



**TUGAS AKHIR - TF 181801**

**PERANCANGAN SISTEM KONTROL PADA *BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEM* (BESS) UNTUK SISTEM GENERATOR TURBIN ANGIN**

**SOVI APRILA KURNIASARI  
NRP. 02311540000018**

**Dosen Pembimbing :  
Dr. Bambang Lelono Widjiantoro, S.T., M.T**

**DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2019**





**TUGAS AKHIR - TF 181801**

**PERANCANGAN SISTEM KONTROL PADA *BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEM* (BESS) UNTUK SISTEM GENERATOR TURBIN ANGIN**

**SOVI APRILA KURNIASARI  
NRP. 02311540000018**

**Dosen Pembimbing :  
Dr. Bambang Lelono Widjiantoro, S.T., M.T**

**DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya  
2019**

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



**FINAL PROJECT - TF 181801**

**DESIGN OF CONTROL SYSTEM ON BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEM (BESS) FOR WIND TURBINE GENERATOR SYSTEMS**

**SOVI APRILA KURNIASARI**  
**NRP. 02311540000018**

*Supervisors :*  
*Dr. Bambang Lelono Widjiantoro, S.T., M.T*

**ENGINEERING PHYSICS DEPARTMENT**  
**Faculty of Industrial Technology**  
**Sepuluh Nopember Institute of Technology**  
**Surabaya**  
**2019**

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME

Saya yang bertanda tangan dibawah ini

Nama : Sovi Aprila Kurniasari  
NRP : 0231154000018  
Departemen / Prodi : Teknik Fisika / S1 Teknik Fisika  
Fakultas : Fakultas Teknologi Industri  
Perguruan Tinggi : Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul **“PERANCANGAN SISTEM KONTROL PADA BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEM (BESS) UNTUK SISTEM GENERATOR TURBIN ANGIN”** adalah benar karya saya sendiri dan bukan plagiat dari karya orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti terdapat plagiat pada Tugas Akhir ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya.

Surabaya, 25 Januari 2019

Yang membuat  
pernyataan,



Sovi Aprila Kurniasari  
NRP.0231154000018

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

**LEMBAR PENGESAHAN  
TUGAS AKHIR**

**PERANCANGAN SISTEM KONTROL PADA *BATTERY  
ENERGY STORAGE SYSTEM (BESS)* UNTUK SISTEM  
GENERATOR TURBIN ANGIN**

**Oleh:**

**Sovi Aprila Kurniasari  
NRP.0231154000018**

**Surabaya, 25 Januari 2019**

**Menyetujui,  
Dosen Pembimbing**

  
**Dr. Bambang Lelono Widjiantoro, S.T., M.T  
NIPN.19690507 199512 1 001**

**Mengetahui,  
Ketua Departemen  
Teknik Fisika FTI-ITS**

  
**Agus Muhamad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D.  
NIPN.19780902 200312 1 002**

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

**PERANCANGAN SISTEM KONTROL PADA BATTERY  
ENERGY STORAGE SYSTEM (BESS) UNTUK SISTEM  
GENERATOR TURBIN ANGIN**

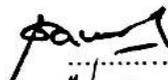
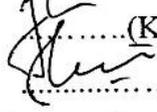
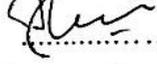
**TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada  
Bidang Studi Rekayasa Instrumentasi  
Program Studi S-1 Departemen Teknik Fisika  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

**SOVI APRILA KURNIASARI**  
**NRP.0231154000018**

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Dr. Bambang L. Widjiantoro, S.T.,M.T. .....(Pembimbing)
2. Ir. Yaumar, M.T. .....(Ketua Penguji)
3. Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T. .....(Penguji II)
4. Ir. Roekmono .....(Penguji III)

**SURABAYA**  
**JANUARI, 2019**

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

**PERANCANGAN SISTEM KONTROL PADA *BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEM* (BESS) UNTUK SISTEM GENERATOR TURBIN ANGIN**

**Nama** : Sovi Aprila Kurniasari  
**NRP** : 0231154000018  
**Departemen** : Teknik Fisika FTI-ITS  
**Dosen Pembimbing** : Dr. Bambang L.Widjiantoro, S.T., M.T

**ABSTRAK**

Pada sistem generator turbin angin, daya yang dihasilkan bergantung kepada kecepatan angin yang menggerakkan turbin. Pemanfaatan turbin angin sebagai pembangkit listrik terkendala karena karakteristik angin yang cenderung tidak teratur, fluktuatif, dan bervariasi. Salah satu metode yang bisa digunakan untuk mengatasi fluktuasi kecepatan angin adalah dengan memanfaatkan *energy storage system* (ESS) terutama *Battery Energy Storage System* (BESS). Baterai memiliki kapasitas penyimpanan energi tertentu sehingga energi yang masuk harus lebih kecil daripada kapasitas baterai. Baterai memiliki batas saat proses *charge-discharge*. Perbedaan arus yang dihasilkan oleh generator dengan batas arus yang diperbolehkan untuk *charging* ke baterai dapat menyebabkan penurunan *lifetime* pada baterai. Dengan demikian, diperlukan adanya suatu sistem kontrol untuk melakukan regulasi *supply* arus ke baterai, sehingga permintaan beban dapat terpenuhi dan dapat mencegah terjadinya *overcharge* dan penurunan *lifetime* pada baterai. Pada penelitian ini, arus yang masuk ke baterai dijaga agar tetap berada pada *range operational* nya yaitu maksimum sebesar 15A. Sistem kontrol pada BESS

menggunakan kontroler PI dengan besar gain  $K_p$  yaitu 10 dan  $K_i$  juga bernilai 10. Dari penelitian yang telah dilakukan didapatkan hasil yaitu untuk perubahan nilai kecepatan angin dari 9 m/s - 17 m/s pada sistem generator turbin angin, diperoleh besarnya nilai arus untuk proses pengisian baterai yaitu rata-rata sebesar 14,9A dengan nilai error sebesar 0,53%, *maximum overshoot* sistem yaitu sebesar 0,11% dengan *settling time* yaitu sebesar 0,25 detik.

**Kata Kunci : Sistem Generator Turbin Angin, Battery Energy Storage System (BESS), Kontroler**

***DESIGN OF CONTROL SYSTEM ON BATTERY  
ENERGY STORAGE SYSTEM (BESS) FOR WIND  
TURBINE GENERATOR SYSTEMS***

***Name*** : Sovi Aprila Kurniasari  
***NRP*** : 0231154000018  
***Department*** : Teknik Fisika FTI-ITS  
***Supervisory*** : Dr. Bambang L.Widjiantoro, S.T., M.T

***ABSTRACT***

*In a wind turbine generator system, the power generated depends on the wind speed that drives the turbine. The use of wind turbines as power plants is constrained due to wind characteristics that tend to be irregular, fluctuating and varied. One method that can be used to overcome wind speed fluctuations is by utilizing energy storage systems (ESS), especially Battery Energy Storage System (BESS). The battery has a certain energy storage capacity so the incoming energy must be smaller than the battery capacity. The battery has a limit during the charge-discharge process. The difference in current generated by a generator with a current limit that is allowed to charge to the battery can cause a decrease in battery lifetime. Thus, there is a need for a control system to regulate the current supply to the battery, so that load demands can be fulfilled and can prevent overcharge and decrease the lifetime of the battery. In this study, the current entering the battery is kept in its operational range, which is a maximum of 15A. The control system on BESS uses a PI controller with a gain of  $K_p$  which is 10 and  $K_i$  is also worth 10. From the research that has been done the results are for changes in the value of wind speed from 9 m / s - 17 m / s to the wind turbine generator system,*

*obtained the current value for the battery charging process is an average of 14.9A with an error value of 0.53%, the maximum overshoot system is 0.11% with a settling time of 0.25 seconds.*

***Keywords: Wind Turbine Generator System, Battery Energy Storage System (BESS), Controller.***

## KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT yang senantiasa melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya serta shalawat dan salam kepada Nabi Muhammad SAW sehingga dapat terselesaikannya tugas akhir beserta laporan tugas akhir yang berjudul “**PERANCANGAN SISTEM KONTROL PADA BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEM (BESS) UNTUK SISTEM GENERATOR TURBIN ANGIN**”.

Penulis telah banyak memperoleh bantuan dari berbagai pihak dalam penyelesaian tugas akhir dan laporan tugas akhir ini. Penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ayah, Ibu, Adik, dan Keluarga atas segala, doa, perhatian, serta dukungan moril dan materiil yang telah diberikan.
2. Bapak Agus Muhamad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D selaku Ketua Departemen Teknik Fisika ITS yang telah memberikan ilmu, bimbingan serta sarana dan prasarana selama menempuh pendidikan di Teknik Fisika ITS.
3. Ibu Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T. dan bapak Dr. Bambang L.Widjiantoro, S.T., M.T selaku dosen pembimbing yang telah dengan sabar memberikan petunjuk, ilmu, serta bimbingan dalam pengerjaan tugas akhir ini.
4. Ibu Dr. Katherin Indriawati, S.T., M.T. selaku dosen wali yang telah membimbing penulis selama perkuliahan dan memberikan ilmu serta nasihat yang sangat bermanfaat.
5. Seluruh dosen Teknik Fisika ITS atas segala ilmu, bimbingan, petunjuk, dan nasihat yang sangat

bermanfaat serta seluruh civitas akademika Teknik Fisika ITS, terima kasih atas segala bantuan dan kerjasamanya.

6. Seluruh teman seperjuangan dalam tugas akhir terima kasih atas bantuan dan kerjasamanya.
7. Seluruh teman-teman KSE 2013,2014,2015,2016, dan 2017 serta asisten lab. Fisika rekayasa, terimakasih
8. Seluruh teman-teman mahasiswa Departemen Teknik Fisika ITS angkatan 2015 terima kasih telah menjadi teman seperjuangan dalam menuntut ilmu.
9. Teman-teman kelas A yang selalu menjadi teman belajar dari semester 1 sampai semester 7.
10. Dzhokar Ali Akbar, terimakasih ya
11. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu, terimakasih atas bantuannya

Penulis sadar bahwa penulisan laporan tugas akhir ini masih terdapat kekurangan. Namun, semoga laporan ini dapat memberikan kontribusi yang berarti dan menambah wawasan yang bermanfaat bagi pembaca, keluarga besar Teknik Fisika ITS khususnya, dan civitas akademika ITS pada umumnya. Semoga laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat sebagai referensi pengerjaan laporan tugas akhir bagi mahasiswa lainnya.

Surabaya, 25 Januari 2019

Penulis

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
COVER PAGE.....	iii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME .....	v
ABSTRAK .....	xi
<i>ABSTRACT</i> .....	xiii
KATA PENGANTAR .....	xv
DAFTAR ISI .....	xvii
DAFTAR GAMBAR.....	xix
DAFTAR TABEL .....	xxiii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	4
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Batasan Masalah.....	5
1.5 Sistematika Laporan .....	6
BAB II TEORI PENUNJANG .....	7
2.1 Sistem Generator Turbin Angin .....	7
2.1.1 Komponen Sistem Generator Turbin Angin.....	7
2.1.2 Prinsip Kerja Sistem Generator Turbin Angin .....	11
2.1.3 Karakteristik Turbin Angin.....	15
2.2 <i>Energy Storage System</i> .....	17
2.3 <i>Battery Energy Storage System (BESS)</i> .....	18

2.3.1 Karakteristik Baterai .....	21
2.3.2 Baterai <i>Lead Acid</i> .....	22
2.3 <i>Bidirectional DC-DC Converter</i> .....	25
2.4 Kontrol PID.....	30
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	35
3.1 Prosedur Umum Penelitian.....	35
3.2 Pemodelan Proses <i>Charge</i> dan <i>Discharge</i> Baterai.....	39
3.3 Perancangan <i>Bidirectional DC-DC Converter</i> .....	41
3.4 Perancangan Sistem Kontrol pada BESS.....	43
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	49
4.1 Hasil pemodelan untuk proses <i>charge</i> dan <i>discharge</i> pada baterai .....	49
4.2 Hasil Perancangan <i>Bidirectional DC-DC Converter</i> ...	53
4.3 Hasil Perancangan Sistem Kontrol pada Baterai .....	64
4.4 Sistem Generator Turbin Angin dengan <i>Battery Energy     Storage System</i> (BESS).....	66
BAB V KESIMPULAN.....	75
5.1 Kesimpulan .....	75
5.2 Saran .....	75
DAFTAR PUSTAKA .....	77
LAMPIRAN .....	81

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Komponen-komponen turbin angin (Manwell J., 2009).....	8
Gambar 2.2	Aliran angin yang mengenai bidang rotor turbin angin (Manwell, 2005).....	12
Gambar 2.3	Kurva koefisien daya berdasarkan TSR dan sudut pitch turbin angin (Wagner, 2009).....	14
Gambar 2.4	Bentuk sudu turbin angin berdasarkan nilai TSR(Schubel, 2012).....	14
Gambar 2.5	Karakteristik daya mekanik dan torsi mekanik turbin angin (Yuhendri M. d., 2015a).....	15
Gambar 2.6	Jenis-jenis baterai (Suberu, 2014) .....	18
Gambar 2.7	Komponen dasar dan prinsip operasi dari BESS (Suberu, 2014) .....	20
Gambar 2.8	Baterai Lead Acid (RF Wireless World, 2019) .....	23
Gambar 2.9	Rangkaian Konverter Buck (Merpaung, 2017) .....	26
Gambar 2.10	Rangkaian Konverter Boost (Merpaung, 2017) .....	28
Gambar 2.11	Diagram blok kontrol PI (Suyadhi, 2018) .....	31
Gambar 2.12	Diagram blok kontrol PID (Suyadhi, 2018) ...	32
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian Tugas Akhir.....	36
Gambar 3.2	[Lanjutan] Diagram Alir Penelitian Tugas Akhir .....	37
Gambar 3.3	Pemodelan Baterai Charge dan Discharge .....	40
Gambar 3.4	Rangkaian bidirectional DC-DC converter baterai (Murali Bottu, 2013).....	41
Gambar 3.5	Diagram Blok Sistem .....	44
Gambar 3.6	Rancangan PI Controller .....	44

Gambar 3.7	Skema sistem secara keseluruhan.....	46
Gambar 4.1	Kurva saat nilai tegangan masukan lebih kecil daripada nilai tegangan baterai .....	50
Gambar 4.2	Kurva saat nilai tegangan masukan lebih besar daripada nilai tegangan baterai .....	51
Gambar 4.3	Grafik hasil pemodelan proses charge dan discharge baterai .....	53
Gambar 4.4	Bidirectional konverter dalam mode buck (arah kanan) .....	54
Gambar 4.5	Arus saat proses charge .....	55
Gambar 4.6	Tegangan baterai saat proses charging .....	55
Gambar 4.7	Nilai SOC Baterai .....	56
Gambar 4.8	Tegangan baterai saat charging dan terjadi perubahan permintaan beban.....	57
Gambar 4.9	Arus saat charging dan terjadi perubahan permintaan beban .....	58
Gambar 4.10	Bidirectional konverter dalam mode boost (arah kiri) .....	59
Gambar 4.11	Arus saat proses discharge .....	60
Gambar 4.12	Kondisi tegangan saat proses discharge .....	60
Gambar 4.13	SOC baterai saat proses discharge.....	61
Gambar 4.14	Tegangan baterai saat discharge dan terjadi perubahan permintaan beban.....	61
Gambar 4.15	Arus saat discharge dan terjadi perubahan permintaan beban .....	62
Gambar 4.16	Arus terkontrol .....	64
Gambar 4.17	Output baterai yang sudah dikontrol dengan kontrol PI .....	65
Gambar 4.18	Arus terkontrol sebesar 15A.....	66
Gambar 4.19	Arus yang digunakan untuk proses pengisian baterai saat kecepatan angin 13 m/s .....	69

Gambar 4.20	Nilai SOC yang telah dihubungkan dengan sistem generator turbin angin .....	69
Gambar 4.21	Arus yang digunakan untuk proses pengisian baterai saat kecepatan angin berubah dari 9-12 m/s .....	71
Gambar 4.22	Nilai SOC baterai .....	72
Gambar 4.23	Arus yang digunakan untuk proses pengisian baterai saat kecepatan angin konstan dan permintaan beban lebih kecil dari keluaran turbin angin .....	73
Gambar 4.24	Arus baterai saat kecepatan angin konstan dan permintaan beban lebih besar dari keluaran turbin angin .....	74

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Kondisi Operasi Baterai Lead Acid.....	39
Tabel 3.2	Nilai variabel pada bidirectional dc-dc converter .....	43
Tabel 4.1	Hasil pemodelan proses charge dan discharge menggunakan simulink .....	52
Tabel 4.2	Tabel hasil perancangan bidirectional dc-dc converter .....	63
Tabel 4.3	Tabel hasil perancangan bidirectional dc-dc converter saat terjadi perubahan permintaan beban.....	63
Tabel 4.4	Sistem Generator Turbin Angin dengan BESS .....	68
Tabel 4.5	Nilai Arus yang masuk ke baterai saat terjadi perubahan kecepatan angin pada sistem generator turbin angin .....	70

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Konsumsi listrik saat ini terus meningkat seiring dengan meningkatnya jumlah populasi manusia. Tercatat sepanjang Januari-Juni 2018, konsumsi listrik terbesar masih berasal dari sektor rumah tangga dengan porsi mencapai 42,25 persen atau mencapai 47,5 TWh. Pertumbuhan konsumsi sektor rumah tangga tercatat 3 persen secara tahunan (Primadhyta, 2018). Sedangkan untuk pembangkit listrik saat ini masih menggunakan energi fosil yaitu batu bara. Hal ini akan membuat ketergantungan manusia terhadap energi fosil juga akan terus meningkat. Salah satu cara yang dapat dilakukan untuk mengurangi ketergantungan manusia akan energi fosil yaitu dengan memanfaatkan sumber energi alternatif. Pemanfaatan sumber energi alternatif yaitu energi terbarukan menjadi salah satu solusi yang tepat untuk mengurangi ketergantungan manusia terhadap penggunaan energi fosil (Raul Sarrias-Mena, 2014). Salah satu energi terbarukan yang dapat dimanfaatkan untuk pembangkit listrik yaitu energi angin.

Pada pembangkit listrik tenaga angin, energi kinetik angin dikonversikan menjadi energi listrik melalui dua konverter utama, yaitu turbin angin untuk mengkonversikan energi kinetik angin menjadi energi mekanik dengan perputaran rotor dan generator untuk mengkonversikan energi mekanik yang dihasilkan turbin angin menjadi energi listrik. Sistem operasi pembangkit listrik tenaga angin terdiri atas operasi terhubung dengan grid (*grid connected*) dan operasi sendiri (*stand alone*). Pada sistem pembangkit listrik tenaga angin, daya yang

dihasilkan bergantung kepada kecepatan angin yang menggerakkan turbin. Karakteristik kecepatan angin di Indonesia sendiri cenderung fluktuatif dan relatif rendah sehingga menyebabkan Sistem Konversi Energi Angin (SKEA) belum dapat dilakukan secara optimal (Celtis Elmas, 2016). Pemanfaatan turbin angin sebagai pembangkit listrik terkendala karena karakteristik angin yang cenderung tidak teratur, fluktuatif, dan bervariasi. Pemanfaatan sistem pembangkit tenaga angin menjadi tidak stabil karena fluktuasi output daya yang dihasilkan akan mengganggu stabilitas pembangkit itu sendiri. Sehingga meningkatkan kesulitan dalam pemasangan dan operasi sistem pembangkit tenaga angin (Ji W, 2017)

Pada sistem pembangkit tenaga angin, masukan energi mekanik yang menggerakkan rotor akan berubah sesuai dengan perubahan kecepatan angin karena angin sifat angin yang fluktuatif. Sehingga akan terjadi perubahan pada daya yang dihasilkan oleh generator. Daya yang dihasilkan ini terdiri dari tegangan-frekuensi yang fluktuatif. Sistem pembangkit seperti ini tidak dapat dihubungkan dengan jaringan listrik karena sifat fluktuatif tegangan-frekuensi yang dihasilkan (Chincilla M, 2006). Untuk sistem pembangkit sendiri (*standalone*), tegangan-frekuensi yang fluktuatif juga tidak bisa digunakan karena akan berubah apabila terjadi perubahan permintaan beban. Sehingga dibutuhkan suatu sistem kontrol yang tepat pada sistem pembangkit listrik tenaga angin yang dihubungkan dengan jaringan (*grid connected*) ataupun sistem pembangkit operasi sendiri (*standalone*) (Hemmati R. A.-K., 2018).

