasitas 487 GW dan merupakan pembangkit listrik energi terbarukan dengan kapasitas terbesar setelah hydropower dan bio-power [10]. Sedangkan kapasitas terpasang Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) di Indonesia baru mencapai angka 1,96 MW, dengan potensi energi sekitar 60,647 MW. Karena letak Indonesia yang berada di sekitar garis khatulistiwa, akibatnya kecepatan angin rata-rata di Indonesia relatif rendah.

Namun, energi angin di Indonesia tetap dapat dimanfaatkan pada beberapa wilayah yang memiliki kecepatan angin menengah. Sebaran potensi energi angin dapat dilihat pada Gambar 2.2, dimana mayoritas kecepatan angin menengah terletak di sepanjang pesisir selatan Indonesia.



**Keterangan :**

- Menara ukur P3TKEBTKE
- Potensi Energi Angin dengan kecepatan > 6 m/dt
- Potensi Energi Angin dengan kecepatan > 4 m/dt hingga 6 m/dt

**Gambar 2. 2** Peta potensi kecepatan angin rata-rata pada ketinggian 50m di Indonesia [11]

### 2.3 Sistem Konversi Energi Angin (SKEA)

Sebagaimana karakter kecepatan angin yang sesaat, Variable Speed Wind Turbine (VSWT) menjadi salah satu bagian dari sistem konversi energi angin yang sangat penting. Karena kemampuannya yang baik dalam memanfaatkan energi angin dibanding tipe yang lain. Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) merupakan salah satu tipe generator yang paling populer untuk digunakan pada sistem yang berbasis VSWT. Penggunaan PMSG mampu menghilangkan pemakaian gearbox pada SKEA. Kecepatan rotasi dari PMSG diatur oleh pulse width modulation (PWM) konverter, sedangkan daya keluaran yang dihasilkan oleh PMSG akan dipasok menuju jala-jala melalui konverter pada sisi generator dan inverter pada sisi jala-jala.[12]

Daya keluaran dari turbin angin ( $P_w$ ) dan torsi pada turbin angin ( $T_w$ ) ditunjukkan pada persamaan berikut :

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R_0^2 \cdot v_w^3 \quad (2.1)$$

$$T_w = \frac{1}{2} \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R_0^3 \cdot \frac{v_w^3}{\lambda} \quad (2.2)$$

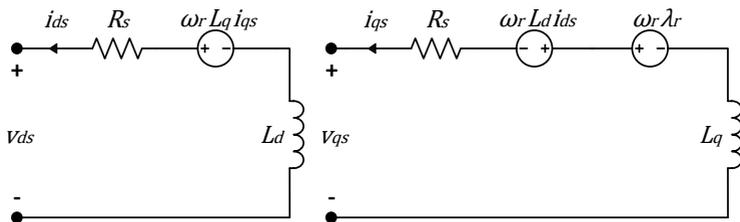
$\lambda$  dapat didefinisikan sebagai  $\lambda = (1/ V_w) R_o \omega_w$ , dengan keterangan nomenklatur untuk persamaan (2.1) dan (2.2) sebagai berikut :

- |   |   |
|---|---|
| $C_p$ : koefisien daya                  | $v_w$ : kecepatan angin (m/s)                       |
| $\rho$ : massa jenis udara ( $kg/m^3$ ) | $\lambda$ : <i>Tip Speed Ratio</i>                  |
| $R_o$ : jari-jari bilah ( $m^2$ )       | $\omega_w$ : kecepatan angular turbin angin (rad/s) |
| $\pi$ : <i>phi</i> (3,14)               | $\beta$ : <i>pitch angle</i>                        |

Turbin angin adalah komponen pokok dalam sistem konversi energi angin, karena perannya yang mampu menangkap energi kinetik dan mengubahnya menjadi energi putar untuk diubah menjadi energi listrik dengan bantuan generator.

## 2.4 Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)

Generator menjadi salah satu bagian penting dalam sistem konversi energi angin, karena perannya dalam melakukan konversi dari energi mekanik menjadi energi listrik berdasarkan prinsip elektromagnetik. PMSG atau *Permanent Magnet Synchronous Generator* merupakan salah satu jenis generator sinkron yang sering digunakan dalam sistem konversi energi angin, karena berbagai kelebihan yang ditawarkan. Diantaranya kemampuan eksitasi diri yang membuatnya dapat beroperasi pada faktor daya tinggi dan meningkatkan efisiensi, keandalan tinggi, tidak memerlukan *gear-box*, kemampuan untuk melacak daya maksimum (MPPT), dan tingkat kebisingan yang rendah [13].



**Gambar 2. 3** Model Sederhana PMSG dalam sumbu dq

Berdasar model dinamik yang telah disederhanakan seperti pada Gambar 2.3, didapat persamaan tegangan stator sumbu dq sebagai berikut :

$$v_{ds} = -i_{ds} \cdot R_s + \omega_r \cdot L_q \cdot i_{qs} - p \cdot L_d \cdot i_{ds} \quad (2.3)$$

$$v_{qs} = -i_{qs} \cdot R_s - \omega_r \cdot L_d \cdot i_{ds} + \omega_r \cdot \lambda_r - p \cdot L_q \cdot i_{qs} \quad (2.4)$$

Dengan keterangan nomenklatur :

$i_d$ : arus stator sumbu d	$v_d$ : tegangan stator sumbu d
$i_q$ : arus stator sumbu q	$v_q$ : tegangan stator sumbu q
$L_d$ : induktansi diri stator sb. d	$L_q$ : induktansi diri stator sb. q
$R_s$ : resistansi belitan ( $\Omega$ )	$\omega_r$ : kec. rotasi elektrik PMSG (rad/s)
$\lambda_r$ : fluks rotor	p : jumlah pole

PMSG menghasilkan torsi elektromagnetik yang dihitung berdasarkan persamaan :

$$T_e = -\frac{3P}{2}(i_{qs} \cdot \lambda_{ds} - i_{ds} \cdot \lambda_{qs}) \quad (2.5)$$

$$= -\frac{3P}{2}(i_{qs} \cdot \lambda_r + i_{ds} \cdot i_{qs} \cdot (L_d + L_q)) \quad (2.6)$$

Sedangkan kecepatan rotor ditentukan dari persamaan :

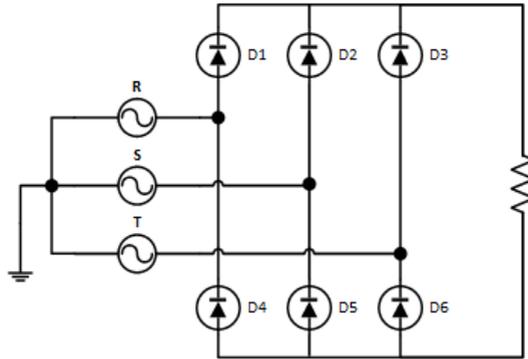
$$\omega_r = \frac{p}{J_s}(T_e - T_m) \quad (2.7)$$

Daya elektrik yang dihasilkan PMSG didapat berdasar persamaan:

$$P = 1,5 (v_{sd} \cdot i_{sd} + v_{sq} \cdot i_{sq}) \quad (2.8)$$

## 2.5 Penyearah (*Rectifier*) Tiga Fase

Penyearah tiga fase terdiri dari 6 buah sakelar semikonduktor yang dirangkai menjadi 3 pasang sakelar. Di mana tiap pasang sakelar terhubung pada sumber tegangan AC fase R, S, dan T secara berurutan pada tiap pasang sakelar. Diagram *schematic* dari penyearah 3 fase ini dapat dilihat pada Gambar 2.4



**Gambar 2. 4** Schematic Penyearah 3 Fase

Pada konfigurasi ini, pemasangan 6 diode membuat lebar tiap puncak sebesar  $60^\circ$ , sehingga jarak kurva *sinusoidal* kuartan pertama adalah  $60^\circ$  dan  $120^\circ$ . Sedangkan amplitudo dari penyearah ini adalah harga maksimum tegangan *line to line*, atau tegangan *rms*. [14]

$$V_{DC} = \frac{6}{2\pi} \int_{\pi/3}^{2\pi/3} \sqrt{3} V_m \sin(\omega t) d(\omega t) \quad (2.9)$$

$$V_{dc} = V_m \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \quad (2.10)$$

Tegangan masukan dari rangkaian penyearah berasal dari tegangan keluaran PMSG. Sedangkan tegangan keluaran tiap fasa pada PMSG ( $V_{ph}$ ) dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut :

$$V_{ph} = E_g - I_g (R_s + jp\omega L_s) \quad (2.11)$$

Di mana ;

$E_g$  : daya elektromotif PMSG

$I_g$  : arus fasa pada PMSG

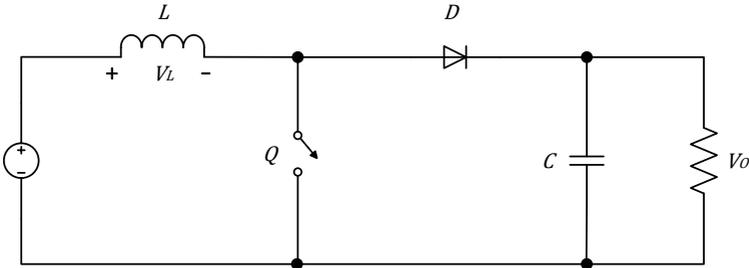
Daya elektromotif yang dihasilkan oleh PMSG memiliki nilai yang sebanding dengan tegangan sisi DC yang merupakan tegangan keluaran dari penyearah (*rectifier*). Berdasarkan informasi yang didapatkan dari persamaan (2.10) dan (2.11), serta pengetahuan bahwa nilai  $V_m = \sqrt{2} V_{ph}$  maka tegangan sisi DC dapat dinyatakan dengan ;

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} V_{ph} \quad (2.12)$$

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} (E_g - I_g (R_s + jp\omega L_s)) \quad (2.13)$$

## 2.6 Konverter Boost

Konverter Boost merupakan konverter yang dapat menghasilkan tegangan output  $V_o$  yang lebih tinggi dibanding dengan tegangan sumbernya  $V_s$ . Konverter ini disusun oleh beberapa komponen seperti induktor, *switch* (MOSFET), dioda, dan kapasitor. Diagram schematic dari konverter ini dapat dilihat pada Gambar 2.5.



**Gambar 2. 5** Konverter Boost

Prinsip kerja dari konverter *boost* bergantung pada kondisi penyalakannya. Saat saklar Q1 konduksi (terhubung) konverter berada dalam mode pengisian (*charging*) arus, sedangkan saat Q1 padam (terputus) konverter berada dalam mode pengosongan (*discharging*) arus induktor. Nilai dari tegangan keluaran ( $V_o$ ) sangat bergantung dari *duty cycle* yang diberikan oleh sinyal PWM pada MOSFET, yang dapat ditentukan melalui persamaan :

$$D = \frac{t_{on}}{T_s} = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} \quad (2.14)$$

$$\begin{aligned} t_{on} &= D \cdot T_s \\ t_{off} &= T_s - t_{on} \\ &= T_s - (D \cdot T_s) \\ &= T_s (1 - D) \end{aligned} \quad (2.15)$$

Di mana :

$t_{on}$  : waktu saklar terhubung

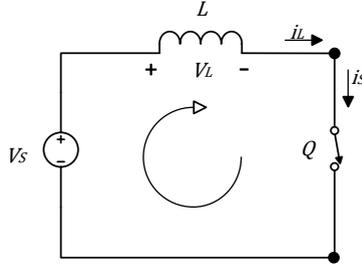
$t_{off}$  : waktu saklar terputus

$T_s$  : periode *switching*

$D$  : *duty cycle*

Berdasar pola kerja dari saklar konverter *boost* dibedakan dalam dua mode, yaitu mode konduksi (*switch on*) dan mode padam (*switch off*).

