



Tesis - TE142599

**Ekualisasi Baterai Menggunakan Konverter
Buck-Boost *Bi-Directional* pada Sistem
Manajemen Baterai**

SITI AISYAH

2213201020

DOSEN PEMBIMBING

Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D

Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D

PROGRAM MAGISTER

BIDANG KEAHLIAN TEKNIK SISTEM TENAGA

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2015



Tesis - TE142599

**Ekualisasi Baterai Menggunakan Konverter
Buck-Boost *Bi-Directional* pada Sistem
Manajemen Baterai**

SITI AISYAH

2213201020

DOSEN PEMBIMBING

Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D

Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D

PROGRAM MAGISTER

BIDANG KEAHLIAN TEKNIK SISTEM TENAGA

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO

FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2015



Thesis - TE142599

Battery Equalization Using Buck-Boost Bi-Directional Converter on Battery Management System

SITI AISYAH

2213201020

ADVISOR

Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D

Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D

MAGISTER PROGRAM

POWER SYSTEM ENGINEERING

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT

FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2015

Telah disusun untuk salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (MT)
di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

SITI AISYAH
NRP. 2213201020

Tanggal Ujian : 17 Juni 2015

Periode Wisuda : September 2015

Disetujui Oleh :



1. Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D.

(Pembimbing I)

NIP. 198006032006041003

35/26/15

2. Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D

(Pembimbing II)

NIP. 197311192000031001

3. Dr. Ir. Soediby, M.MT

(Penguji)

NIP. 195512071980031004

4. Dr.Eng.I Made Yulistya Negara, ST.,M.Sc.

(Penguji)

NIP. 197007121998021001

5. Dr. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng

(Penguji)

NIP. 197309271998031004

Direktur Program Pascasarjana

Prof.Dr.Ir.Adi Soeprijanto, MT.

NIP. 196404051990021001



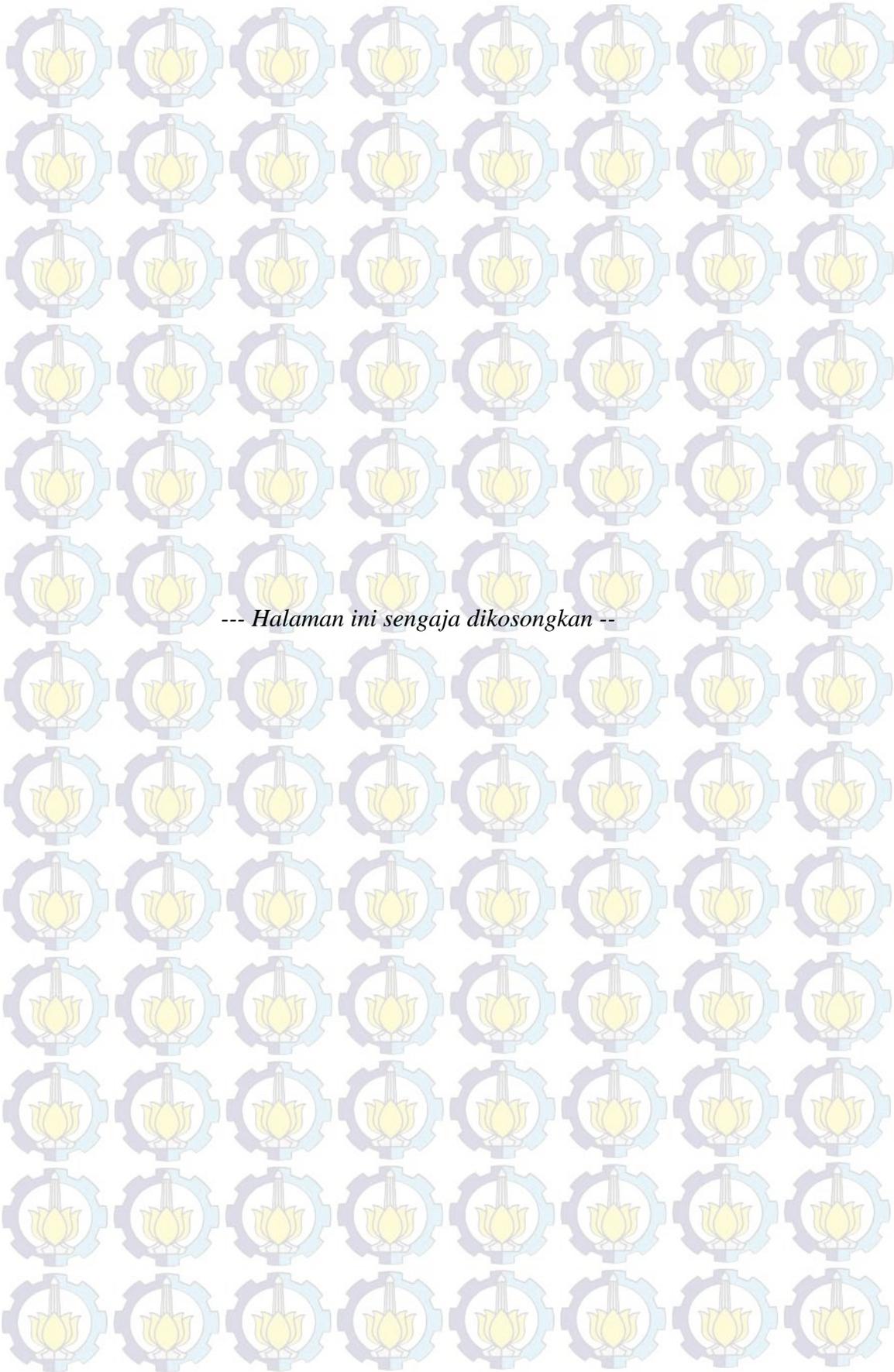
EKUALISASI BATERAI MENGGUNAKAN KONVERTER BUCK-BOOST BI-DIRECTIONAL PADA SISTEM MANAJEMEN BATERAI