Pada sistem pembangkit operasi sendiri (*standalone*), dibutuhkan suatu sistem kontrol untuk mengatur daya, tegangan, dan frekuensi ke beban akibat variasi kecepatan

angin. Sistem kontrol yang sesuai akan memberikan pengaruh yang signifikan untuk kinerja generator dan inverter. Jenis generator seperti induksi generator atau *Permanent Magnet Synchronous Generator* (PMSG) dapat dipasang pada turbin angin. PMSG dan konverter dapat mengatur besarnya tegangan AC dan tegangan DC serta frekuensi. Disisi lain, generator juga dapat dikendalikan untuk mengekstrak energi angin yang optimal. Penelitian untuk mengendalikan generator ini telah dilakukan oleh (Harianto, 2018). Dan hasilnya menunjukkan bahwa dengan mengendalikan kecepatan generator turbin angin menggunakan *supervisory control* diperoleh ekstraksi daya maksimum pada turbin angin skala kecil walaupun terjadi perubahan kecepatan angin. Namun pada penelitian tersebut belum dijelaskan mengenai pemasangan baterai sebagai sistem penyimpanan energi/daya yang dihasilkan oleh generator.

Salah satu metode yang bisa digunakan untuk mengatasi fluktuasi kecepatan angin adalah dengan memanfaatkan *energy storage system* (ESS) terutama *Battery Energy Storage System* (BESS). Baterai akan menyimpan daya listrik (*charging*) dari generator ketika daya yang dihasilkan generator lebih besar dari kebutuhan beban, sebaliknya baterai akan ikut menyuplai daya ke beban (*discharging*) ketika daya yang dihasilkan generator di bawah kebutuhan beban. Kecepatan angin yang selalu berubah membuat tegangan yang keluar dari generator menjadi bervariasi. Sehingga tegangan yang disalurkan ke beban juga akan berubah sesuai dengan perubahan kecepatan angin. Dengan menggunakan baterai sebagai sistem penyimpanan energi diharapkan tegangan yang disalurkan ke beban tetap bisa terpenuhi walaupun tegangan yang dihasilkan oleh turbin angin berubah-ubah. Baterai memiliki kapasitas penyimpanan energi tertentu sehingga energi yang masuk harus

lebih kecil daripada kapasitas baterai. Baterai memiliki batas saat proses *charge-discharge*. Perbedaan arus yang dihasilkan oleh generator dengan batas arus yang diperbolehkan untuk *charging* ke baterai dapat menyebabkan penurunan *lifetime* pada baterai (Hemmati R. , 2017). Dengan demikian, diperlukan adanya suatu kontrol untuk melakukan regulasi *supply* arus dengan baterai, sehingga permintaan beban dapat terpenuhi dan dapat mencegah terjadinya *overcharge* dan penurunan *lifetime* pada baterai.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah disebutkan, adapun permasalahan yang diangkat dalam tugas akhir ini adalah :

1. Bagaimana pengaruh *Battery Energy Storage System* (BESS) pada sistem generator turbin angin yang telah dilengkapi dengan *supervisory control*?
2. Bagaimana merancang sistem kontrol pada *Battery Energy Storage System* (BESS) sehingga dapat mencegah terjadinya *overcharge* dan penurunan *lifetime* baterai ?
3. Bagaimana performansi sistem generator turbin angin yang menggunakan dan tidak menggunakan sistem kontrol pada *Battery Energy Storage System* (BESS)?

## 1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan latar belakang dan rumusan masalah, maka tujuan penelitian yang ingin dicapai dalam pengerjaan tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Merancang sistem kontrol pada *Battery Energy Storage System* (BESS) sehingga arus yang digunakan untuk proses *charging* pada baterai tetap sesuai dengan *set point* dan baterai bisa digunakan sebagai sumber tegangan

apabila permintaan beban lebih besar dari tegangan yang dihasilkan oleh turbin angin.

2. Mengetahui performansi dari *Battery Energy Storage System* pada sistem generator turbin angin.

#### **1.4 Batasan Masalah**

Berdasarkan identifikasi masalah maka batasan masalah dari penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Turbin angin yang digunakan adalah jenis Horizontal Axis Wind Turbine (HAWT) dengan daya nominal 400 W.
2. Turbin angin yang digunakan merupakan jenis turbin angin skala kecil dan tidak tersambung dengan grid (jaringan listrik PLN)
3. Profil angin yang digunakan yaitu dengan *range* kecepatan angin sebesar 8-17 m/s.
4. Baterai yang digunakan pada penelitian tugas akhir ini adalah baterai *lead acid*.
5. Sistem kontrol dilakukan pada *switching bidirectional DC-DC converter* yang menyalurkan energi dari turbin angin ke baterai dan menyalurkan energi dari baterai ke beban.
6. Variabel yang dikontrol adalah arus yang masuk ke baterai agar tidak terjadi *overcharge* dan penurunan *lifetime* baterai dengan variable yang dimanipulasi adalah besarnya *duty cycle* sebagai input dari *bidirectional DC-DC converter*.
7. Penelitian dilakukan dengan simulasi menggunakan fitur simulink pada software matlab R2014a dengan komponen model seperti turbin angin, *bidirectional DC-DC converter*, dan baterai diambil dari simulink library.

## 1.5 Sistematika Laporan

Laporan tugas akhir ini terdiri dari lima bab dan dilengkapi dengan daftar pustaka. Secara garis besar, sistematika dari penulisan laporan tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

a. BAB I PENDAHULUAN

Pada bab I ini terdiri dari latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah dan sistematika laporan.

b. BAB II DASAR TEORI

Pada bab II ini dibahas mengenai teori-teori yang berkaitan dengan penelitian yang dilakukan, seperti turbin angin, baterai, *bidirectional dc-dc converter*, dan kontrol PID.

c. BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab III ini berisi mengenai rancangan dari penelitian yang dilakukan, metode, dan langkah-langkah dalam penelitian.

d. BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

Pada bab IV ini berisi tentang analisa hasil perancangan sistem kontrol pada *Battery Energy Storage System (BESS)*.

e. BAB V PENUTUP

Pada bab V ini diberikan kesimpulan tentang tugas akhir yang telah dilakukan berdasarkan hasil yang diperoleh, serta diberikan saran sebagai penunjang dalam pengembangan tugas akhir selanjutnya.

## **BAB II**

### **TEORI PENUNJANG**

#### **2.1 Sistem Generator Turbin Angin**

Pada sistem generator turbin angin akan dijelaskan mengenai komponen untuk sistem generator turbin angin, prinsip kerja turbin angin, dan karakteristik turbin angin.

##### **2.1.1 Komponen Sistem Generator Turbin Angin**

Turbin Angin adalah sistem konversi energi angin untuk menghasilkan energi listrik dengan proses perubahan energi angin menjadi putaran mekanis rotor dan selanjutnya menjadi energi listrik melalui sebuah generator. Sistem konversi energi angin ini merupakan suatu sistem/peralatan yang berfungsi untuk mengubah energi angin menjadi energi listrik, mekanis, atau bentuk energi lainnya (Armaditya, 2012). Untuk memproduksi listrik bolak-balik (ac), sistem ini harus didesain untuk selalu beroperasi pada kecepatan sudut yang tetap pada kecepatan angin yang berubah-ubah agar didapat frekuensi yang konstan. Ada bermacam-macam jenis turbin angin, termasuk turbin propeller dan lain-lain turbin aksial, juga sistem radial yang dipasang pada sumbu tegak (Archi W. Cuip, 1979).

Turbin angin terdiri dari 2 bagian utama yakni kincir angin dan generator. Kincir angin berfungsi sebagai penerima dan pengumpul energi aerodinamis angin dan mengubahnya menjadi energi mekaik berupa torsi, sedangkan generator berfungsi untuk mengubah torsi kincir angin menjadi energi listrik (Manwell J., 2009). Pada dasarnya turbin angin berdasarkan orientasi porosnya dapat dibedakan menjadi *Horizontal Axis Wind Turbine* (HAWT) dan *Vertical Axis Wind*

*Turbine* (VAWT). Untuk dapat bekerja dengan optimal, turbin angin terdiri dari beberapa komponen seperti pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Komponen-komponen turbin angin (Manwell J., 2009)

Berdasarkan buku (Manwell J., 2009), komponen turbin angin dijelaskan sebagai berikut:

#### 1. Rotor

Rotor adalah komponen yang dirancang untuk mengambil (ekstrak) daya dari angin dan mengkonversinya menjadi gerakan rotasi. Berikut adalah tiga komponen penting dalam rotor yaitu :

### *a. Blades*

*Blades* merupakan salah satu komponen penting dalam rotor dimana *blades* adalah perangkat yang mengkonversi energi angin menjadi torsi yang dibutuhkan untuk menghasilkan tenaga yang berguna.

### *b. Aerodynamics control surface*

*Aerodynamics control surface* adalah perangkat yang dapat dipindahkan untuk mengubah karakteristik aerodinamis rotor. Berbagai jenis *aerodynamics control surface* dapat digabungkan dalam bilah turbin angin. Perangkat ini harus dirancang agar bisa bekerja sama dengan rotor, terutama *blades*.

### *c. Hub*

*Hub* dari turbin angin adalah komponen yang menghubungkan *blade* ke poros utama dan akhirnya ke seluruh drive train. *Hub* mentransmisikan dan harus mampu menahan beban yang dihasilkan oleh *blade*. *Hub* umumnya terbuat dari baja, baik dilas atau cor. Rincian dari *hub* berbeda-beda tergantung pada filosofi desain keseluruhan turbin.

## 2. Drive train

Sebuah drive train dari turbin angin yang lengkap terdiri dari rotor, poros utama, kopling, gearbox, rem, dan generator. Dengan pengecualian dari komponen rotor, yang telah dibahas diatas, semua komponen akan dibahas yaitu sebagai berikut :

### a) Poros Utama

Setiap turbin angin memiliki poros utama, disebut sebagai poros rotor. Poros utama adalah elemen putar utama yang digunakan untuk menyalurkan torsi dari rotor ke seluruh drive train.

### b) Kopling

Kopling digunakan untuk menghubungkan poros. Ada dua lokasi dimana kopling digunakan dalam turbin angin yaitu antara poros utama dan *gearbox* dan antara poros *output gearbox* dan generator.

c) *Gearbox*

Kebanyakan drive train turbin angin termasuk gearbox digunakan untuk meningkatkan kecepatan poros input ke generator. Peningkatan kecepatan diperlukan karena rotor turbin angin dan poros utamanya bisa berubah pada kecepatan angin yang lebih rendah dari yang dibutuhkan oleh sebagian besar generator listrik.

d) Rem

Hampir semua turbin angin menggunakan rem mekanik di drive train. Rem mekanik biasanya digunakan bersama rem aerodinamis. Bahkan, beberapa standar desain membutuhkan dua sistem pengereman yaitu rem aerodinamis dan lainnya yang pada *drive train*.

e) Generator

Generator adalah komponen penting dimana generator berfungsi mengkonversi daya mekanik dari rotor menjadi tenaga listrik.

### 3. Yaw System

Beberapa turbin menggunakan *yaw* aktif sebagai cara untuk mengatur daya.

Ada dua tipe dasar dari sistem *yaw* yaitu *yaw* aktif dan *yaw* bebas. Turbin dengan *yaw* aktif biasanya melawan angin. Mereka menggunakan motor aktif untuk menyelaraskan turbin. Turbin dengan *yaw* bebas biasanya mengikuti arah angin. Untuk turbin yang lebih besar, *yaw* aktif mungkin akan lebih dipertimbangkan dibandingkan dengan *yaw* bebas.

#### 4. Main Frame and Nacelle

*Nacelle* adalah rumah untuk komponen utama dari turbin angin (dengan pengecualian untuk rotor). Ini termasuk *main frame* dan penutup *nacelle*. *Main frame* adalah komponen struktural dimana gearbox, generator, dan rem telah terpasang.

#### 5. Tower

Tower adalah bagian dari turbin angin yang digunakan untuk meningkatkan kinerja bagian utama dari turbin. Tower turbin angin biasanya memiliki tinggi sebesar diameter rotor. Umumnya, ketinggian tower tidak boleh kurang dari 24m karena kecepatan angin lebih rendah dan lebih *turbulent* jika terlalu dekat dengan tanah.

### 2.1.2 Prinsip Kerja Sistem Generator Turbin Angin

Proses konversi energi angin menjadi daya mekanik pada turbin angin berdasarkan persamaan energi kinetik. Daya angin yang ditangkap turbin angin dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$P_w = \frac{E_k}{t} = 0,5 \rho A v_w^3 \quad (2.1)$$

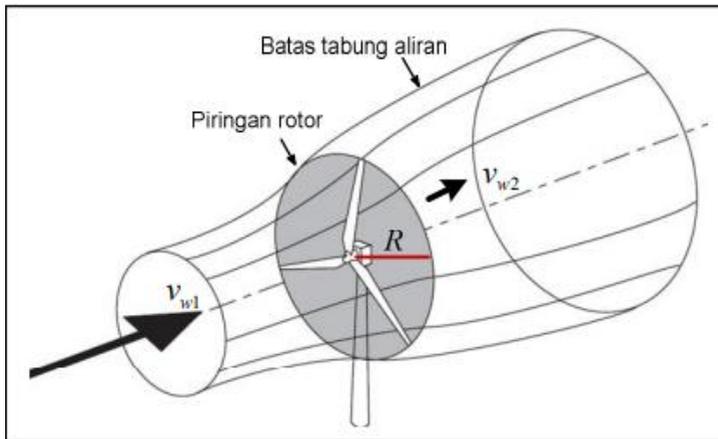
Karena area tangkapan turbin angin berbentuk lingkaran, maka luas area tangkapannya ditentukan oleh jari-jari R, sehingga Persamaan (2.1) dapat juga dituliskan dengan :

$$P_w = \frac{E_k}{t} = 0,5 \rho \pi R^2 v_w^3 \quad (2.2)$$

Daya angin yang ditangkap turbin ( $P_w$ ) ini dikonversikan menjadi daya mekanik ( $P_m$ ) untuk memutar generator. Daya mekanik yang dihasilkan turbin angin ditentukan oleh koefisien daya ( $C_p$ ), yang dirumuskan dengan (Yuhendri M. d., 2011) :

$$P_m = P_w C_p = 0,5 C_p \rho \pi R^2 v_w^3 \quad (2.3)$$

Koefisien daya adalah perbandingan antara daya mekanik yang dihasilkan turbin dengan daya angin yang ditangkap turbin (Yuhendri M. d., 2015a). Menurut hukum Betz, koefisien daya ditentukan oleh kecepatan angin sebelum mengenai blade  $v_{w1}$  dan kecepatan angin sesudah mengenai blade  $v_{w2}$  (Manwell, 2005) seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.2



Gambar 2.2 Aliran angin yang mengenai bidang rotor turbin angin (Manwell, 2005)

Kecepatan angin  $v_{w1}$  yang mengenai bidang rotor turbin angin akan mengalami penurunan kecepatan menjadi  $v_{w2}$ , yang disebut sebagai faktor induksi ( $a$ ), yang dirumuskan dengan (Wagner, 2009) :

$$a = \frac{v_1 + v_2}{v_1} \quad (2.4)$$

Berdasarkan faktor induksi  $a$ , koefisien daya turbin angin dapat dirumuskan dengan :

$$C_p = \frac{P_m}{\frac{1}{2}\rho A v^3} = 4a(1-a)^2 \quad (2.5)$$

Berdasarkan Bezt limit, nilai maksimum  $a = 1/3$ , sehingga nilai koefisien daya maksimum turbin angin adalah :

$$C_p = 4a(1-a)^2 = 4\frac{1}{3}\left(1-\frac{1}{3}\right)^2 = \frac{16}{27} = 0,5926 \quad (2.6)$$

Nilai koefisien daya ini dapat diartikan sebagai efisiensi turbin angin. Berdasarkan Bezt limit, efisiensi maksimum turbin angin hanya sekitar 59,26%. Nilai koefisien daya ini ditentukan oleh Tip Speed Ratio (TSR)  $\lambda$  dan sudut pitch turbin angin  $\beta$ . Sudut pitch merupakan sudut arah datang angin terhadap bidang sudu rotor turbin, sedangkan TSR merupakan rasio kecepatan putaran jari-jari turbin dengan kecepatan angin (Muldi Yuhendri, 2015b). Gambar 2.3 menunjukkan hubungan koefisien daya dengan sudut pitch dan TSR turbin angin. Koefisien daya memiliki nilai maksimum pada titik TSR yang berbeda ketika sudut pitch turbin divariasikan. Nilai TSR turbin angin dapat dinyatakan dengan :

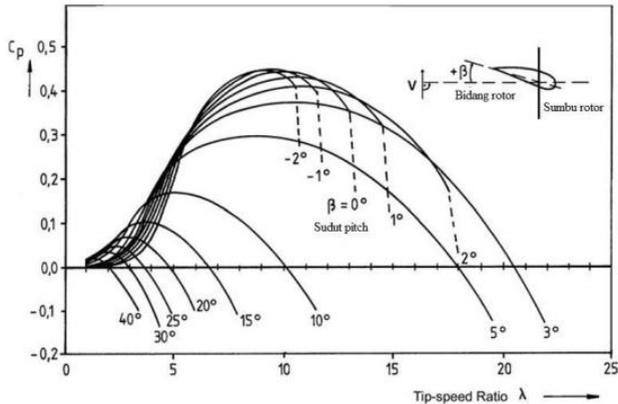
$$\lambda = \frac{\omega_m R}{v_w} \quad (2.7)$$

Dimana :

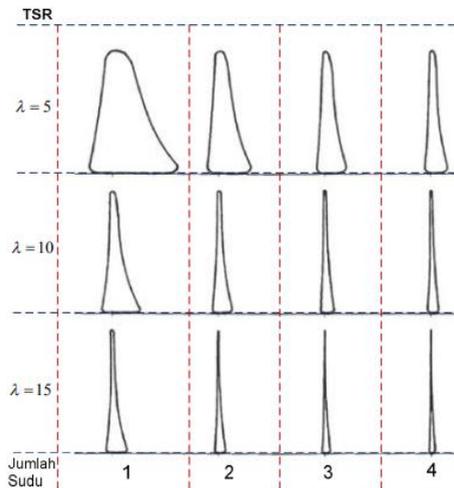
$\omega_m$  adalah kecepatan mekanik turbin angin dalam radian/detik.

Nilai TSR ini dipengaruhi oleh bentuk sudu turbin angin. (Schubel, 2012) menjelaskan bentuk sudu turbin angin berdasarkan nilai TSR yang diinginkan seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2.4. Sudu turbin angin yang lebar akan menghasilkan nilai TSR yang rendah. Artinya turbin angin memiliki rating kecepatan putaran rendah yang cocok dipakai untuk generator kecepatan rendah. Turbin angin yang memiliki TSR rendah akan menghasilkan torsi yang lebih

besar, sebaliknya, turbin angin yang memiliki TSR yang tinggi akan menghasilkan torsi yang rendah.



