



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - TE 141599

**Desain dan Simulasi Sistem Penyimpanan Energi *Hybrid*
Menggunakan Superkapasitor dan Baterai Pada
Pembangkit Listrik Tenaga Surya**

Aditya Setiadi Putra
NRP. 07114400000014

Dosen Pembimbing
Vita Lystianingrum, S.T, M.Sc., Ph.D
Heri Suryoatmojo, S.T, M.T., Ph.D

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018





ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - TE 141599

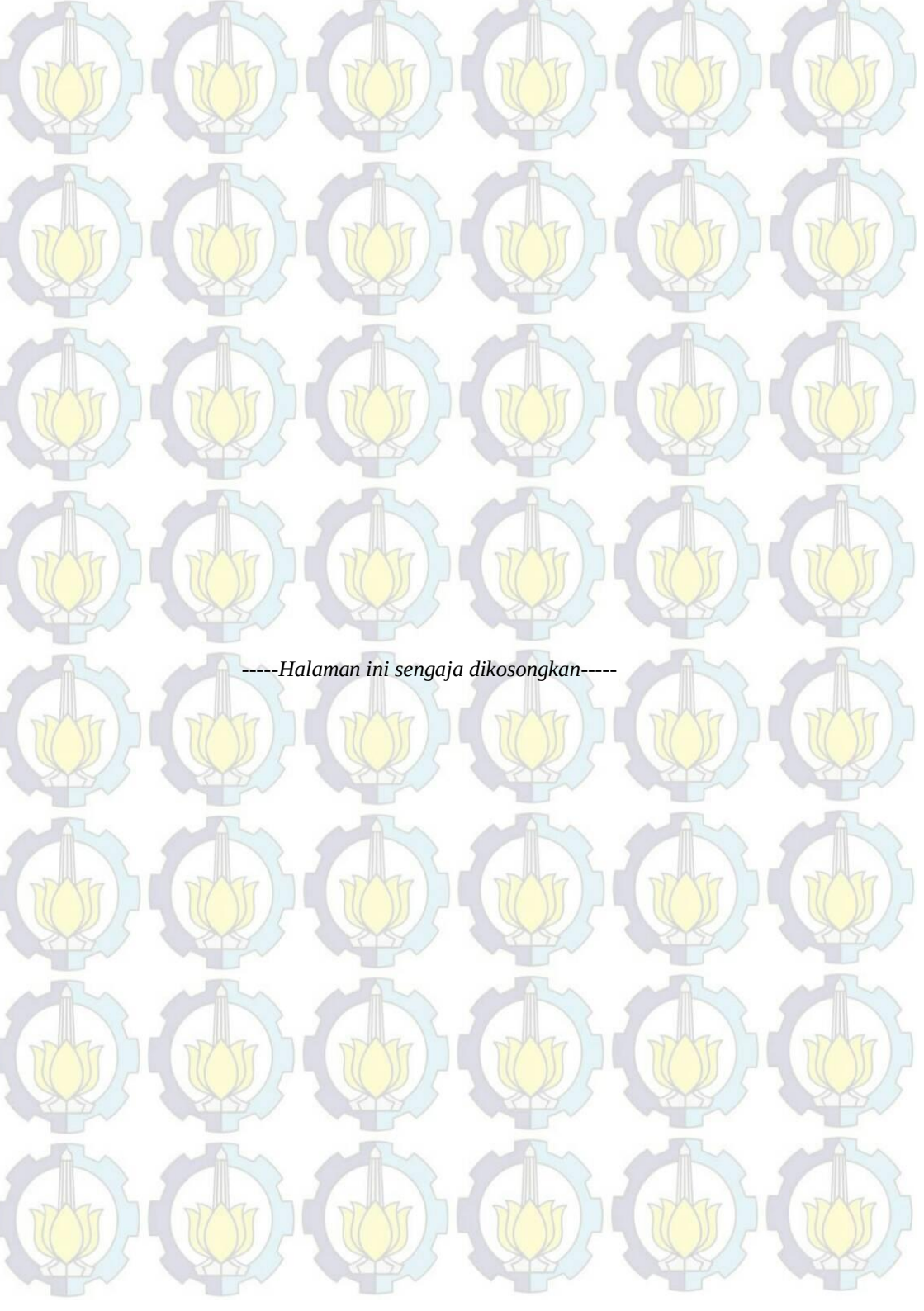
***Design and Simulation of Hybrid Energy Storage Systems
Using Super Capacitors and Batteries in Solar Power***

Aditya Setiadi Putra
NRP. 07114400000014

Supervisor

Vita Lystianingrum, S.T., M.T., Ph.D
Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Electrical Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

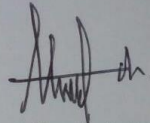
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul “ **Desain dan Simulasi Sistem Penyimpanan Energi Hybrid Menggunakan Superkapasitor dan Baterai Pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya**” 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.

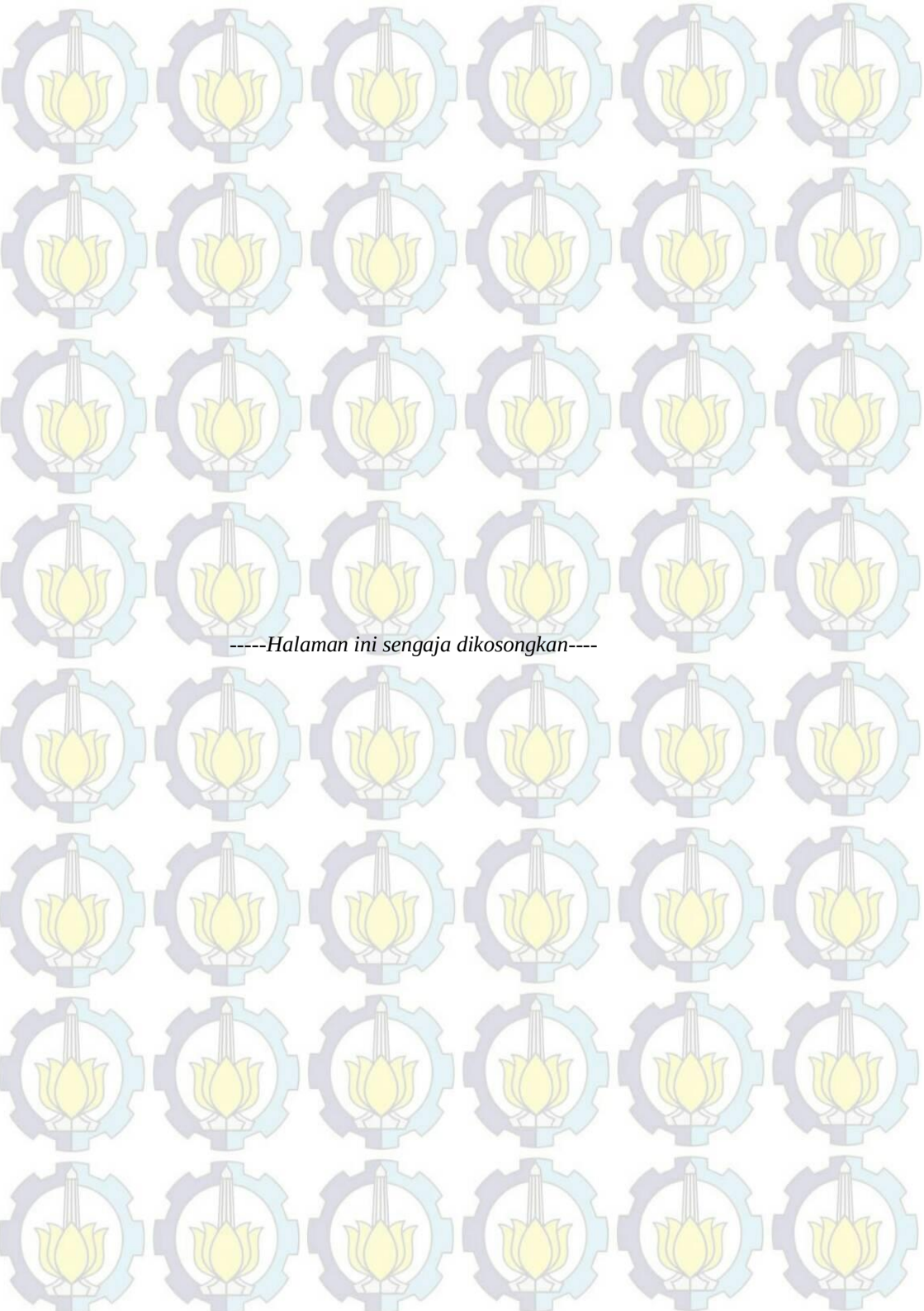
Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

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

Surabaya, 30 November 2018



Aditya Setiadi Putra
NRP 07114400000014



-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

**DESAIN dan SIMULASI SISTEM PENYIMPANAN ENERGI
HYBRID MENGGUNAKAN SUPERKAPASITOR dan BATERAI
pada PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA**

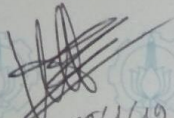
TUGAS AKHIR

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Departemen Teknik Elektro
Fakultas Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

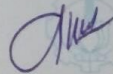
Menyetujui:

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II



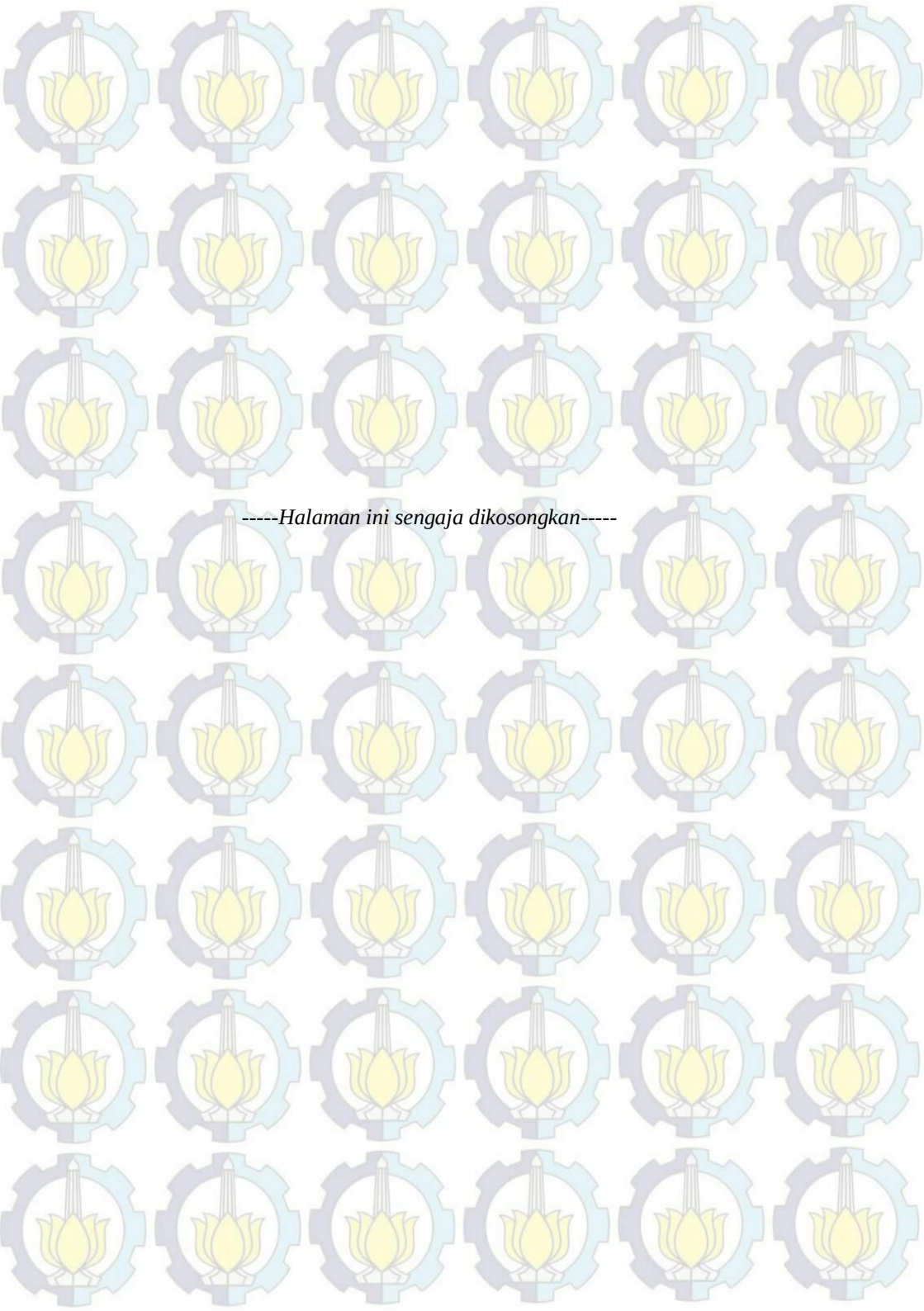
28/1/20



Vita Lystianingrum, S.T. M.Sc., Ph.D
NIP. 198208292006042001

Heri Suryoatmojo, S.T. M.T., Ph.D
NIP. 198006032006041003

**SURABAYA
JANUARI, 2019**



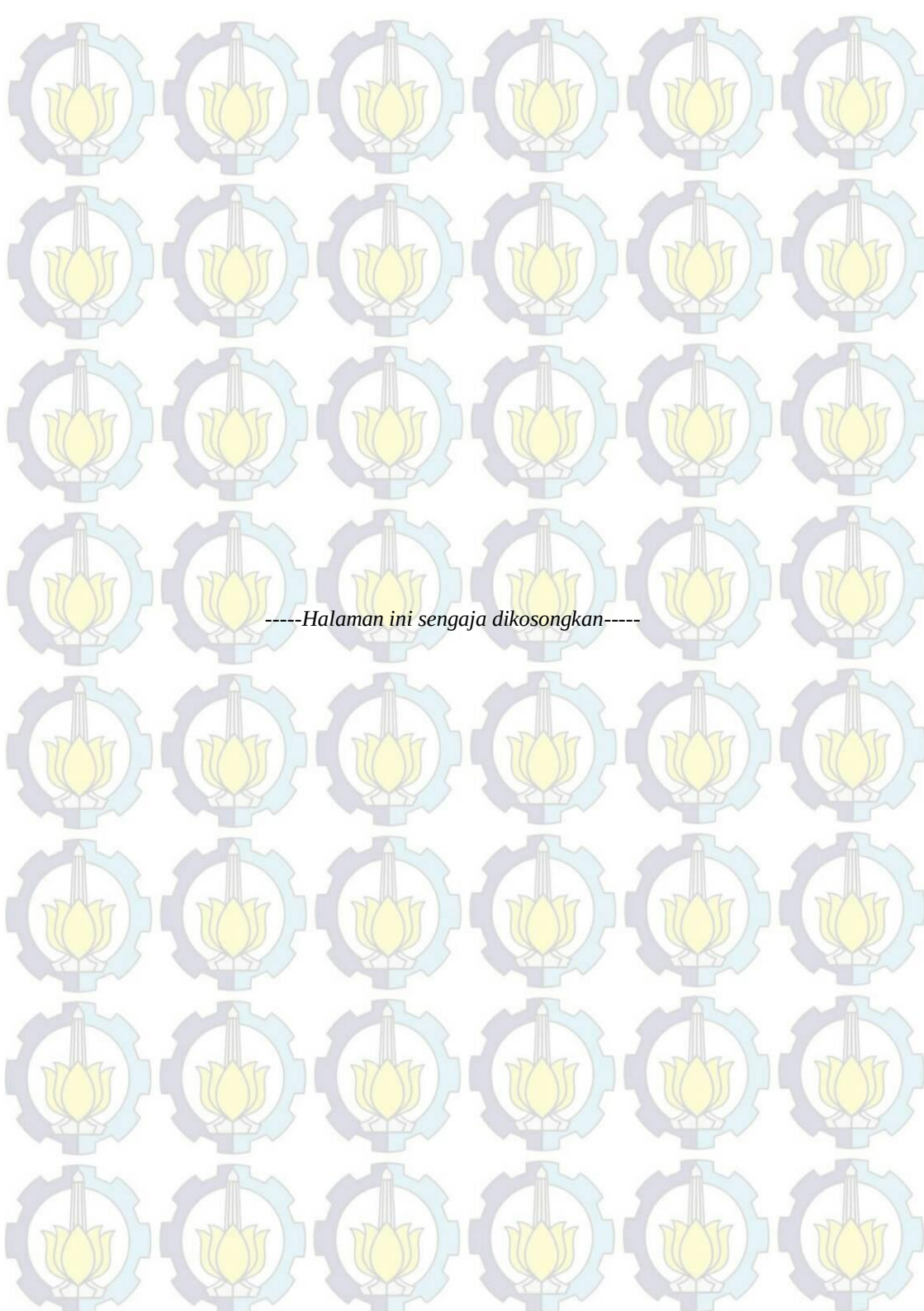
DESAIN dan SIMULASI SISTEM PENYIMPANAN ENERGI HYBRID MENGGUNAKAN SUPERKAPASITOR dan BATERAI pada PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA

Nama : Aditya Setiadi Putra
Pembimbing I : Vita Lystianingrum, S.T, M.Sc., Ph.D
Pembimbing II : Heri Suryoatmojo, S.T, M.T., Ph.D

ABSTRAK

Pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) adalah sistem pembangkitan listrik yang memanfaatkan iradiasi cahaya matahari menjadi energi listrik yang menggunakan *Photovoltaic* (PV). Karena memanfaatkan kondisi alam sekitar yang tidak menentu. Maka, karakteristik dari PLTS adalah keluaran daya yang tidak stabil. Solusi untuk mengatasi masalah ini adalah menggunakan sistem penyimpanan energi. Ketika daya yang dihasilkan oleh PV melebihi kebutuhan daya maka lebih daya tersebut bisa disimpan di penyimpanan energi tersebut dan sebaliknya jika daya yang dihasilkan oleh PV kurang dari kebutuhan daya maka kekurangan daya tersebut diatasi oleh penyimpanan energi yang melepaskan energi ke beban. Akan tetapi, penyimpanan energi yang pada umumnya digunakan adalah baterai yang memiliki kepadatan daya yang rendah dan respon yang lambat, sehingga tidak bisa mengatasi perubahan iradiasi dan beban yang ekstrim. Selain itu, jika baterai akan cepat rusak jika terlalu sering melakukan proses pengosongan dan pengisian. Oleh karena itu, dibutuhkan superkapasitor yang memiliki kepadatan daya tinggi dan mempunyai respon yang lebih cepat ketika terjadi perubahan iradiasi yang ekstrim dan perubahan beban. Namun, Superkapasitor memiliki kekurangan berupa kepadatan energi yang rendah sehingga tidak bisa menyimpan energi dalam jangka waktu yang lama. Pada tugas akhir ini, dibuat simulasi dan desain dari sistem konversi energi matahari yang terhubung dengan sistem penyimpanan energi *hybrid* yang memanfaatkan baterai dan superkapasitor. Berdasarkan hasil simulasi pada tugas akhir ini dapat disimpulkan bahwa baterai dan SC bekerja dengan saling melengkapi. Baterai bekerja lebih statis dan superkapasitor bekerja lebih dinamis. Sehingga, keluaran daya pada beban lebih halus dan baterai bisa lebih awet karena ketika ada perubahan ekstrim pada iradiasi dan beban bisa diatasi oleh superkapasitor. Selain itu, penyimpanan energi dalam waktu yang lebih lama bisa dilakukan oleh baterai.