Nama Mahasiswa : Siti Aisyah
NRP : 2213201020
Pembimbing : Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D
: Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D

ABSTRAK

Baterai adalah salah satu elemen penyimpanan sementara yang sangat penting. Baterai dihubungkan secara seri maupun paralel untuk mendapatkan tegangan dan kapasitas yang diinginkan. Saat baterai terhubung seri seringkali muncul ketidakseimbangan antar *state of charge* (SOC) dari sel baterai satu dengan yang lain akibat proses *charge* dan *discharge* yang berulang. Ketidakseimbangan ini dapat mempengaruhi umur baterai dan kapasitas total dari *pack* baterai tersebut. Oleh karena itu, perlu dilakukan ekualisasi SOC baterai dengan teknik ekualisasi aktif dan pasif. Pada penelitian ini, dilakukan pengembangan teknik ekualisasi aktif berbasis konverter DC/DC *bi-directional*. Keunggulan penerapan metode ini dari penelitian sebelumnya adalah dapat diaplikasikan untuk tiga kondisi yang berbeda. Tiga kondisi tersebut, yaitu: kondisi *charging*, kondisi terhubung beban, dan kondisi *idle*. Simulasi dari teknik ekualisasi berbasis konverter DC/DC telah dilakukan. Hasil simulasi saat kondisi *idle*, SOC dari baterai dengan ekualisasi adalah sebesar 50,06% sedangkan tanpa rangkain ekualisasi sebesar 49,89%. Dalam kondisi *charging*, SOC dari rangkain dengan ekualisasi bernilai 50,18% sedangkan tanpa ekualisasi sebesar 50,11% dan saat kondisi *discharging* dengan ekualisasi 49,95% dan tanpa ekualisasi sebesar 49,89%. Sistem baterai dengan ekualisasi menghasilkan SOC baterai yang lebih besar dan baterai dapat dioperasikan dalam waktu yang lebih lama. Selain itu, proteksi baterai terhadap *overcharge* juga diterapkan sehingga baterai dapat dioperasikan pada batas aman dan terhindar dari kerusakan lebih dini.