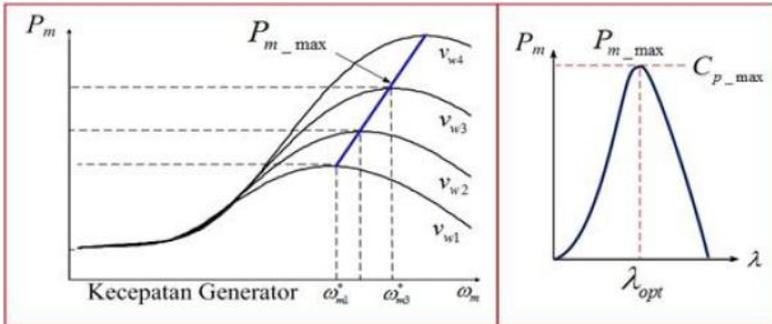
Gambar 2.3 Kurva koefisien daya berdasarkan TSR dan sudut pitch turbin angin (Wagner, 2009)



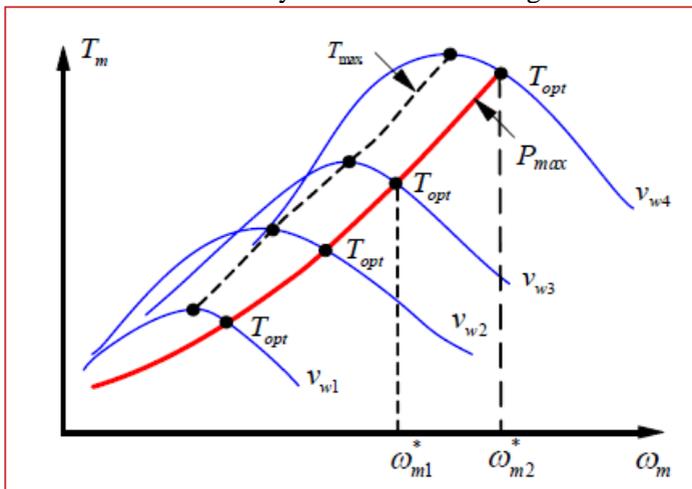
Gambar 2.4 Bentuk sudu turbin angin berdasarkan nilai TSR (Schubel, 2012)

### 2.1.3 Karakteristik Turbin Angin

Ketika turbin angin mendapat energi angin dengan kecepatan angin sebesar  $v_w$ , maka turbin akan bergerak dengan kecepatan putaran  $\omega_m$  dan menghasilkan daya mekanik sebesar  $P_m$  seperti ditunjukkan oleh Gambar 2.5 a, dengan torsi mekanik sebesar  $T_m$ .



a. Kurva daya mekanik turbin angin



b. Kurva torsi mekanik turbin angin

Gambar 2.5 Karakteristik daya mekanik dan torsi mekanik turbin angin (Yuhendri M. d., 2015a)

Daya mekanik yang dihasilkan turbin angin linear dengan kubik dari kecepatan angin, sedangkan torsi mekaniknya linear dengan kuadrat dari kecepatan angin. Pada satu kecepatan angin, daya mekanik turbin dapat berubah, sesuai dengan perubahan kecepatan putaran poros rotor turbin. Hal yang sama juga berlaku pada torsi mekanik yang dihasilkan turbin angin. Gambar 2.5 menunjukkan kurva daya mekanik dan torsi mekanik turbin angin ketika diberi kecepatan angin yang bervariasi. Ketika angin bervariasi maka torsi dan daya yang dihasilkan juga berbeda-beda. Dari Gambar 2.5 b dapat diketahui bahwa besarnya daya maksimal yang dihasilkan oleh turbin angin tidak selalu berada pada torsi maksimal, tetapi daya maksimal turbin angin didapatkan ketika torsi turbin angin optimal.

Pada setiap kecepatan angin, daya mekanik turbin angin memiliki satu titik nilai maksimum  $P_{m\_max}$ , yang berada pada titik koefisien daya maksimum  $C_{p\_max}$  dan titik TSR optimum. Berdasarkan persamaan (2.3), daya mekanik maksimum turbin angin dapat dirumuskan dengan :

$$P_{max} = 0.5 \pi \rho C_{p\_max} (\lambda_{opt}, \beta) R^2 v_w^3 \quad (2.8)$$

Daya mekanik turbin angin dapat diatur pada titik maksimum dengan mengatur kecepatan putaran poros turbin angin pada sisi generator. Kecepatan generator untuk daya mekanik maksimum dirumuskan dengan :

$$\omega_m^* = \frac{\lambda_{opt}}{R} v_w \quad (2.9)$$

Ditinjau dari torsi mekanik, daya mekanik maksimum turbin angin berada pada titik optimum torsi mekanik ( $T_{opt}$ ), seperti

yang ditunjukkan oleh Gambar 2.5 b. Torsi mekanik yang dihasilkan turbin angin dirumuskan dengan :

$$T_m = \frac{P_m}{\omega_m} = \frac{0.5 C_p \rho (\lambda, \beta) \pi R^2 v_w^3}{\omega_m} \quad (2.10)$$

## 2.2 Energy Storage System

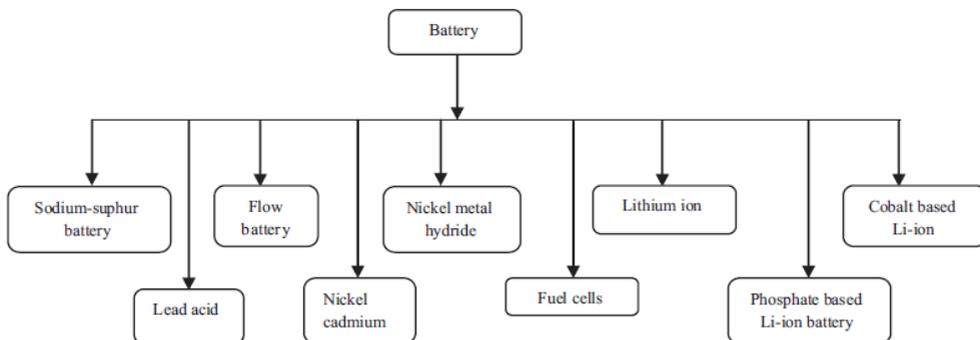
Sejarah mengenai sistem penyimpanan energi (*energy storage system*) dimulai pada awal abad ke 20 dengan munculnya berbagai sistem dengan kemampuan untuk menyimpan energi listrik dalam bentuk *charge* (mengisi/menyimpan energi) ataupun *discharge* (menyalurkan energi) saat energi dibutuhkan. Pencapaian pertama sistem penyimpanan energi yaitu aplikasi akumulator timbal-asam yang digunakan untuk memasok beban sisa pada jaringan arus listrik searah. Seiring dengan perkembangan teknologi, semakin banyak sistem penyimpanan energi (ESS) yang muncul seperti sistem hidro terpompa/*Pumped Hydro System* (PHS), baterai yang portabel dan ekonomis, penyimpanan energi udara terkompresi/*Compressed Air Energy Storage* (CAES), *fuel cell* (FC), superkapasitor, *flywheel*, *Superconducting Magnetic Energy Storage* (SMES) dan perangkat penyimpanan energi thermal.

Pada dasarnya, berbagai jenis perangkat penyimpanan energi yang tersedia diklasifikasikan dalam empat kategori utama yaitu penyimpanan energi secara mekanis (misalnya *flywheel*, CAES, dan PHS), elektrik (misalnya kapasitor, SMES, dan superkapasitor), thermal (misalnya sistem penyimpanan energi suhu rendah dan suhu tinggi), dan dalam bentuk energi kimia (misalnya penyimpanan elektrokimia yaitu baterai, termokimia, dan perangkat penyimpanan secara kimia) (Suberu, 2014).

Pada perspektif yang lebih luas, *Energy Storage Systems* (ESS) memiliki subklasifikasi yang bervariasi berdasarkan pada jenis dan fungsinya. Sistem penyimpanan energi ini pada dasarnya digunakan untuk menyimpan energi listrik berdasarkan fenomena pengisian (*charging*) dan pemakaian (*discharge*). Sebuah *Energy Storage Systems* (ESS) dapat digunakan dalam pemakaian energi listrik dengan menggunakan sumber daya yang dapat diperbarui. Salah satu perangkat yang digunakan sebagai sistem penyimpanan energi yaitu baterai.

### 2.3 Battery Energy Storage System (BESS)

Pada dasarnya, *Battery Energy Storage System* (BESS) dikategorikan kedalam perangkat penyimpanan energi secara elektrokimia. Jenis-jenis baterai dapat dilihat pada Gambar 2.6 berikut :



Gambar 2.6 Jenis-jenis baterai (Suberu, 2014)

Baterai merupakan perangkat penyimpanan energi yang dirancang untuk mengubah energi kimia yang tersimpan menjadi energi listrik saat proses *discharging* dan juga kebalikannya, yaitu dari energi listrik menjadi energi kimia saat

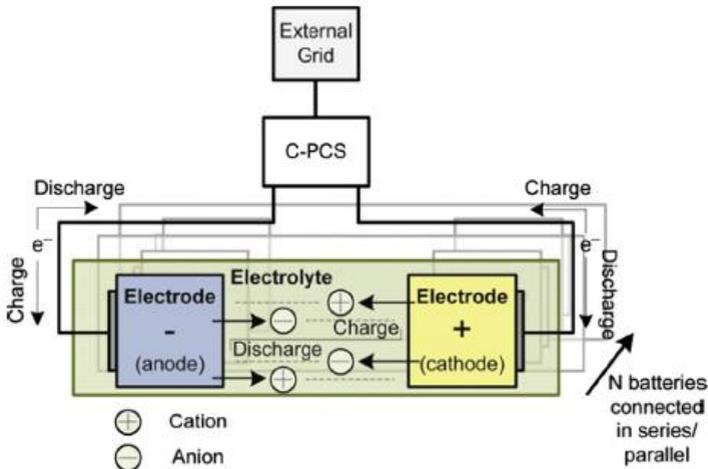
proses pengisian (*charging*). Baterai terdiri dari satu atau beberapa sel, terhubung secara seri atau paralel, atau keduanya, tergantung pada tegangan dan kapasitas output yang diinginkan. Sel baterai terdiri dari tiga komponen utama:

- Anoda atau elektroda negatif yaitu elektroda pereduksi atau yang melepaskan elektron ke sirkuit eksternal dan teroksidasi selama reaksi elektrokimia.
- Katoda atau elektroda positif yaitu elektroda pengoksidasi yang menerima elektron dari sirkuit eksternal dan berkurang selama reaksi elektrokimia.
- Elektrolit merupakan konduktor ionik yang menyediakan medium untuk transfer muatan ion yang terletak di dalam sel antara anoda dan katoda. Elektrolit biasanya cair, seperti air atau pelarut lainnya, dengan garam terlarut, asam, atau alkali untuk ditanamkan konduktivitas ionik.

Baterai memiliki dua sifat yaitu baterai primer dan baterai sekunder (*rechargeable battery*), disebut baterai primer berarti baterai ini hanya bisa satu kali pakai saja sedangkan baterai sekunder berarti baterai yang dapat dipakai berkali-kali dengan cara isi ulang bila dayanya sudah mulai habis (David Linden, 2002). Salah satu jenis baterai sekunder yang banyak digunakan yaitu baterai *lead acid*.

Baterai saat ini telah digunakan untuk berbagai aplikasi seperti pada peralatan elektronik dan sebagai sistem penyimpanan energi pada sistem generator turbin angin. Komponen dasar dari BESS terdiri dari baterai, sistem kontrol dan pengkondisian daya (C-PCS), dan bagian lain dari BESS terdiri dari sistem proteksi seperti ditunjukkan oleh Gambar 2.7. Prinsip operasi BESS saat proses *charge discharge* berdasarkan Gambar 2.7 dijelaskan sebagai berikut. Pada

proses *charging* baterai, ion akan berpindah dari katoda menuju anoda melalui elektrolit. Selain itu elektron juga mengalir dalam arah yang berlawanan melalui rangkaian. Ketika ion dari katoda sudah berhenti mengalir, pada kondisi ini baterai telah mencapai keadaan *full charged* dan siap untuk digunakan. Kemudian pada proses *discharging* baterai, ion akan mengalir kembali dari anoda menuju katoda dan elektron juga mengalir dalam arah yang berlawanan melalui rangkaian. Pada saat ini, baterai digunakan untuk menghidupkan alat-alat yang dibutuhkan.



Gambar 2.7 Komponen dasar dan prinsip operasi dari BESS (Suberu, 2014)

Penggunaan baterai dapat dilihat pada kendaraan listrik hybrid, operasi aerospace, sistem elektronik portabel, sistem jaringan nirkabel, dan stabilitas jaringan listrik. Saat ini, teknologi sistem baterai merupakan perangkat penyimpanan energi yang paling luas digunakan dalam sistem pembangkit.

Pada sistem pembangkit listrik yang memanfaatkan energi terbarukan seperti angin, daya yang dihasilkan tidak selalu bernilai konstan karena sifat angin yang fluktuatif. Dengan penambahan baterai sebagai sistem penyimpanan energi pada sistem pembangkit, maka akan membantu menyeimbangkan pendistribusian daya dalam sistem pembangkit tersebut. Baterai dalam sistem pembangkit dapat bertindak sebagai beban ataupun sebagai generator bergantung pada perbandingan antara *supply* dan permintaan beban.

### 2.3.1 Karakteristik Baterai

Beberapa parameter yang digunakan untuk mengetahui karakteristik baterai adalah sebagai berikut :

#### a. Kapasitas Baterai

Kapasitas baterai menunjukkan berapa banyak energi yang dapat disimpan di dalam baterai. Jumlah energi yang dapat disalurkan oleh baterai yang tersisi penuh saat proses *discharge* bergantung pada temperatur, *rate of discharge*, umur baterai dan jenis baterai. Ada 3 parameter utama yang digunakan untuk menunjukkan kapasitas dari baterai, yaitu:

- 1). Ampere-hour (Ah) : besarnya laju arus yang digunakan pada proses *discharge* dalam interval waktu tertentu
- 2). *Reserve capacity* : panjangnya waktu baterai untuk proses *discharge* (dalam menit)
- 3). Kapasitas kWh : besarnya energi yang dibutuhkan untuk mengisi penuh baterai yang habis.

#### b. Tegangan Baterai

Tegangan baterai adalah ukuran saat baterai dalam keadaan *full charge*. Tegangan baterai ini bergantung pada jumlah sel dan tegangan per selnya. Tegangan baterai berkurang ketika baterai mulai *discharging*.

c. *Cycle depth*

Keadaan baterai yang *full discharge* dapat menyebabkan kerusakan dan akan mengganggu *lifetime* baterai. *Deep cycle* baterai dapat menyalurkan energi (*discharge*) sebesar 15%-20% dari kapasitasnya. Sehingga baterai memiliki batas *discharge* yaitu sebesar 85%-80%.

d. *Energy Density*

*Energy density* adalah ukuran berapa banyak energi yang dapat disalurkan oleh baterai per unit berat baterai atau volume

e. *Power Density*

*Power Density* adalah ukuran berapa banyak daya yang dapat disalurkan oleh baterai per unit berat baterai atau volume

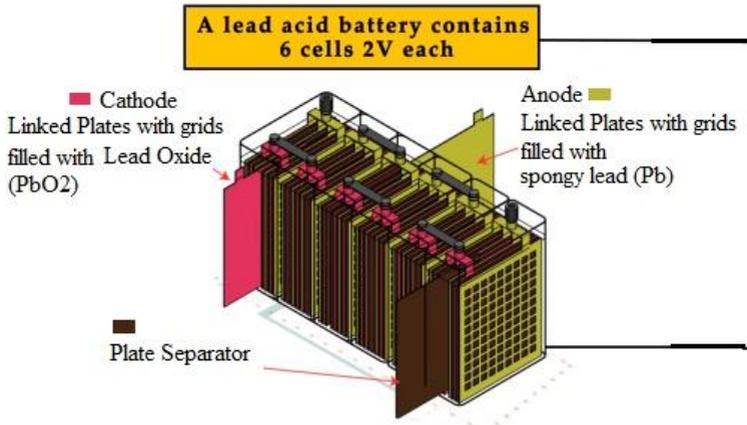
f. *Durability (cycling capacity)*

Sistem penyimpanan energi dirancang untuk melepaskan energi yang tersimpan setelah baterai diisi ulang dalam waktu tertentu. Berapa kali sistem penyimpanan energi dapat melepas energi setelah baterai diisi ulang disebut sebagai daya tahan atau kapasitas siklus.

### **2.3.2 Baterai *Lead Acid***

Dalam sistem generator turbin angin, baterai merupakan salah satu bagian penting yang saat ini penggunaannya semakin meningkat. Baterai banyak dimanfaatkan karena menawarkan solusi terbaik untuk sistem penyimpanan energi dan ramah lingkungan. Baterai *lead acid* merupakan baterai sekunder yang paling umum digunakan. Baterai *lead acid* banyak dimanfaatkan dalam sistem pembangkit karena waktu pakai baterai yang panjang dan biaya pemasangan yang rendah jika dibandingkan dengan jenis baterai sekunder yang lain. Berikut

merupakan struktur baterai *lead acid* yang digunakan dalam sistem pembangkit:



Gambar 2.8 Baterai *Lead Acid* (RF Wireless World, 2019)

Baterai *lead acid* terdiri dari beberapa sel yang masing-masing terdiri dari lempeng timah yang direndam dalam elektrolit asam sulfat encer. Tegangan per sel biasanya sebesar 2 V sampai 2,2 V. Untuk baterai yang memiliki nilai tegangan sebesar 12 V, maka terdapat enam sel yang dihubungkan secara seri seperti ditunjukkan pada Gambar 2.8. Masing-masing lempeng, terdiri dari beberapa katoda dan anoda yang tersusun secara paralel dengan separator berupa karet berpori yang terletak diantaranya. Katoda baterai *lead acid* terbuat dari timbal peroksida ( $PbO_2$ ), anoda baterai terbuat dari timbal murni ( $Pb$ ) dengan cairan elektrolit yaitu asam sulfat ( $H_2SO_4$ ). Perbandingan antara jumlah air terhadap asam sulfat adalah 3:1.

Untuk memodelkan baterai *lead-acid*, maka perlu diketahui parameter- baterai yaitu :

a. *Nominal Voltage (V)*

Merupakan tegangan nominal baterai ( $V_{nom}$ ) dalam (Volt). Tegangan nominal baterai merepresentasikan akhir dari zona linear dari karakteristik *discharge*.

c. *Rate Capacity (Ah)*

*Rate Capacity* ( $Q_{rated}$ ) pada baterai biasanya dalam *Ampere-Hour* (Ah). Merupakan kapasitas efektif minimum dari baterai.

d. *State of Charge dan Depth of Discharge (%)*

*State of Charge* (SOC) merupakan sisa kapasitas baterai yang dinyatakan dalam bentuk persentase. Nilai SOC 100% menyatakan bahwa baterai dalam keadaan terisi penuh, sedangkan nilai SOC 0% menyatakan bahwa baterai dalam keadaan kosong. *Depth of Discharge* (DOD) menyatakan nilai tegangan yang telah digunakan oleh baterai. Baik SOC maupun DOD dinyatakan dalam bentuk (%)

e. *Maximum Capacity (Ah)*

Kapasitas maksimum dari baterai dilambangkan dengan  $Q$ , merupakan jumlah energi maksimum yang dapat diambil dari baterai. Kapasitas maksimum ketika diskontinuitas terjadi pada tegangan baterai. Nilai kapasitas maksimum menurut (Karimi, 2014) dinyatakan dalam persamaan berikut :

$$Q = \frac{105}{100} \times Q_{rated} \quad (2.11)$$

Dimana :

$$Q = \text{Maximum Capacity (Ah)}$$

$$Q_{rated} = \text{Rated Capacity (Ah)}$$

f. *Fully Charged Voltage (V)*

Menyatakan tegangan saat baterai dalam keadaan terisi penuh (*full charged*).

g. *Nominal Discharge Current (A)*

*Nominal Discharge Current* menyatakan besarnya arus yang digunakan saat proses *discharge*.

h. *Internal Resistance*

Menyatakan resistansi dalam baterai. Biasanya dalam satuan ohm. Resistansi ini seharusnya bernilai konstan saat proses *charge* maupun *discharge* dan tidak bervariasi dengan amplitudo arus.