- a. Mode konduksi (*switch on*)  
 Pada kondisi *switch on* induktor pada rangkaian konverter *boost* akan mengalami proses *charging* hingga saklar Q kembali terbuka, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.6



**Gambar 2. 6** Konverter *Boost* mode konduksi (*switch on*)

Persamaan dari mode ini dapat dituliskan sebagai berikut :

$$V_S = V_L$$

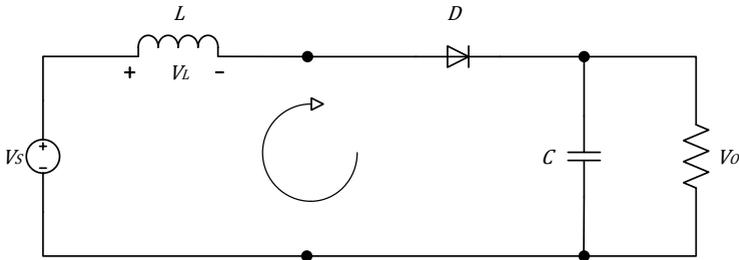
$$V_S = L \frac{di}{dt} \quad (2.16)$$

Dikarenakan konduksi saklar Q berlangsung selama  $t_{on}$ , dan sifatnya yang linier maka penyebut  $dt$  pada persamaan (2.16) dapat diubah dengan  $t_{on}$ , sedangkan pembilang  $dI$  sama dengan  $\Delta I$  sehingga diperoleh persamaan :

$$V_S = L \frac{\Delta I}{t_{on}} \quad (2.17)$$

$$L \cdot \Delta I = V_S \cdot t_{on} \quad (2.18)$$

- b. Mode padam (*switch off*)  
 Saat saklar Q terbuka (*switch off*), induktor dan beban akan terangkai seri dengan tegangan sumber sehingga induktor berubah menjadi sumber arus serta mengalami mode pengosongan (*discharging*). Dari Gambar 2.7 dapat terlihat bahwa beban disuplai oleh 2 buah sumber yang diseri, yaitu  $V_S$  dan  $V_L$ .



**Gambar 2. 7** Konverter *Boost* mode padam (*switch off*)

Persamaan dari mode tersebut dapat ditulis sebagai berikut:

$$V_o = V_S + V_L \quad (2.19)$$

Terbukanya saklar Q akan berlangsung dalam rentang waktu selama  $t_{off}$ , sehingga persamaannya menjadi :

$$V_o = V_S + L \frac{\Delta I}{t_{off}} \quad (2.20)$$

Persamaan (2.20) disubstitusi dengan persamaan (2.18), sehingga didapat hasil :

$$\begin{aligned} V_o &= V_S + V_S \frac{t_{on}}{t_{off}} \\ &= V_S \cdot \left( 1 + \frac{t_{on}}{t_{off}} \right) \end{aligned} \quad (2.21)$$

$$V_o = V_S \cdot \left( \frac{t_{off} + t_{on}}{t_{off}} \right) \quad (2.22)$$

Dari persamaan (2.14) dapat diketahui bahwa  $T = t_{on} + t_{off}$ , dan dari persamaan (2.15) diketahui bahwa  $t_{off} = T(1 - D)$ , sehingga persamaan (2.22) dapat disederhanakan menjadi :

$$V_o = V_S \cdot \frac{1}{(1-D)} \quad (2.23)$$

Dalam prakteknya riak gelombang, baik arus maupun tegangan sangat dipengaruhi oleh nilai induktor dan kapasitor. Di mana riak arus dipengaruhi oleh nilai induktor, dan riak tegangan dipengaruhi oleh nilai kapasitor. Perhitungan nilai induktor dapat ditentukan secara langsung melalui persamaan induktor saat konverter pada mode *switch on*, bila riak arus ( $\Delta I$ ) ditentukan terlebih dahulu :

$$L = \frac{V_S \cdot t_{on}}{\Delta I} \quad (2.24)$$

Di mana ;

$V_s$  : tegangan sumber  
 $t_{on}$  : frekuensi *switching*  
 $\Delta I$  : riak arus

Sedangkan penentuan nilai kapasitor dapat dituliskan pada persamaan berikut :

$$C = \frac{V_o \cdot D}{R \cdot \Delta V \cdot f} \quad (2.25)$$

Di mana :

$V_o$  : tegangan output  
 $f$  : frekuensi *switching*  
 $R$  : Resistansi  
 $D$  : *duty cycle*  
 $\Delta V$  : riak tegangan

Daya yang dikirim menuju beban dapat dihitung melalui persamaan,

$$P_{out} = \frac{V_{out}^2}{R_L} \quad (2.26)$$

Berdasar persamaan (2.23) daya keluaran konverter dapat dinyatakan sebagai berikut,

$$P_{out} = \frac{V_s^2}{(1-D)^2 R_L} \quad (2.27)$$

Jika rugi-rugi daya pada konverter dapat diabaikan karena nilainya yang kecil, maka daya keluaran konverter akan tetap sama dengan daya inputnya,

$$P_{in} = \frac{V_s^2}{R_{in}} \cong P_{out} = \frac{V_s^2}{(1-D)^2 R_L} \quad (2.28)$$

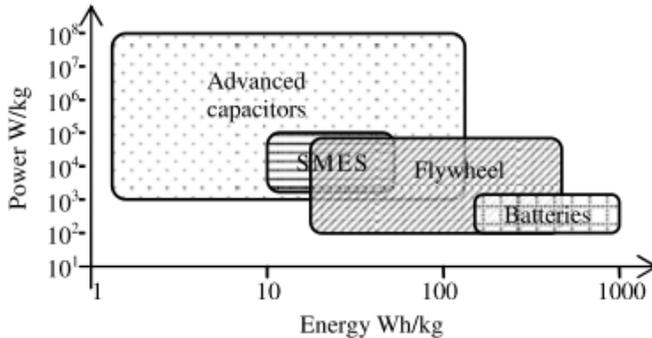
Sehingga resistansi yang masuk menuju konverter *boost* dapat dinyatakan sebagai berikut,

$$R_{in} = (1 - D)^2 R_L \quad (2.29)$$

## 2.7 Penyimpan Energi

Salah satu cara yang dilakukan untuk mengurangi fluktuasi daya yang dihasilkan pada sistem konversi energi angin adalah dengan memanfaatkan sistem penyimpanan energi. Integrasi sistem penyimpanan energi dengan turbin angin menjadi solusi yang cukup menjanjikan

dibanding metode yang lain. Teknologi penyimpanan energi yang sering dijumpai dalam sistem konversi energi angin di antaranya adalah Baterai, *Supercapacitor*, *Flywheel Energy Storage* (FES), dan *Superconducting Magnetic Energy Storage* (SMES).



**Gambar 2. 8** Grafik daya terhadap energi pada beberapa teknologi penyimpanan energi [4]

Sistem yang dibutuhkan dalam sistem konversi energi angin adalah media penyimpanan energi dengan kapasitas daya dan kapasitas energi yang lebar. Kapasitas daya yang lebar dibutuhkan untuk menyerap lonjakan daya, sedangkan kapasitas energi yang lebar diperlukan untuk fluktuasi daya yang berlangsung lama. Sebagaimana ditunjukkan pada gambar 2.8, media penyimpanan dengan kerapatan energi (Wh/kg) paling tinggi adalah baterai, sedangkan kerapatan daya (W/kg) yang paling tinggi dimiliki oleh *supercapacitor*. Tidak satu pun dari keempat media penyimpanan energi tersebut yang memiliki kapasitas daya dan energi yang tinggi. Sehingga teknologi hibrida baterai-*supercapacitor* menjadi solusi yang mampu menyediakan kedua hal tersebut. [4]

### 2.7.1 Baterai

Pada sistem DC *microgrid* dengan sumber energi terbarukan umumnya baterai dimanfaatkan sebagai komponen penyimpanan energi. Sebagaimana karakteristik energi angin yang *intermittent* atau sesaat, baterai dimanfaatkan untuk menjaga keseimbangan daya antara daya yang dihasilkan oleh turbin angin dan daya yang dibutuhkan oleh beban melalui proses *charging* dan *discharging* ketika daya sistem kurang maupun berlebih [9]. Baterai sekaligus dimanfaatkan untuk meregulasi

fluktuasi tegangan yang merupakan imbas dari fluktuasi kecepatan angin, supaya kualitas suplai daya terjaga.

Dalam prakteknya terdapat berbagai macam baterai yang dapat digunakan pada DC *microgrid* seperti *lead-acid*, *Nickel-Cadmium*, *Sodium-sulfur*, *Lithium ion*, *Vanadium Redox*, dan lain sebagainya. Namun, jenis baterai yang populer digunakan saat ini adalah *lead-acid* karena pertimbangan faktor ekonomis. Baterai *lead-acid* memiliki performansi yang relatif rendah pada suhu lingkungan yang tinggi dan cukup rendah, serta umur yang lebih singkat dibanding jenis baterai yang lain [9]. Pemilihan kapasitas baterai ditentukan berdasarkan persamaan [13] :

$$Ah \text{ Rating} = \frac{P_{rated} \cdot t}{V_{rated} \cdot DOD} \quad (2.30)$$

### 2.7.2 Supercapacitor

*Supercapacitor* (SC) yang juga sering disebut sebagai *ultracapacitor* (UC) atau *Electrochemical Double Layer Capacitor* (EDLC) merupakan salah satu jenis penyimpan energi yang memiliki efisiensi pengisian dan pengosongan daya tinggi, kerapatan daya 10-100 kali lebih tinggi dibanding baterai, hambatan internal rendah, serta siklus hidup yang tinggi. [15] Kekurangan yang dimiliki oleh *supercapacitor* adalah kerapatan energi yang rendah. Sehingga dalam prakteknya *supercapacitor* dan baterai akan menjadi sistem yang saling melengkapi.