Kata Kunci : Pembangkit Listrik Tenaga Surya, Sistem penyimpanan energi *hybrid*, baterai, superkapasitor





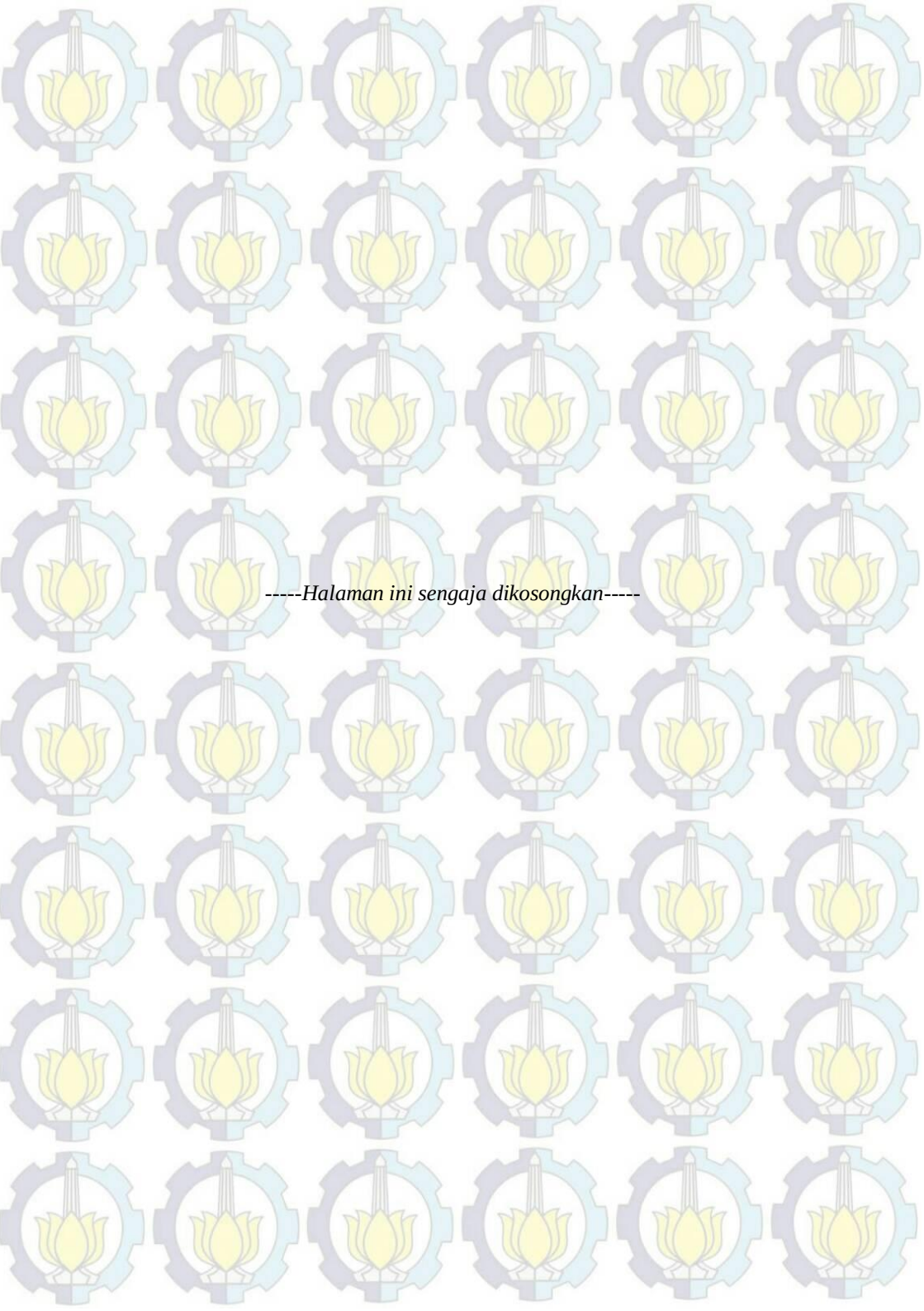
DESIGN AND SIMULATION OF HYBRID ENERGY STORAGE SYSTEM USING SUPERCAPASITORS AND BATTERIES on SOLAR POWER PLANT

Student's name : Aditya Setiadi Putra
Supervisor I : Vita Lystianingrum, S.T, M.Sc., Ph.D
Supervisor II : Heri Suryoatmojo, S.T, M.T., Ph.D

ABSTRACT

Solar power plants (PLTS) are electricity generation systems that utilize solar irradiation into electrical energy using Photovoltaic (PV). Because it uses uncertain surrounding natural conditions. So, the characteristics of PLTS are unstable power. To overcome this problem use an energy storage system. If the power produced by PV is greater then the power that can be stored in the energy storage and vice versa if the power produced by PV is less than the power requirement that will be eliminated by energy storage. However, energy storage that occurs is a battery that has a slow dependency and a slow response, can not be more efficient. In addition, if the battery will be quickly damaged once too often the process of emptying and charging. Therefore, supercapacitors who have a high environment and have a faster and more efficient response are needed. However, supercapacitors have a shortage of low void energy. They cannot store energy for a long duration. In this final assignment, a hybrid energy system is created and utilized the battery and supercapacitor. Based on the results at this time it can be indicated that the battery and SC work complementary. Batteries work higher and supercapacitors work more dynamically. Thus, more energy and batteries are better because they are very better and can be overcome by supercapacitors. In addition, a longer-term energy storage can be carried out by the battery.

Keywords : Solar Power Plant, Hybrid energy storage system, Battery Supercapacitor



KATA PENGANTAR

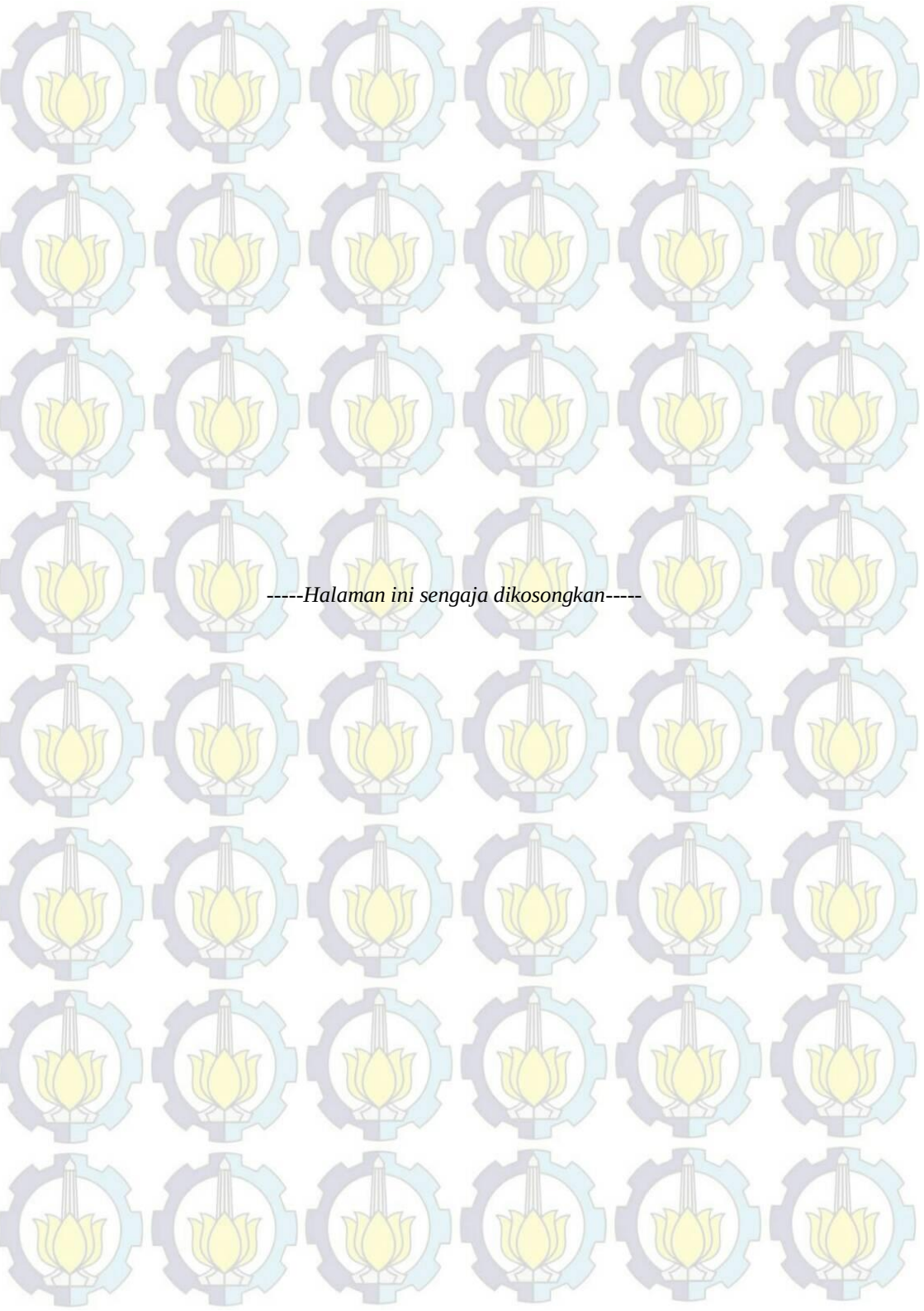
Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang selalu memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga tugas akhir ini dapat terselesaikan dengan baik. Shalawat serta salam semoga selalu dilimpahkan kepada Rasulullah Muhammad SAW, keluarga, sahabat, dan umat muslim yang senantiasa meneladani beliau. tugas akhir ini disusun bertujuan untuk memenuhi sebagian persyaratan guna menyelesaikan pendidikan S1 pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya yang berjudul **“Desain dan Simulasi Sistem Penyimpanan Energi Hybrid Menggunakan Superkapasitor dan Baterai Pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya”** Atas selesainya penyusunan tugas akhir ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Ibu dan Bapak penulis yang memberikan berbagai bentuk doa serta dukungan tulus tiada henti, dalam keadaan apapun. Semoga Allah selalu memberikan kesehatan.
2. Ibu Vita Lystianingrum, S.T, M.Sc., Ph.D dan Bapak Heri Suryoatmojo, S.T, M.T., Ph.D selaku Dosen Pembimbing atas segala bimbingan ilmu, moral, dan spiritual dari awal hingga terselesaikannya tugas akhir ini,
3. Seluruh Staff/Karyawan/Dosen Departemen Teknik Elektro yang telah memberikan banyak ilmu dan menciptakan suasana belajar yang mendukung.
4. Teman- teman yang selalu mendukung saya secara moril untuk menyelesaikan Tugas Akhir.

Penulis berharap semoga tugas akhir ini dapat bermanfaat dalam pengembangan keilmuan di kemudian hari.

Surabaya, 30 November 2017

Penulis



-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

DAFTAR ISI

ABSTRAK	i
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xi
BAB I	1
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Permasalahan	2
1.3 Tujuan	2
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Metodologi	3
1.6 Sistematika Penulisan	3
1.7 Relevansi	4
BAB II	5
TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 <i>Photovoltaic</i>	5
2.1.1 Prinsip kerja	5
2.1.2 Karakteristik PV	6
2.2 Maximum Power Point Tracking (MPPT)	9
2.2.1 Perturb and Observe	10
2.3 <i>Buck Converter</i>	12
2.4 Penyimpanan Energi <i>Hybrid</i>	14
2.5 <i>Bidirectional Converter</i>	14
2.6 Pengatur Tegangan (<i>Voltage Divider</i>)	16
BAB III	37
METODOLOGI PENELITIAN	37
3.1 Konfigurasi Sistem Konversi Energi Matahari	37
3.2 Konfigurasi pemodelan penyimpanan pembangkit listrik tenaga surya dengan sistem hybrid.	37
3.3 <i>Photovoltaic</i>	38
3.4 MPPT P&O	39
3.5 Desain <i>Buck Converter</i>	41
3.6 Desain <i>Bidirectional Converter</i>	42
3.7 Desain Kontroler <i>Bidirectional Converter</i>	44
BAB IV	47
HASIL DAN PEMBAHASAN	47
4.1 Pengujian perubahan iradiasi terhadap daya keluaran PV	48
4.2 Referensi aliran daya oleh penyimpanan energi	48
4.3 Pengujian dan analisa penyimpanan energy <i>hybrid</i>	49
4.4 Pengujian dan analisa pemenuhan daya dan tegangan pada beban (<i>DC Link</i>)	50

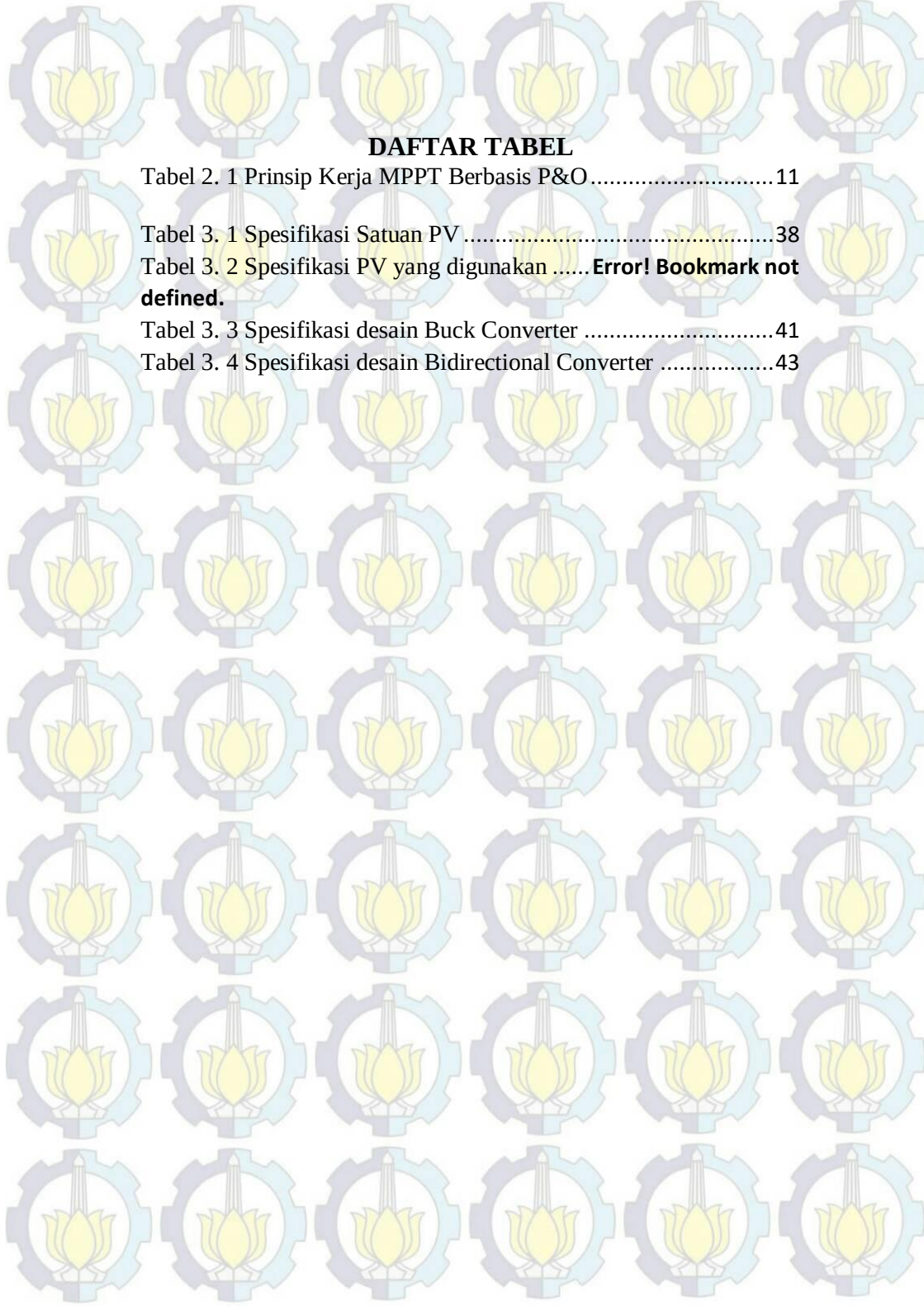
4.5	Pengujian dan analisa pembagian daya pada penyimpanan energy <i>hybrid</i>	51
4.5.1	Karakteristik SOC, arus dan tegangan baterai	52
4.5.2	Karakteristik SOC, arus dan tegangan superkapasitor	52
4.6	Pengujian dan analisa referensi kontroler	53
BAB V		55
KESIMPULAN DAN SARAN		55
5.1	Kesimpulan	55
5.2	Saran	55
DAFTAR PUSTAKA		xiii
LAMPIRAN		xv
Program MPPT P&O		xv
BIODATA PENULIS		xvii

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Ilustrasi PV[5]	6
Gambar 2. 2 Rangkaian Ekuivalen Sederhana PV[6]	6
Gambar 2. 3 Rangkaian Ekuivalen PV[7].....	7
Gambar 2. 4 Karakteristik arus PV berdasarkan nilai iradiasi.....	8
Gambar 2. 5 Karakteristik dayaPV berdasarkan nilai iradiasi.....	8
Gambar 2. 6 Karakteristik arus PV berdasarkan nilai temperatur.....	9
Gambar 2. 7 Karakteristik daya PV berdasarkan nilai temperatur.....	9
Gambar 2. 8 Prinsip Kerja MPPT Berbasis P&O	10
Gambar 2. 9 Flowchart MPPT P&O.....	12
Gambar 2. 10 Saat switch menyala.....	13
Gambar 2. 11 Saat switch mati.....	13
Gambar 2. 12 Skema Kinerja Konverter Bidirectional	15
Gambar 2. 13 Rangkaian pengatur tegangan.....	17
Gambar 2. 14 Diagram blok pengatur tegangan	17
Gambar 3. 1 Konfigurasi sistem penyimpanan energi	37
Gambar 3. 2 karakteristik PV yang digunakan.....	39
Gambar 3. 3 Hasil uji coba MPPT dengan STC.....	40
Gambar 3. 4 Diagram blok pemodelan MPPT di MATLAB/Simulink	Error! Bookmark not defined.
Gambar 3. 5 Pemodelan Bidirectional Converter dengan Baterai	42
Gambar 3. 6 Pemodelan Bidirectional Converter dengan superkapasitor	43
Gambar 3. 7 Blok diagram Voltage Controller	44
Gambar 3. 8 Blok diagram Kontroler Bidirectional Converter pada baterai	45
Gambar 3. 9Blok diagram Kontroler Bidirectional Converter pada Superkapasitor.....	46
Gambar 4. 1 Grafik perubahan iradiasi cahaya matahari	47
Gambar 4. 2 Grafik perubahan kebutuhan daya	48
Gambar 4. 3 Grafik keluaran daya PV	48
Gambar 4. 4 Grafik referensi aliran daya	49
Gambar 4. 5 Grafik hasil pengujian aliran daya pada penyimpanan energi hybrid	50
Gambar 4. 6 Grafik perbandingan nilai referensi dan hasil.....	50
Gambar 4. 7 Grafik aliran daya pada beban dan referensi kebutuhan daya	Error! Bookmark not defined.