### **2.3 Bidirectional DC-DC Converter**

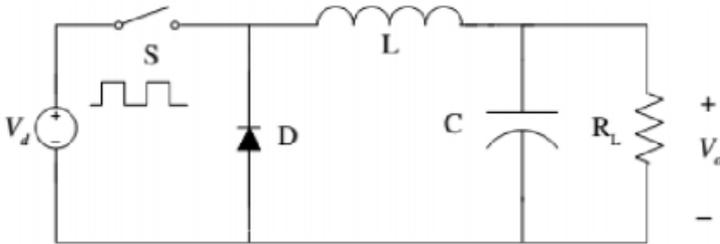
*Bidirectional DC-DC Converter* atau konverter DC-DC dua arah saat ini telah banyak digunakan bersama dengan sistem penyimpanan energi seperti baterai. Kombinasi antara *bidirectional DC-DC converter* dengan baterai menjadi pilihan yang cukup menjanjikan untuk banyak sistem seperti sistem pembangkit, kendaraan listrik, dan sel bahan bakar kendaraan karena mengurangi biaya, meningkatkan efisiensi, dan meningkatkan kinerja sistem (Karimi, 2014).

Dalam sistem generator turbin angin misalnya, *bidirectional DC-DC converter* digunakan untuk menyalurkan energi ke baterai apabila kecepatan angin tinggi sehingga turbin angin menghasilkan daya yang besar dan digunakan untuk menyalurkan tegangan dari baterai ke beban ketika tegangan yang dihasilkan turbin angin rendah. *Bidirectional DC-DC converter* memiliki 2 *switch* utama yaitu S1,S2 dan induktor. Masing-masing *switch* menjaga agar konverter bekerja dalam mode buck dan mode boost.

a). Konverter Mode Buck

Konverter mode buck digunakan untuk menghasilkan tegangan atau arus keluaran yang lebih rendah dibanding

dengan tegangan atau arus masukan. Rangkaian konverter buck digambarkan sebagai berikut :



Gambar 2.9 Rangkaian Konverter Buck (Merpaung, 2017)

Konverter buck ini bekerja dalam dua mode, mode 1 saklar  $S$  induksi (saat  $t=0$  sampai  $t=t_1$ ), maka arus akan mengalir dari sumber melalui induktor  $L$  dan beban  $R$ . Kondisi ini disebut sebagai periode pengisian arus induktor. Mode 2 saat saklar  $S$  dipadamkan (saat  $t=t_1$  sampai saklar dinyalakan pada periode berikutnya), dioda  $D$  akan konduksi karena adanya aliran arus pengosongan dari induktor. Arus mengalir dari induktor, ke beban, lalu menuju dioda  $D$  dan kembali ke induktor. Pola penyalan saklar selanjutnya didefinisikan sebagai *duty cycle* ( $k$ ). *Duty Cycle* ( $k$ ) merupakan rasio antara interval waktu saat saklar  $Q$  menyala dan periode sistem (Ashari, 2015).

$$k = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = \frac{t_{on}}{T} \quad (2.12)$$

$$t_{on} = kT = k/f \quad (2.13)$$

$$t_{off} = (1 - k)T \quad (2.14)$$

Dimana :

$k = \text{duty cycle}$

$t_{on} = \text{waktu saat saklar menyala}$

$t_{off}$  = waktu saat saklar padam

Pada saat mode 1, tegangan sumber merupakan jumlah dari seluruh tegangan beban. Dan saat mode 2, tegangan sumber terpisah dengan induktor dan beban. Sehingga untuk mode 1 dan mode 2 didapatkan persamaan sebagai berikut :

Mode 1

$$V_d = \frac{L\Delta I}{t_{on}} + V_o \quad (2.15)$$

Mode 2

$$L\Delta I = V_o t_{off} \quad (2.16)$$

Hasil substitusi kedua persamaan (2.5) dan (2.6) diperoleh hasil sebagai berikut :

$$V_d = V_o \frac{t_{off}}{t_{on}} + V_o \quad (2.17)$$

$$V_d = V_o \left(1 + \frac{t_{off}}{t_{on}}\right) \quad (2.18)$$

$$V_o = kV_d \quad (2.19)$$

Dengan :

$V_d$  = tegangan sumber

$V_o$  = tegangan rata – rata keluaran

$L$  = nilai induktor

$\Delta I$  = riak arus

Persamaan (2.5) diubah kedalam bentuk berikut:

$$L = \frac{V_d - V_o}{\Delta I} t_{on} \quad (2.20)$$

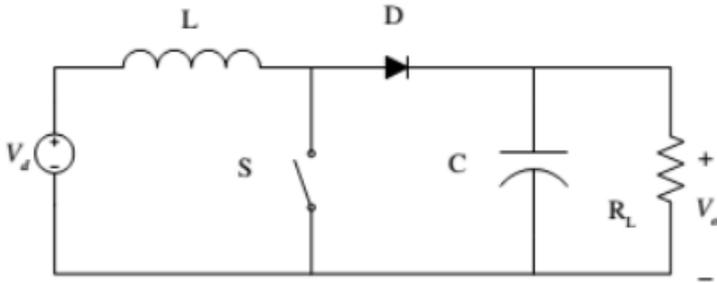
Dengan mensubstitusikan persamaan (2.13) dan (2.19) kedalam persamaan (2.20) maka bisa didapatkan besarnya nilai

L apabila parameter-parameter yang lain seperti  $\Delta I$  dan  $f$  telah ditentukan terlebih dahulu.

$$L = \frac{V_d(1-k)k}{\Delta I f} \quad (2.21)$$

b). Konverter Mode Boost

Untuk arah yang berbeda, maka mode pada *bidirectional DC-DC converter* juga berbeda. Konverter dengan mode boost digunakan untuk menghasilkan tegangan atau arus keluaran yang lebih tinggi dibanding dengan sumber atau masukannya. Rangkaian konverter boost dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 2.10 Rangkaian Konverter Boost (Merpaung, 2017)

Sama seperti konverter Buck, konverter Boost bekerja dalam 2 mode, yaitu mode 1 saat pengisian arus induktor (saklar S konduksi) dan mode 2 saat terjadi pengosongan arus induktor (saklar S padam).

Pada mode 1 saat saklar S konduksi, induktor akan terhubung dengan tegangan sumber. Semua arus mengalir melalui saklar dan tidak ada arus yang mengalir ke beban R. Tegangan resistor  $V_o$  adalah tegangan output konverter dan bernilai 0 saat saklar S konduksi. Persamaan tegangan rangkaian dituliskan sebagai berikut :

$$V_d = L \frac{dl}{dt} \quad (2.22)$$

Karena saklar S konduksi selama  $t_{on}$  maka  $dt$  dapat diganti dengan  $t_{on}$  sedangkan  $dl = \Delta I$  sehingga

$$V_d = L \frac{\Delta I}{t_{on}} \quad (2.23)$$

$$L\Delta I = V_d t_{on} \quad (2.24)$$

Pada mode 2 saat saklar S padam, tegangan sumber akan terangkai seri terhadap induktor dan beban. Induktor yang awalnya dalam mode pengisian arus, akan berubah menjadi mode pengosongan arus. Artinya, induktor akan berfungsi sebagai sumber arus atau sumber tegangan, sedangkan resistor sebagai beban. Resistor R dicatu oleh 2 sumber yaitu tegangan sumber dan tegangan induktor. Kondisi ini yang menyebabkan tegangan output konverter Boost selalu lebih tinggi dari tegangan input. Rentang waktu saat Q padam adalah  $t_{off}$  sehingga persamaan tegangan berubah menjadi

$$V_d + L \frac{\Delta I}{t_{off}} = V_o \quad (2.25)$$

Persamaan (2.24) disubstitusi dengan persamaan (2.25) sehingga

$$V_d = V_d \frac{t_{on}}{t_{off}} + V_o \quad (2.26)$$

$$V_o = V_d \left(1 - \frac{t_{on}}{t_{off}}\right) \quad (2.27)$$

Karena  $t_{on} + t_{off} = T$  dan  $t_{off} = (1 - k)T$  maka persamaan (2.17) dapat diubah menjadi

$$V_o = V_d \frac{1}{(1-k)} \quad (2.28)$$

## 2.4 Kontrol PID

Kontrol PID merupakan metode kontrol linear tradisional yang banyak digunakan dalam berbagai aplikasi. Kontroler dalam sebuah sistem kontrol memiliki peranan yang penting terhadap perilaku dari sistem tersebut. Salah satu fungsi dari kontroler sendiri yaitu mengurangi sinyal *error*. Sinyal *error* merupakan perbedaan nilai antara *set point* dengan nilai *output plant*. *Set point* adalah nilai referensi atau nilai yang diinginkan, sedangkan *output plant* merupakan nilai aktual yang terukur pada keluaran *plant* tersebut. Apabila nilai *error* yang didapatkan semakin kecil, maka kinerja sistem kontrol bisa dikatakan semakin baik. Prinsip kerja dari kontroler sendiri yaitu membandingkan nilai keluaran dengan nilai masukan (*set point*), menentukan besarnya nilai kesalahan dan menghasilkan sinyal kontrol yang digunakan untuk meminimalkan kesalahan (*error*) (Bredley, 2002)

Pengendali PI merupakan suatu algoritma kontrol yang digunakan untuk menghitung besarnya koreksi yang diperlukan suatu alat pengendali untuk mengendalikan sebuah proses. Kontrol *proportional* digunakan sebagai pembesar sinyal atau penguat sehingga *process variable* dapat mencapai *set point*. Namun penambahan *gain proportional* akan meninggalkan *offset* atau *error steady state*. Oleh karena itu, kekurangan dari kontrol *proportional* yang selalu meninggalkan *offset* diperbaiki oleh kontrol *integral* untuk menghilangkan *offset* tersebut. Fungsi kontrol integral adalah menghasilkan respon sistem yang memiliki *error steady state* nol. Namun, kemampuan kontrol integral untuk menghilangkan *offset* tidak disertai dengan kemampuan respon secara cepat. Sehingga untuk memperbaiki respon, dapat

dilakukan dengan menggunakan kontrol *derivative*. Algoritma pengendalian PI dirumuskan sebagai berikut :

$$u(t) = K_p[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau] \quad (2.29)$$

Dimana :

$u(t)$  = variabel output dari kontroler

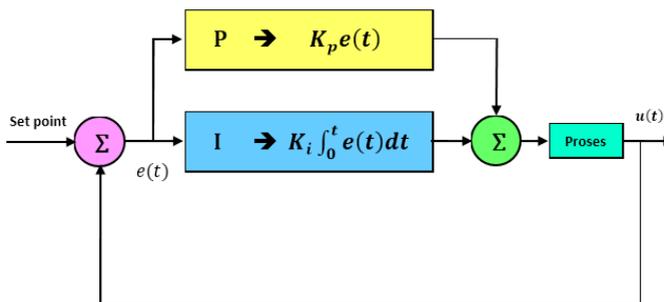
$e$  = variabel kesalahan kontrol

Parameter pengontrol dari PI adalah gain proporsional K dan waktu integral  $T_i$ .

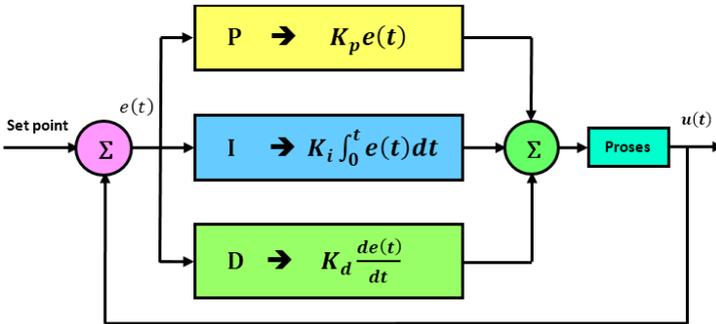
Algoritma pengendalian PID dirumuskan sebagai berikut :

$$u(t) = K_p[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{d}{dt} e(t)] \quad (2.30)$$

Sedangkan untuk parameter pengontrol dari PID adalah gain proporsional K, waktu integral  $T_i$ , dan waktu turunan  $T_d$ . Gambar 2.11 merupakan sinyal kontrol keluaran dari kontroler PI yang merupakan hasil penjumlahan antara  $K_p$  (sebanding dengan kesalahan) dan  $K_i$  (sebanding dengan integral dari kesalahan/*error*). Sedangkan Gambar 2.12 merupakan sinyal kontrol keluaran dari kontroler PID yaitu hasil penjumlahan  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$ .



Gambar 2.11 Diagram blok kontrol PI (Suyadhi, 2018)



Gambar 2.12 Diagram blok kontrol PID (Suyadhi, 2018)

Untuk mendapatkan hasil respon sistem yang stabil, suatu sistem pengendalian harus mendapatkan proses *tuning* atau penyetelan alat. Berbagai macam metode tuning telah ditemukan. Seperti metode Ziegler Nichols, metode trial and error, atau metode adaptive PI. Beberapa parameter dalam algoritma PID yang harus diketahui dalam suatu *system closed loop* adalah *maximum overshoot*, *settling time*, dan *error steady state*

- a. *Maximum (percent) overshoot* merupakan nilai puncak tertinggi respon sistem pengukuran terhadap keadaan yang diinginkan.

$$\text{Maximum Overshoot} = \frac{y_p - y_{ss}}{y_{ss}} \times 100\% \quad (2.31)$$

dengan  $y_p$  merupakan nilai maksimum respon sistem dan  $y_{ss}$  adalah nilai *steady state* sistem

- b. *Settling time* adalah waktu yang dibutuhkan respon sistem untuk mencapai dan berada direntang  $\pm 5\%$  atau  $\pm 2\%$  dari nilai akhir.

- c. *Error steady state* adalah nilai *error* yang dihasilkan dari keadaan *steady* ketika belum mencapai set point yang diinginkan.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

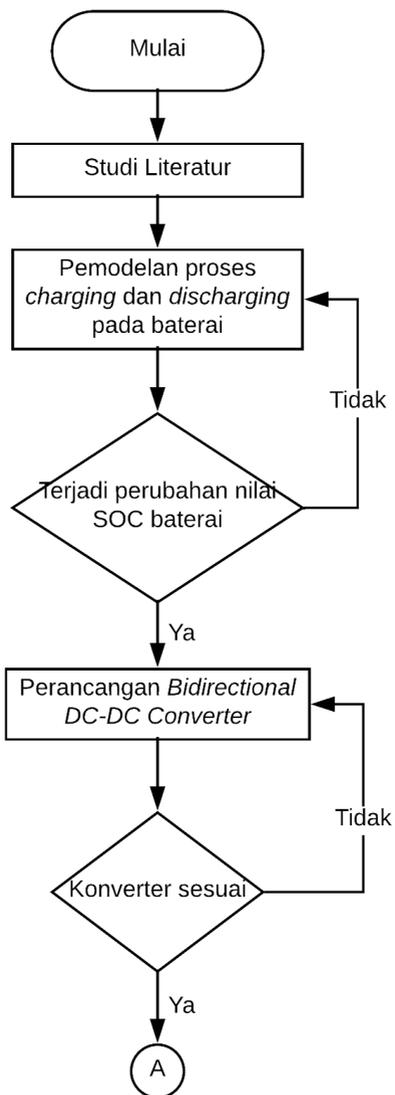
## **BAB III**

### **METODOLOGI PENELITIAN**

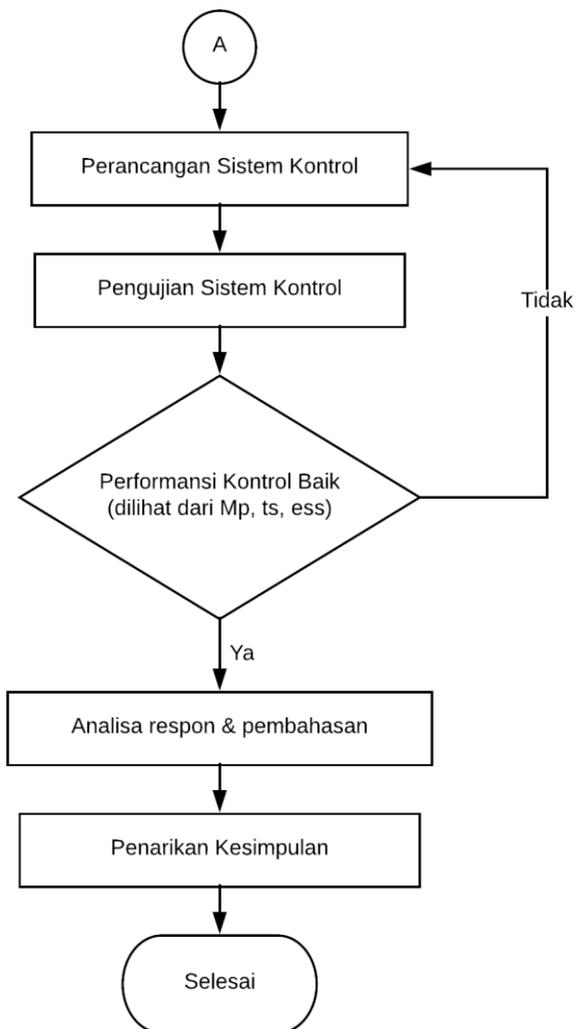
#### **3.1 Prosedur Umum Penelitian**

Pada bab 3 ini, dijelaskan mengenai prosedur penelitian tugas akhir yang digunakan untuk merancang sistem kontrol pada *Battery Energy Storage System* untuk sistem generator turbin angin. Untuk mencapai tujuan penelitian, maka metodologi yang digunakan dalam penelitian tugas akhir ini sesuai dengan diagram alir penelitian pada Gambar 3.1 yang mendeskripsikan tahap-tahap penelitian sebagai berikut :

- a. Studi literatur diperlukan pada penyusunan tugas akhir untuk dijadikan referensi dalam melakukan pengerjaan dan penyusunan tugas akhir. Pada tahap ini dilakukan studi terhadap beberapa literatur dari referensi *text book*, *manual book*, serta jurnal-jurnal ilmiah yang memuat materi-materi berkaitan dengan penelitian yang akan dilakukan. Materi-materi yang berkaitan dengan penelitian tugas akhir ini yaitu proses *charge* dan *discharge* pada *Battery Energy Storage System* (BESS), kontrol PID, dan *bidirectional DC-DC converter*.
- b. Pemodelan proses *charging* dan *discharging* pada baterai didapat dari jurnal yang telah melakukan penelitian sebelumnya. Pemodelan proses *charging* dan *discharging* ini disimulasikan pada *fitur* Simulink pada perangkat lunak Matlab R2014a. Apabila pemodelan sudah sesuai, dimana terjadi perubahan nilai SOC maka dilanjutkan ke langkah selanjutnya, namun jika tidak, maka akan kembali dilakukan pemodelan *charging* dan *discharging* pada baterai.



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian Tugas Akhir



Gambar 3.2 [Lanjutan] Diagram Alir Penelitian Tugas Akhir

- c. Setelah dilakukan pemodelan proses *charge* dan *discharge* pada baterai, maka dilakukan perancangan *bidirectional DC-DC converter*. Seperti telah dijelaskan pada bab 2 sebelumnya, *bidirectional DC-DC converter* ini digunakan untuk menyalurkan energi ke baterai apabila kecepatan angin tinggi sehingga turbin angin menghasilkan daya yang besar dan digunakan untuk menyalurkan tegangan dari baterai ke beban ketika tegangan yang dihasilkan turbin angin rendah. Apabila konverter telah sesuai maka dilakukan perancangan sistem kontrol.
- d. Perancangan sistem kontrol dilakukan dengan merancang kontroler PID. Perancangan kontroler PID yang bertujuan untuk menentukan nilai parameter *proportional*, *integral* dan *derivative* yang mampu menghasilkan respon yang baik untuk sistem. Metode yang digunakan untuk mendapatkan nilai parameter-parameter tersebut ialah metode *trial and error*.
- e. Pengujian sistem kontrol PI dilakukan dengan melihat parameter-parameter dari respon berupa *Maximum overshoot* ( $M_p$ ), *error steady state* ( $e_{ss}$ ), dan *time settling* ( $t_s$ ). Apabila parameter tersebut sesuai dengan rentang yang diinginkan maka akan dilanjutkan ke tahap selanjutnya. Namun apabila sistem kontrol belum sesuai maka akan kembali dilakukan perancangan sistem kontrol.
- f. Langkah terakhir dalam melakukan penelitian tugas akhir ini adalah pembuatan kesimpulan. Pembuatan kesimpulan dilakukan berdasarkan hasil analisa dan pengujian. Kesimpulan ini disusun sesuai dengan

tujuan penelitian untuk menjawab permasalahan penelitian.