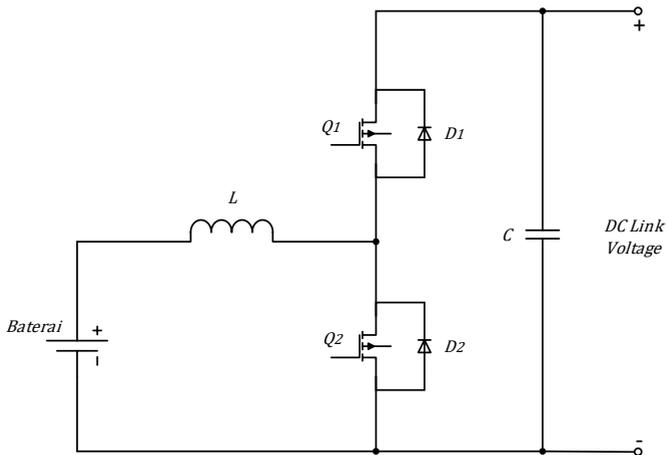
Dalam sistem konversi energi angin *supercapacitor* akan berperan saat terjadi perubahan ekstrem kecepatan angin, yang memerlukan penyerapan maupun suplai lonjakan daya dalam waktu singkat. Sehingga *supercapacitor* dibutuhkan dalam rentang waktu singkat untuk mengatasi efek *transient* yang terjadi. Kapasitas *supercapacitor* dapat ditentukan berdasar persamaan [13] :

$$C_{sup} = \frac{2 \cdot E_{sc}}{[(V_{sc}^2)_{max} - (V_{sc}^2)_{min}]} \quad (2.31)$$

Dimana  $E_{sc}$  merupakan nilai nominal energi pada *supercapacitor*,  $V_{sc_{max}}$  dan  $V_{sc_{min}}$  adalah rentang maksimum dan minimum dari tegangan operasi *supercapacitor*.

## 2.8 Konverter Bidirectional

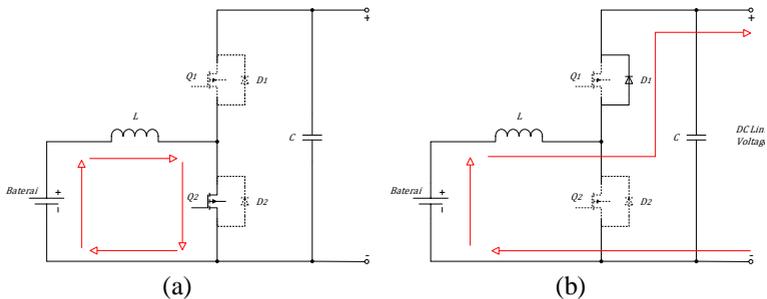
Topologi dari konverter buck boost bi-directional sering kali digunakan pada sistem konversi energi angin untuk mengatur proses penyimpanan energi menuju baterai supaya arus dan tegangan beban stabil. Konverter ini mampu mempertahankan tegangan DC link konstan lewat mekanisme charge dan discharge pada baterai sehingga walaupun terjadi fluktuasi kecepatan angin, tegangan keluaran menuju beban akan tetap konstan [9]. Konverter *bi-directional* bekerja dalam dua mode yaitu mode *boost* dan *buck*.



**Gambar 2. 9** Konverter *Bidirectional*

a. Mode 1 (*boost*)

Pada mode ini saklar  $Q_2$  dan dioda  $D_1$  mengalami konduksi bergantung pada nilai *duty cycle*-nya, sedangkan saklar  $Q_1$  dan dioda  $D_2$  padam atau terputus sepanjang waktu. Mode ini dapat dibedakan pada dua interval kerja :

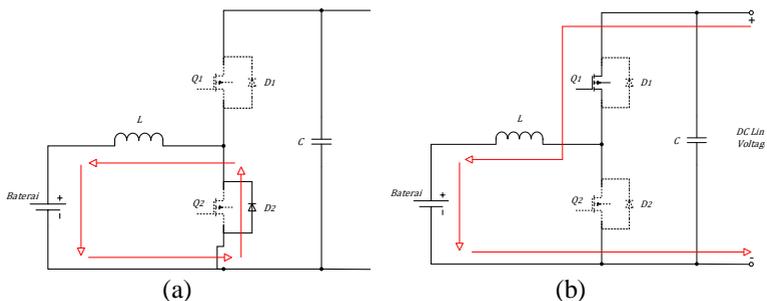


**Gambar 2. 10** Mode *boost* pada konverter *bidirectional*

- i. Interval 1 ( $Q_2$ -on,  $D_1$ -off ;  $Q_1$ -off,  $D_2$ -off)  
 Pada interval ini, bagian tegangan rendah akan melakukan pengisian ke induktor dan arus induktor akan meningkat.
- ii. Interval 2 ( $Q_1$ -off,  $D_1$ -off ;  $Q_2$ -off,  $D_2$ -on)  
 Setelah induktor terisi, polaritas tegangan yang melewati induktor akan berubah, dan membuatnya bekerja searah dengan tegangan input. Sehingga arus induktor akan mengisi kapasitor ditambah tegangan input dan tegangan akan meningkat.

b. Mode 2 (*buck*)

Pada mode ini saklar  $Q_1$  dan dioda  $D_2$  mengalami konduksi yang bergantung pada *duty cycle*, sedangkan saklar  $Q_2$  dan dioda  $D_1$  tidak bekerja. Mode ini juga terbagi ke dalam dua interval kerja :



**Gambar 2. 11** Mode *buck* pada konverter *bidirectional*

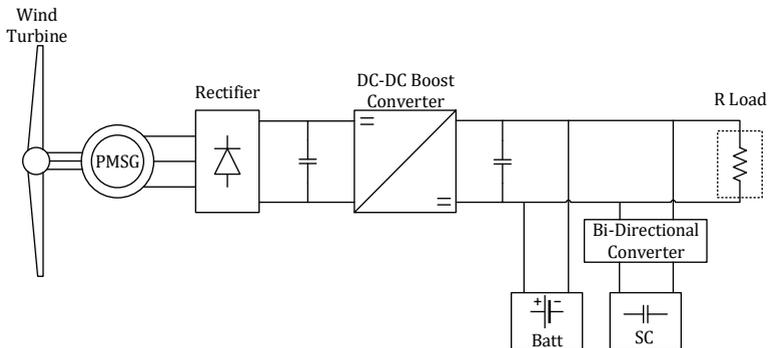
- i. Interval 1 ( $Q_2$ -off,  $D_2$ -off ;  $Q_1$ -on,  $D_2$ -off)  
Karena  $Q_2$  padam, dan  $Q_1$  konduksi maka sisi tegangan tinggi baterai akan melakukan proses *charging* menuju induktor. Lalu keluaran kapasitor akan disuplai melalui induktor.
- ii. Interval 2 ( $Q_1$ -off,  $D_1$ -off ;  $Q_2$ -off,  $D_2$ -on)  
Pada interval ini kedua saklar padam. Karena arus induktor tidak dapat berubah seketika, maka terjadi proses *discharging* melalui dioda  $D_2$ . Dan tegangan yang melewati beban akan turun dibanding dengan tegangan input.

## BAB 3 PERANCANGAN SISTEM

Dalam bab ini dijabarkan mengenai perancangan dan permodelan sistem konversi energi angin dan juga sistem hibrida baterai-*supercapacitor* sebagai komplemennya. Tugas akhir ini menggunakan *software* Simulink Matlab untuk menunjukkan bagaimana sistem konversi energi angin dapat bekerja.

### 3.1 Konfigurasi Sistem Konversi Energi Angin

Sistem ini dirancang pada skenario sistem *standalone* dengan beban yang resistif. Sistem konversi energi angin ini disusun oleh beberapa blok pendukung, yaitu turbin angin, PMSG, *rectifier* 6 pulsa, konverter DC-DC *boost*, kontroler MPPT, penyimpan energi baterai dan *supercapacitor*. Gambaran sistem secara umum dapat dilihat pada gambar 3.1.



**Gambar 3. 1** Sistem Konversi Energi Angin dengan Sistem Penyimpan Hibrida

Gambar diatas menunjukkan bagaimana konfigurasi sistem, dimana turbin angin awalnya akan menangkap energi angin untuk diubah menjadi energi mekanik. Energi mekanik yang ditangkap akan menghasilkan daya listrik 3 fasa yang terhubung pada penyearah 3 fasa, sehingga akan dihasilkan tegangan DC. Tegangan DC kemudian di

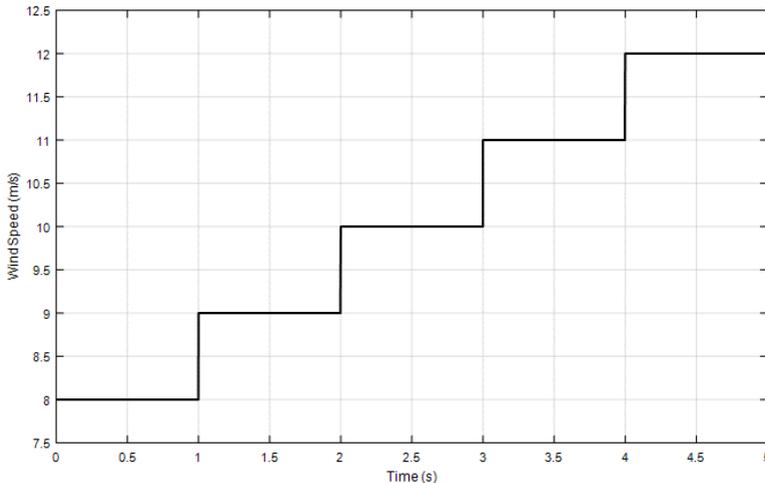
tingkatkan tegangannya hingga mencapai level tegangan yang diinginkan untuk mendapatkan daya maksimum sistem pada kecepatan angin yang berbeda-beda. Variasi yang terjadi pada DC Link diatasi oleh adanya penyimpanan energi baterai dan *supercapacitor*.

Pada sub-bab berikutnya pada bab ini, beban yang digunakan adalah beban resistif sebesar 6000 Watt. Cuplikan gambar dari kotak dialog yang berisi parameter komponen maupun permodelan dapat dilihat pada bagian lampiran.

### 3.2 Kecepatan Angin

Karakteristik suplai energi yang dihasilkan oleh turbin angin sangat bergantung pada kecepatan angin yang ditangkap oleh turbin. Sebagaimana diketahui bahwa kecepatan angin selalu berubah-ubah terhadap waktu sehingga untuk mendapatkan hasil yang lebih riil, model kecepatan angin pada percobaan ini akan dibuat bervariasi.

Pengujian pada sub-bab ini menggunakan permodelan kecepatan angin yang berubah secara konstan mulai dari kecepatan 8 m/s hingga kecepatan *base*-nya 12 m/s, untuk memperlihatkan kinerja dari sistem secara keseluruhan. Grafik model kecepatan angin sebagaimana pada gambar 3.2.



**Gambar 3. 2** Grafik Kecepatan Angin

### 3.3 Model Turbin Angin

Turbin angin yang digunakan pada tugas akhir ini merupakan permodelan yang berasal dari Matlab. Permodelan ini menunjukkan hubungan antara input kecepatan angin dengan torsi mekanik yang dihasilkan oleh turbin. Torsi mekanik yang dihasilkan pada turbin ini bergantung pada koefisien daya turbin angin.