Kata Kunci: konverter DC-DC *bi-directional*, *state of charge*, baterai.



--- Halaman ini sengaja dikosongkan ---

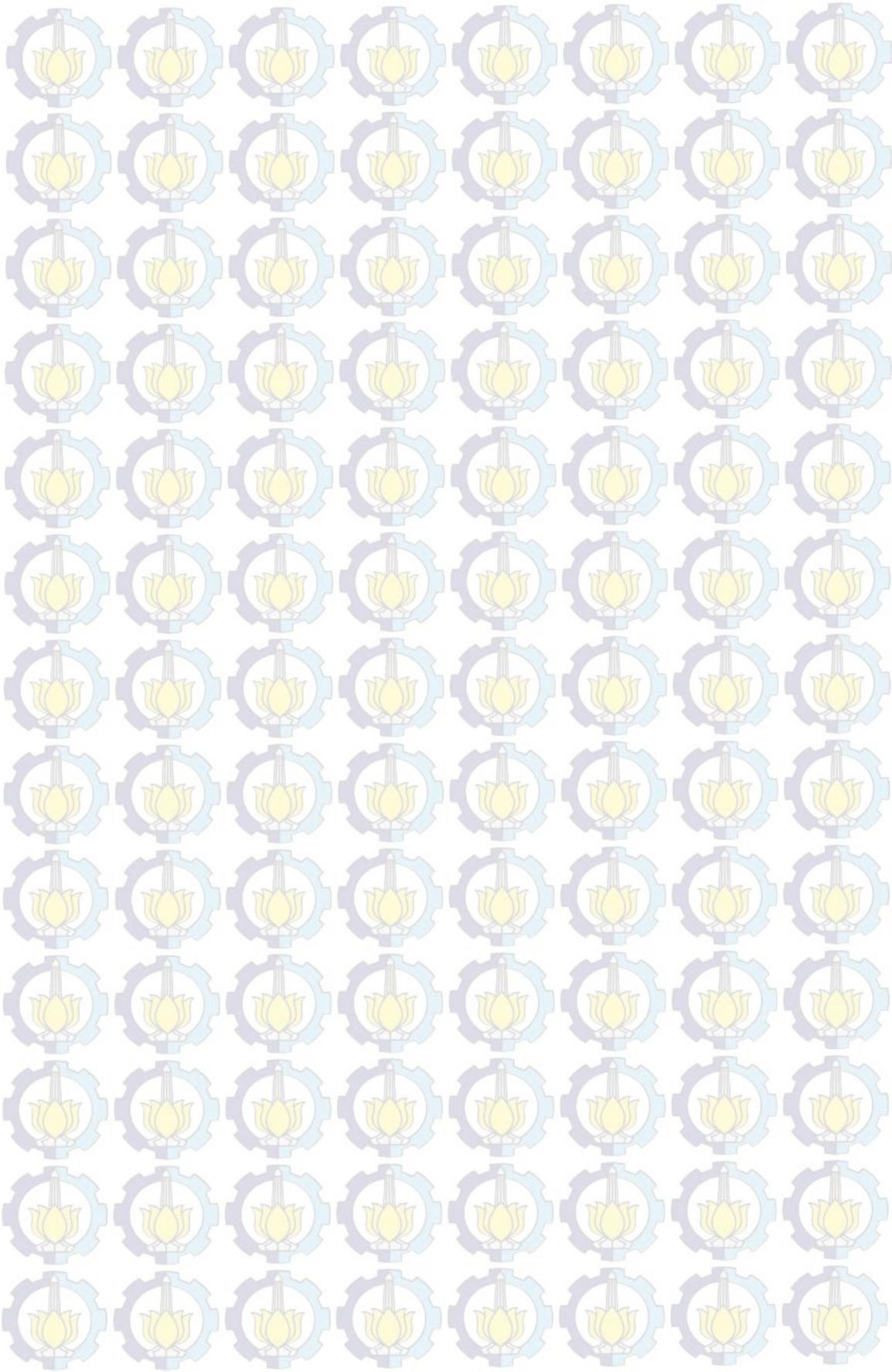
BATTERY EQUALIZATION USING BUCK-BOOST BI-DIRECTIONAL KONVERTER ON BATTERY MANAGEMENT SYSTEM