Gambar 4. 8 Grafik tegangan pada beban dan referensi tegangan.....	51
Gambar 4. 9 Grafik aliran daya pada baterai dan superkapasitor	52
Gambar 4. 10 Grafik Karakteristik tegangan, arus dan SOC pada Baterai	52
Gambar 4. 11 Grafik Karakteristik tegangan, arus dan SOC pada superkapasitor	53
Gambar 4. 12 Grafik referensi daya dari kontroler.....	53



DAFTAR TABEL

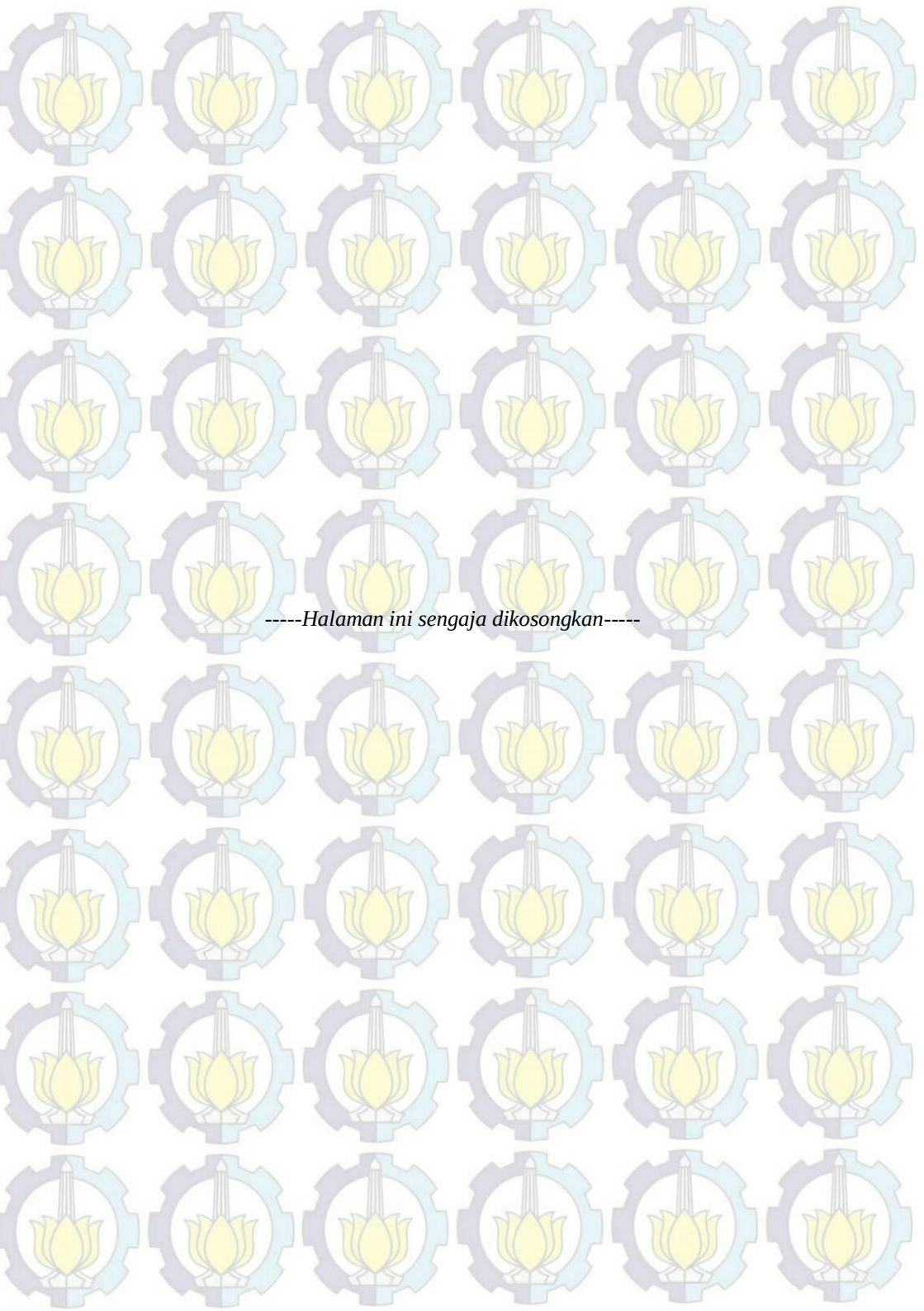
Tabel 2. 1 Prinsip Kerja MPPT Berbasis P&O11

Tabel 3. 1 Spesifikasi Satuan PV38

Tabel 3. 2 Spesifikasi PV yang digunakan**Error! Bookmark not defined.**

Tabel 3. 3 Spesifikasi desain Buck Converter41

Tabel 3. 4 Spesifikasi desain Bidirectional Converter43



-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan akan energi listrik di Indonesia semakin besar setiap tahunnya. Tetapi, sumber energi fosil seperti batu bara, minyak, gas dan sebagainya semakin tipis ketersediannya di Indonesia. Langkah dari pemerintah adalah mengeluarkan program pembauran energi dengan 23% kebutuhan energi di Indonesia dipenuhi oleh energi baru dan terbarukan.. Salah satu sumber energi baru terbarukan ialah pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) dengan memanfaatkan *Photovoltaic* (PV). Energi surya sesungguhnya merupakan sumber energi yang paling menjanjikan mengingat sifatnya yang berkelanjutan (sustainable) serta jumlahnya yang sangat besar. PLTS merupakan sumber energi yang diharapkan dapat mengatasi permasalahan kebutuhan energi masa depan setelah berbagai sumber energi konvensional berkurang jumlahnya serta ramah terhadap lingkungan. Dalam penggunaannya, PV dipengaruhi oleh intensitas cahaya matahari dan temperatur pada permukaan PV. Posisi matahari yang berubah-ubah setiap saat mempengaruhi intensitas yang diterima oleh PV sehingga membuat daya keluaran fluktuatif.

Keluaran daya dari PV disimpan di dalam baterai. Baterai adalah salah satu alat penyimpanan energi yang bisa menjaga kestabilan pengiriman energi. Umumnya baterai memiliki karakteristik kondisi penyimpanan, yaitu kondisi pengisian (*state of charge*) dan kondisi pengosongan baterai (*depth of charge*). Jika baterai mendapatkan masukan yang tidak stabil secara cepat nilai SOC akan turun, penurunan nilai SOC berdampak pada proses pengisian baterai yang selanjutnya. Nilai SOC yang tidak diketahui dapat menyebabkan baterai mengalami pengisian di saat yang tidak tepat. Perubahan nilai SOC mengubah kondisi pengisian baterai. Oleh karena itu dibutuhkan perangkat tambahan untuk menjaga nilai SOC dan masukan baterai stabil. Salah satu perangkat yang digunakan ialah superkapasitor. Superkapasitor ialah alat penyimpanan energi listrik yang memiliki kepadatan daya tinggi sehingga mampu melakukan proses pengisian dan pengosongan dengan cepat. Penggunaan baterai yang terus menerus bisa merusak baterai karena memiliki batasan-batasan seperti batasan *state of charge* (SOC) dan batasan arus *charge-discharge* yang berdampak pada umur baterai [1]. Menggabungkan baterai dan superkapasitor adalah salah satu solusi untuk menutupi kekurangan dari baterai, superkapasitor bisa melakukan *charge-discharge* dengan

sering dan bisa menyimpan arus *charge* yang besar sehingga membuat baterai menjadi lebih awet[2]. Baterai memiliki kepadatan energi yang tinggi sehingga bisa menyimpan daya dalam waktu yang lama tetapi jika sering melakukan proses *charge-discharge* akan mengakibatkan kerusakan dan tidak bisa menampung arus *charge* yang besar dengan waktu singkat karena penyalan pada beban. Sementara itu, superkapasitor memiliki kepadatan daya yang tinggi sehingga tidak cepat rusak jika melakukan proses *charge-discharge* dengan sering dan bisa menampung arus *charge* yang besar dalam waktu sesaat[3]. Hanya saja, kapasitor tidak bisa menyimpan energi dalam waktu yang lama. Penggabungan baterai dan superkapasitor sebagai penyimpanan energi adalah pilihan yang baik karena bisa saling menutupi kekurangan. Karena itu, baterai bisa menjadi lebih awet dan keluaran dari sel surya menjadi lebih stabil.

1.2 Permasalahan

PV memiliki karakteristik keluaran daya yang tidak stabil. Keluaran itu bergantung pada keadaan cuaca dan suhu di sekitar sel surya. Sehingga, sel surya membutuhkan alat penyimpanan energi. Pada umumnya, baterai digunakan sebagai alat penyimpanan energi pada sel surya karena baterai mampu menyimpan energi dengan jumlah yang banyak dan dalam waktu yang lama.

Penggunaan baterai pada sel surya masih memiliki masalah karena proses *charge-discharge* yang cepat dan sering mengakibatkan baterai menjadi cepat rusak. Sehingga, dibutuhkan alat yang mampu melakukan proses *charge-discharge* dengan waktu cepat seperti superkapasitor. Pemasangan superkapasitor dengan baterai secara *hybrid* akan membuat keluaran PV lebih stabil.

1.3 Tujuan

Penelitian tugas akhir ini bertujuan untuk :

1. Mendesain dan membuat simulasi sistem konversi energi matahari yang terhubung dengan sistem penyimpanan energi *hybrid*.
2. Menguji hasil keluaran daya dan tegangan pada beban yang menggunakan PLTS yang menggunakan penyimpanan energi *hybrid* berupa superkapasitor dan baterai Litium Ion.
3. Menguji pembagian aliran daya antara baterai dengan superkapasitor.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dalam tugas akhir ini adalah :

1. Membuat simulasi sistem penyimpanan hybrid pada PV menggunakan MATLAB/Simulink R2015a
2. Blok-blok yang digunakan adalah blok *generic* pada MATLAB/Simulink R2015a
3. Kontroler yang digunakan adalah kontroler *bidirectional* yang berupa kontroler PI
4. Tidak mempertimbangkan sizing

1.5 Metodologi

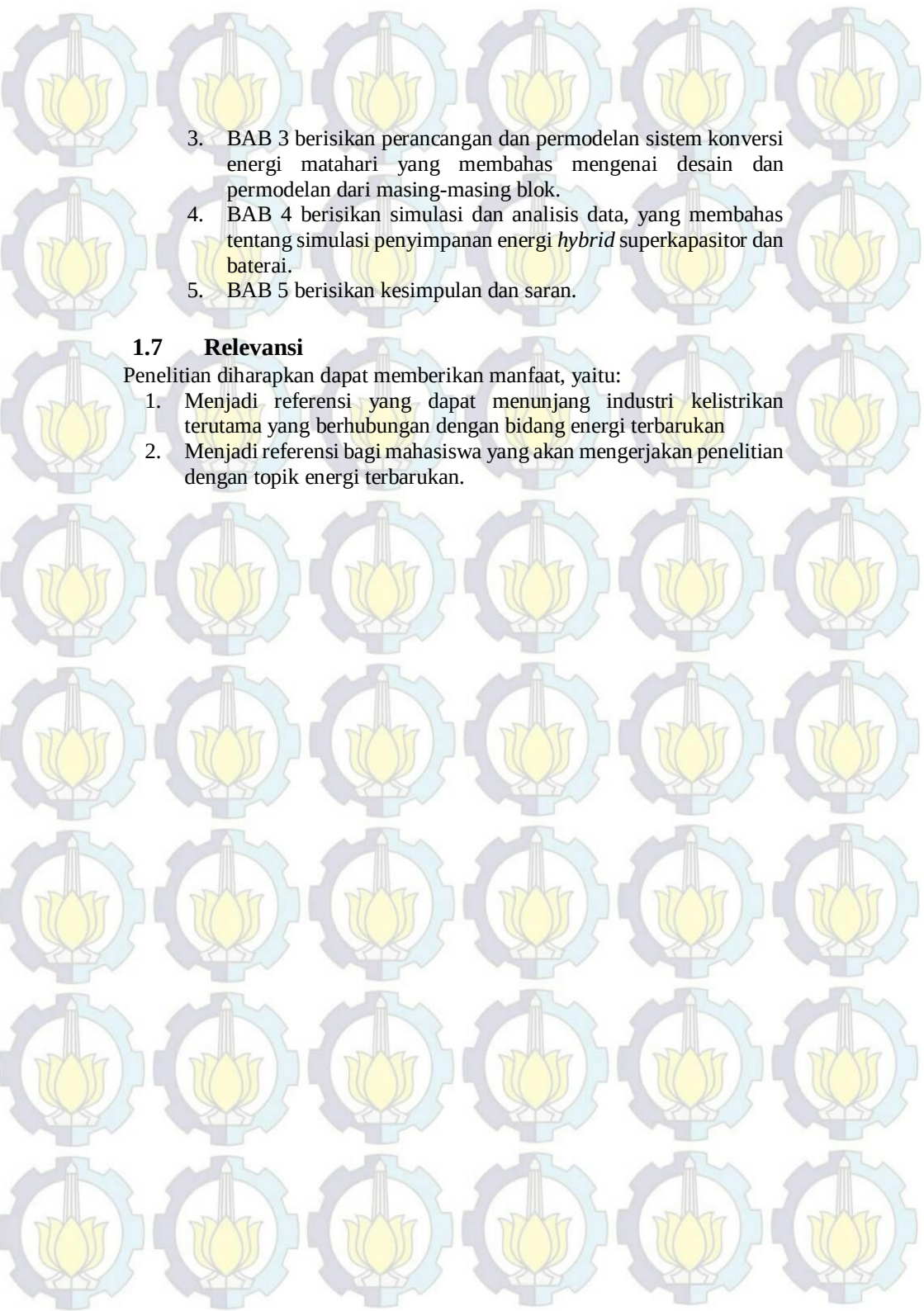
Metodologi yang digunakan dalam menyusun penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Studi Literatur
Mengumpulkan referensi-referensi yang berhubungan dengan penyimpanan energi superkapasitor, sistem Pembangkit Listrik Tenaga Angin seperti buku, *paper*, serta jurnal.
2. Simulasi
Tahap ini berisi proses pengolahan data-data yang diperoleh dari proses sebelumnya untuk mendapatkan hasil yang diinginkan. *Software* yang digunakan dalam tahap ini adalah MATLAB/Simulink R2017a.
3. Analisis Data dan Hasil Simulasi
Memberikan kesimpulan mengenai studi penggunaan superkapasitor sebagai penyimpan energi dalam Pembangkit Listrik Tenaga Angin.
4. Penyelesaian Laporan Tugas Akhir
Tahap ini dilakukan sebagai tahap akhir dari serangkaian pengerjaan tugas akhir ini. Juga dilakukan guna memenuhi persyaratan kelulusan mata kuliah Tugas Akhir.

1.6 Sistematika Penulisan

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

1. BAB 1 merupakan pendahuluan yang berisikan latar belakang masalah, tujuan, metodologi, sistematika penulisan, dan relevansi
2. BAB 2 berisikan kajian pustaka dan dasar teori yang membahas mengenai teori-teori penunjang yang berkaitan dengan sistem turbin angin yang terhubung dengan dua jenis penyimpan energi, yaitu superkapasitor dan baterai.

- 
3. BAB 3 berisikan perancangan dan permodelan sistem konversi energi matahari yang membahas mengenai desain dan permodelan dari masing-masing blok.
 4. BAB 4 berisikan simulasi dan analisis data, yang membahas tentang simulasi penyimpanan energi *hybrid* superkapasitor dan baterai.
 5. BAB 5 berisikan kesimpulan dan saran.