Persamaan 2.1 dapat disederhanakan dalam bentuk per unit (p.u) sebagaimana digunakan pada perangkat lunak matlab

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

Dimana  $P_{m\_pu}$  merupakan nilai pu dari daya nominal turbin pada massa jenis udara ( $\rho$ ) dan luas sapuan bilah ( $A$ ).  $c_{p\_pu}$  merupakan koefisien daya turbin saat maksimum dalam pu.  $k_p$  adalah *power gain* dari daya nominal turbin ( $k_p \leq 1$ )

Koefisien daya ( $C_p$ ) dari blok turbin matlab dapat dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut;

$$C_p = 0.5176 \left( \frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-\frac{21}{\lambda_i}} + 0.0068\lambda \quad (3.2)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (3.3)$$

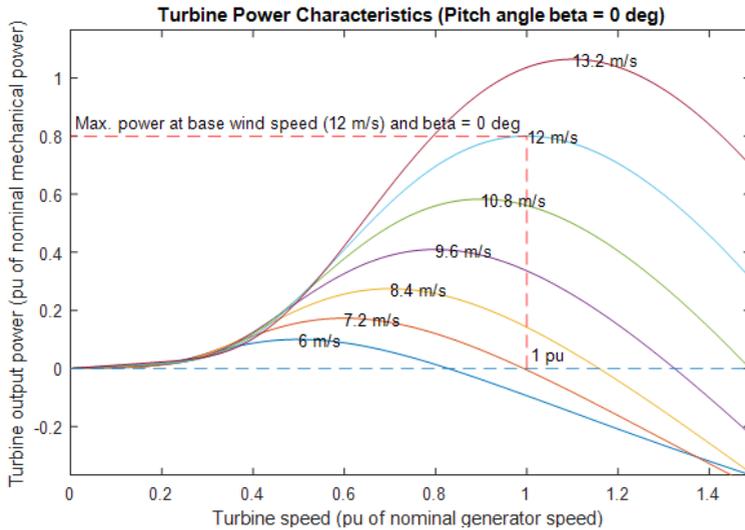
Berikut merupakan parameter dari turbin angin yang digunakan pada sistem, sebagaimana tertulis pada tabel 3.1.

**Tabel 3. 1** Parameter Turbin Angin

Daya nominal	8.5 kW
Kecepatan <i>base</i>	12 m/s
<i>Pitch angle</i> ( $\beta$ )	0 °
Koefisien daya ( $C_p$ ) maksimal	0.48
Daya mekanik nominal	0.8 pu = 6.8 kW

Sebagaimana tabel 3.1, daya nominal dari turbin angin yang bernilai 8.5 kW menunjukkan besarnya daya maksimum yang dapat dihasilkan oleh turbin. Kecepatan *base*, merupakan kecepatan angin rata-rata dari kecepatan angin yang di perkirakan. *Pitch angle* akan

menunjukkan karakteristik turbin angin yang memiliki koefisien daya maksimum sebesar 0.48. Sedangkan daya mekanik nominal, merupakan daya mekanik maksimum yang dapat dihasilkan turbin angin pada kecepatan *base*-nya, yaitu 12 m/s.



**Gambar 3. 3** Kurva Karakteristik Turbin Angin

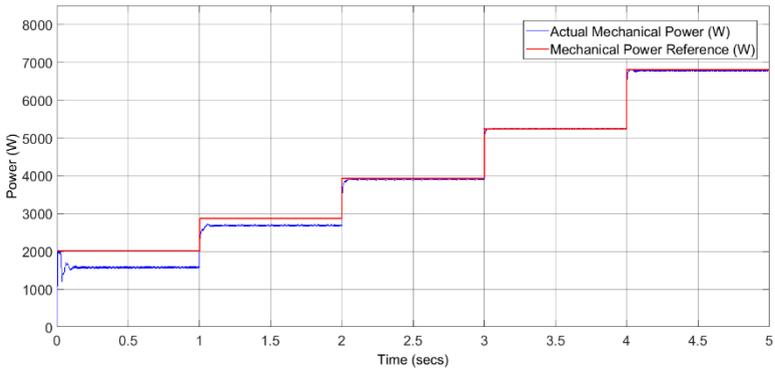
Dari kurva tersebut dapat dilihat bahwa semakin tinggi kecepatan putar generator akan semakin tinggi pula daya mekanik yang bisa dihasilkan pada titik maksimumnya. Sebagaimana ditunjukkan gambar 3.3, daya maksimum pada kecepatan *base* dapat dihasilkan saat kecepatan putar dari rotor generator sebesar 1 pu.

Hasil simulasi dari turbin angin ditunjukkan pada gambar 3.4, Dimana *reference power* merupakan daya mekanik dari turbin angin yang dapat dihitung berdasarkan persamaan (3.1), misal pada kecepatan *base* 12 m/s maka,

$$P_{m\_pu} = 0,8 \times \frac{0.48}{0.48} \times \frac{12^3}{12} = 0,8 \text{ p.u}$$

Sehingga daya yang dikeluarkan turbin pada kecepatan 12 m/s adalah

$$P_m = 0,8 \times 8500 = 6800 \text{ W}$$



**Gambar 3. 4** Perbandingan daya mekanik aktual dan referensi dari Turbin

Gambar 3.4 memperlihatkan daya mekanik yang dihasilkan oleh turbin angin pada beberapa level kecepatan, dan menunjukkan bahwa MPPT pada konverter *boost* dapat bekerja secara maksimal mulai kecepatan 10 m/s. Sedangkan pada kecepatan 8 m/s dan 9m/s terdapat sedikit penyimpangan dari daya maksimum yang dapat diekstrak dengan efisiensi masing-masing 82,5 % dan 93,4 %.

### 3.4 Model PMSG

Permodelan *Permanent Magnet-Synchronous Generator* yang digunakan pada tugas akhir ini merupakan blok *generic* Matlab. Dengan parameter generator sesuai dengan tabel 3.2.

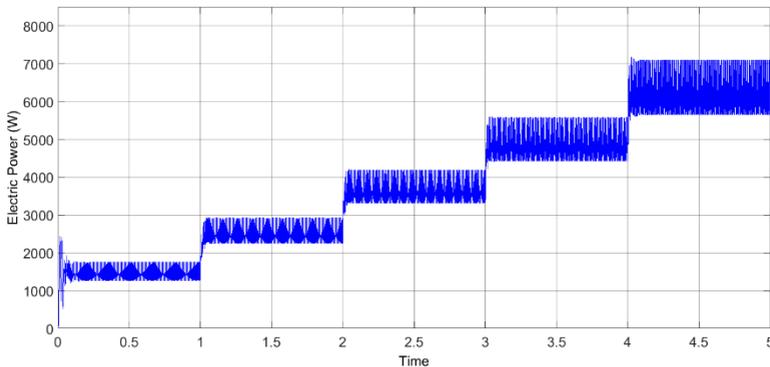
Kecepatan generator bersifat linier dengan kecepatan angin yang ditangkap oleh turbin. Semakin tinggi kecepatan angin maka generator akan menghasilkan daya yang semakin besar pula. Sebagaimana ditunjukkan pada gambar 3.5

**Tabel 3. 2** Parameter PMSG

Tipe rotor	<i>Salient-pole</i>
Jumlah pasang kutub	10
Resistansi stator (Rs)	0.09 $\Omega$

<i>Induktansi (Ld, Lq)</i>	8.2 mH ; 8.2mH
<i>Flux Linkage</i>	0.433 V.s
<i>Inersia</i>	0.01197 Kgm <sup>2</sup>
<i>Faktor gesekan</i>	0.001189 Nms

Daya elektrik yang diekstrak oleh PMSG ditunjukkan oleh gambar 3.5 yang berdasar pada kecepatan angin sebagaimana gambar 3.2. Fluktuasi daya yang disebabkan PMSG terlihat semakin besar seiring dengan bertambahnya kecepatan angin dan kecepatan generator.

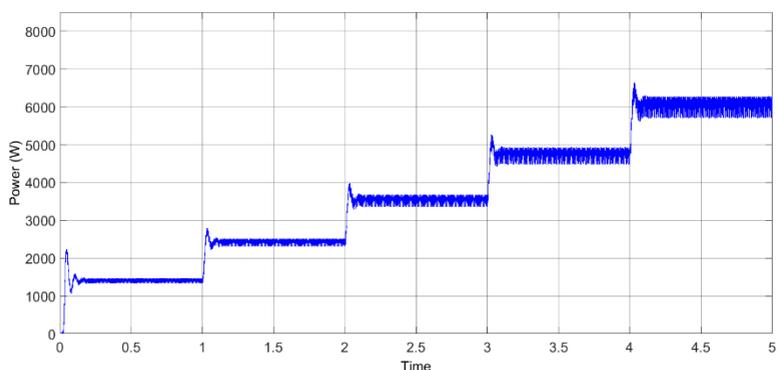


**Gambar 3. 5** Daya elektrik PMSG

### 3.5 Penyearah Dioda Tiga Fasa

Model penyearah yang digunakan adalah penyearah 6 pulsa pada simulink. Hasil simulasi dari penyearah dioda tiga fasa dapat dilihat pada gambar 3.6

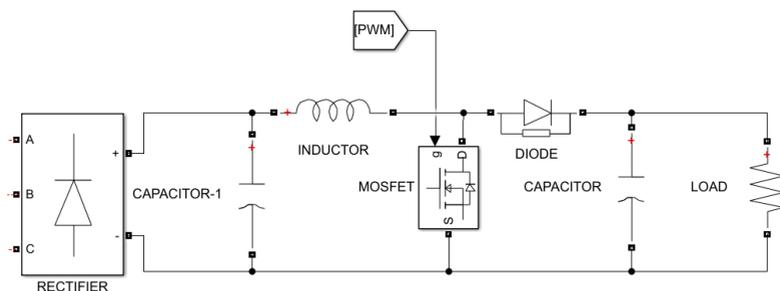
Tegangan yang dihasilkan oleh penyearah memiliki perbandingan yang sama dengan tegangan yang disuplai oleh generator. Seiring dengan kenaikan kecepatan angin, daya yang dihasilkan oleh *rectifier* juga akan semakin besar. Dari gambar 3.6 juga terlihat pengurangan riak gelombang yang dihasilkan oleh *rectifier* dibanding dengan daya elektrik PMSG yang ditunjukkan pada gambar 3.5.



**Gambar 3. 6** Daya keluaran *Rectifier*

### 3.6 Model Konverter *Boost*

Permodelan konverter *boost* sebagaimana ditunjukkan pada gambar 3.7. Keluaran dari penyearah dioda tiga fasa dari PMSG dihubungkan dengan filter kapasitor yang kemudian dihubungkan dengan konverter *boost* untuk menaikkan level tegangan.



**Gambar 3. 7** Permodelan konverter *boost* pada simulink Matlab

Permodelan konverter *boost* yang digunakan sebagaimana pada gambar 3.7, dengan detail parameter komponen sebagaimana tercantum pada tabel 3.3. Input mosfet yang berupa PWM pada gambar 3.8 berasal dari kontrol MPPT yang menggunakan metode *Perturb & Observe* (P&O).