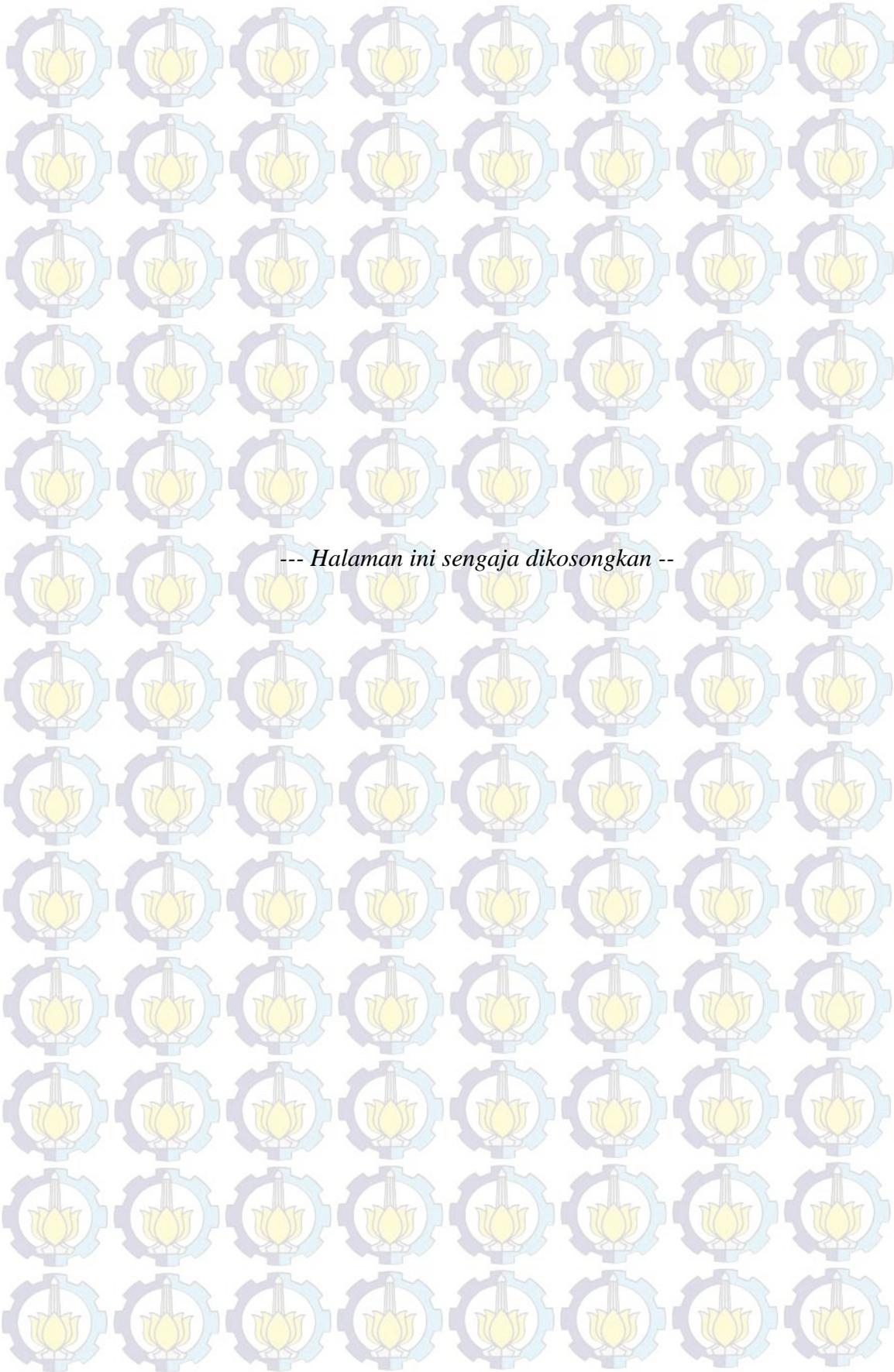
Name : Siti Aisyah
NRP : 2213201020
Advisor : Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D
: Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D