1.7 Relevansi

Penelitian diharapkan dapat memberikan manfaat, yaitu:

1. Menjadi referensi yang dapat menunjang industri kelistrikan terutama yang berhubungan dengan bidang energi terbarukan
2. Menjadi referensi bagi mahasiswa yang akan mengerjakan penelitian dengan topik energi terbarukan.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Beberapa teori penunjang yang dipaparkan dalam buku tugas akhir ini adalah teori dasar mengenai antara lain modul Photovoltaic, DC-DC Converter, MPPT P&O, Superkapasitor dan Bi-Directional Converter.

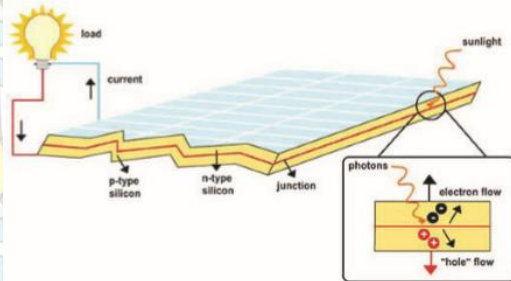
2.1 Photovoltaic

Photovoltaic (PV) merupakan salah satu bentuk sumber energi yang paling berpotensi untuk masa depan, hal ini dikarenakan karakteristiknya yang bebas polusi juga ketersediaan energi primernya yang tidak terbatas. Namun demikian, perkembangan teknologi PV belum bisa mencapai tingkat efisiensi yang tinggi. PV masih perlu untuk diteliti dan dikembangkan agar menghasilkan konversi energi yang memiliki efisiensi lebih besar.

PV dibuat dari begitu banyak bagian-bagian kecil yang disebut sel surya yang terkoneksi seri dan paralel untuk mendapatkan nilai tegangan dan arus yang dibutuhkan. Pada saat ini, penggunaan PV atau panel surya sebagai sumber energi baru terbarukan banyak digunakan oleh masyarakat luas. Penggunaan PV sebagai salah satu solusi alternatif untuk memenuhi kebutuhan listrik di Indonesia.

2.1.1 Prinsip kerja

Ketika cahaya matahari yang berupa paket-paket partikel membentur mengenai sebuah material semikonduktor yang bersifat positif dan negatif, partikel-partikel disebut photon ini mentransfer energi karena benturannya terhadap material menyebabkan atom-atom material kehilangan elektron-elektronnya. Elektron-elektron ini bergerak menuju permukaan dan menyebabkan permukaan yang berseberangan menjadi bermuatan positif. Apabila sebuah penghantar diletakkan diantara kedua perbedaan muatan diantara permukaan material seperti ini, dan benturan partikel photon terhadap material berlanjut secara konstan dan kontinyu, maka arus elektron akan terus bergerak dengan stabil. Begitulah energi listrik diproduksi oleh PV[4]

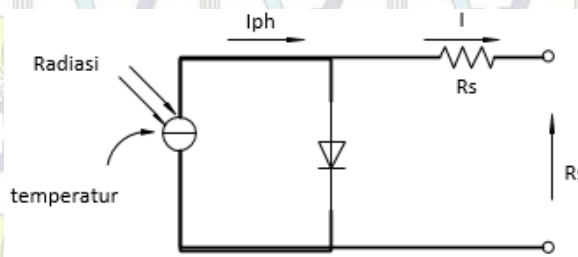


Gambar 2. 1 Ilustrasi PV[5]

Prinsip kerja sebuah PV dapat diilustrasikan seperti Gambar 2.1. Benturan *photon* dengan material semikonduktor pada sel *Photovoltaic*, membuat *elektron* tereksitasi dan mengalir memungkinkan adanya aliran gaya gerak listrik jika diberi konduktor

2.1.2 Karakteristik PV

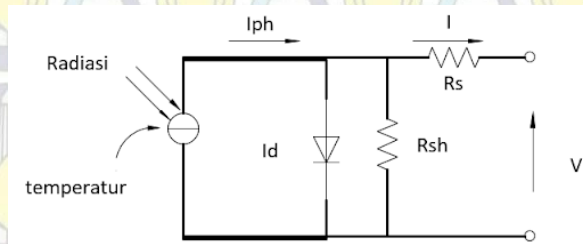
Photovoltaic (PV) dapat dimodelkan secara sederhana sebagai suatu rangkaian yang terdiri dari sebuah sumber arus yang terpasang paralel dengan sebuah dioda seperti pada Gambar 2.2. Besar arus luaran dari suatu PV berbanding lurus dengan besar radiasi sinar matahari yang diterima oleh sel tersebut, sedangkan kurva karakteristik I-V dari PV ditentukan oleh karakteristik dioda [4].



Gambar 2. 2 Rangkaian Ekuivalen Sederhana PV[6]

Namun dalam perkembangannya, model PV tidak sesederhana seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2.2, akan tetapi dalam prakteknya ada beberapa parameter yang harus ditambahkan sehingga model PV menjadi semakin mendekati dengan kondisi sebenarnya, seperti yang diperlihatkan pada Gambar 2.3[5]. Penambahan parameter tersebut antara lain :

- A. Arus saturasi dioda (I_D) yang tergantung pada temperatur.
- B. Arus *photocurrent* (I_{PH}) yang juga tergantung pada suhu.
- C. Hambatan seri (R_s) yang memberikan bentuk yang jelas antara *maximum power point* dengan tegangan *open circuit*.
- D. Hambatan paralel (R_{sh}) yang paralel dengan *diode*.



Gambar 2. 3 Rangkaian Ekivalen PV[7]

Dari Gambar 2.3 terlihat bahwa terdapat sedikit perubahan pada rangkaian ekivalen PV. Sehingga persamaan dasar dari suatu PV dapat dirumuskan sebagaimana Persamaan 2.1 adalah seperti berikut [6]:

$$I = I_{PH} - I_D \left[\exp^{\left(\frac{V + I R_s}{n K T} \right)} - 1 \right] - \left(\frac{V + I R_s}{R_{sh}} \right) \quad (2.1)$$

Di mana:

I : arus keluaran PV (*Ampere*).

I : efek *photocurrent* yang terbangkit pada PV (*Ampere*).

I_{Du77} : arus saturasi dioda.

K : konstanta Boltzman (*Joule/Kelvin*).

T : temperatur sel (*Kelvin*).

R_s : resistansi seri sel (*Ohm*).

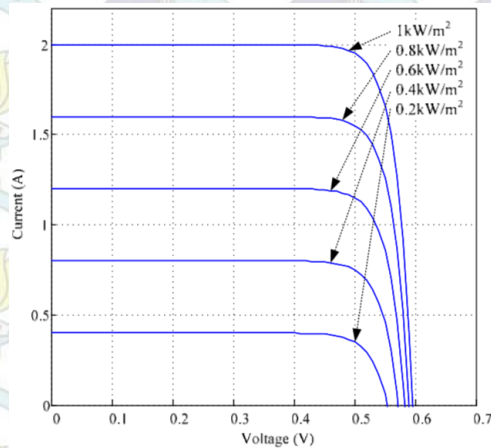
R_{sh} : resistansi paralel (*Ohm*).

V : tegangan luaran PV (*Volt*).

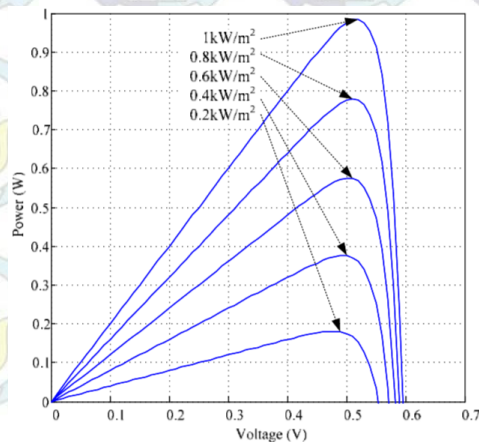
n : adalah faktor kualitas dioda yang bernilai antara 1 dan 2

Karakteristik besar daya yang dikeluarkan oleh PV bergantung pada besarnya intensitas cahaya yang mengenai permukaan PV dan temperatur pada permukaan PV. Gambar 2.6 dan Gambar 2.7 menunjukkan pengaruh besar intensitas cahaya matahari dan temperature. Intensitas cahaya

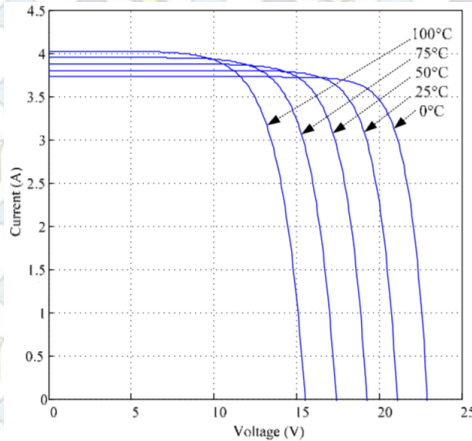
bepengaruh pada arus yang dihasilkan sedangkan temperature berpengaruh pada tegangan yang dihasilkan.



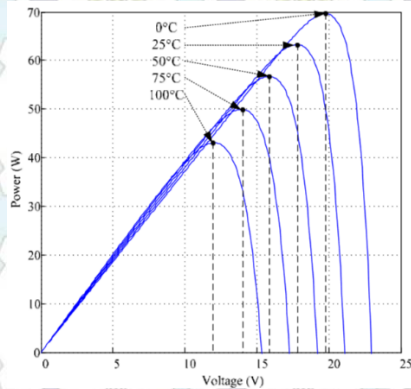
Gambar 2. 4 Karakteristik arus PV berdasarkan nilai iradiasi



Gambar 2. 5 Karakteristik dayaPV berdasarkan nilai iradiasi



Gambar 2. 6 Karakteristik arus PV berdasarkan nilai temperature



Gambar 2. 7 Karakteristik daya PV berdasarkan nilai temperatur

2.2 Maximum Power Point Tracking (MPPT)

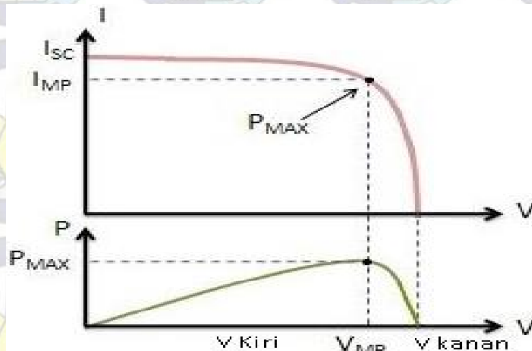
Tegangan dan arus keluaran sel PV memiliki karakteristik *nonlinear* seperti yang ditunjukkan Persamaan 2.1. Hal tersebut juga dapat dilihat pada plot kurva P-V hasil simulasi karakteristik PV pada Gambar 2.6 dan Gambar 2.7. parameter kualitas keluaran PV dapat dilihat melalui parameter *fill factor* yang diberikan oleh Persamaan 2.2.

$$FF = \frac{V_{MP} I_{MP}}{V_{oc} I_{sc}} \quad (2.2)$$

Dimana V_{MP} dan I_{MP} merupakan titik kerja *maximum/minimum power point* (MPP) dari tegangan dan arus PV. Titik kerja maksimum PV berubah seiring perubahan radiasi matahari dan suhu sel. PV tidak akan secara otomatis bekerja pada titik maksimumnya, melainkan harus dikendalikan. *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) adalah metode yang digunakan untuk mencari titik kerja maksimum PV dan mempertahankan PV bekerja di titik tersebut[7]. Banyak jurnal yang membahas MPPT. Terdapat lebih dari 5 metode MPPT yang memiliki perbedaan mendasar, setiap metode memiliki karakteristik yang berbeda-beda. Beberapa metode seperti *Perturbation & Observation* (P&O) memiliki kelemahan pada waktu penjajakan dan osilasi pada MPP.

2.2.1 Perturb and Observe

Perturb and Observe (P&O) adalah metode MPPT konvensional. Algoritma P&O bekerja dengan menaikkan dan menurunkan nilai *dutycycle* (D) untuk pencarian terhadap titik maximum daya PV. Terdapat 2 jenis P&O yakni *direct dutycycle* (*hill climbing*) dan menggunakan *Voltage reference*[8].



Gambar 2. 8 Prinsip Kerja MPPT Berbasis P&O

Dari Gambar 2.8 dapat dilihat bahwa titik daya maksimum P_{MPP} membagi wilayah tegangan V menjadi dua area yakni area V kiri dan V kanan. Metode P&O memperoleh nilai P_{MPP} dengan melakukan pergeseran nilai tegangan V ke arah kiri dan kanan. Apabila pada saat P&O menggeser tegangan V ke arah kanan dan terjadi peningkatan nilai daya maka peturbasi berikutnya harus tetap sama yakni menggeser V ke arah kanan untuk

mencapai MPP[6]. Namun jika terjadi penurunan daya, perturbasi harus dibalik. Algoritma ini dirangkum dalam Tabel 2.1.

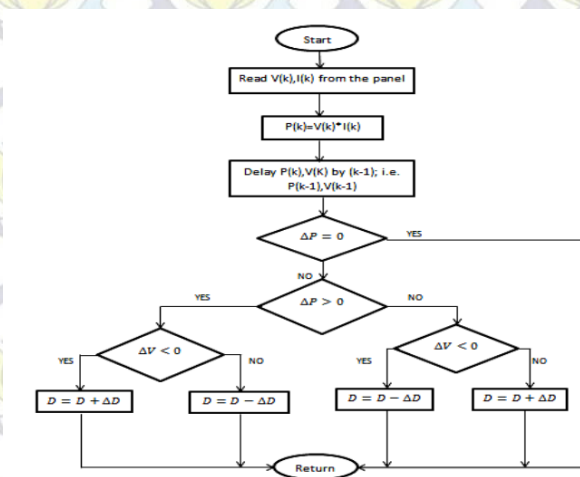
Tabel 2. 1 Prinsip Kerja MPPT Berbasis P&O

Perturbasi	Perubahan Daya (ΔP_{MPP})	Perturbasi Berikutnya
V geser ke kanan	Positif	V geser ke kanan
V geser ke kanan	Negatif	V geser ke kiri
V geser ke kiri	Positif	V geser ke kiri
V geser ke kiri	Negative	V geser ke kanan

Pada Tabel 2.1 terlihat bahwa algoritma juga bekerja secara berulang-ulang sampai P_{MPP} tercapai. Sistem mengalami osilasi pada daerah disekitar P_{MPP} . penggunaan *Modified P&O*, bertujuan untuk mengurangi osilasi sampai mendekati nol. Adapun *flowchart* dari algoritma *Modified P&O* ditunjukkan pada Gambar 2.8[6].

Pada Gambar 2.9 merupakan sebuah *flowchart* prinsip dari algoritma *Modified P&O* untuk MPPT. Masukan dari algoritma *Modified P&O* adalah arus dan tegangan PV. Melalui nilai masukan tegangan $V(t)$ dan arus $I(t)$ diperoleh nilai daya $P(t)$. Pada saat daya PV dan tegangan naik, algoritma ini menaikkan nilai *dutycycle* (ΔD). Nilai *dutycycle* (D) dijumlah dengan selisih nilai ΔD , sehingga menghasilkan nilai titik operasi dan mencapai titik daya maximum, begitu juga dengan arah sebaliknya[14].

Pada *Modified P&O*, penambahan faktor C dikalikan dengan ΔD untuk mengurangi step langkah *dutycycle* ketika algoritma MPPT berada disekitar titik MPP. pengurangan step *dutycycle* ini berimbas pada pengurangan *ripple* daya pada saat kondisi *steady state*. Itulah yang menyebabkan nilai *ripple* daya bisa mendekati nol. Sehingga dapat dilihat pada grafik MPP pada simulasi nilai *ripple* sama dengan nol.



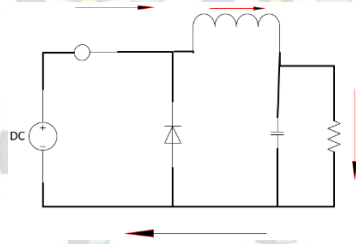
Gambar 2. 9 Flowchart MPPT P&O

2.3 Buck Converter

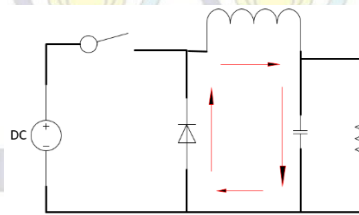
Buck Converter merupakan konverter DC-DC yang mengubah level tegangan keluaran lebih rendah daripada tegangan masukan. Buck converter menggunakan sistem pensaklaran untuk mencacah masukan sehingga tegangan keluaran menjadi lebih rendah. Pensaklaran dilakukan dengan memberikan sinyal PWM (*pulse width modulation*) terhadap komponen pensaklaran. Pada gambar 2.x sinyal PWM berada di posisi ON , maka arus akan mengalir langsung dari sumber DC ke beban[9]. Dioda yang terpasang paralel mem block aliran arus yang mengalir ke ground. Pada Kondisi tersebut persamaan untuk tegangan keluaran V_{out} , yaitu :

$$V_{in} = V_L + V_{out} \quad (2.3)$$

$$V_{in} = \frac{L \Delta I}{T_{on} + V_{out}} \quad (2.4)$$



Gambar 2. 10 Saat switch menyala



Gambar 2. 11 Saat switch mati

Kondisi berikutnya merupakan kondisi off/ kondisi saat saklar terbuka. Pada kondisi ini induktor yang menyimpan arus dari kondisi ketika ON, akan mengalirkan ke beban dan membentuk closed loop melalui dioda. Persamaan pada kondisi off yaitu ;

$$L \Delta I / T_{off} = V_{out}$$

$$\frac{L \Delta I}{T_{OFF}} = V_{out} \quad (2.5)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan 2.6 dan 2.7 didapatkan

$$V_{in} = V_{out} \times \frac{T_{off}}{T_{on} + T_{off}} \quad (2.6)$$

$$V_{in} = V_{out} \times \frac{T_{off}}{T_{on} + 1} \quad (2.7)$$

$$V_{in} = T_{off} + \frac{T_{on}}{T_{on} \times V_{out}} \quad (2.8)$$

Karena

$$D = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} \quad (2.9)$$

Maka

$$V_{out} = D \times V_{in} \quad (2.10)$$

Perbandingan besaran tegangan input dan output bergantung pada nilai duty cycle yang dioperasikan. Duty cycle merupakan perbandingan antara waktu on dan periode dari gelombang pwm yang dioperasikan. Pada sistem Mppt, komponen buck converter menjadi pengatur tegangan operasi PV. MPPT bekerja dengan algoritma tertentu yang mengatur duty cycle dari konverter agar tegangan PV selalu bekerja titik optimum.