**Tabel 3. 3** Parameter Konverter *Boost*

$C_{in}$	74.421 $\mu$ F
Induktor	35.6 mH
Frekuensi penyaklaran	5000 Hz
$C_{out}$	3.99 mF

Dalam proses desain konverter *boost* dilakukan kalkulasi terhadap beban yang dibutuhkan. Dimana, dalam bab ini diasumsikan kebutuhan daya sebesar 6000 Watt, dan tegangan DC *link* yang diinginkan sebesar 400 V. Sehingga berdasar persamaan (2.26) dapat dihitung resistansi pada konverter sebagai berikut,

$$P_{out} = \frac{V_{out}^2}{R_L}$$
$$R_L = \frac{V_{out}^2}{P_{out}}$$
$$R_L = \frac{400^2}{6000} = 26.67 \Omega$$

*Duty cycle* awal dari sistem dikalkulasikan berdasarkan persamaan (2.23), dengan tegangan input sebesar 133.97 V dan tegangan output yang diinginkan sebesar 400 V.

$$V_o = V_s \cdot \frac{1}{(1-D)}$$
$$D = 1 - \frac{V_s}{V_o}$$
$$D = 1 - \frac{133,97}{400}$$
$$D = 0,665$$

Kapasitas komponen induktor ditentukan berdasar persamaan (2.24), dengan pemilihan besar riak arus sebesar 0.5 A, sebagaimana perhitungan berikut,

$$L = \frac{V_s \cdot t_{on}}{\Delta I}$$

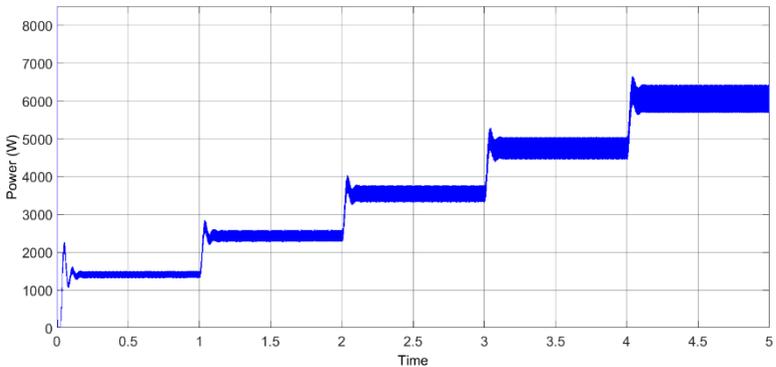
$$L = \frac{V_s \cdot D}{\Delta I \cdot f}$$

$$L = \frac{133,97 \cdot 0,665}{0,5 \cdot 5000} = 35.6 \text{ mH}$$

Sedangkan nilai dari kapasitor ditentukan berdasar persamaan (2.25), dengan pemilihan besar riak tegangan sebesar 0.5 V, sebagaimana dibawah ini,

$$C = \frac{V_o \cdot D}{R \cdot \Delta V \cdot f}$$

$$C = \frac{400 \cdot 0,665}{26,67 \cdot 0,5 \cdot 5000} = 3.99 \text{ mF}$$



**Gambar 3. 8** Hasil Simulasi Konverter *Boost*

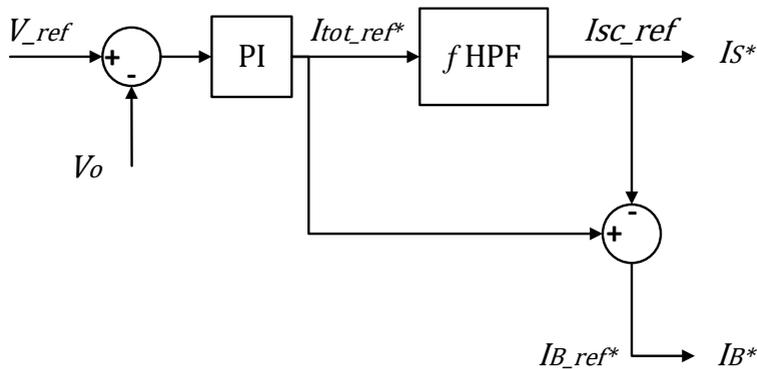
Gambar 3.8 menunjukkan daya keluaran pada konverter *boost*, dimana riak gelombang yang muncul semakin besar seiring dengan bertambahnya kecepatan angin dan juga kecepatan generator.

### 3.7 Manajemen Penyimpan Energi

Untuk memaksimalkan peran dari media penyimpanan energi baterai dan *supercapacitor*, maka perlu adanya strategi pembagian daya (*power sharing*). Metode pembagian daya yang digunakan adalah dengan membagi dua media penyimpanan berdasarkan wilayah kerja frekuensinya. Dalam tugas akhir ini dipilih penggunaan *high pass filter* (HPF) dengan frekuensi sebesar 5 Hz. Filter ini digunakan untuk

melakukan filtrasi terhadap *supercapacitor* dengan melewati sinyal di atas 5Hz sebagai wilayah kerja dari *supercapacitor*. Sehingga *supercapacitor* dapat mengambil lonjakan daya dari sistem.

Skenario *power sharing* yang digunakan sebagaimana tercantum pada gambar 3.9. Dengan parameter PI,  $K_p = 15$  dan  $K_i = 1.5$  yang didapat secara *trial and error*. Nilai tegangan referensi ( $V_{ref}$ ) yang digunakan adalah 400 V, yang dibandingkan dengan tegangan aktual ( $V_o$ ) pada sisi DC link.



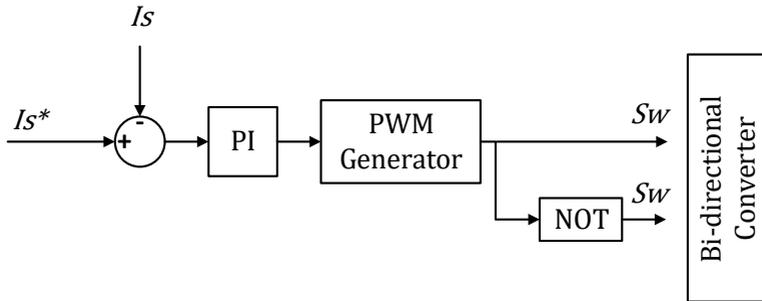
**Gambar 3. 9** Skenario *Power Sharing* pada baterai dan *supercapacitor*

$I_{tot\_ref}^*$  pada gambar 3.9, merupakan hasil interpolasi dari PI yang berupa arus referensi total yang kemudian dibagi menggunakan filter, sehingga arus total terbagi menuju *supercapacitor* ( $I_{sc\_ref}$ ) dan sisanya diakomodir baterai.

### 3.8 Model Konverter *Bidirectional*

Sebagaimana dijelaskan pada bab sebelumnya konverter *bidirectional* dimanfaatkan untuk mengatur aliran daya dari/menuju baterai. Proses pengisian dan pengosongan pada media penyimpanan energi bertujuan untuk menjaga tegangan DC link konstan. Untuk mendapatkan pendekatan nilai tegangan DC Link sesuai yang diinginkan, diperlukan metode kontrol pada konverter *bidirectional*. Kontroler yang digunakan pada konverter ini adalah kontroler PI dengan referensi arus. Parameter PI yang digunakan untuk mengontrol *supercapacitor* adalah  $K_p = 0.5$  dan

$K_i = 0.0005$ , dimana nilai  $K_p$  dan  $K_i$  didapat secara *trial and error*. Dan frekuensi *switching* dipilih sebesar 5kHz.



**Gambar 3. 10** Strategi kontrol *Supercapacitor*

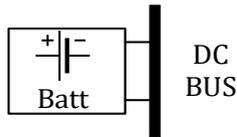
Strategi kontrol *supercapacitor* pada gambar 3.10 menggunakan referensi arus seperti pada gambar 3.9 yang merupakan arus keluaran dari hasil pembagian daya antara baterai dan *supercapacitor*. Yang kemudian dibandingkan dengan arus aktual pada *supercapacitor* ( $I_s$ ) untuk menghasilkan *duty cycle* bagi konverter *bi-directional*.  $Sw$  pada gambar 3.10 merupakan sinyal PWM yang disambungkan menuju saklar yang terhubung pada *bi-directional* untuk mengatur mekanisme pengisian maupun pengosongan pada *supercapacitor*.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

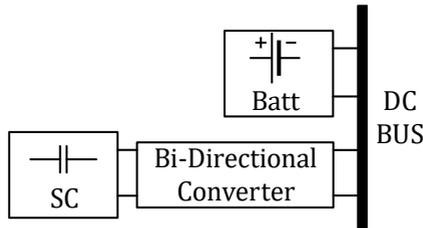
## BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Topologi Penyimpan Energi

Pada tugas akhir ini dilakukan perbandingan dua macam topologi penyimpanan energi, yaitu *single storage (battery only)* dengan topologi hibrida *semi-active*. *Schematic* dari kedua topologi itu dapat dilihat pada gambar 4.1 dan 4.2.



**Gambar 4. 1** Topologi *Single storage (battery only)*



**Gambar 4. 2** Topologi *semi-active*

Pada topologi penyimpanan yang tanpa menggunakan kontroler sebagaimana topologi *semi-active* dan *single storage*, maka penentuan tegangan baterai didasarkan pada tegangan *DC link* yang diinginkan. Sehingga dipilihlah tegangan nominal baterai 400 V, untuk membuat tegangan *DC link* bekerja dikisaran 400 V. Penentuan kapasitas baterai berdasarkan pada persamaan (2.30)

$$Ah \text{ Rating} = \frac{6000 \cdot 0.5}{400 \cdot 0.5} = 15 \text{ Ah}$$

Berdasarkan perhitungan didapatkan kapasitas baterai sebesar 15Ah. Dengan asumsi  $t$  selama 30 menit, dan *Depth of Discharge (DOD)*

sebesar 50%. Sedangkan penentuan kapasitas *supercapacitor* berdasarkan pada persamaan (2.31)

$$C_{sup} = \frac{2 \cdot 6000 \cdot 0,5}{[200^2 - 185^2]} = 1.03 F$$

Sehingga didapat kapasitas kapasitor sebesar 1.03 F, dengan asumsi t selama 30 menit, dan tegangan operasi mulai dari 185 hingga 200 V.

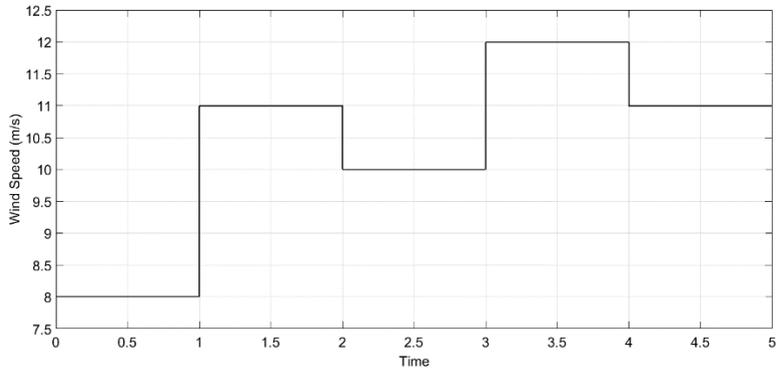
## **4.2 Hasil Simulasi *Energy Storage* sebagai *Power Smoothing* dalam Sistem Konversi Energi Angin**

Dalam sub-bab ini akan ditampilkan hasil simulasi penyimpanan energi sebagai penghalus daya DC *Link*. Untuk menguji bahwa media penyimpanan energi mampu bekerja sesuai yang diinginkan, maka dilakukan beberapa studi kasus pada perubahan kecepatan angin dan juga perubahan yang terjadi pada beban.