### 3.2 Pemodelan Proses *Charge* dan *Discharge* Baterai

Pemodelan proses *charge* dan *discharge* pada baterai dilakukan dengan menggunakan fitur simulink pada matlab R2014a. Pemodelan ini bertujuan untuk mengetahui nilai SOC pada baterai apabila diberi sumber tegangan. Sebelum melakukan pemodelan proses *charge* dan *discharge* pada baterai, terlebih dahulu ditentukan jenis baterai yang akan digunakan pada sistem generator turbin angin. Menurut (Karimi, 2014), jenis baterai sekunder yang banyak digunakan untuk sistem pembangkit adalah baterai *lead acid*. Salah satu baterai *lead acid* yang dapat digunakan untuk sistem energi terbarukan seperti PV dan turbin angin adalah BSB Solar Series SLA Battery 12-150. Berdasarkan (Company, 2018), baterai *lead acid* ini memiliki beberapa kondisi operasi seperti berikut:

Tabel 3.1 Kondisi Operasi Baterai *Lead Acid*

Parameter	Nilai	Satuan
Battery Model	Solar 12-150	
Tegangan baterai	12	V
Kapasitas Baterai	150	Ah
Arus <i>charge</i>	15	A
Waktu <i>charge</i>	10	hour
Internal resistance	0,0035	Ohm

Untuk pemodelan proses *charge* dan *discharge* pada baterai, dibuat dengan menggunakan instruksi pilihan. Instruksi pilihan adalah instruksi yang dipakai untuk memilih suatu proses dari beberapa kemungkinan proses berdasarkan suatu persyaratan.

Pada pemodelan proses *charge* dan *discharge* pada baterai ini digunakan instruksi pilihan *if..then* yaitu sebagai berikut:

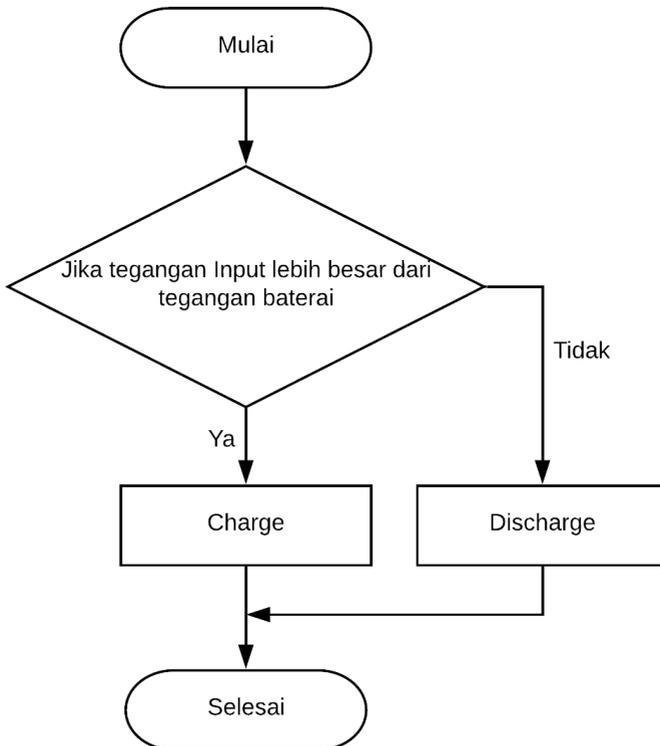
*If* (tegangan masukan/input lebih besar daripada tegangan baterai)

*Then* baterai akan *charge*

*Else* baterai akan *discharge*

*End*

Untuk lebih jelasnya, pemodelan proses *charge* dan *discharge* pada baterai dapat dilihat pada diagram alir berikut:

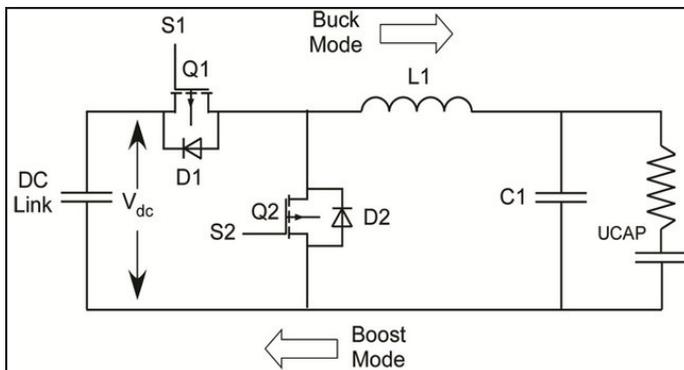


Gambar 3.3 Pemodelan Baterai *Charge* dan *Discharge*

Saat proses *charge* maka nilai SOC baterai akan meningkat, sedangkan saat proses *discharge* nilai SOC baterai akan menurun. Untuk pemodelan proses *charge* dan *discharge* pada baterai dengan menggunakan fitur simulink secara lebih lengkap akan ditampilkan pada lampiran.

### 3.3 Perancangan *Bidirectional DC-DC Converter*

Setelah pemodelan *charge* dan *discharge* baterai selesai dilakukan, maka langkah selanjutnya yaitu merancang *bidirectional DC-DC converter* seperti ditunjukkan oleh Gambar 3.4. Berdasarkan Gambar 3.4 dapat dilihat bahwa saat arah ke kanan, konverter akan bekerja pada mode buck sedangkan saat arah ke kiri konverter akan bekerja dalam mode boost. Pada penelitian tugas akhir ini, perancangan konverter dua arah dilakukan dengan menggunakan fitur simulink.



Gambar 3.4 Rangkaian *bidirectional DC-DC converter* baterai (Murali Bottu, 2013)

Pada Bab 2 telah dijelaskan mengenai penentuan nilai induktansi pada induktor. Untuk merancang *bidirectional DC-DC converter*, maka perlu diperhitungkan besarnya nilai komponen yang akan digunakan pada rangkaian. Perlu

ditentukan nilai *duty cycle* terlebih dahulu sebelum menentukan nilai komponen induktor. Rangkaian konverter ini harus dapat bekerja pada rentang *duty cycle* yang lebar, yaitu  $0,01 < D < 0,99$ . Rangkaian konverter ini memiliki *ripple* sebesar 10%. Beberapa parameter yang sudah didapatkan dari penelitian yang dilakukan oleh (Karimi, 2014) yaitu sebagai berikut :

- a. Frekuensi switching (f) yang digunakan adalah 20 KHz
- b. Tegangan input (Vd) sebesar 230 V
- c. Tegangan Output (Vo) sebesar 149,55 V
- d. Arus rata-rata sebesar 5A
- e. Nilai *ripple* 10% adalah sebesar 0,52A

Dari parameter yang telah ditetapkan, maka dapat dihitung nilai komponen yaitu nilai induktor yang digunakan pada rangkaian. Dengan menggunakan persamaan (2.19) yaitu :

$$V_o = kV_d \quad (3.1)$$

Besarnya nilai k dapat dihitung melalui persamaan

$$k = \frac{V_o}{V_d} \quad (3.2)$$

$$k = \frac{149,55 \text{ V}}{230 \text{ V}}$$

$$k = 0,65$$

Setelah didapatkan nilai k, maka besarnya nilai induktor L dapat diketahui dengan menggunakan persamaan (2.21) yaitu sebagai berikut :

$$L = \frac{V_d(1-k)k}{\Delta I f} \quad (3.3)$$

$$L = \frac{230V(1 - 0,65)0,65}{0,52 A \times 2. 10^4 Hz}$$

$$L = 5 \times 10^{-3} H$$

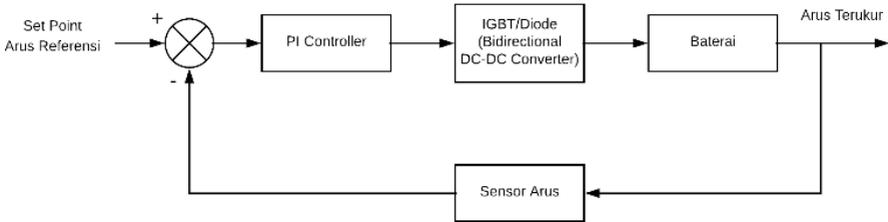
Tabel 3.2 Nilai variabel pada bidirectional dc-dc converter

No.	Variabel	Nilai
1.	Tegangan input (Vd)	230 V
2.	Frekuensi <i>switching</i>	20.000 Hz
3.	Nilai induktor (L)	$5 \times 10^{-3}$ H
4.	Tegangan Output	149,55 V

Tabel 3.2 diatas menunjukkan nilai tiap variabel yang terdapat pada rangkaian konverter. Seperti telah dijelaskan pada subbab 2.3, bahwa *bidirectional DC-DC converter* memiliki 2 *switch* utama yaitu S1 dan S2 yang masing-masing digunakan untuk mode buck dan mode boost. Pada perancangan *bidirectional DC-DC converter* ini, fungsi *switching* dilakukan oleh komponen yaitu IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*). IGBT akan bekerja sesuai dengan sinyal yang diberikan pada *gate*. Apabila sinyal pada *gate* bernilai 1 ( $g=1$ ) maka IGBT akan *on*. Sedangkan apabila sinyal pada *gate* bernilai 0 ( $g=0$ ), maka IGBT akan *off*. IGBT juga akan dalam keadaan *off* apabila nilai tegangan antara kolektor dengan emiter bernilai negatif. Mode buck bekerja apabila S1 *on* dan S2 *off*. Sedangkan mode boost sebaliknya, bekerja ketika S1 *off* dan S2 *on*.

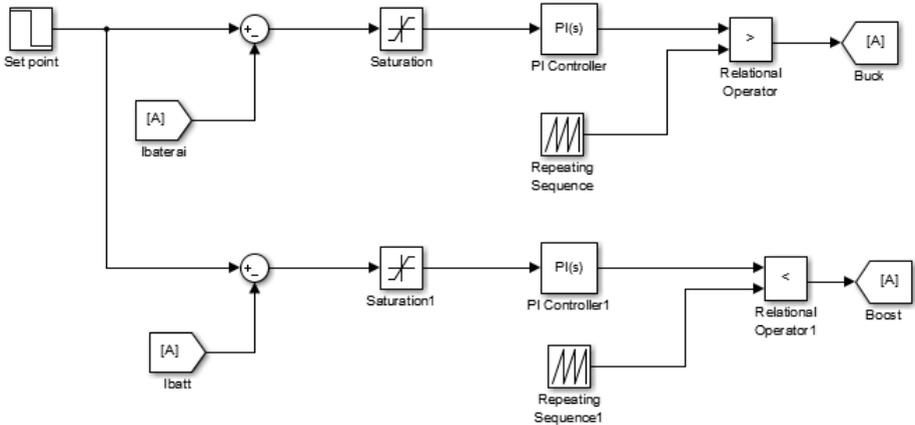
### 3.4 Perancangan Sistem Kontrol pada BESS

Perancangan sistem kontrol pada BESS secara keseluruhan ditunjukkan seperti pada diagram blok berikut:



Gambar 3.5 Diagram Blok Sistem

Berdasarkan diagram blok diatas, dapat diketahui bahwa perancangan sistem kontrol dilakukan untuk memperkecil sinyal error akibat perbedaan arus yang terukur dengan arus referensi. Perancangan kontroler yang digunakan pada tugas akhir ini adalah PI control. Terdapat 2 PI control pada penelitian tugas akhir ini. Masing-masing digunakan sebagai kontrol masukan untuk mode buck dan mode boost pada IGBT/diode yang digunakan pada rangkaian *bidirectional DC-DC converter*. Perancangan PI control yang digunakan pada penelitian dapat dilihat pada gambar berikut :



Gambar 3.6 Rancangan *PI Controller*

Pengendali PI pada tugas akhir ini dirancang untuk mengendalikan arus yang akan masuk ke baterai. Sesuai dengan kondisi operasi yang direkomendasikan, maka arus maksimal masukan ke baterai dibatasi yaitu sebesar 15A. Sehingga kontroler disini digunakan untuk menjaga agar arus keluaran dari konverter tetap berada pada *range operasional* sehingga arus yang masuk ke baterai tetap terjaga sesuai dengan *set point*. Berdasarkan persamaan (2.29) maka persamaan fungsi transfer dari kontroler dapat diketahui yaitu sebagai berikut:

$$u(t) = K_p[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau] \quad (3.4)$$

Persamaan (3.4) diubah kedalam bentuk laplace, sehingga didapatkan hasil yaitu :

$$U(s) = K_p[E(s) + \frac{1}{T_i} \frac{1}{s} E(s)] \quad (3.5)$$

$$U(s) = K_p E(s) [1 + \frac{1}{T_i s}] \quad (3.6)$$

$$U(s) = E(s) [K_p + \frac{K_p}{T_i s}] \quad (3.7)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_p}{T_i s} \quad (3.8)$$

Dengan menggunakan metode *trial and error*, maka nilai parameter PI yang digunakan adalah sebagai berikut

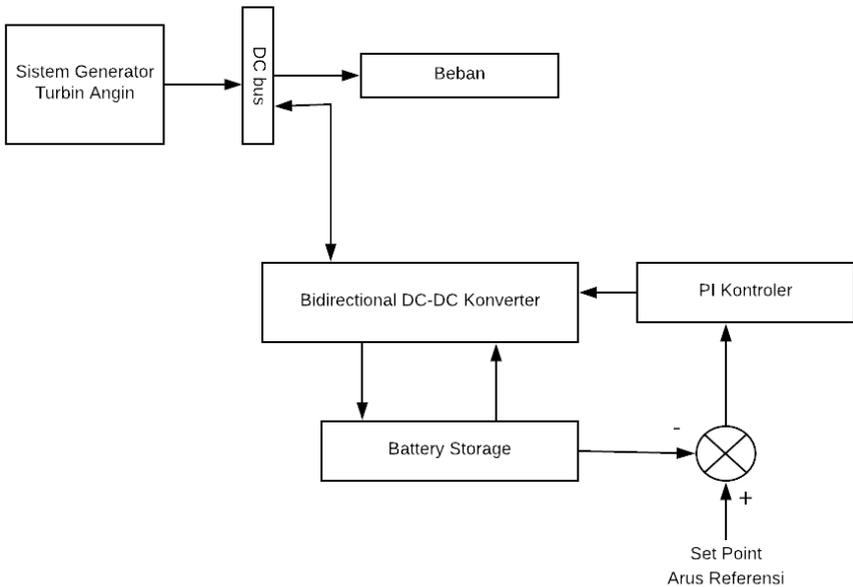
$$K_p = 10$$

$$K_i = 10$$

### 3.5 Penerapan BESS pada Sistem Generator Turbin Angin

Setelah dibuat sistem kontrol pada baterai, kemudian dilakukan simulasi apakah kontroler yang dirancang sudah

memiliki performansi yang baik atau tidak. Apabila kontroler baterai sudah sesuai, maka kontroler akan digunakan pada sistem generator turbin angin untuk menjaga masukan ke baterai sehingga diharapkan dapat mengatasi fluktuasi yang ditimbulkan akibat perubahan kecepatan angin. Secara keseluruhan sistem generator turbin angin dengan sistem kontrol pada baterai dapat dilihat pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7 Skema sistem secara keseluruhan

Berdasarkan Gambar 3.7 dapat dilihat bahwa keluaran dari sistem generator turbin angin akan digunakan untuk memenuhi permintaan beban dan mengisi baterai melalui dc bus. Saat keluaran sistem generator turbin angin lebih besar dari permintaan beban maka akan terjadi proses pengisian pada baterai. Sedangkan apabila keluaran sistem generator turbin

angin lebih kecil maka baterai akan menjadi *supply* untuk memenuhi permintaan beban. Fungsi ini dilakukan oleh *bidirectional dc-dc converter*. *Switching* dari *bidirectional dc-dc converter* ini dikontrol oleh kontroler PI. Keluaran dari kontroler berupa nilai *duty cycle* yang menentukan apakah *switch* pada konverter membuka/menutup. Saat *switch* tertutup maka konverter bekerja dan saat *switch* terbuka maka konverter akan dalam keadaan *off*. Prinsip kerja dari *bidirectional dc-dc converter* sesuai dengan Gambar 3.4. Kontroler PI dalam sistem digunakan untuk menjaga arus saat proses pengisian pada baterai agar sesuai dengan arus referensi. Diagram blok sistem kontrol pada baterai ini dapat dilihat pada Gambar 3.5

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **BAB IV**

### **ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN**

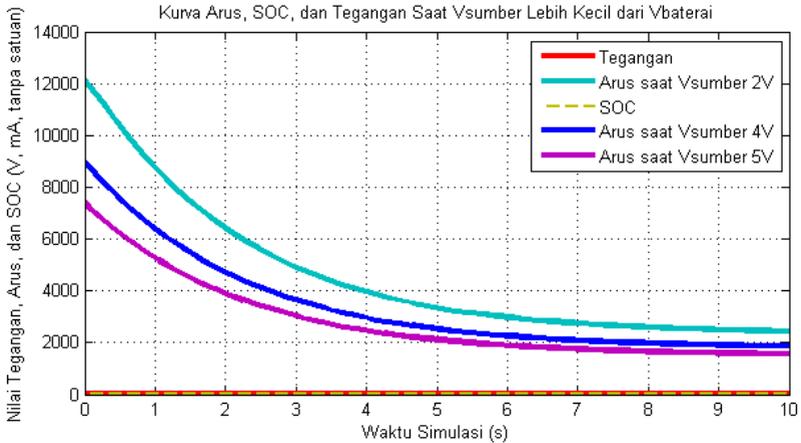
#### **4.1 Hasil pemodelan untuk proses *charge* dan *discharge* pada baterai**

Berdasarkan simulasi yang telah dilakukan seperti ditunjukkan oleh Gambar 3.3, didapatkan hasil pemodelan untuk proses pengisian baterai (*charge*) dan proses penggunaan baterai (*discharge*) yaitu sebagai berikut:

Pada saat tegangan masukan (*input*) lebih kecil daripada tegangan nominal baterai, maka baterai tidak mengalami proses pengisian energi (*charge*) tetapi baterai akan mengalami proses menyalurkan energi (*discharge*). Hal ini dapat dilihat pada kurva arus yang turun saat nilai tegangan masukan (*input*) lebih kecil daripada nilai tegangan baterai. Sedangkan saat nilai tegangan masukan lebih besar dari nilai tegangan baterai, maka baterai akan mengalami proses pengisian (*charge*). Tegangan nominal baterai sesuai dengan tabel 3.2 yaitu sebesar 12V. Untuk pemodelan proses *charge* dan *discharge* pada baterai, tegangan baterai dibuat sebesar 9,6 V. Saat nilai tegangan masukan lebih kecil daripada tegangan tersebut, maka baterai akan *discharge* dan nilai arus baterai turun. Nilai arus akan meningkat, ketika tegangan masukan lebih besar daripada nilai tegangan baterai. Selain itu, proses *charge* dan *discharge* pada baterai dapat dilihat dari perubahan nilai SOC. *Initial State of Charge* pada baterai dibuat sebesar 80% atau 0,8. Saat proses *charge* nilai SOC akan meningkat, sedangkan saat proses *discharge* nilai SOC akan menurun.