2.4 Penyimpanan Energi Hybrid

Pada tugas akhir ini penyimpanan energi yang digunakan ialah Hybrid energy storage system (HESS). Penyimpanan hybrid menggunakan superkapasitor dan baterai. baterai adalah teknologi yang relatif matang dan memiliki kepadatan energi yang lebih tinggi (kapasitas lebih untuk volume tertentu, berat, dan biaya) daripada superkapasitor; namun, superkapasitor memiliki kepadatan daya yang lebih tinggi daripada baterai, dan efisien lebih serta menawarkan masa pakai yang lebih lama dalam hal siklus pengisian-daya[10]. Kekurangan dari supercapacitors adalah tingginya arus bocor. Penyimpanan energi yang ideal dalam sistem PV mandiri harus mampu memberikan energi dan kapasitas daya yang tinggi untuk menangani situasi seperti perubahan tiba-tiba dalam kondisi cuaca dan beban. Dengan demikian, tujuannya adalah untuk memanfaatkan kelebihan dari baterai dan SC untuk merancang penyimpanan energi dengan daya tinggi dan kepadatan energi. Dengan memanfaatkan sistem penyimpanan energi hibrida superkapasitor baterai (HESS), keuntungan berikut dapat dicapai:

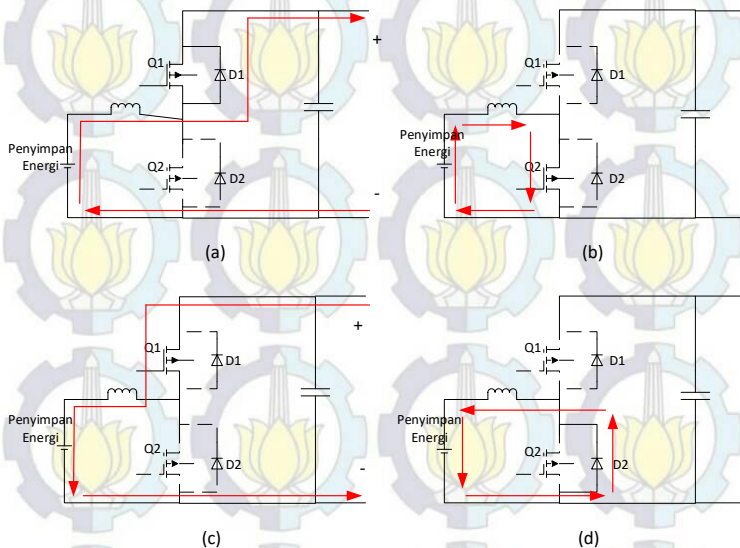
- 1) peningkatan masa pakai baterai
- 2) pengurangan ukuran baterai dan karenanya biaya
- 3) pengurangan stres pada baterai
- 4) peningkatan keseimbangan daya antara pembangkit listrik dan permintaan beban.

Digunakan Super Kapasitor dan baterai lithium ion. Dengan memanfaatkan kelebihan yang ada pada Super Kapasitor. Battery lithium ion dipilih karena lebih efisien dari jenis baterai lainnya, memiliki siklus hidup yang lebih lama, self-discharge yang lebih rendah, dan arus nominal discharge yang lebih tinggi daripada jenis baterai lainnya.

2.5 Bidirectional Converter

Dalam aplikasinya, sistem penyimpanan energi membutuhkan rangkaian yang mampu bekerja sebagai perantara untuk melakukan proses *charging* dan *discharging* untuk mencapai keseimbangan daya yang dibutuhkan. Konverter *bidirectional* merupakan rangkaian yang dapat

dipilih sebagai perantara agar penyimpan energi mampu melakukan proses *charging* dan *discharging*[13]. Konverter *bidirectional* merupakan konverter yang mampu bekerja dua arah yang dapat menjaga tegangan DC link menjadi konstan, melalui proses pengisian dan pengosongan penyimpan energi. Konverter ini mampu bertindak sebagai konverter *boost* saat penyimpan energi melakukan proses *charging* dan bertindak sebagai konverter *buck* saat melakukan proses *discharging*. Skema kinerja konverter ini dijelaskan dalam Gambar 2.11 [11].



Gambar 2. 12 Skema Kinerja Konverter Bidirectional

Berdasarkan gambar di atas, prinsip kerja rangkaian konverter *buck boost bidirectional* dibagi menjadi empat bagian, yakni :

1. Bagian 1 (D1 on, Q1 off, D2 off, Q2 off) :

Bagian ini ditunjukkan dalam Gambar 2.12a. Dalam bagian ini konverter menunjukkan keadaan dimana konverter akan menyuplai daya ke DC link.

2. Bagian 2 (Q2 on, D1 off, Q1 off, D2 off) :

Bagian ini ditunjukkan dalam Gambar 2.12b. Dalam bagian ini konverter menunjukkan keadaan *boost* dan induktor akan mengalami proses *charging* sehingga arus induktor akan meningkat.

3. Bagian 3 (Q1 on, D1 off, D2 off, Q2 off) :

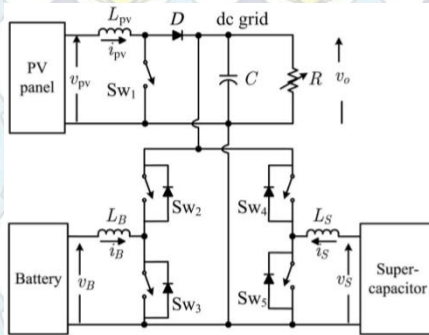
Bagian ini ditunjukkan dalam Gambar 2.12c. Dalam bagian ini konverter menunjukkan keadaan *buck* dan daya dari DC link akan disuplai ke baterai.

4. Bagian 4 (D2 on, D1 off, Q1 off, Q2 off) :

Bagian ini ditunjukkan dalam Gambar 2.12d. Dalam bagian ini konverter menunjukkan keadaan dimana arus induktor tidak dapat berubah langsung, sehingga akan dibuang melalui dioda 2 sehingga tegangan pada DC link akan turun dibandingkan tegangan baterai.

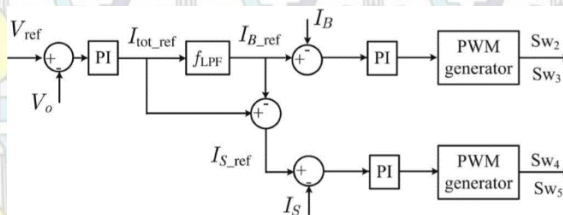
2.6 Pengatur Tegangan (*Voltage Divider*)

Pada tugas akhir ini model penyimpanan yang digunakan ialah model penyimpanan hybrid. Untuk menggunakan keduanya dibutuhkan kontrol tegangan untuk menjaga kestabilan tegangan pada beban. Hybrid energy storage system (HESS) digunakan untuk mempertahankan tegangan konstan di dc grid dikarenakan adanya perbedaan beban dan energi yang di dihasilkan oleh sumber, ketika kebutuhan daya beban lebih tinggi dari daya yang dihasilkan pv sehingga tegangan beban akan turun dari nilai referensi nya. Oleh karena itu HESS akan melakukan proses discharge untuk memenuhi kebutuhan beban, sebaliknya apabila kebutuhan beban kurang dari daya sumber yang dihasilkan maka HESS akan melakukan proses charging untuk menampung kelebihan daya. Buck Boost converter digunakan sebagai bidirectional konverter, dimana aliran daya dua arah antara dc grid dan HESS[12]. Gambar 2.13 menjelaskan bahwa beban DC berupa resistor, V_{pv} & I_{pv} (tegangan & arus pv panel), V_b dan I_b (tegangan dan arus baterai), V_s dan I_s (tegangan dan arus superkapasitor), dan Sw1, Sw2, Sw3, Sw4, Sw5 (switch kontrol). Diagram blok dari kontrol tegangan ditunjukkan pada gambar 2.14.



Gambar 2. 13 Rangkaian pengatur tegangan

Diagram blok dari kontrol tegangan ditunjukkan pada gambar 2.13. Dalam hal ini mempertahankan nilai tegangan di DC link sehingga ketika terjadi perubahan nilai resistansi beban, tegangan masuk pada beban tetap. Strategi kontrol yang diterapkan ialah baterai mengatasi transient lambat dan superkapasitor transient cepat. Tegangan dc link (V_o) dibandingkan dengan tegangan referensi (V_{ref}) lalu melewati kontroler PI lalu menghasilkan nilai arus referensi (I_{tot_ref}) kemudian dibagi 2 menjadi bagian daya frekuensi rendah dan bagian daya frekuensi tinggi menggunakan low pass filter (LPF). Keluaran dari LPF adalah bagian arus rata-rata atau frekuensi rendah yang menjadi arus referensi baterai (I_{B_ref}). I_{B_ref} dibandingkan dengan I_B lalu hasilnya masuk ke kontroler PI, melewati PWM, untuk menyalakan $sw2$ dan $sw3$. Selain itu, arus dinamis atau frekuensi tinggi yang tidak diatasi oleh baterai menjadi arus referensi superkapasitor (I_{S_ref}) lalu dibandingkan dengan arus superkapasitor (I_S), masuk ke kontroler PI, melewati PWM, untuk menyalakan $sw4$ dan $sw5$.



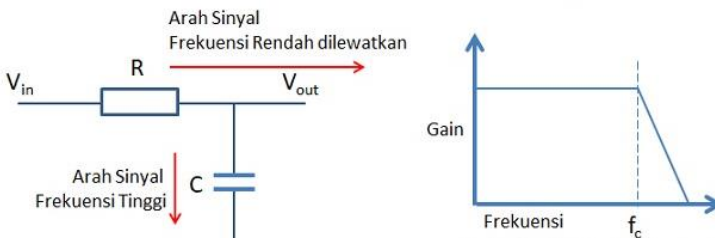
Gambar 2. 14 Diagram blok pengatur tegangan

2.7 Low Pass Filter (LPF)

Pada filter *low pass filter*, LPF terdapat beberapa karakteristik mendasar sebagai berikut. Pada saat frekuensi sinyal input lebih rendah dari frekuensi cut-off (f_c) ($f_{in} \ll f_c$) maka penguatan tegangan / Gain (G) = 1 atau $G=0\text{dB}$. Pada saat frekuensi sinyal input sama dengan frekuensi cut-off (f_c) ($f_{in} = f_c$) maka $\omega = 1/RC$ sehingga penguatan tegangan / Gain (G) menjadi -3 dB atau terjadi pelemahan tegangan sebesar 3 dB. Pada saat frekuensi sinyal input lebih tinggi dari frekuensi cut-off (f_c) ($f_{in} \gg f_c$) maka besarnya penguatan tegangan (G) = $1/\omega RC$ atau $G = -20 \log \omega RC$ Sehingga dapat ditarik kesimpulan bahwa Filter Lolos Rendah (Low Pass Filter, LPF) hanya meloloskan sinyal dengan frekuensi yang lebih rendah dari frekuensi cut-off (f_c) saja

2.7.1 Low Pass RC Filter

Low Pass RC Filter atau Penyaring Lolos Bawah RC ini adalah rangkaian filter yang terdiri dari komponen pasif Resistor dan Kapasitor yang meneruskan sinyal frekuensi rendah dan memblokir sinyal frekuensi tinggi. Untuk membuat Low Pass RC Filter, Resistor diletakkan secara seri ke sinyal INPUT dan Kapasitor diletakkan sejajar atau Paralel dengan sinyal INPUT seperti ditunjukkan pada gambar dibawah ini :



Gambar 2. 15 Rangkaian Low Pass RC Filter

Dengan rangkaian Low Pass RC Filter diatas, Kapasitor yang merupakan perangkat reaktif ini akan menawarkan resistansi yang berbeda terhadap sinyal frekuensi yang berbeda yang masuk melaluinya. Resistansi pada Kapasitor akan sangat tinggi apabila dilewati oleh sinyal frekuensi rendah atau DC dan resistansi akan menjadi rendah apabila dilewati oleh sinyal frekuensi tinggi. Dengan demikian, Kapasitor akan memblokir sinyal frekuensi rendah atau sinyal DC sehingga sinyal tersebut harus melewati atau diteruskan ke jalur alternatif yang ditunjukkan oleh arah panah

pada gambar diatas. Sedangkan sinyal frekuensi tinggi akan melewati Kapasitor karena kapasitor menawarkan resistansi yang rendah bagi sinyal frekuensi tinggi tersebut. Perlu diingat bahwa arus akan selalu mengambil jalur yang resistansinya paling rendah, karena kapasitor menawarkan resistansi yang rendah dalam rangkaian frekuensi tinggi maka mereka akan akan mengambil jalur melalui kapasitor. Sementara sinyal frekuensi rendah akan mengambil jalur alternatif dengan resistansi yang lebih rendah. Rumus yang digunakan untuk menemukan titik cut-off Frekuensi dari rangkaian RC adalah :

$$F = \frac{1}{2\pi RC} \quad (2.11)$$

Dimana :

f = Frekuensi dalam satuan Hz

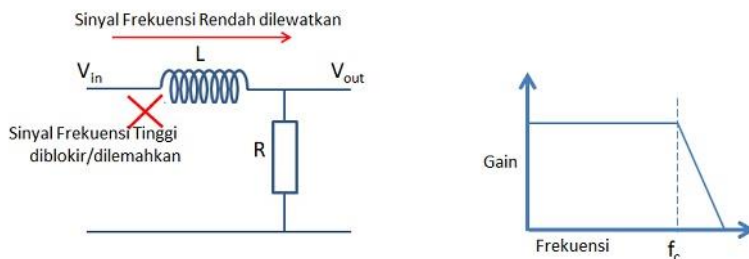
$\pi = 3.14$

R = Nilai Resistor dalam satuan Ohm (Ω)

C = Nilai Kapasitor dalam satuan Farad (F)

2.7.2 Low Pass RL Filter

Low Pass RL Filter atau Penyaring lolos bawah RL adalah rangkaian penyaring frekuensi yang terdiri dari komponen Resistor dan Induktor yang melewati atau meneruskan Frekuensi rendah dan memblokir atau menghambat frekuensi tinggi. Untuk membuat Low Pass RL Filter, Induktor ditempatkan secara seri dengan sinyal *I input* dan Resistor ditempatkan sejajar atau paralel dengan sinyal *input* seperti pada gambar rangkain dibawah ini :



Gambar 2. 16 Low pass RL filter

Cara kerja rangkaian Low Pass RL Filter diatas berdasarkan prinsip Reaktansi Induktif. Reaktansi Induktif adalah resistansi atau impedansi Induktor yang berubah berdasarkan sinyal frekuensi yang melewatinya. Tidak seperti Resistor yang merupakan perangkat non-reaktif, Induktor menawarkan Impedansi yang berbeda untuk sinyal frekuensi yang berbeda, seperti halnya kapasitor. Namun resistansi yang dihasilkan oleh Induktor ini merupakan kebalikan dari Kapasitor, Resistansi Induktor akan menjadi sangat tinggi apabila dilewati sinyal frekuensi tinggi dan sebaliknya akan menjadi rendah apabila dilewati frekuensi rendah. Oleh karena itu, penempatan Induktor di rangkaian berbeda dengan penempatan Kapasitor pada rangkaian RC Filter.

Berdasarkan karakteristik ini, rangkaian RL (Resistor Induktor) diatas dapat berfungsi secara efektif sebagai Penyaring Lolos Bawah atau Low Pass Filter yang memblokir sinyal frekuensi tinggi dan memungkinkan sinyal frekuensi rendah melewatinya tanpa hambatan.

Rumus yang digunakan untuk menemukan titik cut-off Frekuensi dari rangkaian RC adalah :

$$F = \frac{R}{2\pi L} \quad (2.12)$$

Dimana :

f = Frekuensi dalam satuan Hz

$\pi = 3.14$

R = Nilai Resistor dalam satuan Ohm (Ω)

L = Nilai Induktor dalam satuan Henry (H)

BAB III

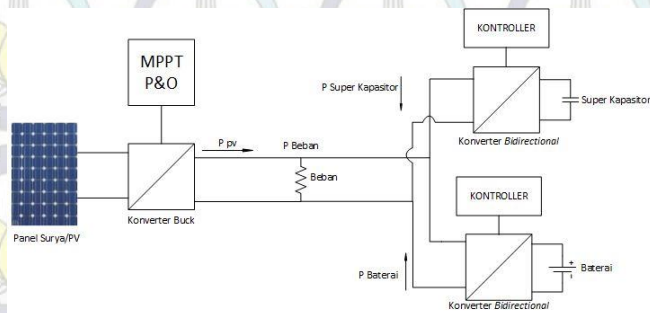
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Konfigurasi Sistem Konversi Energi Matahari

Dalam bab ini akan di jelaskan tentang pemodelan sistem penyimpanan pembangkit listrik tenaga surya yang terhubung dengan penyimpanan energi yang akan di simulasikan pada *software* MATLAB/*simulink* untuk mendemonstrasikan kinerja penyimpanan pembangkit listrik tenaga surya . Pada bab sebelumnya telah dijelaskan model penyimpanan di modelkan dengan blok generic dari *software* MATLAB.

3.2 Konfigurasi pemodelan penyimpanan pembangkit listrik tenaga surya dengan sistem hybrid.

Pada tugas akhir ini keseluruhan sistem penyimpanan pembangkit listrik tenaga surya terdiri dari beberapa blok yaitu ; Panel surya, konverter *buck* dengan kontroller MPPT P&O , dua konverter *bidirectional* dengan kontrolernya, penyimpanan energi berupa Baterai dan Superkapasitor, beban resistif. Keseluruhan konfigurasi sistem konversi energi matahari digambarkan pada gambar 3.1



Gambar 3. 1 Konfigurasi sistem penyimpanan energi

Sesuai gambar di atas, dapat diketahui bahwa daya yang mengalir ke beban (P_{beban}) adalah Total dari daya yang dihasilkan oleh Panel Surya (P_{pv}) dan daya yang berasal dari kedua penyimpanan energi. Untuk

memenuhi kebutuhan daya yang diinginkan, Kontroller pada Konverter Bidirectional mengatur suplai daya dari kedua penyimpanan energi.