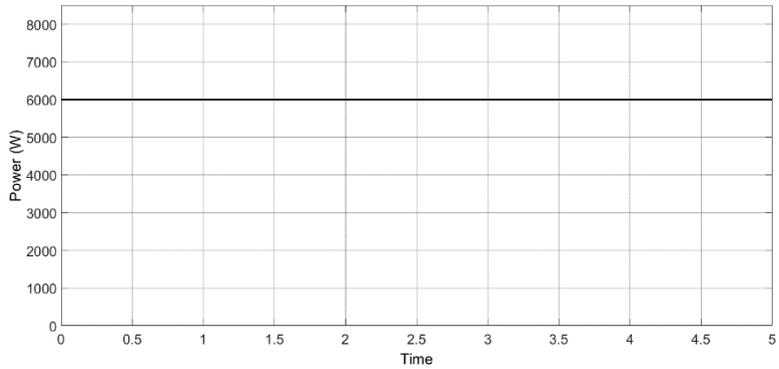
Studi kasus ini digunakan untuk memperlihatkan perbedaan respon sistem ketika tersambung pada baterai secara langsung, dan ketika tersambung pada sistem energi hibrida secara *semi-active*. Sehingga kemampuan sistem hibrida dengan topologi *semi-active* dapat dianalisis.

### **4.2.1 Skenario (1) Kecepatan Angin Berubah dan Kebutuhan Daya Konstan**

Pengujian sistem yang pertama menggunakan variasi kecepatan angin antara 8 m/s hingga 12 m/s sebagaimana gambar 4.3. Perubahan kecepatan angin akan mengakibatkan perubahan daya keluaran dan juga tegangan, yang sifatnya linier dengan kecepatan angin.



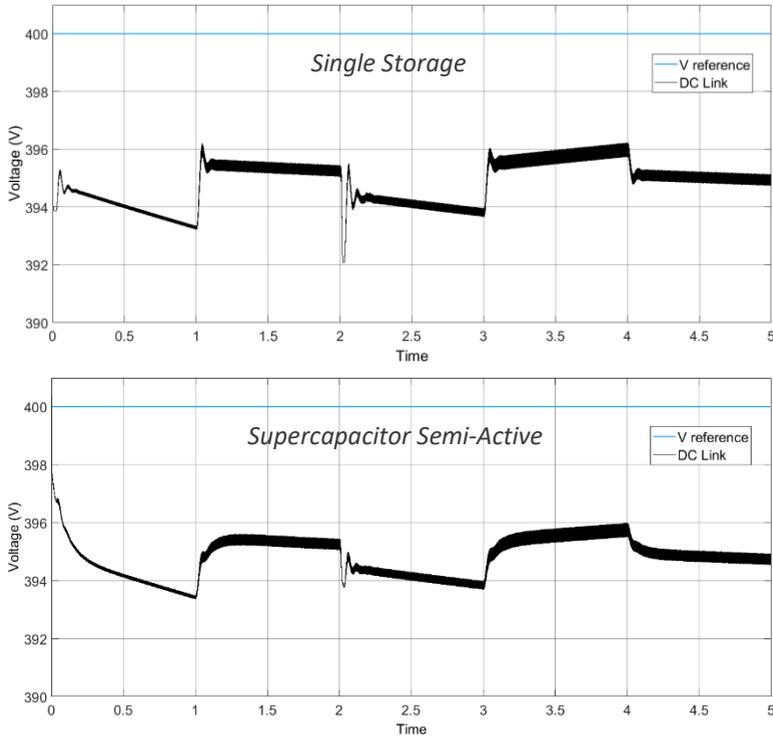
**Gambar 4. 3** Permodelan Kecepatan Angin Variatif



**Gambar 4. 4** Permodelan Kebutuhan Daya Konstan

Berikut adalah hasil pada skenario kecepatan angin berubah yang terhubung pada beban konstan ;

- 1) *DC Link*

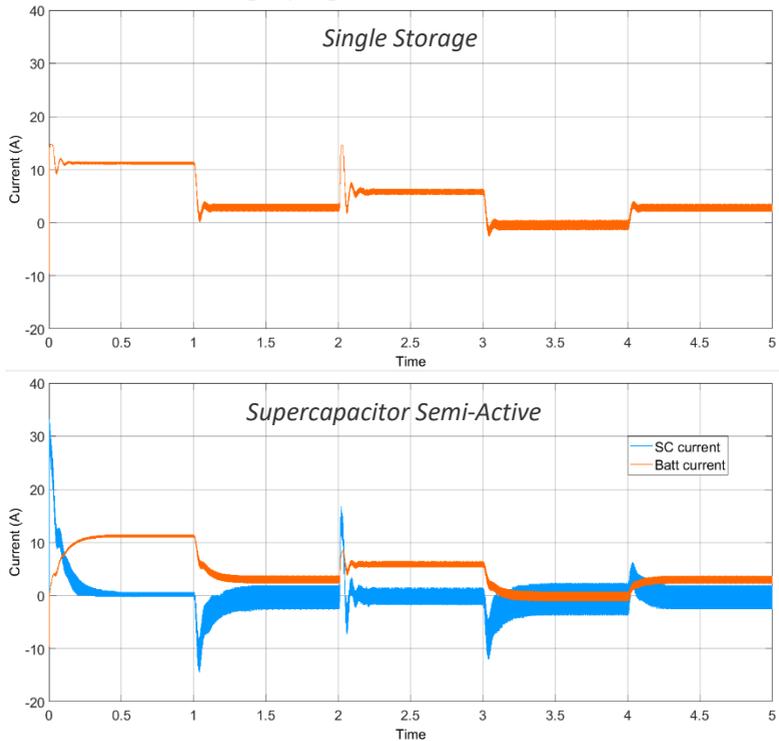


**Gambar 4. 5** Perbandingan tegangan DC link pada skenario 1

Pada kedua topologi tersebut tegangan DC link akan menyesuaikan tegangan baterai, karena terhubung secara paralel dengan baterai. Sebagaimana ditunjukkan oleh grafik pada gambar 4.5. Tegangan DC Link pada topologi *semi-active* menunjukkan hasil yang sedikit lebih halus dibanding pada penggunaan baterai saja, dimana *overshoot* tegangan yang muncul per detik dapat diakomodir dengan baik oleh *supercapacitor*.

Seperti terlihat pada gambar 4.5, saat  $2 \geq t \leq 2.1$  *supercapacitor* dapat meredam *overshoot* dari 3 Volt menjadi 0.75 Volt, atau sekitar 75 %. Selain itu penggunaan topologi *semi-active* membuat tegangan DC link lebih halus dan landai dibanding penggunaan *single storage*.

## 2) Arus media penyimpanan

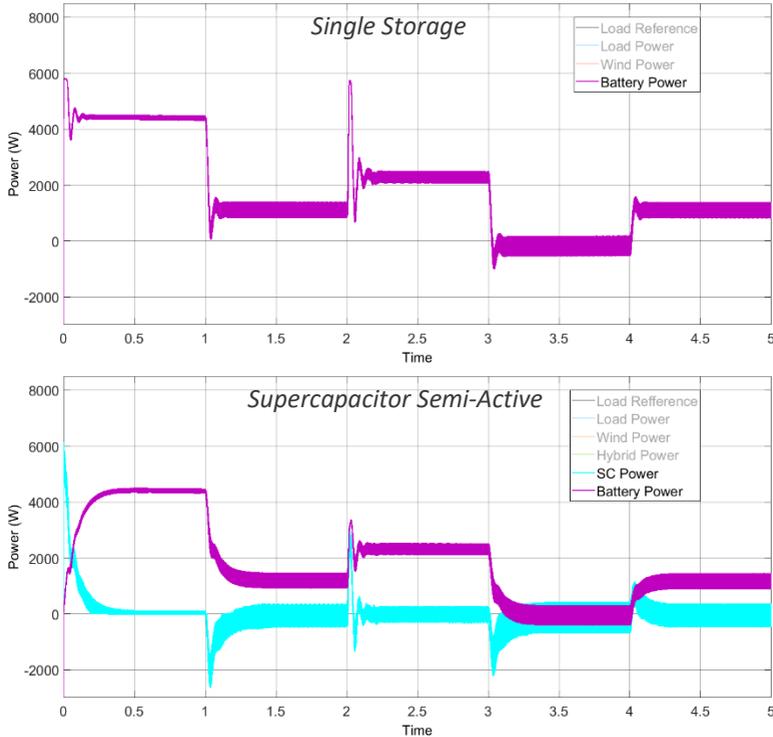


**Gambar 4. 6** Perbandingan arus media penyimpanan pada skenario 1

Perubahan polaritas arus yang terjadi pada baterai menunjukkan proses *charge-discharge*, yang mana proses *charge-discharge* ini bisa bila terjadi secara berlebihan dapat memperpendek umur dari baterai. Pada kecepatan angin yang bervariasi akan timbul lonjakan arus pada sistem yang berbahaya bagi media penyimpanan baterai. Topologi *semi-active* mampu menyerap lonjakan arus yang ditimbulkan oleh sistem melalui pemanfaatan *supercapacitor*.

Pada hasil keluaran arus sebagaimana gambar 4.6 saat  $2 \geq t \geq 2.1$ , lonjakan arus baterai yang semula 11 A dapat direduksi pada penggunaan topologi hibrida menjadi 4.7 A atau sebesar 57.3 %.

### 3) Daya

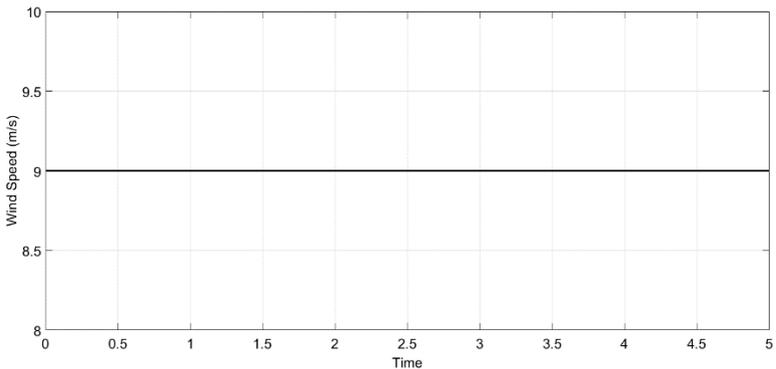


**Gambar 4. 7** Perbandingan daya media penyimpanan pada skenario 1

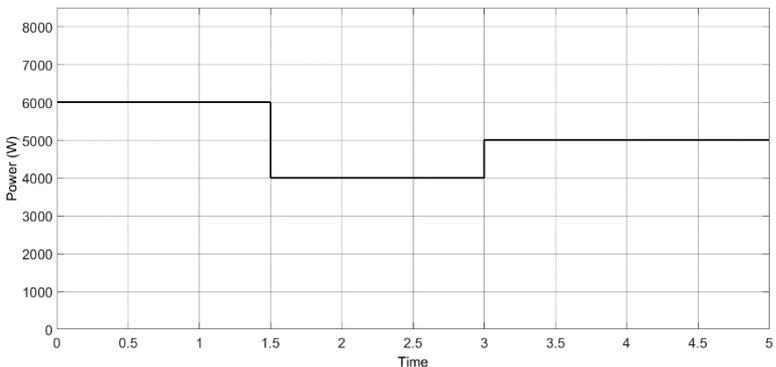
Sehingga pada gambar 4.7, dapat dilihat perbedaan lonjakan daya baterai yang cukup signifikan. Dimana pada topologi hibrida *semi-active, supercapacitor* mampu mengakomodir lonjakan daya yang muncul. Fluktuasi daya yang muncul tiap detik (0-5s) pada topologi *single storage*, mampu diserap dengan baik oleh *supercapacitor*. Sehingga daya yang diserap maupun dilepas baterai jauh lebih halus dan landai dibanding pada topologi *single storage*.