Berikut merupakan beberapa hasil yang didapatkan untuk mengetahui proses *charge* dan *discharge* pada baterai. Untuk mengetahui proses *discharge*, diberikan nilai tegangan

masukannya yang lebih rendah dari nilai tegangan baterai. Diberikan tegangan yaitu sebesar 2V, 4V dan 5V dan didapatkan hasil yaitu sebagai berikut:

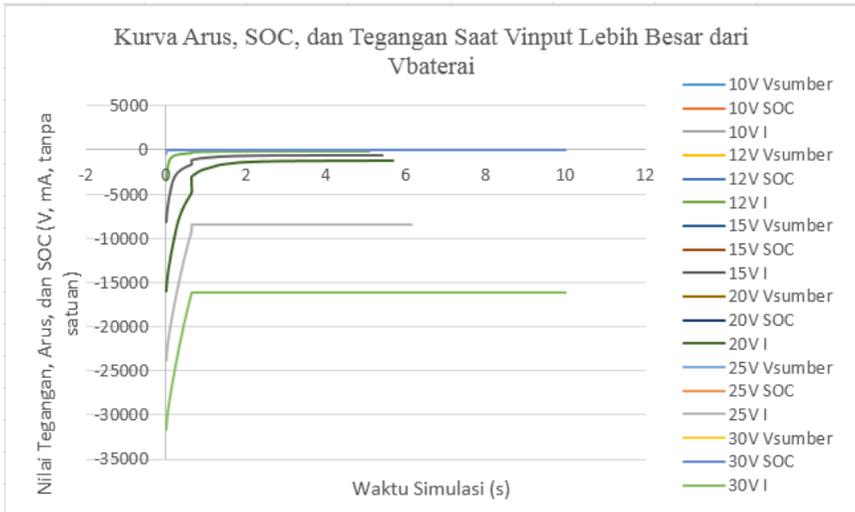


Gambar 4.1 Kurva saat nilai tegangan masukan lebih kecil daripada nilai tegangan baterai

Dari Gambar 4.1 diketahui bahwa nilai arus pada baterai menurun apabila nilai tegangan masukan lebih kecil daripada nilai tegangan baterai. Saat diberikan tegangan masukan 2V maka arus baterai menurun dari 12.000 mA menjadi 2400 mA. Begitu juga ketika tegangan masukan bernilai 4V dan 5V, nilai arus akan menurun masing masing dari 8900 mA menjadi 1800 mA dan 7400 mA menjadi 1500 mA. Selain kurva arus yang menurun, proses *discharge* ini dapat diketahui dari nilai SOC baterai yang juga menurun.

Untuk mengetahui proses pengisian pada baterai (*charge*), maka diberikan nilai tegangan masukan yang lebih besar dari nilai tegangan baterai. Saat nilai tegangan masukan lebih besar dari nilai tegangan baterai didapatkan hasil yang berbeda. Nilai

arus baterai akan meningkat begitu juga dengan nilai SOC baterai. Diberikan nilai tegangan masukan yaitu sebesar 10V, 12V, 15V, 20V, 25 V, dan 30V sehingga didapatkan hasil untuk pemodelan pada proses pengisian baterai (*charge*) yaitu sebagai berikut :



Gambar 4.2 Kurva saat nilai tegangan masukan lebih besar daripada nilai tegangan baterai

Dari gambar diatas dapat diketahui bahwa nilai arus baterai meningkat yang menunjukkan proses pengisian (*charging*) pada baterai. Saat diberikan nilai tegangan masukan yang lebih besar, maka nilai SOC juga mengalami peningkatan. Untuk nilai tegangan masukan sebesar 10V yang hampir sama dengan nilai tegangan baterai maka tidak menunjukkan nilai peningkatan SOC yang signifikan. SOC baterai berubah yaitu dari 0,8 menjadi 0,80038. Sedangkan untuk nilai tegangan 12V, 15V, dan 20V nilai arus dan SOC meningkat. Hasil yang

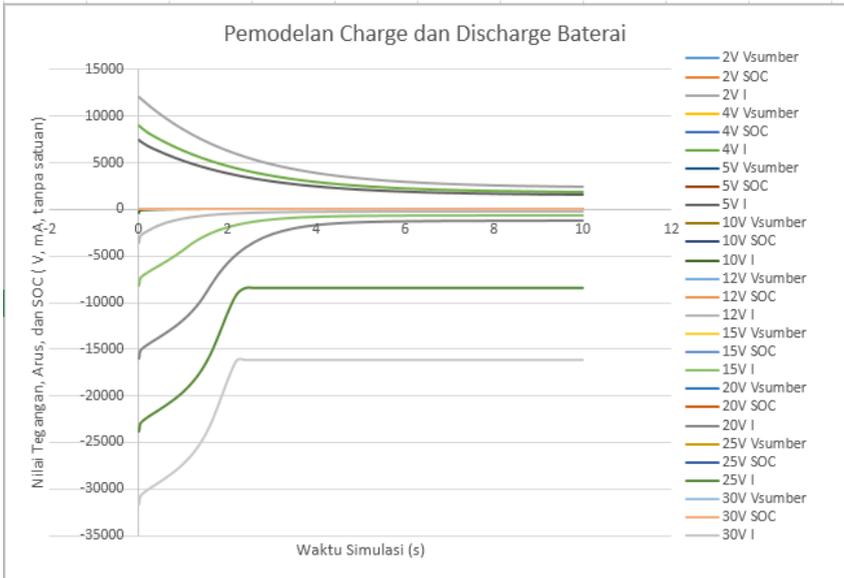
berbeda ditunjukkan pada tegangan masukan yang bernilai 25V dan 30V. Berdasarkan Gambar 4.2 diketahui bahwa saat waktu kurang dari 2 s, maka sudah tidak terjadi peningkatan nilai arus. Hal ini berarti bahwa sudah tidak terjadi proses pengisian (*charge*) ke baterai. Saat diberikan nilai tegangan masukan 30V, nilai SOC bernilai 1 yang artinya baterai sudah dalam keadaan *full charged* (baterai dalam keadaan penuh) sehingga nilai arus pada grafik konstan. Hasil pemodelan dari proses *charge* dan *discharge* pada baterai yang telah dilakukan, secara lebih lengkap dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel 4.1 Hasil Pemodelan Proses *Charge* dan *Discharge* Menggunakan Simulink

$V_{nom}$ bat	V Input	<i>Initial State of Charge</i>	V saat SOC 0,8	SOC	Keterangan
12 V	2 V	0,8	9,6 V	0,7205	<i>discharge</i>
12 V	4 V	0,8	9,6 V	0,7401	<i>discharge</i>
12 V	5 V	0,8	9,6 V	0,7502	<i>discharge</i>
12 V	10 V	0,8	9,6 V	0,8004	<i>charge</i>
12 V	12 V	0,8	9,6 V	0,8080	<i>charge</i>
12 V	15 V	0,8	9,6 V	0,8221	<i>charge</i>
12 V	20 V	0,8	9,6 V	0,8436	<i>charge</i>
12 V	25 V	0,8	9,6 V	0,9602	<i>charge</i>
12 V	30 V	0,8	9,6 V	1	<i>Full charged</i>

Untuk membandingkan hasil yang telah didapatkan pada pemodelan proses *charge* dan *discharge* pada baterai maka dapat dilihat pada Gambar 4.3. Proses *discharge* ditandai

dengan menurunnya kurva arus dan nilai SOC, sedangkan proses *charge* ditandai dengan meningkatnya nilai arus dan meningkatnya nilai SOC dari *initial state of charge*.



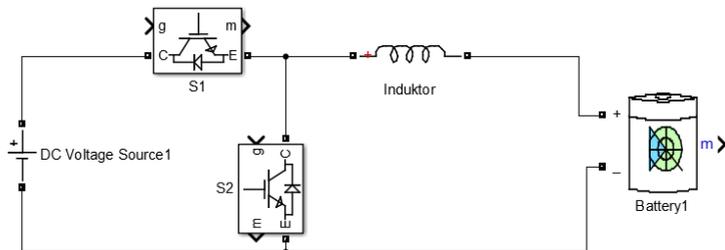
Gambar 4.3 Grafik hasil pemodelan proses *charge* dan *discharge* baterai

#### 4.2 Hasil Perancangan *Bidirectional DC-DC Converter*

Untuk mengetahui apakah rangkaian *bidirectional DC-DC converter* berjalan dengan baik atau tidak, maka dilakukan pengujian yaitu memberikan nilai 1 atau 0 pada transistor pertama dan transistor kedua.

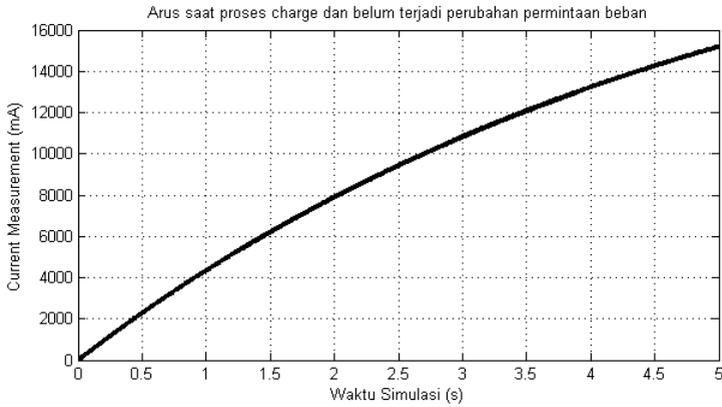
Saat nilai duty cycle 1 pada transistor pertama, dan 0 pada transistor kedua, maka *bidirectional dc-dc converter* akan bekerja dalam mode buck. Transistor pertama akan *on* (keadaan menutup) sedangkan transistor kedua akan *off*

(keadaan membuka). Hal ini berarti baterai menjadi beban dari sumber tegangan. Arus mengalir dari sumber tegangan melalui transistor 1 menuju ke baterai. Saat mode buck berlangsung maka baterai akan mengalami proses *charge* karena terjadi pengisian ke baterai. Arus yang masuk ke baterai meningkat. Tegangan yang dihasilkan oleh baterai nantinya akan digunakan untuk memenuhi permintaan beban. Berikut merupakan bidirectional konverter saat konverter bekerja dalam mode buck dimana transistor 1 (S1) dalam keadaan *on* dan transistor 2 (S2) dalam keadaan *off*



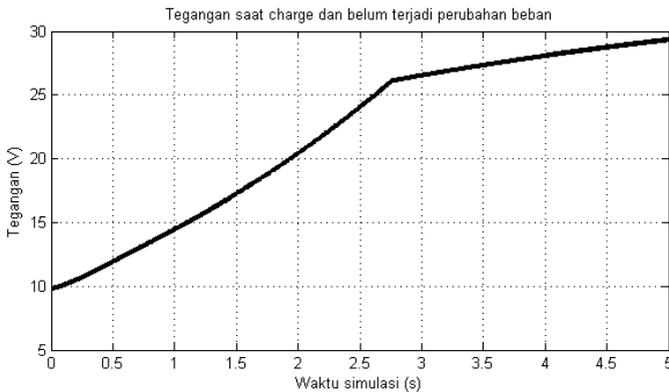
Gambar 4.4 Bidirectional konverter dalam mode buck (arah kanan)

Sehingga didapatkan hasil yaitu ketika transistor 1 menutup dan transistor 2 membuka, arus mengalir dari sumber tegangan melewati transistor 1 lalu menuju induktor. Baterai saat *bidirectional dc-dc converter* bekerja dalam mode buck berperan sebagai beban. Sehingga dapat dilihat bahwa arus pada baterai meningkat. Kurva arus yang dihasilkan meningkat menunjukkan baterai sedang dalam proses pengisian (*charging*). Kurva arus yang masuk ke baterai saat proses pengisian (*charge*) dapat dilihat pada Gambar 4.5. Dari gambar tersebut diketahui bahwa nilai arus meningkat dari 0 sampai 15000 mA.



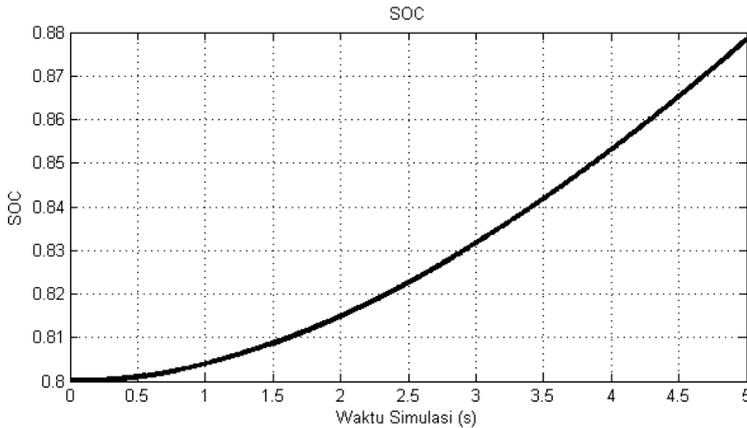
Gambar 4.5 Arus saat proses *charge*

Selain nilai arus yang masuk ke baterai, tegangan baterai juga meningkat karena proses *charging*. Tegangan baterai meningkat dari 9,6 V menjadi sekitar 29,3 V. Kurva peningkatan nilai tegangan baterai ini dapat dilihat pada Gambar 4.6.



Gambar 4.6 Tegangan baterai saat proses *charging*

Keluaran baterai pada simulasi perancangan *bidirectional dc-dc converter* merupakan nilai SOC baterai. Nilai SOC hasil dari konverter saat mode buck ditunjukkan pada Gambar 4.7



Gambar 4.7 Nilai SOC Baterai

Gambar 4.7 menunjukkan bahwa ketika proses *charge* maka nilai SOC mengalami peningkatan dari *initial state of charge* sebesar 0,8 menjadi 0,88.

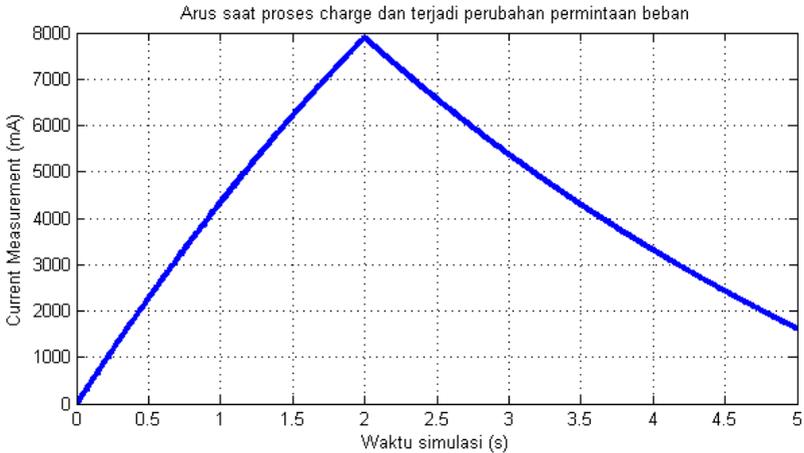
Berbeda apabila terjadi perubahan permintaan beban saat proses *charge* berlangsung. Kurva yang semula meningkat akan menurun yang menunjukkan terjadi proses menyalurkan energi dari baterai (*discharge*). Dapat dilihat pada hasil simulasi berikut yaitu dari detik ke 0 sampai detik ke-2 belum terjadi perubahan permintaan beban, sehingga baik nilai tegangan baterai dan arus yang masuk ke baterai akan meningkat dan baterai dalam keadaan *charge*. Saat detik ke 2, terjadi perubahan permintaan beban yang nilainya lebih tinggi dari nilai tegangan masukan. Dalam hal ini baterai diperlukan untuk memenuhi permintaan beban tersebut. Sehingga nilai tegangan baterai akan turun.



Gambar 4.8 Tegangan baterai saat *charging* dan terjadi perubahan permintaan beban

Secara lebih jelas, proses *charging* pada baterai yang melibatkan terjadinya perubahan permintaan beban dapat dilihat pada Gambar 4.8 yang menunjukkan perubahan nilai tegangan baterai. Hal ini menunjukkan tegangan keluaran dari baterai akan digunakan untuk *supply* tegangan ke beban.

Saat baterai digunakan *supply* ke beban, maka tidak ada proses pengisian ke baterai sehingga nilai arus baterai akan menurun. Gambar 4.9 menunjukkan perubahan nilai arus saat proses *charging* dan terjadi perubahan permintaan beban. Arus yang masuk ke baterai meningkat saat detik ke 0 sampai detik ke 2, saat ini baterai berperan sebagai beban. Kemudian, terjadi perubahan nilai arus pada detik ke-2 saat terjadi perubahan permintaan beban yaitu nilai arus baterai menurun. Saat ini baterai tidak lagi berperan sebagai beban, melainkan sebagai sumber untuk memenuhi permintaan beban.

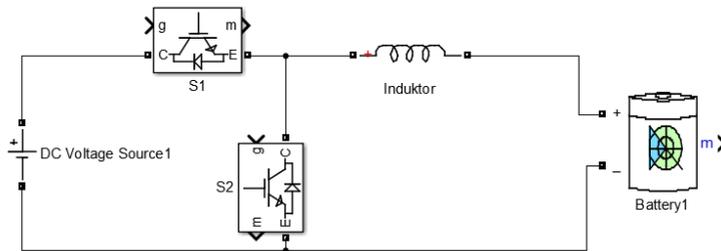


Gambar 4.9 Arus saat *charging* dan terjadi perubahan permintaan beban

Saat belum terjadi permintaan beban, maka tegangan baterai yang awalnya 9,6 V meningkat menjadi 20,673 V. Namun saat baterai dalam proses *charging* dan terjadi permintaan beban nilai tegangan baterai menurun. Hal ini menunjukkan bahwa tegangan keluaran baterai digunakan untuk memenuhi permintaan beban yang lebih besar daripada tegangan yang dihasilkan oleh sumber. Selain itu nilai SOC juga berubah saat proses *charge* dan terjadi perubahan permintaan beban, yaitu dari 0,88 menjadi 0,83.

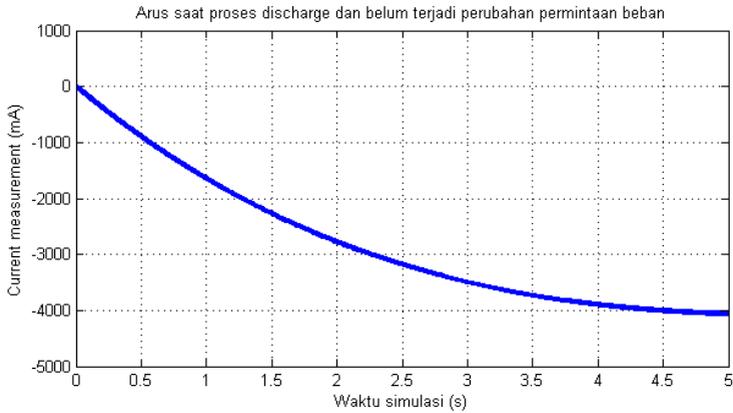
Sebaliknya, saat nilai duty cycle 0 pada transistor pertama dan 1 pada transistor kedua, maka *bidirectional dc-dc converter* bekerja dalam mode boost. Hal ini menunjukkan bahwa tidak ada arus yang mengalir dari sumber tegangan ke baterai, karena rangkaian terputus. Saat mode boost ini, baterai berperan sebagai sumber tegangan untuk memenuhi permintaan beban dan arus mengalir dari baterai menuju ke

beban melalui induktor. Saat mode boost berlangsung, maka baterai akan mengalami proses *discharge*. Arus pada baterai akan menurun. Tegangan baterai nantinya akan digunakan untuk memenuhi permintaan beban. Saat mode boost berlangsung, nilai SOC baterai juga menurun. Berikut merupakan bidirectional konverter saat konverter bekerja dalam mode boost dimana transistor 1 (S1) dalam keadaan *off* dan transistor 2 (S2) dalam keadaan *on*



Gambar 4.10 Bidirectional konverter dalam mode boost (arah kiri)

Saat mode boost berlangsung, maka tidak terjadi proses pengisian pada baterai. Arus pada baterai saat proses *discharge* ditunjukkan seperti pada Gambar 4.11 yang mengalami penurunan. Nilai arus menurun dan bernilai negatif menunjukkan bahwa baterai sedang dalam proses *discharge*. Tidak ada arus yang mengalir dari sumber tegangan ke baterai saat mode boost berlangsung karena transistor 1 dalam keadaan *off*. Arus mengalir dari baterai ke induktor lalu menuju transistor 2. Saat mode boost, baterai akan menjadi *supply* untuk memenuhi permintaan beban sehingga kurva arus, kurva tegangan, dan nilai SOC baterai akan menurun.