ABSTRACT

The battery is one of the important temporary storage elements. Batteries connected in series or parallel to obtain the desired voltage and capacity. When the battery is connected in series often appear imbalance between the state of charge (SOC) of the battery cells to each other due to charge and discharge cycles are repeated. This imbalance can affect battery life and the total capacity of the battery pack. Therefore, the battery SOC equalization needs to be done with active and passive equalization techniques. In this research, the development of active equalization technique based converter DC / DC bi-directional. Excellence application of this method from previous research is that it can be applied to three different conditions. The three conditions, namely: charging conditions, conditions connected load and idle conditions. Simulation of the equalization technique based DC converter / DC has done. The simulation results when idle, SOC of battery with equalization amounted to 50,06% while without rangakain equalization amounted to 49,89%. Under conditions of charging, the SOC of rangakain with equalization worth 50,18% while without the equalization of 50,11% and is currently discharging condition with equalization of 49,95% and amounted to 49,89% without equalization. The battery system with equalization produce larger battery SOC and the battery can be operated in a longer time. In addition, the battery against overcharge protection also applied so that the battery can be operated at safe limits and to avoid early damage.

Key words: bi-directional DC-DC converter, state of charge, battery.





KATA PENGANTAR

Alhamdulillah Robbil 'Alamin, terucap syukur kehadiran Allah atas limpahan rahmat dan karunianya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tesis yang berjudul “EKUALISASI BATERAI MENGGUNAKAN KONVERTER BUCK-BOOST *BI-DIRECTIONAL* PADA SISTEM MANAJEMEN BATERAI”. Adapun tujuan dari penyusunan Tesis ini adalah sebagai salah satu persyaratan untuk mendapatkan gelar master teknik pada bidang studi Teknik Sistem Tenaga, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