3.3 Photovoltaic

Photovoltaic merupakan sumber energi utama dalam tugas akhir ini, PV memiliki beberapa macam berdasarkan bahan untuk penyerapan cahaya matahari. Jenis photovoltaic terbagi menjadi 2, yaitu jenis monocrystalline dan polycrystalline.

Solar Cell monocrystalline dibuat menggunakan crystall silicon murni yang sudah melalui proses Czochralski yang hasilnya adalah Ingot. Ingot kemudian diiris tipis – tipis layaknya kripik kentang yang berasal dari potongan tipis kentang gelondongan. Jenis Solar cell polycrystalline dihasilkan dari proses metalurgi grade silicon dengan pemurnian kimia. Silikon baku dicairkan dan dituangkan ke dalam cetakan persegi, yang didinginkan dan dipotong menjadi wafer – wafer persegi yang sempurna. Proses produksi polycrystalline silicon lebih murah bila dibandingkan proses produksi monocrystalline silicon. PV yang digunakan merupakan PV ZEDfabric jenis Monocrystalin 180Wp, memiliki spesifikasi pada tabel 3.1

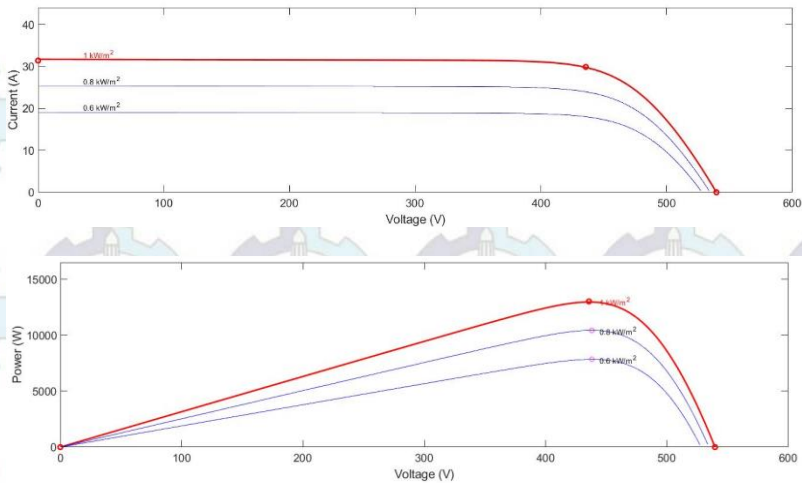
Tabel 3. 1 Spesifikasi Satuan PV

Pmpp	180 Wp
Vmpp	36.31 V
Impp	4.98 A
Voc	44.97 V
Isc	5.23 A

Pada tugas akhir ini dibutuhkan sebanyak 144 PV untuk menghasilkan tegangan dan arus yang diinginkan pada simulasi MATLAB/simulink. PV disusun secara seri dan paralel, sebanyak 12 PV disusun seri dan 12 PV disusun paralel. Adapun hasil dari penyusunan tersebut memiliki karakteristik daya, tegangan dan arus seperti yang ditunjukkan pada tabel 3.2 dan gambar 3.2

Tabel 3. 2 Spesifikasi PV yang digunakan

Pmpp	13.02kW
Vmpp	435.7
Impp(A)	29.88
Voc(V)	539.6
Isc(A)	31.38



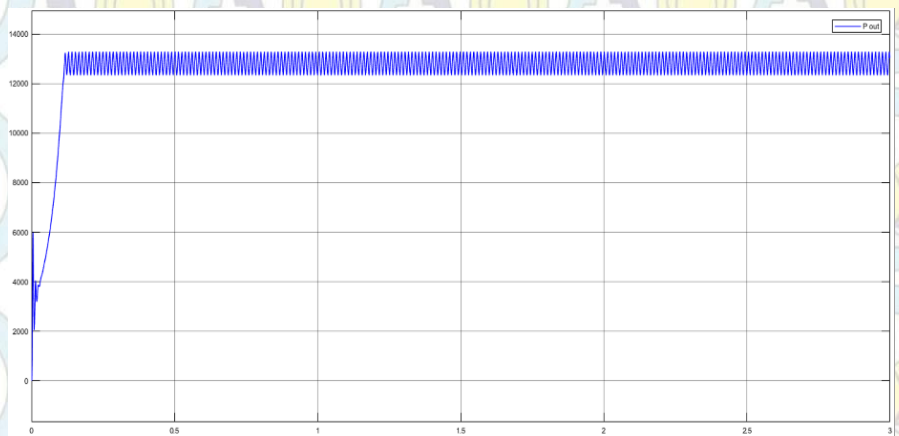
Gambar 3. 2 karakteristik PV yang digunakan

3.4 MPPT P&O

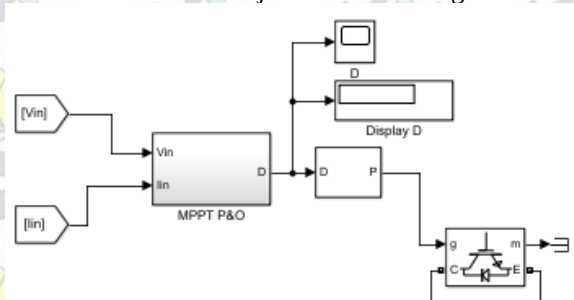
MPPT berfungsi untuk menghasilkan daya terbaik dari PV yang selalu berubah seiring dengan perubahan iradiasi dan temperature. Algoritma yang akan digunakan ialah algoritma P&O yang memiliki cara kerja dengan umpan balik sederhana. Masukan dari algoritma P&O adalah arus dan tegangan PV. Melalui nilai masukan tegangan $V(t)$ dan arus $I(t)$ diperoleh nilai daya $P(t)$. Pada saat daya PV dan tegangan naik, algoritma

ini menaikkan nilai dutycycle (ΔD). Nilai dutycycle (D) dijumlah dengan *step size* Duty Cycle, sehingga menghasilkan nilai titik operasi dan mencapai titik daya maximum, begitu juga dengan arah sebaliknya[6]. Perubahan step dutycycle mengakibatkan ripple daya pada saat kondisi steady state.

Saat uji coba simulasi MPPT dengan keadaan standar test(STC/*standart test condition*) iradiasi cahaya matahari 1000w/m² dan suhu 25 C daya yang dihasilkan sebesar 13 kW, namun masih ada sedikit ripple yang diakibatkan perubahan duty cycle (D). Hasil uji coba MPPT kondisi di tunjukkan pada gambar 3.3 dan pemodelan MPPT blok simulink ditunjukkan pada gambar 3.4.



Gambar 3. 3 Hasil uji coba MPPT dengan STC



Gambar 3. 4 Diagram blok pemodelan MPPT di MATLAB/Simulink

3.5 Desain Buck Converter

Buck Converter merupakan salah satu konverter DC yang mampu mengubah nilai tegangan menjadi lebih rendah dari tegangan inputnya. Tegangan output DC yang dihasilkan mempunyai polaritas yang sama dengan tegangan inputnya. Konverter ini juga disebut dengan step down converter.

Dalam menghasilkan daya maksimum, perlu dilakukan pengaturan kecepatan generator yang diatur berdasarkan pengaturan *duty cycle* yang telah dijelaskan dalam persamaan 3.1. Untuk itu dilakukan perhitungan nilai parameter-parameter konverter *boost* agar sesuai dengan hasil yang diinginkan. Berikut adalah parameter komponen-komponen yang digunakan pada konverter *boost* yang digunakan dalam Tugas Akhir ini :

- a. Tegangan output konverter (DC link) = 220Volt
- b. *Ripple* arus keluaran = $\pm 5\%$
- c. *Ripple* tegangan keluaran = $\pm 5\%$
- d. Frekuensi *switching* = 4 kHz

Tabel 3. 3 Spesifikasi desain *Buck Converter*

P	13.02kW
Vinput	437.5 V
Voutput	220 V
Ioutput	27.27
ΔV_c	11 V
ΔI_L	1.36 A
Duty Cycle	0.5

Berikutnya dilakukan perhitungan nilai inductor yang digunakan. Untuk menghitung nilai inductor maka perlu ditentukan terlebih dahulu frekuensi *switching* dan *ripple* arus yang diinginkan. Perhitungan dilakukan dengan persamaan dibawah ini :

$$D = \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (3.1)$$

$$L = \frac{V_{in} \times (1-D) \times D}{\Delta I_L \times f_s} \quad (3.2)$$

$$L = \frac{437.5 \times (1-0.5) \times 0.5}{0.2727 \times 4000} \quad (3.3)$$

$$L = 0.02 \text{ H}$$

$$C = (V_{out} + \Delta V) \frac{(1-k)}{R \times f_s \times \Delta V} \quad (3.4)$$

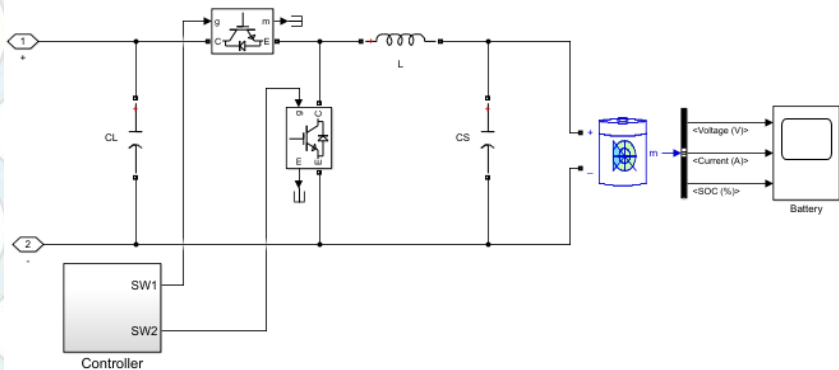
$$C = (220 + 11) \times \frac{(0.5)}{8.067 \times 4000 \times 11} \quad (3.5)$$

$$C = 0.325 \text{ m}$$

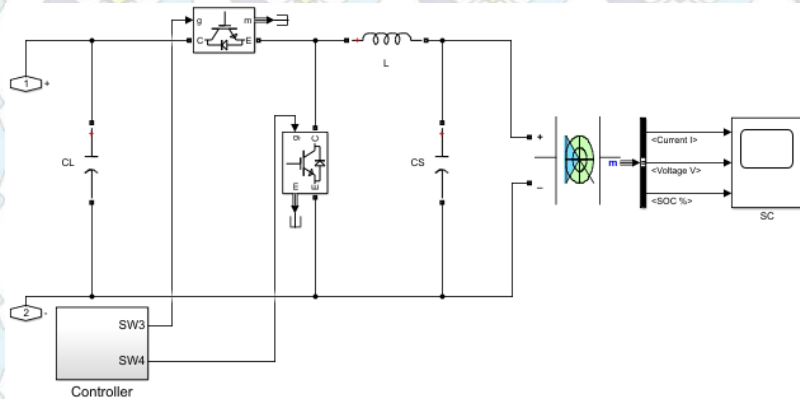
Berdasarkan perhitungan dengan persamaan 3.1 dan 3.2 di atas hasil yang diperoleh ialah $L = 0.02 \text{ H}$ dan $C = 0.325 \text{ m}$

3.6 Desain Bidirectional Converter

Seperti apa yang telah dijelaskan pada bab 2, konverter *bidirectional* bekerja dengan cara mengatur *switch* untuk mengatur aliran daya dua arah ke penyimpanan energi. Dalam tugas akhir ini baterai yang digunakan ialah baterai Li-Ion 120 V 50 A.h dan superkapasitor 200 F 120 V. Kinerja ini bertujuan untuk menjaga tegangan DC link konstan, melalui proses pengisian dan pengosongan penyimpanan energi. Pemodelan *bidirectional converter* di tunjukkan pada gambar 3.5 dan 3.6



Gambar 3. 5 Pemodelan Bidirectional Converter dengan Baterai



Gambar 3. 6 Pemodelan *Bidirectional Converter* dengan superkapasitor

Parameter penting dalam mendesain konverter bidirectional yaitu Tegangan beban (V_{load}), Tegangan pada penyimpanan energi ($V_{storage}$), daya beban (P_{load}), resistansi beban (R_{Load}), frekuensi switching (F_s), dan duty cycle (D). Adapun nilai duty cycle yang dipilih sebesar $1/3$ bertujuan untuk mempertahankan aliran arus di induktor ketika mode buck atau boost sedang berjalan [15]. Berikut adalah tabel 3.3 yang menunjukkan spesifikasi desain konverter bidirectional .

Tabel 3. 4 Spesifikasi desain *Bidirectional Converter*

P Load	6 kw
R load	8.067Ω
V load (VL)	220 V
V storage (VS)	120 V
Frekuensi Switching (fs)	4Khz
Duty Cycle	$1/3$
Ripple	$\pm 1 \%$

Berikut adalah persamaan untuk mencari nilai induktor (L) :

$$L = \frac{1/3 \times (1 - 1/3)^2 \times 220^2}{2 \times 6000 \times 4000} \quad (3.6)$$

$$L = 0.149 \text{ mH} \quad (3.7)$$

Dipilih 0.16 mH

$$C = C_S = C_L = \frac{D}{R_H \times f_s \times \frac{\Delta V_L}{V_L}} \quad (3.8)$$

$$C = \frac{1/3}{8.067 \times 4000 \times 0.01} \quad (3.9)$$

$$C = 1.03 \text{ mF}$$

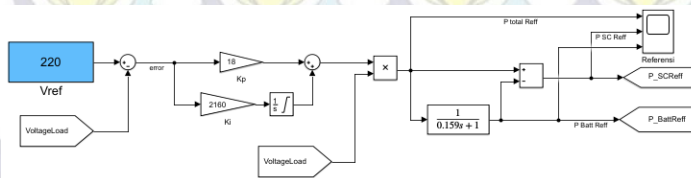
Dipilih 1.5 mF

Cs = kapasitor di penyimpanan

Cl = kapasitor di beban

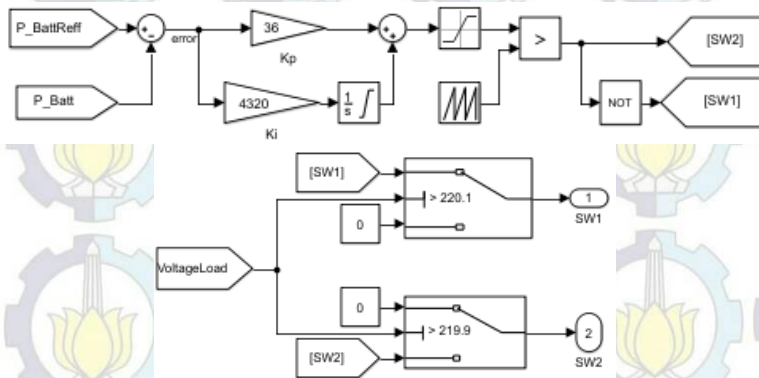
3.7 Desain Kontroler *Bidirectional Converter*

Dalam kinerjanya, konverter *bidirectional* membutuhkan sebuah kontroler yang dapat mengatur proses *switching* transistor agar proses *charging* dan *discharging* penyimpanan energi dapat dilakukan untuk menjaga keseimbangan daya. Kontroler *Proportional Integrator* (PI) dipilih untuk mengatur proses tersebut serta Nilai Kp dan Ki tersebut didapatkan dengan metode ziegler nichols. Dalam hal ini, ada tiga kontroller PI yang digunakan. Kontroller PI pertama dengan nilai Kp=18 ; Ki=2160 menghasilkan nilai referensi arus dari *membaca error* antara nilai tegangan referensi dan tegangan pada DC link yang sebenarnya, dalam hal ini tegangan referensi yang dipilih adalah sebesar 220 V. Arus referensi tersebut dikalikan dengan tegangan pada beban sehingga menjadikannya referensi daya. Referensi daya yang dihasilkan kemudian dibagi menggunakan persamaan low pass filter (LPF) sehingga menghasilkan dua jenis referensi yaitu komponen daya rata-rata atau frekuensi rendah yang menjadi referensi daya yang melewati LPF untuk baterai dan komponen daya dinamis atau frekuensi tinggi yang menjadi daya referensi untuk Super Kapasitor. Seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.7.



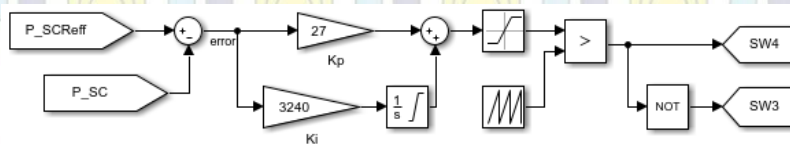
Gambar 3. 7 Blok simulasi *Voltage Controller*

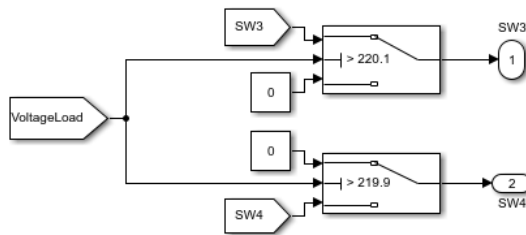
Kontroler PI kedua dengan nilai $K_p=36$; $K_i=4320$ digunakan untuk membaca error dari Referensi baterai dengan nilai daya baterai yang sebenarnya. Untuk kemudian dilewati kepada PWM Generator sehingga bisa mengatur switching pada transistor seperti pada gambar 3.8. Transistor tersebut tersambung pada konverter *bidirectional* untuk melakukan proses *buck-boost* yang membantu baterai melakukan proses *charge-discharge*.



Gambar 3. 8 Blok simulasi Kontroler *Bidirectional Converter* pada baterai

Kontroler PI ketiga dengan nilai $K_p=27$; $K_i=3240$ digunakan untuk membaca error dari Referensi Super Kapasitor dengan nilai daya Super Kapasitor yang sebenarnya. Untuk kemudian dilewati kepada PWM Generator sehingga bisa mengatur switching pada transistor seperti pada gambar 3.9. Transistor tersebut tersambung pada konverter *bidirectional* untuk melakukan proses *buck-boost* yang membantu Super Kapasitor melakukan proses *charge-discharge*.