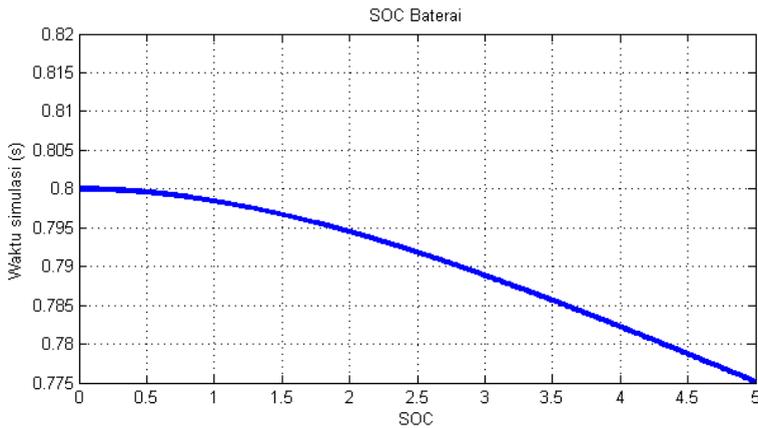


Gambar 4.11 Arus saat proses *discharge*



Gambar 4.12 Kondisi tegangan saat proses *discharge*

Selain nilai arus, nilai tegangan baterai saat proses *discharge* juga menurun dari 9,6 V menjadi 4,43 V. Penurunan tegangan baterai dapat diketahui dari Gambar 4.12, selain itu nilai keluaran baterai berupa nilai SOC akan menurun. Nilai SOC baterai menurun dari 0,8 menjadi 0,775 seperti ditunjukkan pada gambar berikut :



Gambar 4.13 SOC baterai saat proses discharge

Saat proses *discharge* kemudian diberikan perubahan permintaan beban, maka nilai tegangan akan semakin menurun. Grafik perubahan tegangan baterai dapat dilihat seperti pada Gambar 4.14.



Gambar 4.14 Tegangan baterai saat *discharge* dan terjadi perubahan permintaan beban

Saat detik ke 0 sampai detik ke 2 tegangan baterai mengalami penurunan, saat detik ke 2 dan terjadi perubahan permintaan beban tegangan baterai akan turun kembali untuk memenuhi permintaan beban tersebut.



Gambar 4.15 Arus saat *discharge* dan terjadi perubahan permintaan beban

Saat proses *discharge* dan terjadi perubahan permintaan beban, maka perubahan nilai arus baterai ditunjukkan seperti Gambar 4.15. Arus baterai terus menurun karena saat transistor 1 membuka dan transistor 2 menutup, baterai tidak mengalami proses pengisian dari sumber tegangan tetapi baterai justru menjadi sumber untuk memenuhi permintaan beban sehingga terjadi proses penyaluran energi dari baterai ke beban sehingga arus baterai menurun.

Saat proses *discharge* maka tegangan baterai berubah dari 9,6 V menjadi 4,43 V. Saat terjadi perubahan permintaan beban, nilai tegangan baterai menurun kembali menjadi 3,576 V dan SOC nya berubah dari 0,8 menjadi 0,77. Secara ringkas,

hasil perancangan *bidirectional dc-dc converter* ini bisa dilihat pada tabel berikut

Tabel 4.2 Tabel Hasil Perancangan *Bidirectional DC-DC Converter*

Nilai <i>Duty Cycle</i>		Mode	Tegangan Baterai	SOC Baterai	Output Baterai		Proses
Transistor 1	Transistor 2				Tegangan	SOC	
1	0	Buck	9,6 V	0,8	29,3 V	0,88	<i>charging</i>
0	1	Boost	9,6 V	0,8	4,43 V	0,775	<i>discharging</i>

Saat terjadi perubahan permintaan beban saat detik ke-2 yang nilainya lebih besar dari tegangan dan arus yang dihasilkan oleh sumber maka terjadi perubahan nilai pada baterai yang ditunjukkan seperti pada tabel berikut :

Tabel 4.3 Tabel Hasil Perancangan *Bidirectional DC-DC Converter* Saat Terjadi Perubahan Permintaan Beban

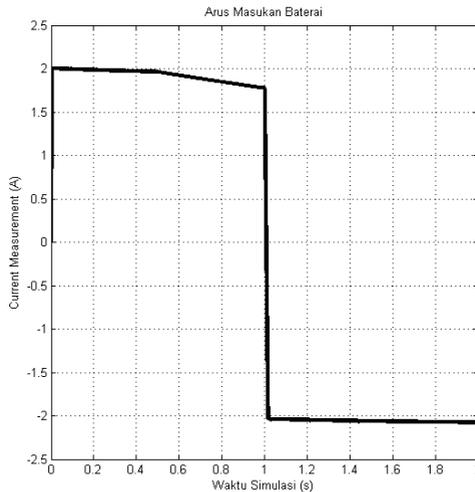
Nilai <i>Duty Cycle</i>		Mode	Detik ke 0-2	Detik ke 2-selesai	Tegangan Baterai (V)	SOC Baterai	Output Baterai		Proses
S1	S2		V dan I	V dan I			Tegangan (V)	SOC	
1	0	Buck	Naik	Turun	9,6	0,8	20,673	0,83	<i>charging</i>
0	1	Boost	Turun	Naik	9,6	0,8	3,576	0,77	<i>discharging</i>

Rangkaian dari *bidirectional dc-dc converter* ini secara lengkap ditampilkan pada lampiran. Sistem kontrol kemudian dirancang untuk mengatur *duty cycle* yang digunakan untuk *switching* pada *bidirectional dc-dc converter* sehingga transistor dapat membuka dan menutup sesuai dengan sinyal kontrol.

### 4.3 Hasil Perancangan Sistem Kontrol pada Baterai

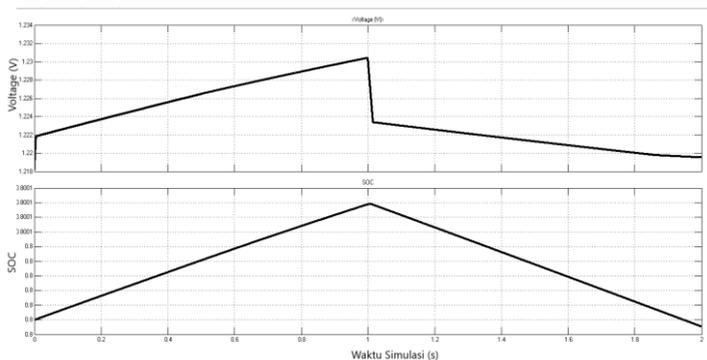
Perancangan sistem kontrol pada baterai dibuat dengan menggunakan kontrol PI dengan besarnya gain  $K_p$  yaitu 10 dan  $K_i$  sebesar 10. Dari simulasi yang telah dilakukan didapatkan hasil bahwa arus yang masuk ke baterai dapat diatur sesuai dengan set point atau arus referensinya.

Simulasi dilakukan dengan membuat nilai arus referensi sebesar 2 pada *initial value* dan -2 pada *final value*. Simulasi dilakukan selama 2 detik dan nilai akan berubah saat waktunya 1 detik. Saat sistem kontrol pada baterai ini disambungkan dengan sumber tegangan dan terjadi perubahan permintaan beban didapatkan hasil bahwa arus bisa dikontrol sesuai dengan set point, pada detik pertama terjadi perubahan permintaan beban sehingga arus pada baterai menurun. Namun nilai arus dijaga agar sesuai dengan set point. Berikut merupakan hasil arus setelah dikontrol menggunakan kontroler PI :



Gambar 4.16 Arus terkontrol

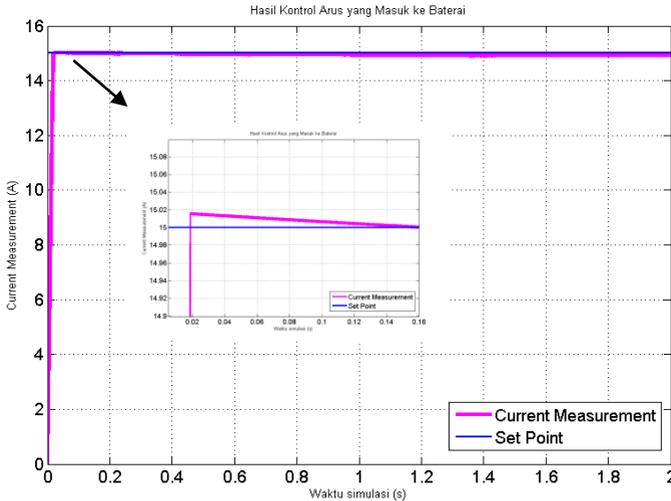
Selain nilai arus, hasil keluaran dari baterai yang *duty cycle* nya sudah dikontrol ditunjukkan seperti pada Gambar 4.17. Dari gambar tersebut diketahui bahwa, saat detik ke 0 sampai detik ke 1, belum terjadi perubahan permintaan beban sehingga saat periode ini baterai mengalami proses *charge*. Arus mengalir dari sumber tegangan menuju baterai sehingga tegangan yang dihasilkan meningkat begitu juga dengan nilai SOC juga meningkat. Ketika terjadi perubahan permintaan beban saat detik ke 1 maka baterai mengalami proses *discharge*. Saat ini tidak ada arus yang mengalir ke baterai dan baterai berperan sebagai sumber tegangan untuk memenuhi permintaan beban sehingga tegangan baterai menurun dan nilai SOC juga menurun. Berikut merupakan hasil keluaran baterai, yang nilai *duty cycle* untuk mengatur *switching* pada *bidirecional dc-dc converter* sudah dikontrol dengan menggunakan kontroler PI.



Gambar 4.17 Output baterai yang sudah dikontrol dengan kontrol PI

Saat sistem kontrol digunakan pada baterai *lead acid* dengan kondisi operasi seperti pada Tabel 3.1 maka arus yang masuk ke baterai untuk proses pengisian baterai (*charge*) dapat

dikontrol sesuai dengan *set point* sebesar 15A. Arus terkontrol saat menggunakan baterai *lead acid* 12 V 150 Ah ditunjukkan seperti pada Gambar 4.18. Sedangkan rangkaian simulasi perancangan sistem kontrol pada baterai secara lengkap dapat dilihat pada lampiran.



Gambar 4.18 Arus terkontrol sebesar 15A

Berdasarkan respon sistem yang telah didapatkan pada Gambar 4.18 dapat diketahui bahwa dari hasil perancangan sistem kontrol pada baterai ini didapatkan nilai *maximum overshoot* sebesar 0,11% dengan *settling time* sebesar 0,25 detik dan *error* sistem sebesar 0,53%.

#### 4.4 Sistem Generator Turbin Angin dengan *Battery Energy Storage System* (BESS)

Sistem Generator Turbin Angin yang digunakan merupakan sistem generator turbin angin yang telah dilengkapi

dengan *supervisory control* dan menggunakan *buck converter*. Hasil tegangan yang dihasilkan oleh sistem generator turbin angin akan digunakan untuk memenuhi permintaan beban. Saat nilai keluaran turbin lebih besar dari permintaan beban, maka sisanya akan digunakan sebagai sumber untuk proses pengisian pada baterai. Namun, proses pengisian pada baterai ini harus tetap dijaga supaya arus yang masuk saat proses *charging* tetap berada pada *range operational* baterai, meskipun nilai kecepatan angin berubah-ubah. Hal ini dilakukan untuk menjaga *lifetime* baterai dan mencegah terjadinya *overcharge* pada baterai. Berdasarkan *datasheet* baterai *lead acid* yang telah dibahas pada subbab 3.2, maka arus masukan maksimal pada baterai harus sebesar 15 A.

Sedangkan apabila nilai keluaran turbin lebih kecil daripada nilai permintaan beban, maka baterai akan digunakan sebagai sumber untuk memenuhi permintaan beban tersebut. Sehingga permintaan beban tetap terpenuhi meskipun keluaran dari turbin kecil.

Saat sistem kontrol pada baterai ini digabungkan dengan sistem generator turbin angin, maka arus yang masuk ke baterai bisa dikontrol sesuai dengan *range* operasi yang direkomendasikan sesuai dengan tabel 3.1. Arus masukan pada baterai dijaga agar maksimal sebesar 15 A. Berdasarkan simulasi yang telah dibuat, pengambilan data dilakukan pada kecepatan angin sebesar 8 m/s - 17 m/s dan didapatkan hasil yaitu sebagai berikut:

- Saat Kecepatan Angin Konstan dan Beban Konstan

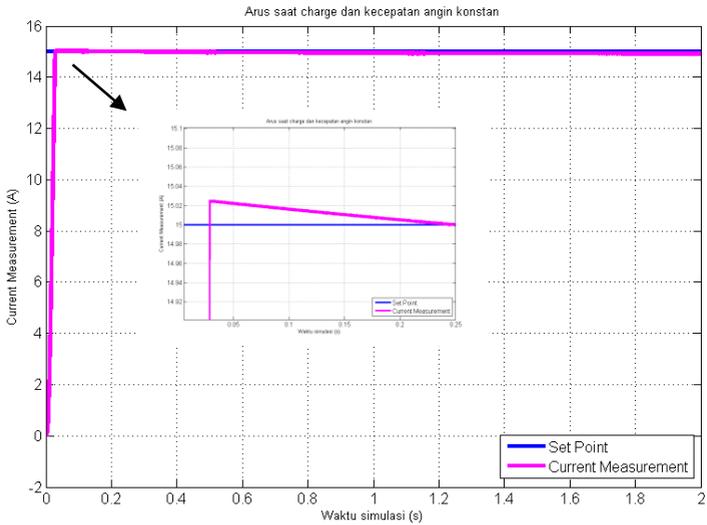
Hasil yang didapatkan saat kecepatan angin dan beban bernilai konstan ditunjukkan oleh Tabel 4.4. Dari tabel tersebut diketahui bahwa ketika permintaan beban lebih kecil dari

keluaran turbin, maka baterai mengalami proses *charge* dan arus yang digunakan untuk proses *charging* tersebut terjaga sesuai dengan *range operational* nya yaitu kurang dari 15 A.

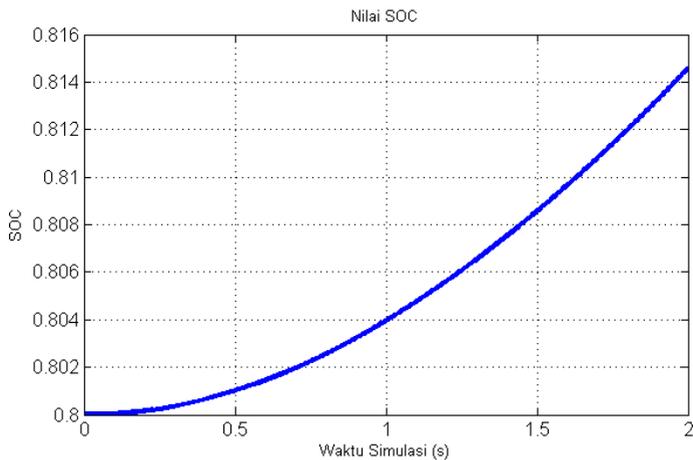
Salah satu hasil yang didapatkan dapat dilihat pada Gambar 4.19 yang menunjukkan hasil ketika kecepatan angin sebesar 13 m/s. Pada Gambar 4.19 tersebut *set point* berupa arus referensi ditunjukkan oleh warna biru sedangkan arus terukur ditunjukkan oleh warna ungu. Didapatkan hasil yaitu nilai arus terkontrol agar sesuai dengan *set point* yaitu arus bernilai kurang dari 15A atau sekitar 14,9 A. Respon sistem pada Gambar 4.19 menunjukkan bahwa sistem kontrol baterai yang diterapkan pada sistem generator turbin angin dengan nilai kecepatan angin konstan dan beban konstan memiliki nilai *maximum overshoot* sebesar 0,173% dengan nilai *settling time* yaitu 0,22 detik dan *error* sebesar 0,53%.

Tabel 4.4 Sistem Generator Turbin Angin dengan BESS

Kecepatan Angin (m/s)	Tegangan keluaran dari Turbin Angin (V)	Tegangan beban (V)	Arus yang masuk ke baterai (A)
8	2,065	2	2,052
9	2,028	2	7,902
10	2,8	2	14,93
11	3,468	2	14,93
12	3,905	2	14,92
13	4,364	2	14,92
14	4,623	2	14,92
15	4,953	2	14,92
16	5,211	2	14,92
17	5,45	2	14,92



Gambar 4.19 Arus yang digunakan untuk proses pengisian baterai saat kecepatan angin 13 m/s



Gambar 4.20 Nilai SOC yang telah dihubungkan dengan sistem generator turbin angin

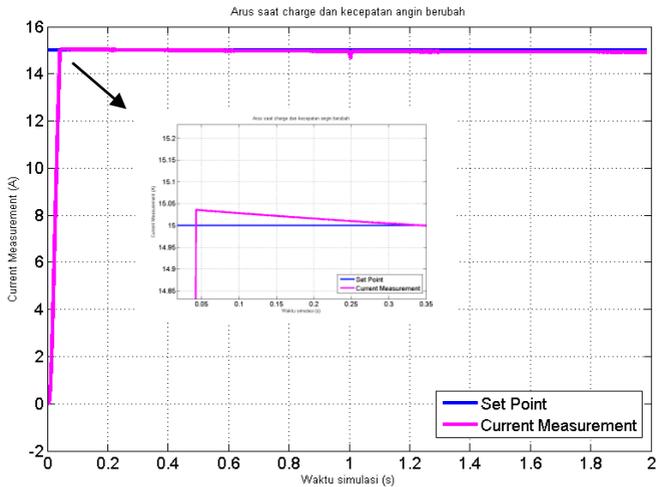
Sedangkan untuk nilai keluaran dari baterai terlihat bahwa, saat terjadi perubahan pada detik ke-1 maka baterai akan mengalami proses *charge* dan nilai SOC baterai akan meningkat seperti ditunjukkan pada Gambar 4.20.

- Saat Kecepatan Angin Berubah dan Beban Konstan

Saat terjadi perubahan kecepatan angin, maka besarnya arus yang masuk ke baterai juga harus tetap dijaga agar sesuai dengan *range operational* nya. Hasil yang didapatkan ketika terjadi perubahan kecepatan angin dapat dilihat pada Tabel 4.5. Arus yang digunakan untuk *charging* ke baterai terkontrol sebesar 14,9 A meskipun terjadi perubahan nilai kecepatan angin. Gambar 4.21 menunjukkan grafik nilai arus yang digunakan untuk pengisian baterai yaitu saat terjadi perubahan kecepatan angin dari 9 m/s menjadi 12 m/s.

Tabel 4.5 Nilai Arus yang masuk ke baterai saat terjadi perubahan kecepatan angin pada sistem generator turbin angin

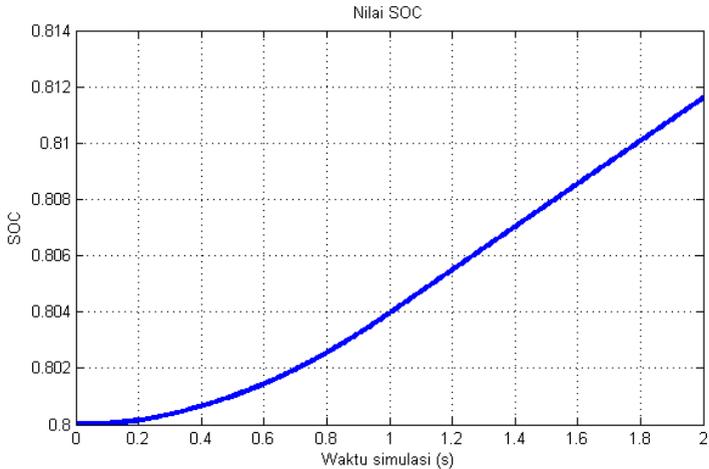
Kecepatan awal Angin (m/s)	Kecepatan akhir Angin (m/s)	Tegangan keluaran turbin angin (V)	Arus yang masuk ke baterai (A)
8	9	2,037	7,906
9	10	2,872	14,94
9	11	3,435	14,93
9	12	3,945	14,93
9	13	4,367	14,92
9	14	4,711	14,93
9	15	4,965	14,92
9	16	5,241	14,92
9	17	5,45	14,92



Gambar 4.21 Arus yang digunakan untuk proses pengisian baterai saat kecepatan angin berubah dari 9-12 m/s

Hasil *tracking* arus dapat dilihat pada Gambar 4.21. *Set point* berupa arus referensi ditunjukkan oleh warna biru sedangkan arus terukur ditunjukkan oleh warna ungu. Didapatkan hasil yaitu nilai arus terkontrol agar sesuai dengan *set point* yaitu arus bernilai kurang dari 15 A atau sekitar 14,9 A. Berdasarkan persamaan (2.31) maka didapatkan besarnya nilai *maximum overshoot* sistem yaitu sebesar 0,167% dengan *settling time* yaitu sebesar 0,278 detik. Dengan menggunakan kontroler maka arus yang masuk ke baterai tetap bisa dijaga sebesar kurang dari 15 A yaitu sebesar 14,9 A meski terjadi perubahan nilai kecepatan angin. Didapatkan nilai *error* sebesar 0,6%. Gambar 4.22 menunjukkan nilai SOC baterai saat kecepatan angin berubah dan beban konstan. Nilai SOC baterai yang dihasilkan meningkat. Keluaran dari baterai ini nantinya akan

digunakan untuk memenuhi permintaan beban saat permintaan beban lebih besar dari keluaran yang dihasilkan oleh sistem generator turbin angin. Sehingga baterai akan berperan sebagai sumber tegangan dan mengalami proses *discharge* (menyalurkan energi).