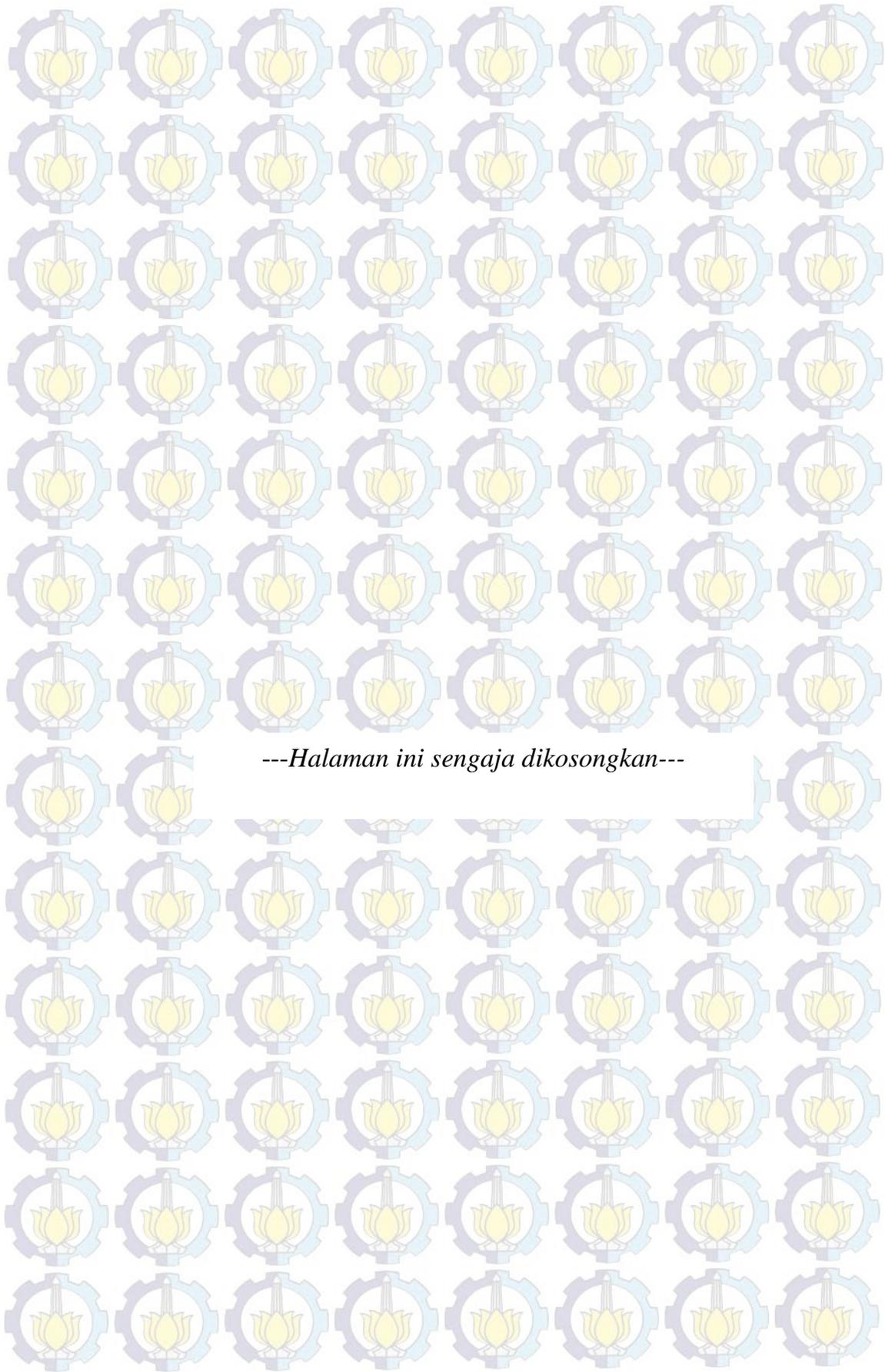
Dalam kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang banyak berjasa terutama dalam penyusunan tugas Akhir ini, yaitu :

1. Kementrian Pendidikan dan Kebudayaan khususnya Direktorat Jendral Pendidikan Tinggi yang telah memberikan beasiswa *fresh graduate* sehingga saya dapat menempuh pendidikan magister.
2. Segenap keluarga besar terutama Bapak, Ibu, Mbak Ela, Mbak Aas, Mbak Hani, dan Mbak Eni, Mas Ival, Mas Diki, Nawfal dan Rasvi tercinta yang selalu memberikan dukungan baik finansial, semangat, dan doa untuk keberhasilan penulis.
3. Bapak Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D dan Bapak Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan waktu, saran serta bimbingannya.
4. Seluruh rekan-rekan S2 angkaran 2013 atas dukungan, masukan, dan kerjasamanya selama masa kuliah dan proses pengerjaan tesis.

Besar harapan penulis agar tesis ini dapat memberikan manfaat dan masukan bagi banyak pihak. Oleh karena itu penulis mengharapkan kritik, koreksi, dan saran dari pembaca yang bersifat membangun untuk pengembangan ke arah yang lebih baik.

Surabaya, 1 Juli 2015

Penulis



---Halaman ini sengaja dikosongkan---

DAFTAR ISI

	Hal
HALAMAN PENGESAHAN.....	i
ABSTRAK.....	iii
ABSTRACT.....	v
KATA PENGANTAR.....	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
 BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	1
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan.....	2
1.5 Kontribusi Penelitian.....	3
 BAB II KARAKTERISTIK BATERAI DAN SISTEM PENGISIAN BATERAI	
2.1. Karakteristik Baterai Lead Acid.....	3
2.2. Charging pada Baterai Lead Acid.....	5
2.3. Faktor yang Mempengaruhi Baterai.....	7
2.3.1. <i>Depth of Discharge (DOD)</i>	8
2.3.2. <i>Overcharge dan Underdischarge</i>	8
2.4. State of Charge (SOC) dan Kapasitas Baterai Leac Acid.....	9
2.4.1. Pengukuran Langsung.....	11
2.4.2. SOC Berdasarkan <i>Open Circuit Voltage (OCV)</i>	11
2.4.3. <i>Coulomb Counting</i> atau Pengukuran SOC berbasis arus.....	12
2.4.4. Hydrometer.....	13
2.5. Teknik Ekualisasi Baterai.....	14
2.5.1. Teknik Ekualisasi Pasif.....	16
2.5.2. Teknik Ekualisasi Aktif.....	16