Gambar 3. 9 Blok simulasi Kontroler *Bidirectional Converter* pada Superkapasitor

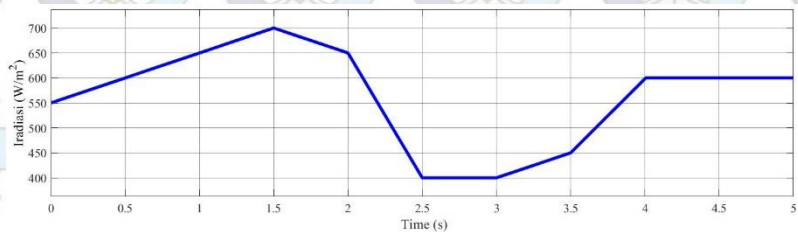
Untuk mempertahankan nilai tegangan pada DC link, selain menggunakan tegangan referensi pada controller PI yang pertama, dilakukan juga dengan menggunakan blok diagram switch. Jika tegangan pada DC link diatas 220.1 V maka hanya ada dua switch yang berfungsi. yaitu, switch 1 pada konverter bidirectional yang terhubung pada baterai dan switch 3 pada konverter bidirectional yang terhubung dengan Super Kapasitor . Dengan kata lain konverter *bidirectional* hanya melakukan proses buck saja atau hanya melakukan proses *charge* pada baterai dan Super Kapasitor.

Selain itu , jika tegangan pada DC link dibawah 219.9 maka hanya ada dua switch yang berfungsi. yaitu, switch 2 pada konverter bidirectional yang terhubung pada baterai dan switch 4 pada konverter bidirectional yang terhubung dengan Super Kapasitor . Dengan kata lain, konverter *bidirectional* hanya melakukan proses boost saja atau hanya melakukan proses *discharge* pada baterai dan Super Kapasitor. Selain itu, switch juga mencegah adanya *short circuit* pada konverter *bidirectional*

BAB IV

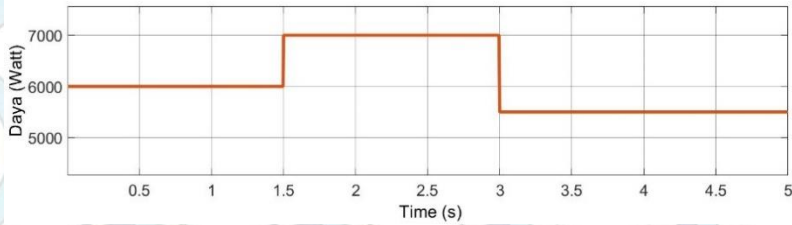
HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini membahas hasil simulasi dari sistem konversi energi matahari dengan menggunakan sistem penyimpanan energi *hybrid* yang memanfaatkan baterai dan Super Kapasitor dengan kondisi iradiasi dan beban yang berubah-ubah. Ada beberapa hal yang akan diamati dari hasil simulasi tersebut seperti daya yang dihasilkan oleh PV, Daya yang harus disimpan dan dikeluarkan oleh baterai dan Super Kapasitor, Daya Beban, Tegangan Beban, Daya Referensi dari Kontroller serta Karakteristik SOC Tegangan dan arus dari Baterai dan Super Kapasitor. Dalam tugas akhir ini akan diamati sistem konversi energi matahari dengan iradiasi yang berubah-ubah selama lima detik dengan nilai iradiasi paling tinggi sebesar 700 kW/m² dan paling rendahnya adalah 400kW/m². Nilai iradiasi dipilih dengan pertimbangan dari data iradiasi di departemen teknik elektro ITS Surabaya dari pukul 10.00 WIB - 15.00 WIB. Dari data tersebut, iradiasi berkisar antara 400kW/m² sampai 700kW/m². Nilai iradiasi matahari yang dipilih adalah seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.1



Gambar 4. 1 Grafik perubahan iradiasi cahaya matahari

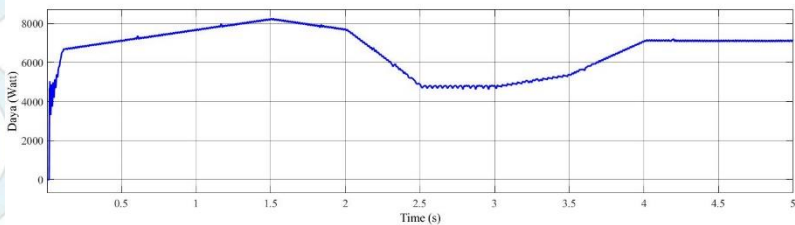
Selain iradiasi yang berubah-ubah, dalam tugas akhir ini juga akan mengamati perubahan beban. Pengujian perubahan beban diperlukan untuk membuktikan jika sistem bisa digunakan untuk kebutuhan daya yang berbeda. Daya beban merupakan beban DC resistif. Perubahan daya beban yang dibutuhkan dimulai dari 6kW kemudian naik menjadi 7kW dan turun menjadi 5.5 kW Seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.2. Perubahan beban dilakukan dengan mengubah nilai resistansi. Untuk kebutuhan beban 6 kW nilai resistansi yang digunakan sebesar 8.067 ohm, Untuk kebutuhan beban 7 kW nilai resistansi yang digunakan sebesar 6.9 ohm dan untuk kebutuhan daya 5.5 kW nilai resistansi yang digunakan sebesar 8.8 ohhm.



Gambar 4. 2 Grafik perubahan kebutuhan daya

4.1 Pengujian dan analisa perubahan iradiasi terhadap daya keluaran PV

Perubahan iradiasi berpengaruh pada daya yang dihasilkan. Pada gambar 4.3 menunjukkan daya yang dihasilkan oleh PV setelah melewati Konverter *Buck* yang dikontrol dengan MPPT P&O. Semakin tinggi nilai iradiasi maka semakin tinggi pula nilai daya yang dihasilkan. Sebaliknya, semakin rendah nilai iradiasi maka semakin kecil pula nilai daya yang dihasilkan. Ketergantungan daya pada iradiasi cahaya matahari menyebabkan daya yang dihasilkan oleh PV mengalami fluktuasi.

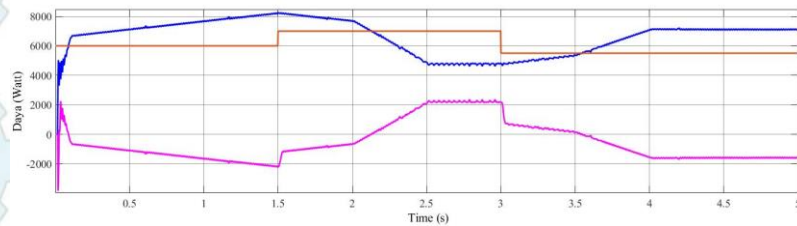


Gambar 4. 3 Grafik keluaran daya PV

4.2 Referensi aliran daya oleh penyimpanan energi

Untuk mengetahui berapa besar lebihan daya yang seharusnya disimpan di penyimpanan energi dan kekurangan daya yang seharusnya disuplai oleh penyimpanan energi bisa dilakukan dengan cara mengurangi Daya beban yang dibutuhkan (Preffload) dengan daya yang dihasilkan oleh PV (P_{PV}). Apabila daya yang dihasilkan PV lebih besar dari daya yang dibutuhkan maka hasilnya negatif yang menandakan bahwa penyimpanan energi seharusnya melakukan pengisian untuk menyimpan lebihan daya. Kemudian, apabila daya yang dihasilkan PV lebih kecil daripada kebutuhan daya maka hasilnya adalah positif yang menandakan bahwa penyimpanan energi seharusnya melakukan pengosongan untuk memenuhi kebutuhan daya. Seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.4 , Grafik yang berwarna

biru adalah daya yang dihasilkan PV (P_{PV}), Grafik yang berwarna coklat adalah referensi daya yang dibutuhkan (Preffload) dan Grafik yang berwarna ungu adalah selisih dari Preffload dikurangi P_{PV} yang menggambarkan seberapa besar daya yang harus disimpan dan disuplai oleh penyimpanan energi.

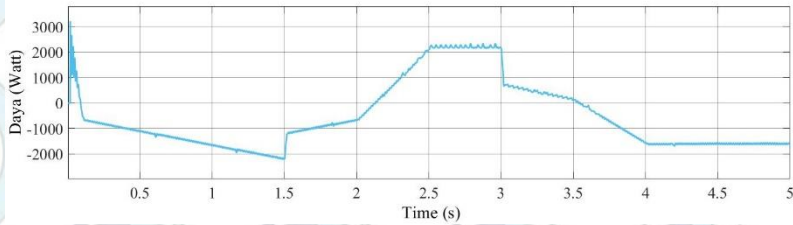


Gambar 4. 4 Grafik referensi aliran daya

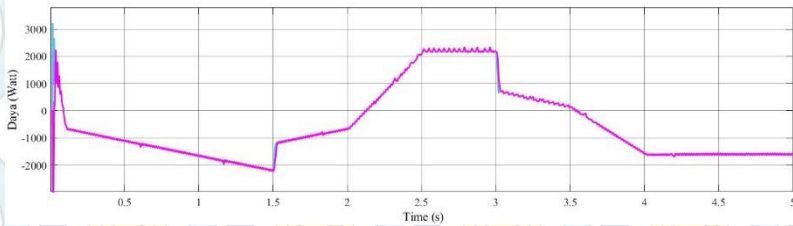
- = Daya PV
- = Kebutuhan daya beban
- = Selisih kebutuhan daya beban dan daya PV

4.3 Pengujian dan analisa penyimpanan energy *hybrid*

Baterai dan Super Kapasitor sebagai penyimpanan energi harus melakukan proses pengisian dan pengosongan untuk menjaga kebutuhan daya. Hasil simulasi pengisian dan pengosongan daya total oleh penyimpanan energi ditunjukkan pada gambar 4.5. Ketika grafik berada di bawah nol atau negatif, hal itu menandakan bahwa penyimpanan energi melakukan proses pengisian. Tetapi, ketika grafik berada di atas nol atau positif, hal itu menandakan bahwa penyimpanan energi sedang melakukan proses pengosongan. Untuk mengamati apakah pengosongan dan pengisian penyimpanan energi sudah sesuai dengan kebutuhan atau belum, maka perlu dibandingkan dengan grafik selisih Preffload dikurangi P_{PV} . Gambar 4.6 menunjukkan bahwasannya proses pengisian dan pengosongan oleh penyimpanan energi sudah sesuai dengan kebutuhan, hanya berbeda sedikit ketika overshoot di awal dan ketika perubahan beban.



Gambar 4. 5 Grafik hasil pengujian aliran daya penyimpanan energi

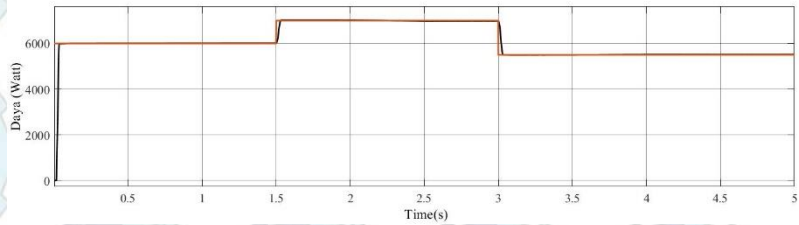


Gambar 4. 6 Grafik perbandingan nilai referensi dan hasil

- = Aliran daya total pada baterai dan superkapasitor
- = Selisih kebutuhan daya PV dan beban

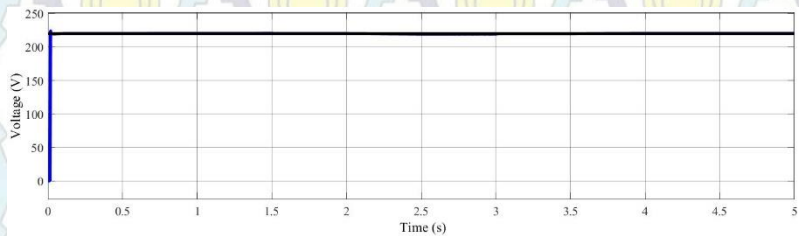
4.4 Pengujian dan analisa pemenuhan daya dan tegangan pada beban (DC Link)

Kemampuan Baterai dan SC untuk melakukan proses pengosongan dan pengisian sesuai keinginan membuat suplai daya pada DC link bisa terjaga walaupun dalam keadaan iradiasi dan kebutuhan beban yang berubah-ubah. Seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.7 grafik kuning adalah referensi kebutuhan daya dan grafik hitam adalah daya yang mengalir pada beban atau DC link. Terlihat bahwasannya Daya yang mengalir pada beban mengikuti referensi daya yang dibutuhkan. Selain aliran daya pada beban yang terpenuhi, diamati pula tegangan pada beban. Referensi tegangan yang dipertahankan oleh kontrollor adalah sebesar 220 V. Pada gambar 4.8 menunjukkan grafik berwarna hitam adalah referensi tegangan pada 220 V dan grafik berwarna biru adalah tegangan pada beban atau DC link. Terlihat bahwa tegangan pada beban mampu dijaga di 220V.



Gambar 4. 7 Grafik aliran daya pada beban dan referensi kebutuhan daya

— = Aliran daya beban
 — = Kebutuhan Daya beban

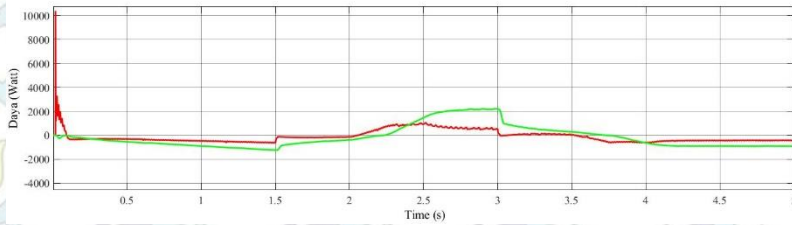


Gambar 4. 8 Grafik tegangan pada beban dan referensi tegangan

— = Tegangan pada DC link/ beban.
 — = Referensi tegangan 220 V

4.5 Pengujian dan analisa pembagian daya pada penyimpanan energy hybrid

Baterai dan SC adalah penyimpanan energi yang digunakan untuk sistem penyimpanan energi. Baterai dan super kapasitor berbagi daya untuk diserap dan dilepaskan serta saling membantu untuk menjaga daya dan tegangan di DC link tetap stabil. Gambar 4.9 menunjukkan daya yang diserap dan dilepas oleh baterai dan super kapasitor. Grafik berwarna hijau adalah daya pada baterai dan grafik berwarna merah adalah daya pada super kapasitor. Dari gambar tersebut terlihat bahwa proses pengisian dan pengosongan daya pada SC memiliki respon yang lebih cepat ketika perubahan beban dan iradiasi serta mengatasi kebutuhan daya fluktuatif. Sementara proses pengisian dan pengosongan daya baterai responnya lebih lambat dan tidak mengatasi kebutuhan daya fluktuatif sehingga grafiknya cenderung tidak banyak bergejolak dan perubahannya tidak setajam superkapasitor.

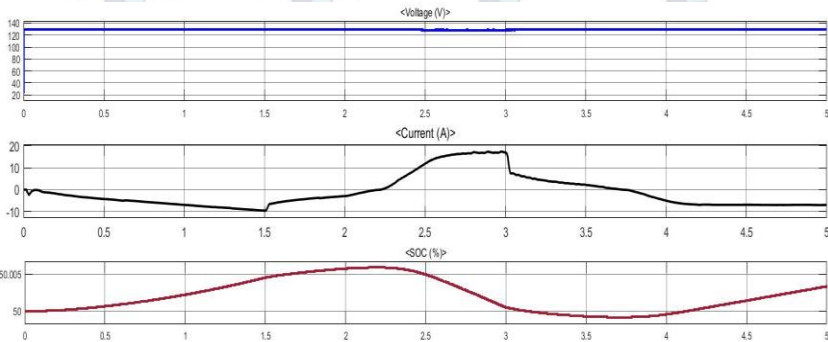


Gambar 4. 9 Grafik aliran daya pada baterai dan superkapasitor

— = Aliran daya pada baterai
 — = Aliran daya pada superkapasitor

4.5.1 Karakteristik SOC, arus dan tegangan baterai

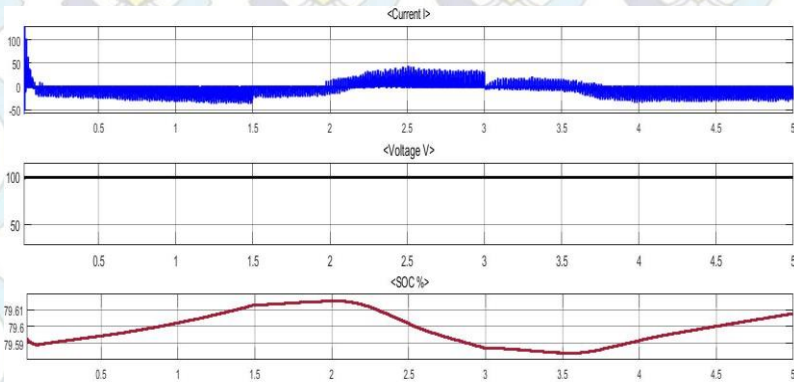
Baterai yang digunakan mempunyai tegangan nominal 120 V ; 50Ah; SOC 50%. Karakteristik SOC, Arus dan tegangan pada baterai ketika simulasi dijalankan ditunjukkan pada gambar 4.10. Terlihat bahwa tegangan di baterai konstan di 130 V hal ini terjadi karena zona eksponensialnya 130 V. Bisa dilihat pula arus dan SOC yang berubah-ubah ketika proses pengosongan dan pengisian



Gambar 4. 10 Grafik Karakteristik tegangan, arus dan SOC pada Baterai

4.5.2 Karakteristik SOC, arus dan tegangan superkapasitor

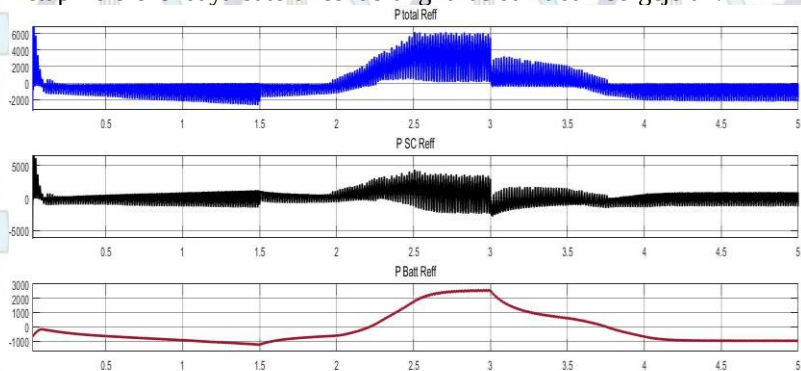
Super kapasitor yang digunakan sebesar 50 F dan tegangan rate 120 V serta tegangan initial 100 V. Gambar 4.11 menunjukkan karakteristik SOC, Arus dan tegangan pada SC ditunjukkan pada gambar. Terlihat arus pada superkapasitor yang sangat bergejolak dan tegangan pada 100 V sesuai dengan tegangan initial dan SOC yang naik turun ketika proses pengosongan dan pengisian.