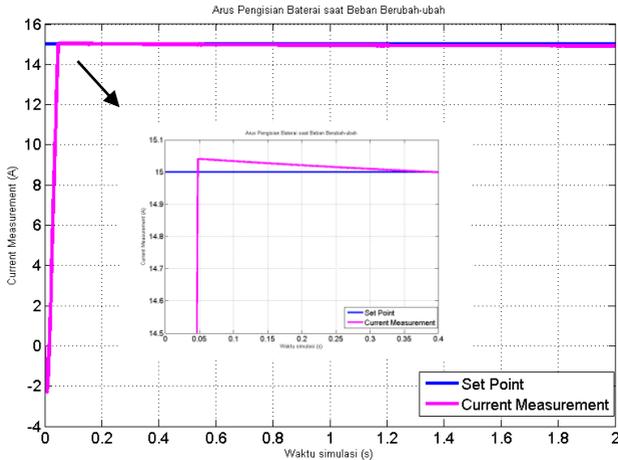


Gambar 4.22 Nilai SOC baterai

- Saat Kecepatan Angin Konstan dan Beban Berubah

Saat kecepatan angin konstan dan beban berubah-ubah maka apabila perubahan beban lebih kecil daripada nilai keluaran sistem generator turbin angin, baterai akan *charge* dan arus yang masuk ke baterai dijaga agar tetap sesuai dengan arus referensi. Salah satu hasilnya ditunjukkan ketika kecepatan angin konstan sebesar 13 m/s dan beban berubah namun perubahannya masih lebih kecil jika dibandingkan dengan keluaran turbin yaitu dari 2V menjadi 3V. Sehingga proses pengisian baterai akan berlangsung dan arus pengisian baterai terjaga sebesar 14,92 A. Gambar 4.23 merupakan hasil yang

didapatkan saat kecepatan angin konstan dan terjadi perubahan beban. Perubahan beban ini lebih kecil dari keluaran turbin angin sehingga terjadi proses pengisian pada baterai.

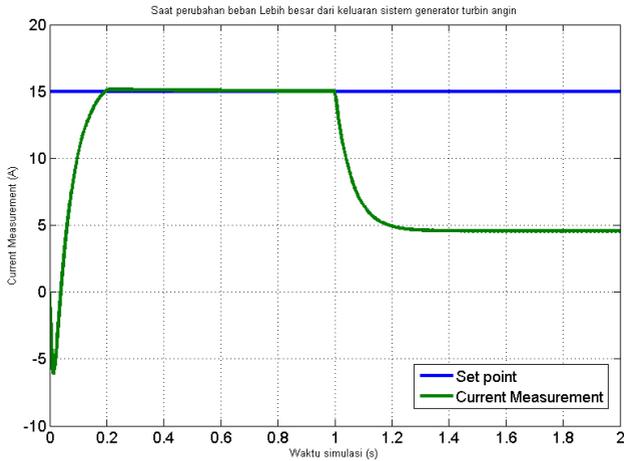


Gambar 4.23 Arus yang digunakan untuk proses pengisian baterai saat kecepatan angin konstan dan permintaan beban lebih kecil dari keluaran turbin angin

Dari perancangan sistem kontrol pada baterai yang telah dilakukan dan diterapkan pada sistem generator turbin angin, untuk kecepatan angin yang konstan dan nilai beban berubah-ubah, maka didapatkan besarnya nilai *maximum overshoot* yaitu sebesar 0,267% dengan *settling time* yaitu 0,4 detik dan *error* sebesar 0,53%.

Saat beban berubah dan nilai perubahan beban tersebut lebih besar dari keluaran turbin angin maka arus yang semula terjaga sebesar 14,92 A, nilainya akan menurun. Saat ini tidak ada proses pengisian pada baterai. Melainkan baterai menjadi sumber untuk memenuhi permintaan beban. Hasil yang

didapatkan saat baterai *discharge* dan terjadi penurunan nilai arus dapat dilihat pada Gambar 4.24. Gambar tersebut merupakan hasil yang didapatkan saat kecepatan angin konstan sebesar 13 m/s dan perubahan beban dari 4V menjadi 5V (lebih besar dari keluaran turbin yang hanya 4,177 V)



Gambar 4.24 Arus baterai saat kecepatan angin konstan dan permintaan beban lebih besar dari keluaran turbin angin

Secara keseluruhan rangkaian sistem kontrol pada baterai dan yang telah digunakan pada sistem generator turbin angin akan ditampilkan pada lampiran.

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan hasil analisis data yang telah dilakukan didapatkan kesimpulan dari tugas akhir mengenai Perancangan Sistem Kontrol pada *Battery Energy Storage System* untuk Sistem Generator Turbin Angin adalah sebagai berikut :

- Perancangan sistem kontrol pada *Battery Energy Storage System* telah dilakukan dan menghasilkan respon yang benar. Sistem kontrol dengan  $K_p$  dan  $K_i$  sebesar 10 dapat digunakan untuk menjaga arus yang masuk ke baterai kurang dari 15 A yaitu sebesar 14,9A dengan nilai error sebesar 0,53%, *maximum overshoot* sistem yaitu sebesar 0,11% dengan *settling time* yaitu sebesar 0,25 detik sehingga tidak terjadi *overcharge* yang akan menurunkan *lifetime* baterai.
- Untuk sistem kontrol pada baterai yang diterapkan pada sistem generator turbin angin didapatkan hasil yaitu saat kecepatan angin konstan dan beban konstan, nilai arus terjaga sesuai dengan *set point* dengan besarnya nilai *maximum overshoot* sebesar 0,11%, *settling time* sebesar 0,2 detik dan *error* sebesar 0,53%.
- Saat kecepatan angin berubah-ubah maka sistem kontrol pada baterai mampu menjaga besarnya nilai arus untuk *charging* baterai sebesar 14,9 A dengan nilai *maximum overshoot* sebesar 0,167%, *settling time* sebesar 0,278 detik dengan besarnya nilai *error* yaitu 0,6%.
- Dari perancangan sistem kontrol pada baterai yang telah dilakukan dan diterapkan pada sistem generator

turbin angin, untuk kecepatan angin yang konstan dan nilai beban berubah-ubah, maka didapatkan besarnya nilai *maximum overshoot* yaitu sebesar 0,267% dengan *settling time* yaitu 0,4 detik dan *error* sebesar 0,53%.

## **5.2 Saran**

Dari tugas akhir ini terdapat saran yang dapat digunakan untuk penelitian selanjutnya, yakni pengembangan sistem kontrol pada baterai ini dapat dilakukan secara *real time* pada *miniplant* dengan menggunakan berbagai macam penggunaan strategi kontrol serta menggunakan jenis konverter lain seperti boost konverter pada sistem generator turbin angin.

## DAFTAR PUSTAKA

- Archi W. Cuip, J. (1979). *Principles of Energy Conversion*. USA: McGraw-Hill, Ltd.
- Armadiya, T. ., (2012). Maximum Power Point Tracking (MPPT) pada Variable Speed Wind Turbine (VSWT) dengan Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) menggunakan Switch Mode Rectifier (SMR). *Jurnal Teknik POMITS 1*, 1-6.
- Ashari, M. (2015). *Sistem Konverter DC Desain Rangkaian Elektronika Daya*. Surabaya: ITS Press.
- Bredley, A. (2002). *Solid State Relay Application Guide*. Rockwell Automation.
- Celtis Elmas, O. D. (2016). Adaptive Fuzzy Logic Controller for DC-DC Converter.
- Chincilla M, S. B. (2006). Control of permanent-magnet generators applied to variable-speed wind energy systems connected to grid. *IEEE Trans Energy Convers*, 21:130-5.
- David Linden, T. B. (2002). *Handbook of Batteries 3 Ed*. Amerika Serikat: The McGraw-Hills Companies, Inc.
- Hamied, M. A., & Amary, N. H. (2016). Permanent Magnet Synchronous Generator Stability Analysis and Control. 507-515.
- Harianto, R. (2018). *Implementasi Supervisory Control Untuk Pengendalian Kecepatan Turbin Angin menggunakan metode direct torque control berbasis boost converter*. Surabaya: Departemen Teknik Fisika ITS.
- Hemmati, R. (2017). Technical and Economic Analysis of Home Energy Management System Incorporating Small-scale Wind Turbine and Battery Energy Storage System. *Journal of Cleaner Production*, 1-44.
- Hemmati, R. A.-K. (2018). Decentralized Frequency-Voltage Control and Stability Enhancement of Standalone Wind Turbine-load-battery. *electrical power and energy systems*, 1-10.

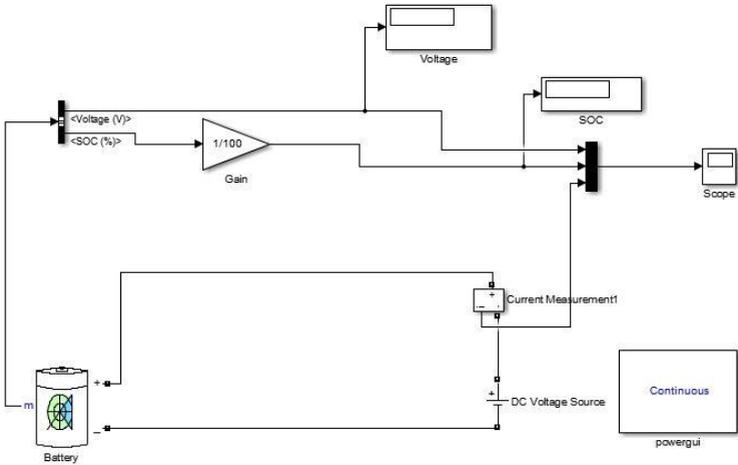
- Ji W, Z. Y. (2017). Thermodynamic analysis of a novel hybrid wind-solar-compressed air energy storage system. *Energy Conversion & Management*, 176-187.
- Karimi, Z. M. (2014). *Modelling, Implementation, and Performance Analysis of A Hybrid Wind-Solar Power Generator With Battery Storage*. Universidade De Coimbra.
- Manwell J., G. M. (2009). *Wind Energy Explained (2nd ed)*. Chichester, USA: John Willey & Sons Ltd.
- Manwell, J. M. (2005). *Wind Energy Explained : Theory, Design, and Application*. West Sussex: John Willey & Sons Ltd.
- Merpaung, A. S. (2017). *Boost Converter pada Elektronika Daya*. Batam: Politeknik Negeri Batam.
- Muldi Yuhendri, d. (2015b). Adaptive type-2 fuzzy sliding mode control for grid-connected wind turbine generator using very sparse matrix converter. *International Journal of Renewable Energy Research*,, vol. 5, pp. 668-676.
- Primadhyta, S. (2018, Oktober 15). Diambil kembali dari CNN Indonesia:  
<https://www.cnnindonesia.com/ekonomi/20180803183316-85-319355/semester-i-2018-konsumsi-listrik-tumbuh-47-persen>
- Raul Sarrias-Mena, e. (2014). Improving grid integraton of wind turbines by using secondary batteries. *Renewable and Sustainable Energy*, 194-207.
- Schubel, P. J. (2012). Wind Turbine Blade Design. *Energies*, Vol. 5, hal. 3425-3449.
- Suberu, M. Y. (2014). Energy Storage Systems for Renewable Energy Power Sector Integration and mitigation of intermittency. *Renewables and Sustainable Energy Reviews*, 499-514.
- Suyadhi, T. D. (2018, December 20). *Teknik Kendali PID*. Diambil kembali dari Robotics University: <http://www.robotics-university.com/2015/02/teknik-kendali-pid.html>

- Texas Instrument.* (2018, December 20). Diambil kembali dari <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq24450.pdf>
- Wagner, H. d. (2009). *Introduction to Wind Energy Systems : Basics, Technology and Operation.* Berlin: Springer.
- Wijaya, D. M. (2018). Surabaya: ITS Surabaya.
- Yuhendri, M. d. (2011). Maximum Output Power Tracking of Wind Turbine Using Intelligent Control Approach. *Telkomnika*, vol.9, pp 217-226.
- Yuhendri, M. d. (2015a). A novel sensorless MPPT for wind turbine generators using very sparse matrix converter based on hybrid intelligent control. *International Review of Electrical Engineering*, vol. 10, pp. 233-243.
- Zuher Alnasir, d. M. (2013). An analytical literature review of stand-alone wind energy conversion systems from generator viewpoint,”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* , vol. 28, pp. 597-615.

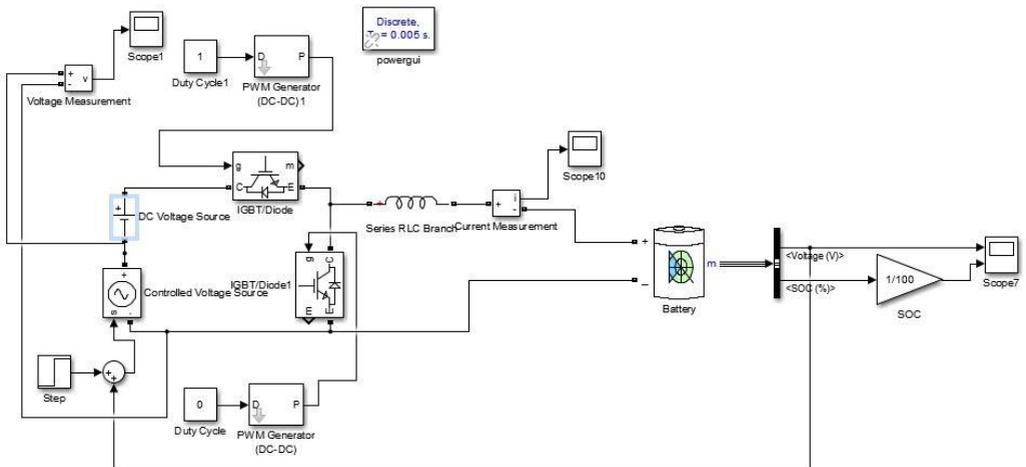
*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## LAMPIRAN

### A. Rangkaian pemodelan *charge* dan *discharge* pada baterai

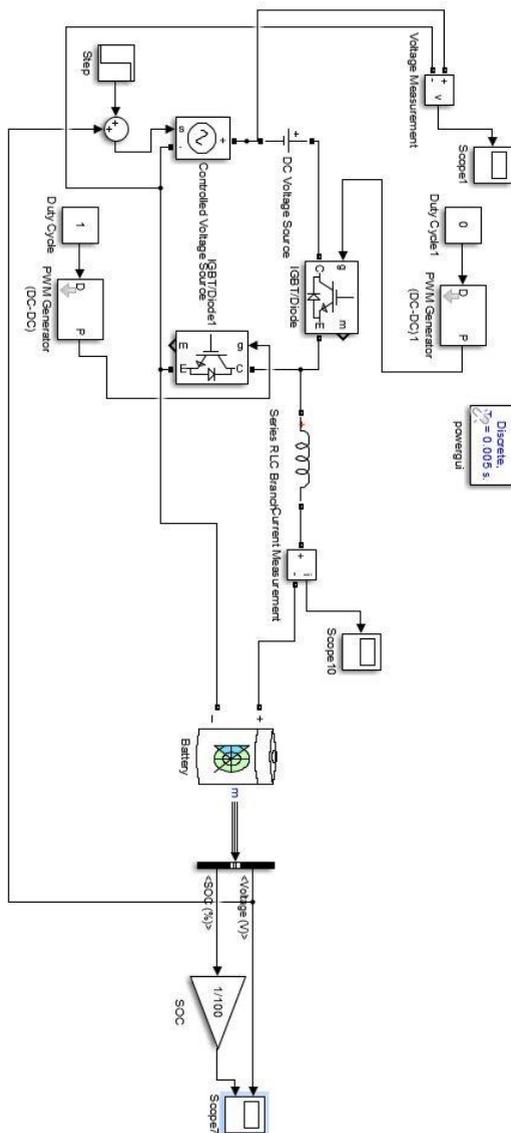


### B. Rangkaian konverter saat mode Buck





### C. Rangkaian Konverter Saat Mode Boost

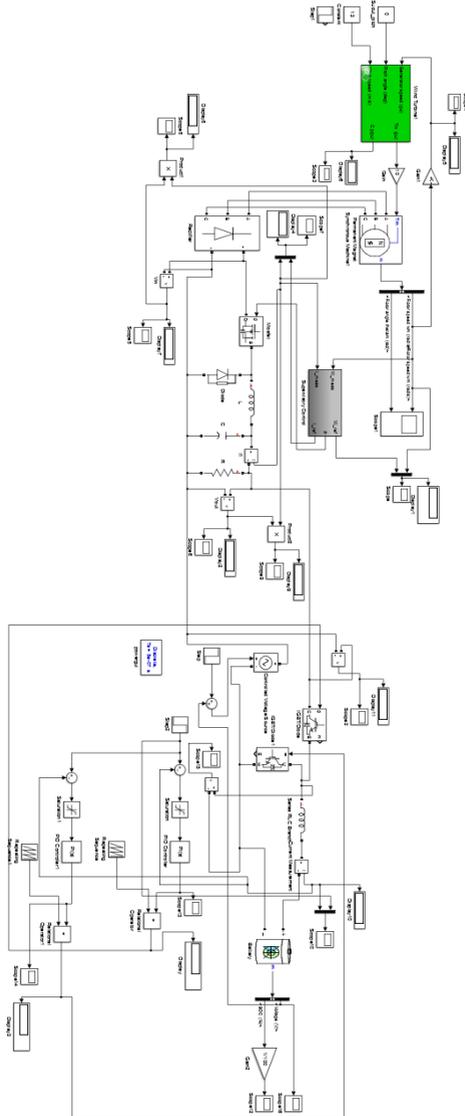








## E. Rangkaian keseluruhan (Sistem Generator Turbin Angin dengan BESS)





## BIODATA PENULIS



Penulis bernama Sovi Aprila Kurniasari dilahirkan di Banyuwangi, 30 April 1997. Penulis merupakan anak pertama dari dua bersaudara. Penulis telah menyelesaikan pendidikan di SDN 2 Sempu pada tahun 2009, SMPN 1 Genteng pada tahun 2012, SMAN 1 Genteng pada tahun 2015, dan sedang menempuh pendidikan S1 Teknik Fisika

FTI di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya hingga sekarang, melalui jalur SNMPTN 2015. Penulis memiliki pengalaman program *intership* selama dua bulan di PSTBM BATAN.

Pada bulan Desember 2018 penulis telah menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul **Perancangan Sistem Kontrol Pada *Battery Energy Storage System (BESS)* Untuk Sistem Generator Turbin Angin**. Bagi pembaca yang memiliki kritik, saran, atau ingin berdiskusi lebih lanjut mengenai tugas akhir ini, maka dapat menghubungi melalui email: [soviaprila@gmail.com](mailto:soviaprila@gmail.com)