2.6.	Rangkaian Ekualisasi dengan Buck/Boost <i>Bi-Directional</i>	17
------	--	----

BAB III DESAIN SISTEM EKUALISASI BATERAI

3.1.	Konfigurasi Sistem	21
3.2.	Parameter Baterai Lead Acid	21
3.2.1	Resistansi Internal	24
3.2.2	Parameter Model Baterai	24
3.3.	Karakteristik Rangkaian Konverter <i>Bi-Directional</i>	26
3.4.	Rangkaian Proteksi Baterai	29

BAB IV HASIL SIMULASI DAN ANALISIS DATA

4.1	Kondisi <i>Idle</i>	33
4.2	Kondisi <i>Charging</i>	35
4.3	Kondisi Terhubung Beban	38
4.4	Kondisi <i>Overcharge</i>	41
4.5	Resistansi Internal Berbeda	42
4.6	Perbedaan Koefisien A	44

BAB V PENUTUP

5.1.	Kesimpulan	47
5.2.	Saran	47

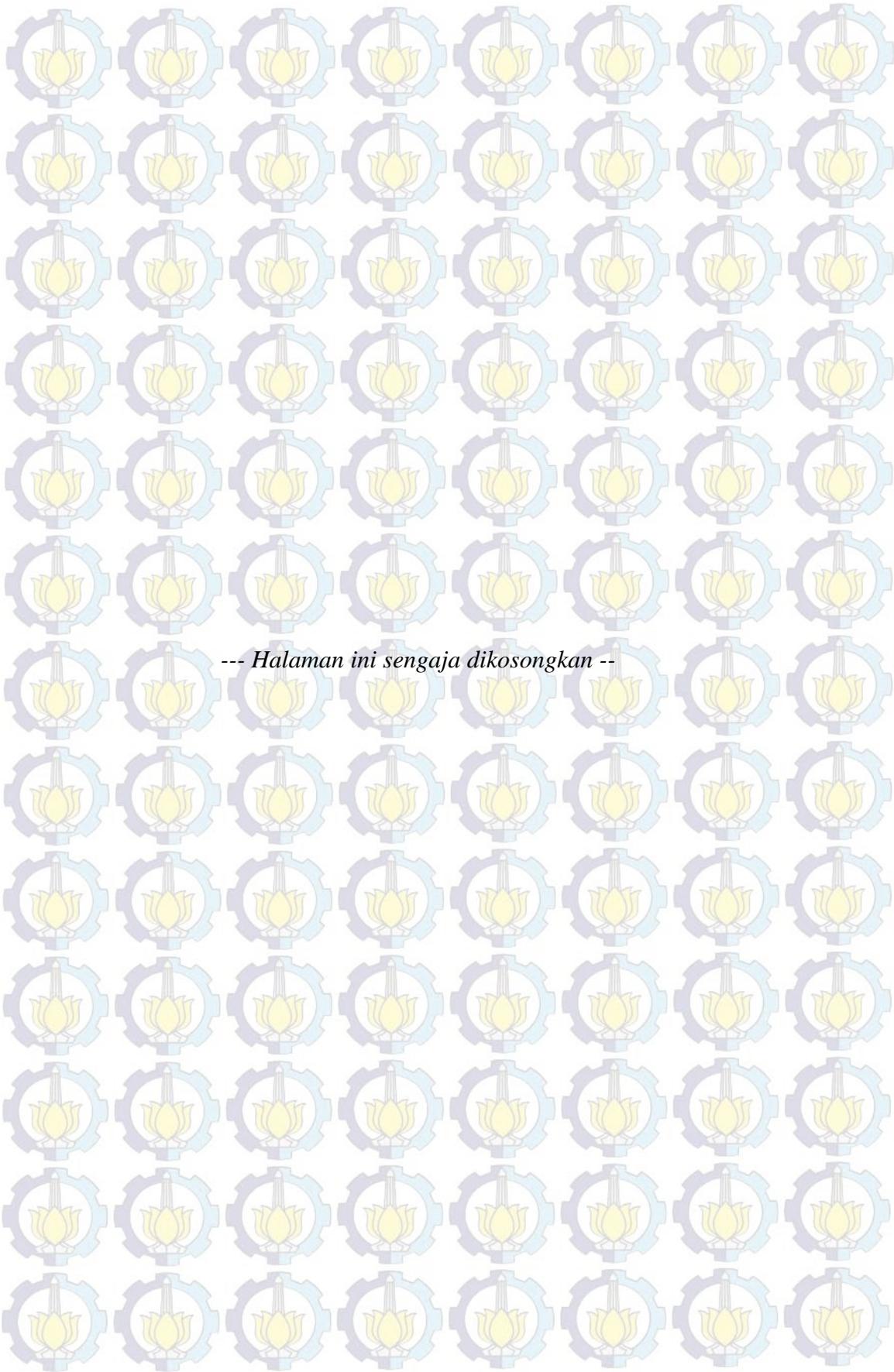
DAFTAR PUSTAKA	49
----------------------	----