#### 4.2.2 Skenario (2) Kecepatan Angin Konstan dan Kebutuhan Daya Berubah

Skenario kecepatan angin dan pembebanan pada sistem dapat dilihat pada gambar 4.8 dan 4.9. Dimana kecepatan angin konstan pada kecepatan 9 m/s. Sedangkan pada sisi beban diasumsikan terdapat pemutusan maupun penyambungan beban secara tiba-tiba, dengan karakteristik beban yang dibutuhkan berubah-ubah. Perubahan beban dimulai dari 6000 Watt, 4000 Watt, dan 5000 Watt.



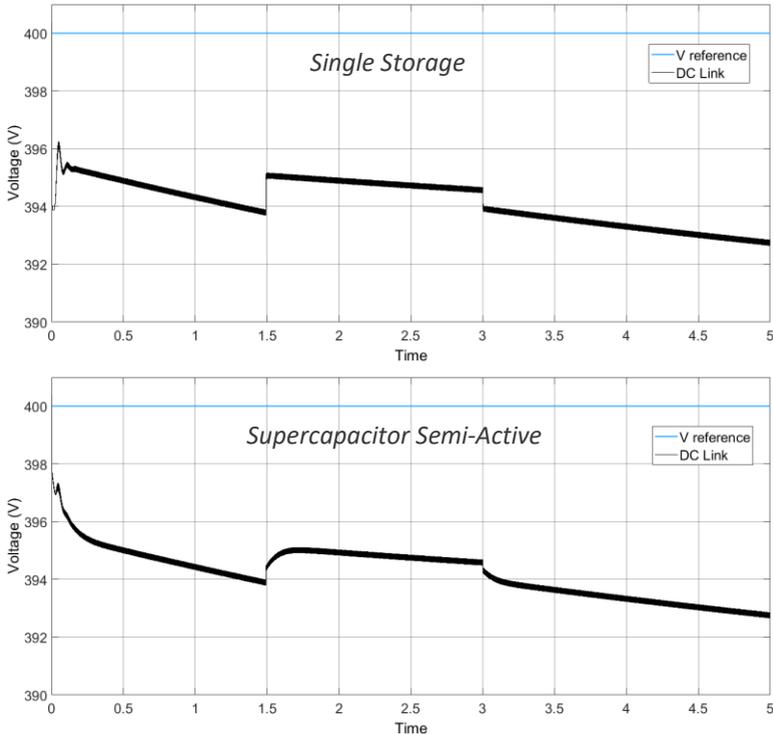
**Gambar 4. 8** Permodelan Kecepatan Angin Konstan



**Gambar 4. 9** Permodelan Kebutuhan Daya Berubah

Berikut adalah hasil yang didapat pada skenario kecepatan angin konstan dan beban variatif ;

1) DC link

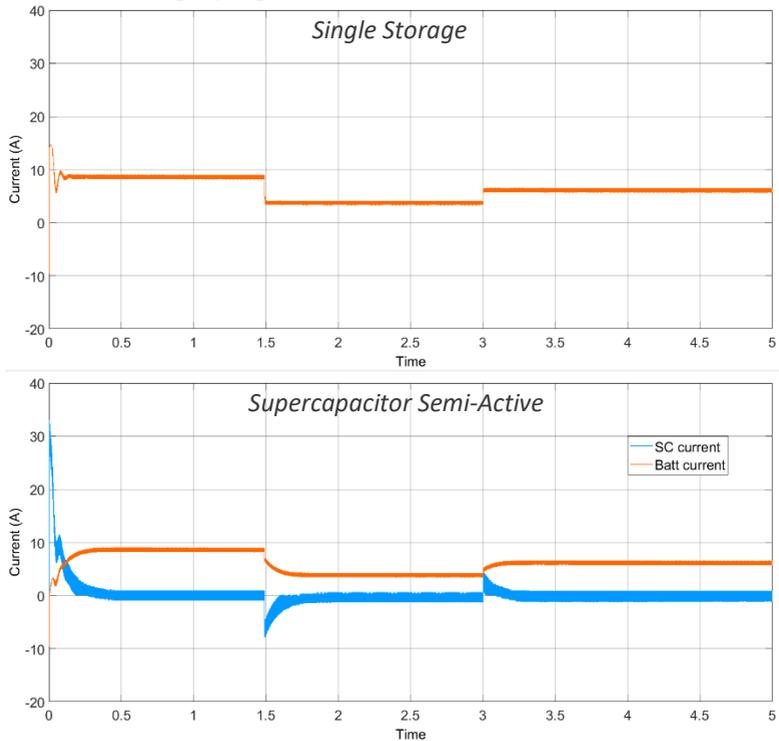


**Gambar 4. 10** Perbandingan tegangan DC link pada skenario 2

Pada kecepatan angin konstan baterai terlihat lebih stabil tegangannya walaupun nilainya masih berada dibawah tegangan DC Link 400 V. Hal ini ditambah lagi oleh perubahan beban yang tidak terlalu signifikan.

Tegangan DC link pada gambar 4.10 mengalami sedikit perubahan akibat penggunaan *supercapacitor* pada topologi *semi-active*. Sebagaimana terlihat pada gambar 4.10 saat  $t \geq 0$ ,  $t \geq 1.5$ , dan  $t \geq 3$ . Tegangan DC link terlihat lebih halus dan lebih landai dibanding tegangan DC link pada topologi *single storage*.

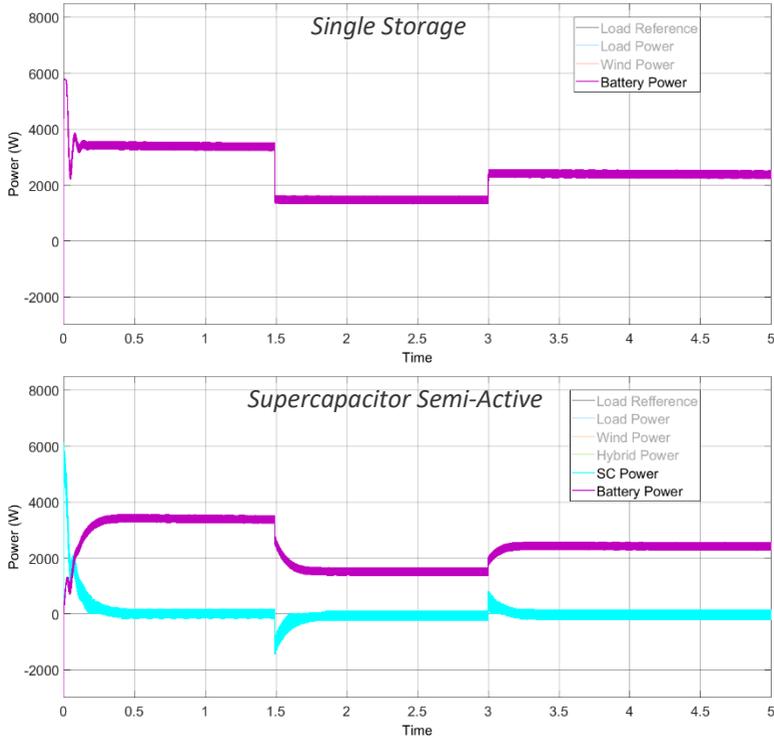
## 2) Arus penyimpanan



**Gambar 4. 11** Perbandingan arus media penyimpanan pada skenario 2

Begitu pula pada arus penyimpanan seperti pada gambar 4.11, dimana penyusutan arus, dapat seluruhnya diakomodir oleh *supercapacitor* saat  $t \geq 0$ . Dan pada  $t \geq 1.5$  dan  $t \geq 3$ , perubahan arus pada baterai yang disebabkan perubahan beban dapat diperhalus dengan keberadaan *supercapacitor* pada topologi *semi-active*. Sehingga arus yang masuk maupun keluar dari baterai menjadi lebih landai dibanding pada topologi *single storage*.

### 3) Daya



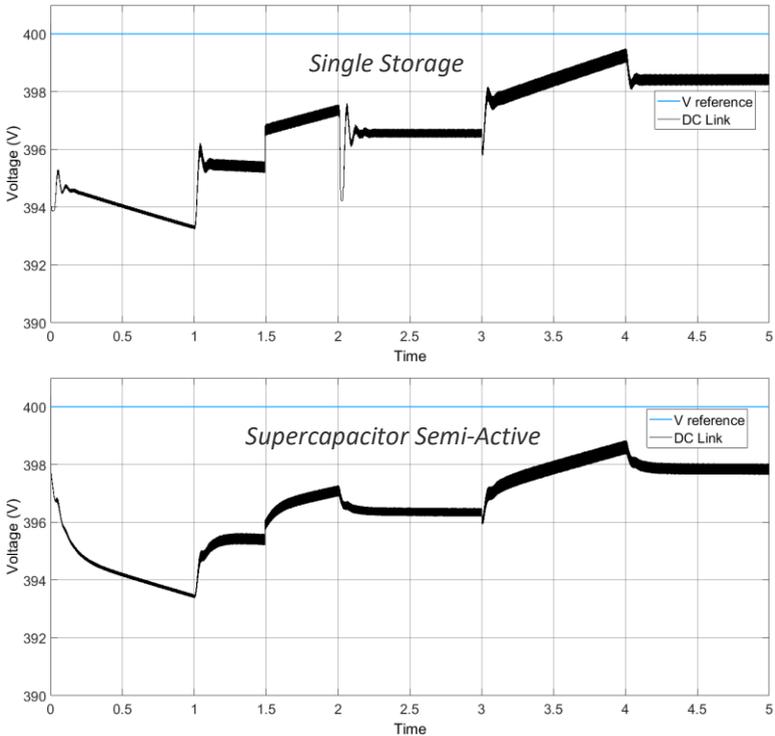
**Gambar 4. 12** Perbandingan daya media penyimpanan pada skenario 2

Pada studi kasus ini, perubahan daya baterai pada topologi *semi-active* terlihat jauh lebih halus dibanding pada topologi *single storage*, seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.12. Sehingga kinerja yang dilakukan oleh baterai jauh lebih ringan dibanding penggunaan topologi *single storage*.