Gambar 4. 11 Grafik Karakteristik tegangan, arus dan SOC pada superkapasitor

4.6 Pengujian dan analisa referensi kontroler

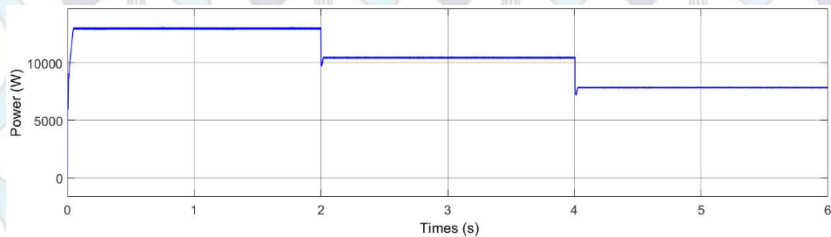
Untuk membagi dan mengatur daya yang keluar dan masuk baterai serta superkapasitor adalah menggunakan kontroller. Dalam hal ini, kontroller memberikan daya referensi seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.12. Terlihat bahwa referensi daya total sangat bergejolak, Referensi pada super kapasitor mengatasi sinyal yang sangat bergejolak. Tetapi referensi daya baterai cenderung lurus dan tidak bergejolak.



Gambar 4. 12 Grafik referensi daya dari kontroler

4.7

Respon MPPT pada perubahan berbagai iradiasi



Gambar 4. 13 Respon MPPT pada perubahan iradiasi

Respon MPPT yang digunakan ditunjukkan pada Gambar 4.13. Iradiasi berubah dari 1000 W/m² kemudian menjadi 800 W/m² dan menjadi 600 W/m². Pada iradiasi 1000 W/m² daya yang seharusnya dihasilkan berdasarkan *rating* oleh PV sebesar 13.02 kW tetapi pada grafik menunjukkan nilai daya sebesar 12,96 kW. Pada iradiasi 800 W/m² daya yang seharusnya dihasilkan berdasarkan *rating* oleh PV sebesar 10.44 kW tetapi pada grafik menunjukkan nilai daya sebesar 10.43 kW. Pada iradiasi 600 W/m² daya yang seharusnya dihasilkan berdasarkan *rating* oleh PV sebesar 7.848 kW tetapi pada grafik menunjukkan nilai daya sebesar 7.844 kW. Berdasarkan data yang didapatkan, efisiensi tracking MPPT mencapai sekitar 99%.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

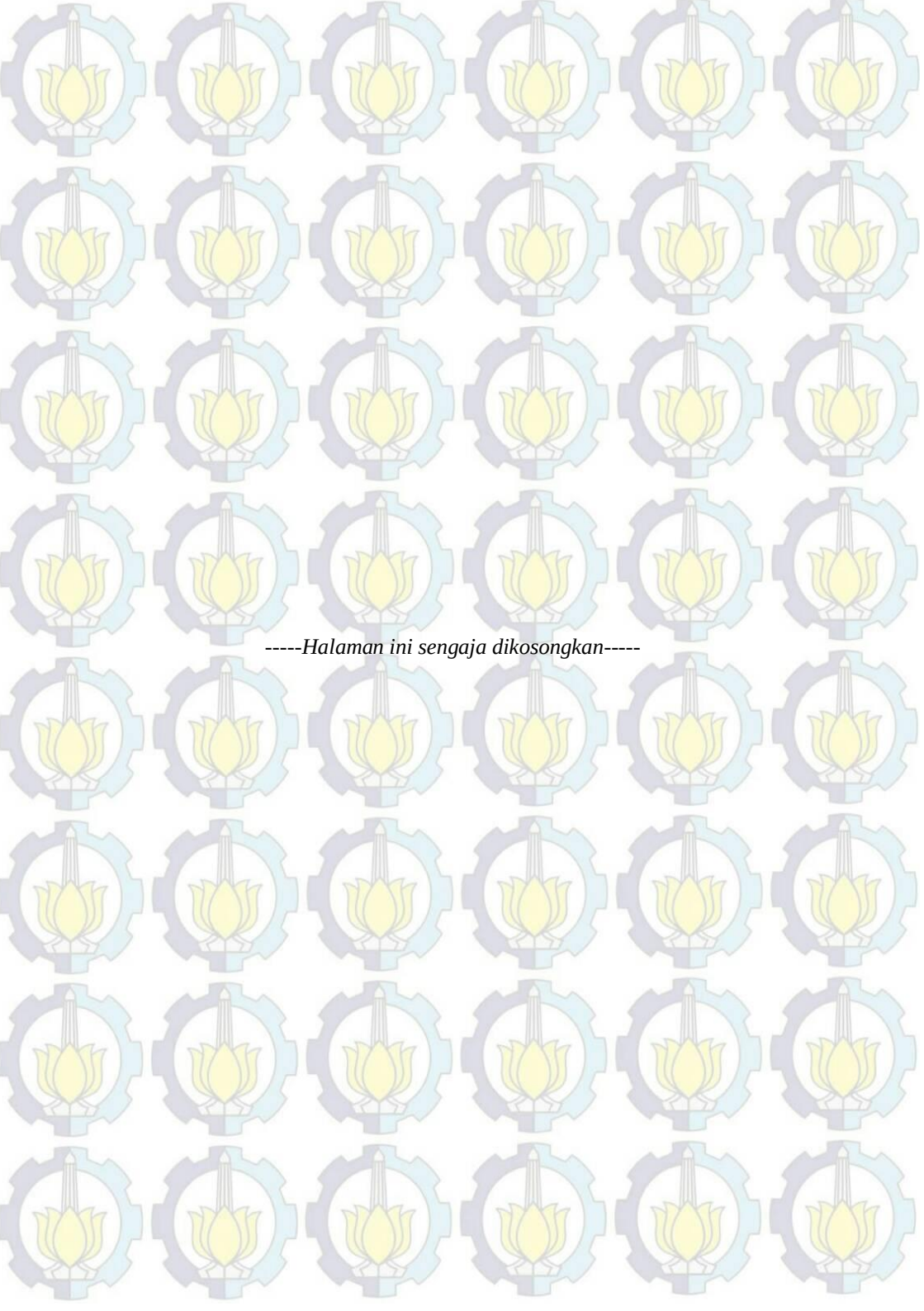
5.1 Kesimpulan

Dari hasil simulasi konversi energi matahari yang terhubung dengan sistem penyimpanan energi *hybrid* yang menggunakan baterai dan super kapasitor. Didapatkan beberapa kesimpulan, diantaranya.

1. Daya yang dihasilkan oleh PV dipengaruhi oleh iradiasi dan bersifat fluktuatif yang memiliki *ripple*.
2. Sistem penyimpanan energi *hybrid* mampu melakukan pengosongan dan pengisian daya sesuai dengan kebutuhan.
3. Sistem konversi energi matahari dengan penyimpan *hybrid* mampu memenuhi kebutuhan daya yang berubah-ubah serta menjaga tegangan pada beban (DC link).
4. Kontroler yang digunakan mampu membagi pemenuhan aliran daya sesuai dengan karakteristik yang dimiliki baterai dan superkapasitor.
5. Baterai melakukan proses pengisian dan pengosongan daya dengan respon yang lebih lambat dari pada superkapasitor ketika terjadi perubahan iradiasi atau beban serta daya yang diserap dan dilepas bersifat rata-rata atau statis.
6. SC melakukan proses pengisian dan pengosongan daya dengan respon yang lebih cepat dari pada baterai ketika terjadi perubahan iradiasi atau beban serta daya yang diserap dan dilepas bersifat dinamis sehingga bisa mengatasi kebutuhan *ripple* daya.

5.2 Saran

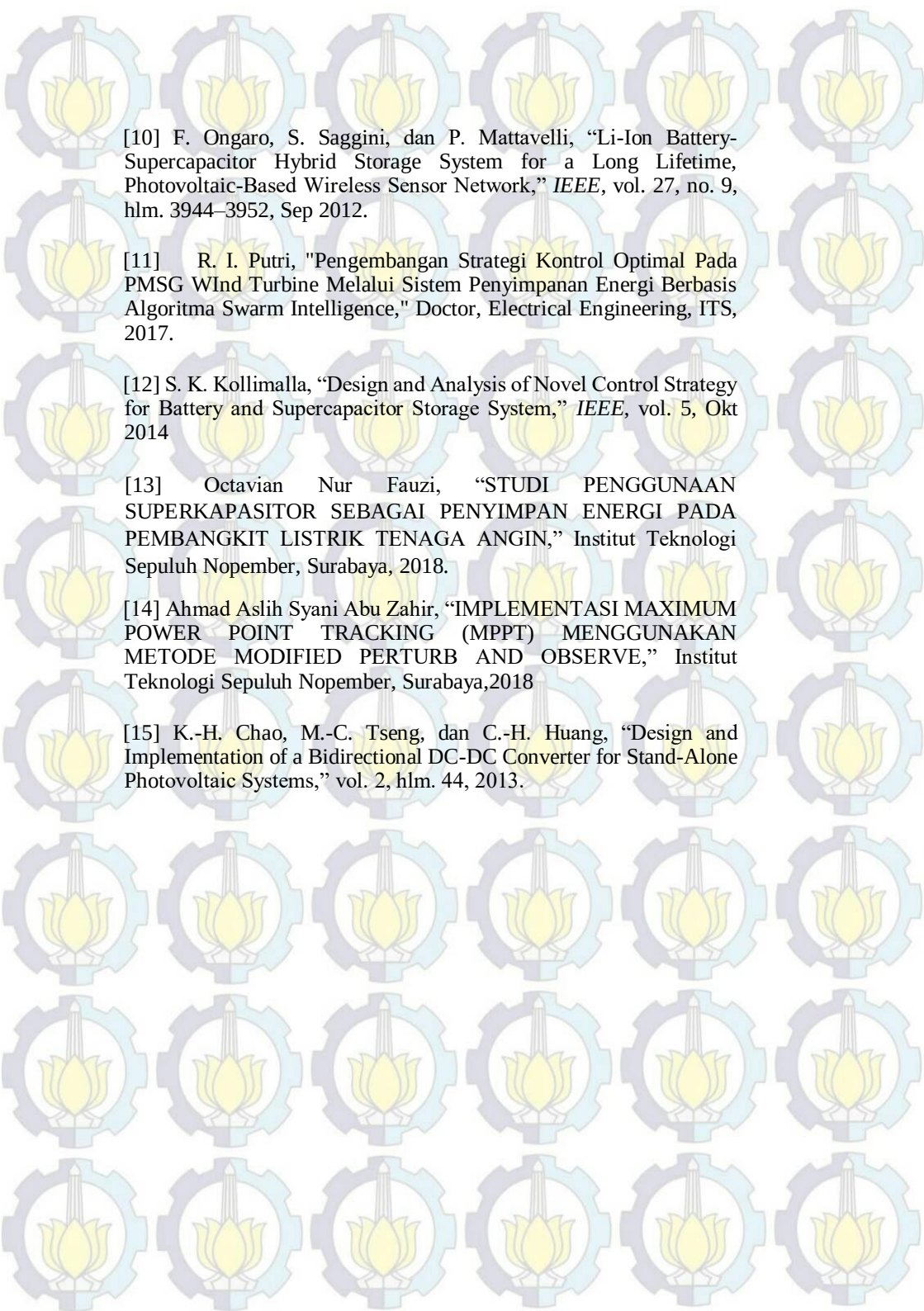
Mempertimbangkan kualitas daya yang dihasilkan oleh sistem konversi energi matahari yang terhubung dengan sistem penyimpanan energi *hybrid*. Penelitian selanjutnya diharap dapat menambahkan inverter agar bisa memenuhi beban AC dan membuat beban yang lebih kompleks serta mempertimbangkan sizing pada superkapasitor. Mengingat, harga dari superkapasitor yang relatif mahal. Sehingga kedepannya bisa diimplementasikan dan dimanfaatkan untuk pengembangan energi baru terbarukan.



-----Halaman ini sengaja dikosongkan-----

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Teleke, M. E. Baran, S. Bhattacharya, dan A. Q. Huang, "Rule-Based Control of Battery Energy Storage for Dispatching Intermittent Renewable Sources," *IEEE*, vol. 1, no. 3, hlm. 117–124, Okt 2010.
- [2] F. Ongaro, S. Saggini, dan P. Mattavelli, "Li-Ion Battery-Supercapacitor Hybrid Storage System for a Long Lifetime, Photovoltaic-Based Wireless Sensor Network," *IEEE*, vol. 27, no. 9, hlm. 3944–3952, Sep 2012.
- [3] M. E. Glavin, P. K. W. Chan, S. Armstrong, dan W. . Hurley, "A Stand-alone Photovoltaic Supercapacitor Battery Hybrid Energy Storage System," *Int. Electron. Motion Control Conf. EPE-PEMC 2008*, hlm. 1688–1695.
- [4] Kosyachenko, Leonid A, "Solar Cell – Silicon Wafer – Based Technologies", Intech: Rijeka Croatia. 201
- [5] Ciptian Wieried P, "Desain Model MPPT Baru Pada Topologi PV Farm Berbasis Culster Yang Tertutup Bayangan Sebagian", TESIS. Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2017.
- [6] Ochieng, Reccab M., "Solar Collectors and Panels, Theory and Application", Intech: Rijeka Croatia, 2010.
- [7] Benediktus Ryan Gumelar, "Analisis Step-Up Chopper Sebagai Transformasi Interface Photovoltaic dan Beban", Tugas Akhir, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Univ.Katolik Soegijanprananta, Semarang, 2011
- [8] Datasheet ACS712, "Fully Integrated, Half Effect-Based Linear Current Sensor with 2.1 kVRMS Voltage Isolation and Low-Resistance Current Conductor".
- [9] R. M. Hakim, "Desain dan implementasi MPPT berbasis algoritma modified incremental conductance untuk photovoltaic dengan perubahan iradiasi matahari yang cepat," thesis, Institute Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2018.



[10] F. Ongaro, S. Saggini, dan P. Mattavelli, “Li-Ion Battery-Supercapacitor Hybrid Storage System for a Long Lifetime, Photovoltaic-Based Wireless Sensor Network,” *IEEE*, vol. 27, no. 9, hlm. 3944–3952, Sep 2012.

[11] R. I. Putri, "Pengembangan Strategi Kontrol Optimal Pada PMSG WInd Turbine Melalui Sistem Penyimpanan Energi Berbasis Algoritma Swarm Intelligence," Doctor, Electrical Engineering, ITS, 2017.

[12] S. K. Kollimalla, “Design and Analysis of Novel Control Strategy for Battery and Supercapacitor Storage System,” *IEEE*, vol. 5, Okt 2014

[13] Octavian Nur Fauzi, “STUDI PENGGUNAAN SUPERKAPASITOR SEBAGAI PENYIMPAN ENERGI PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA ANGIN,” Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2018.

[14] Ahmad Aslih Syani Abu Zahir, “IMPLEMENTASI MAXIMUM POWER POINT TRACKING (MPPT) MENGGUNAKAN METODE MODIFIED PERTURB AND OBSERVE,” Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2018

[15] K.-H. Chao, M.-C. Tseng, dan C.-H. Huang, “Design and Implementation of a Bidirectional DC-DC Converter for Stand-Alone Photovoltaic Systems,” vol. 2, hlm. 44, 2013.

LAMPIRAN

Program MPPT P&O

```
function dutyOut = pno(Vsense,Isense)
persistent duty p p0 v0 dp dv n stepSize ;
if isempty(duty)
    duty=1;
end
if isempty(p)
    p = 0;
end
if isempty(p0)
    p0=0;
end
if isempty(v0)
    v0=0;
end
if isempty(n)
    n=0;
end
if isempty(stepSize)
    stepSize=0.005;
end
if duty<=1
    p = Vsense*Isense;
    dp = p-p0;
    dv = Vsense-v0;

    if dp>0
        if dv > 0
            duty = duty - stepSize;
        elseif dv < 0
            duty = duty + stepSize;
        end
    end

    if dp<0
        if dv<0
            duty = duty - stepSize;
        elseif dv>0
            duty = duty + stepSize;
        end
    end
end
```




BIODATA PENULIS



Aditya Setiadi Putra lahir di Probolinggo, 19 Maret 1996 dan dibesarkan di kota Cirebon. Penulis menyelesaikan pendidikan dasar di SDI Al-Azhar 03 Kota Cirebon dari tahun 2002 hingga 2008. Setelah itu, penulis melanjutkan pendidikan di SMPN 7 Kota Cirebon dan SMAN 2 Kota Cirebon. Penulis melanjutkan ke jenjang perguruan tinggi di Institut Sepuluh Nopember melalui jalur SNMPTN. Pada masa perkuliahan penulis banyak menghabiskan waktu di bidang Sistem Tenaga Listrik. Penulis juga aktif dalam kegiatan keorganisasian mahasiswa seperti UKM Rebana ITS dan JMMI ITS. Penulis bisa dihubungi melalui email: aditsetiadi7@gmail.com