#### 4.2.3 Skenario (3) Kecepatan Angin Berubah dan Kebutuhan Daya Berubah

Pada skenario ini kecepatan angin dimodelkan secara variatif sebagaimana pada gambar 4.3 dan pembebanan yang juga variatif seperti pada gambar 4.9. Berikut hasil pengujian sistem pada skenario ini ;

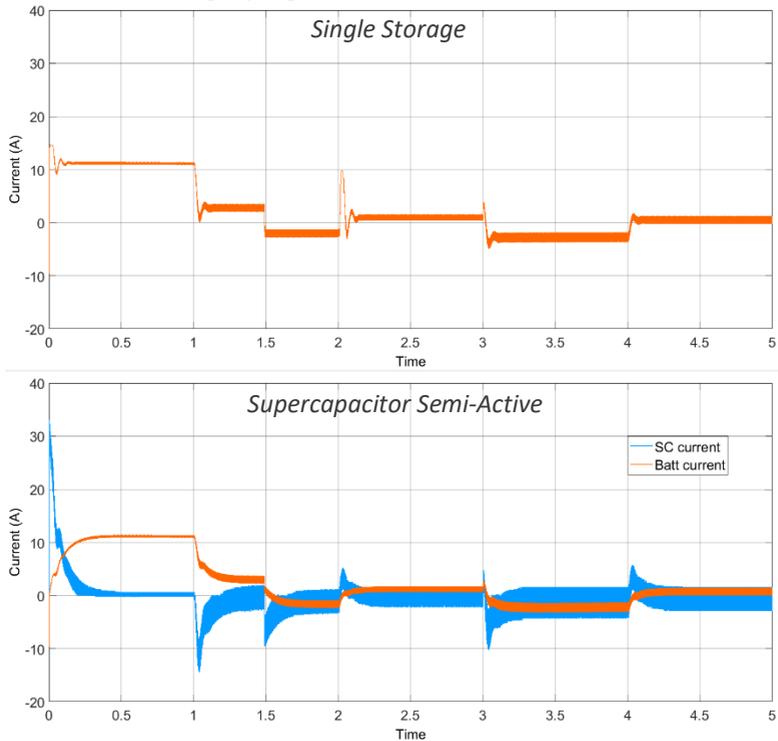
### 1) DC link



**Gambar 4. 13** Perbandingan tegangan DC link pada skenario 3

Pada gambar 4.13, saat  $2 \geq t \leq 2.1$  dapat terlihat bagaimana *supercapacitor* dapat meredam *overshoot* dari 3.36 Volt menjadi 0.47 Volt, atau sekitar 86 %. Pada setiap fluktuasi dan *overshoot* tegangan yang terjadi pada skenario ini, topologi *semi-active* dapat mengakomodirnya. Sehingga tegangan DC link menjadi lebih halus dan lebih landai dibanding pada topologi *single storage*.

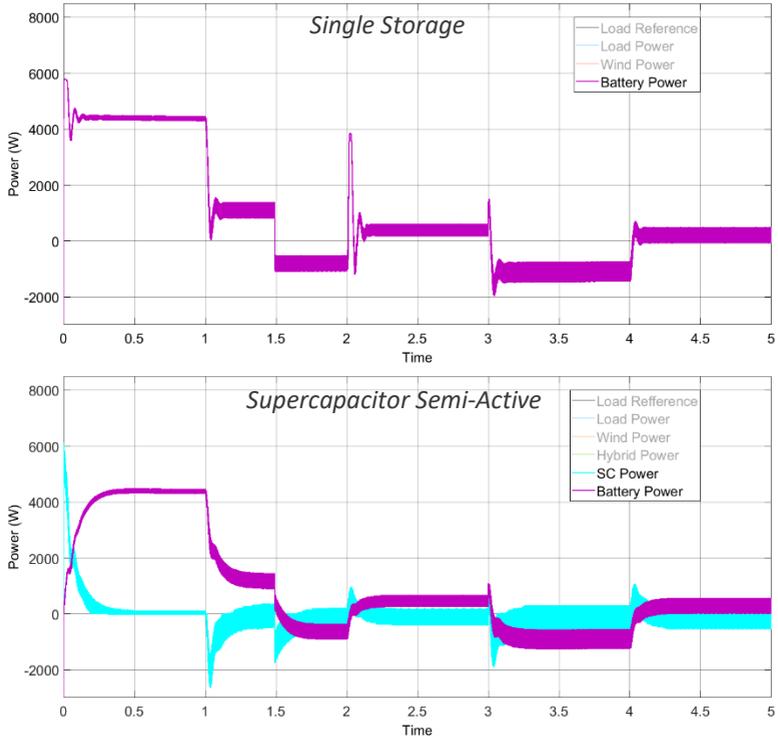
## 2) Arus penyimpanan



**Gambar 4. 14** Perbandingan arus media penyimpanan pada skenario 3

Sedangkan hasil keluaran arus yang ditampilkan pada gambar 4.14 saat  $2 \geq t \leq 2.1$ , lonjakan arus baterai yang semula 11 A dapat direduksi pada penggunaan topologi hibrida menjadi 2.57 A atau sebesar 76.6 %.

### 3) Daya



**Gambar 4. 15** Perbandingan daya media penyimpanan pada skenario 3

Gambar 4.15 menunjukkan perbandingan yang signifikan pada lonjakan daya baterai seperti yang terjadi pada saat  $2 \geq t \leq 2.1$ . Dimana pada topologi hibrida *semi-active*

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **BAB 5**

### **KESIMPULAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Dari hasil simulasi sistem turbin angin yang terhubung dengan dua jenis topologi penyimpanan energi yang berbeda, yaitu *single storage* dan topologi penyimpanan energi hibrida *semi-active*, didapatkan beberapa kesimpulan, diantaranya :

1. Pada penggunaan topologi *single storage* terjadi fluktuasi pada tegangan dan arus baterai, sehingga fluktuasi daya yang dihasilkan cukup besar.
2. Penggunaan topologi hibrida *supercapacitor semi-active* mampu memperhalus daya dengan membaginya pada baterai dan *supercapacitor*.
3. Lonjakan arus yang terjadi pada topologi *single storage*, dapat diakomodir dengan baik melalui penggunaan *supercapacitor* pada topologi hibrida *semi-active* dengan rata-rata reduksi sebanyak 66.95 %.
4. Tegangan DC *link* yang dihasilkan pada topologi hibrida *supercapacitor semi-active* lebih halus dan lebih landai dibanding topologi *single storage*, dengan rata-rata reduksi sebesar 80.5 %.

#### **5.2 Saran**

Perancangan tugas akhir ini dikerjakan tanpa mempertimbangkan aspek ekonomi, karenanya diharapkan terdapat tinjauan ekonomi terhadap topologi hibrida baterai-*supercapacitor*. Sehingga dapat menjadi acuan yang lebih layak dalam perencanaan sistem hibrida pada sistem konversi energi angin.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

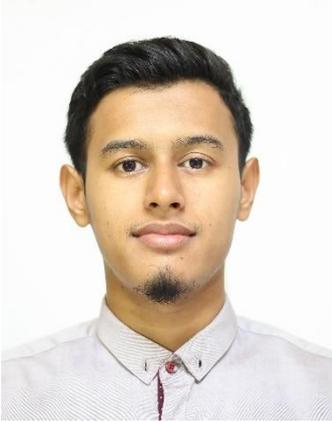
## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi, Outlook Energi Indonesia 2016, no. July. Jakarta: Pusat Teknologi Sumber Daya Energi dan Industri Kimia (PTSEIK), 2016.
- [2] Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral, “RUPTL PLN 2016-2025.” Kementerian Energi dan Sumberdaya Mineral (KESDM), Jakarta, p. 524, 2016.
- [3] Direktorat Jenderal Energi Baru Terbarukan dan Konservasi Energi, “Statistik EBTKE 2016,” p. 68, 2016.
- [4] W. Li and G. Joós, “A power electronic interface for a battery *supercapacitor* hybrid energy storage system for wind applications,” in PESC Record - IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference, 2008, pp. 1762–1768.
- [5] G. Zhang, X. Tang, and Z. Qi, “Research on battery *supercapacitor* hybrid storage and its application in MicroGrid,” in Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, APPEEC, 2010.
- [6] I. Chotia and S. Chowdhury, “Battery storage and hybrid battery *supercapacitor* storage systems: A comparative critical review,” in Proceedings of the 2015 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia, ISGT ASIA 2015, 2016.
- [7] P. Yu, G. L. Li, Y. Zhang, Y. Cheng, S. M. Sun, and P. Zhao, “The Review on the Topology of Battery-*Supercapacitor* Hybrid System Applied into the Real-Time Wind Power Suppression,” Adv. Mater. Res., vol. 860–863, pp. 287–292, 2013.
- [8] R. P. Eviningsih, “Pengaturan Konverter DC-DC Bidirectional dengan MPPT berbasis Modified Perturbation and Observation,” Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2016.
- [9] R. I. Putri, “Pengembangan Strategi Kontrol Optimal pada PMSG Wind Turbine melalui Sistem Penyimpan Energi Berbasis Algoritma Swarm Intelligence,” Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2017.
- [10] REN21, Renewables 2017 Global Status Report. Paris: REN21,

2017.

- [11] Kementerian ESDM, “Peta Potensi Energi Angin Indonesia.” .
- [12] A. M. Howlader, N. Urasaki, A. Yona, T. Senju, and A. Y. Saber, “A review of output power smoothing methods for wind energy conversion systems,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 26. pp. 135–146, 2013.
- [13] 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,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 5, no. 2, pp. 944–953, 2014.
- [14] M. Ashari, *SISTEM KONVERTER DC; Desain Rangkaian Elektronika Daya*, I. Surabaya: ITS Press, 2012.
- [15] S. Adhikari, Z. Lei, W. Peng, and Y. Tang, “A battery/*supercapacitor* hybrid energy storage system for DC microgrids,” in *2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference, IPEMC-ECCE Asia 2016*, 2016, pp. 1747–1753.

## BIODATA PENULIS



**Rusdy Saleh**, terlahir di kota Solo, 10 Desember 1995. Penulis merupakan buah hati dari pasangan (alm.) dr. Saleh Badar dengan Wahidah. Jenjang pendidikan formal yang ditempuh penulis dimulai di SDN Ngaglik 01 Batu, SMP Al-Islam 1 Surakarta, hingga menyudahi masa putih abu di SMA N 3 Surakarta. Jenjang pendidikan tingginya dimulai pada tahun 2014 di kampus pahlawan Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya, Departemen Teknik Elektro. Semasa kuliah penulis aktif mengisi

waktunya berpartisipasi di HIMATEKTRO ITS sebagai staff Departemen Keprofesian dan Kesejahteraan Mahasiswa, dan Kepala Departemen Keprofesian. Di tahun terakhirnya penulis memanfaatkan waktu dalam kegiatan internasionalisasi berupa *short program* di *University of Southern Denmark*. Penulis dapat dihubungi melalui email : [rusdysaleh.al@gmail.com](mailto:rusdysaleh.al@gmail.com)