BIOGRAFI PENULIS	50
------------------------	----

LAMPIRAN	51
----------------	----

DAFTAR TABEL

	Hal
Tabel 2.1 Keuntungan dan kerugian penggunaan baterai lead acid.....	5
Tabel 2.2 Batas tegangan yang diperkenankan pada mode charging (Trojan Battery Comapany, 2015).....	7
Tabel 2.3 Pengukuran SOC berdasarkan tegangan OCV pada trojan (Trojan Battery Comapany, 2015).....	12
Tabel 2.4 Standar BCI untuk estimasi SOC dari maintenance-free starter battery dengan antimony.....	13
Tabel 3.1 Parameter baterai	25



--- Halaman ini sengaja dikosongkan ---

DAFTAR GAMBAR

		Hal
Gambar 2.1	Konstruksi baterai lead acid secara umum.....	4
Gambar 2.2	Karakteristik <i>charging</i> pada baterai lead acid	6
Gambar 2.3	<i>Charging</i> menggunakan <i>constant curreny</i> pada baterai lead acid ... jenis Trojan [3].....	7
Gambar 2.4	Hubungan antara kapasitas baterai, DOD dan siklus baterai untuk baterai jenis <i>shallow cycle</i>	8
Gambar 2.5	Pengaruh overcharge dan undercharge terhadap siklus baterai	9
Gambar 2.6	Kapasitas baterai secara umum	10
Gambar 2.7	Ilustrasi pengukuran berdasarkan <i>Coulomb Counting</i>	13
Gambar 2.8	Ilustrasi tegangan dan kapasitas baterai yang tidak sama	14
Gambar 2.9	Tegangan dari baterai tanpa menggunakan rangkaian ekualisasi 15	
Gambar 2.10	Topologi rangkaian ekualisasi menggunakan konverter DC/DC <i>bi-directional</i>	17
Gambar 2.11	(a) Baterai1 discharge; (b) Baterai2 charge; (c) Baterai2 discharge; (d) Baterai1 charge	18
Gambar 2.12	Topologi ekualisasi untuk empat baterai.....	19
Gambar 3.1	Konfigurasi sistem keseluruhan	21
Gambar 3.2	Rangkaian ekivalen baterai non-linear.....	22
Gambar 3.3	Karakteristik kurva <i>discharge</i> dari baterai.....	24
Gambar 3.4	Kurva karakteristik <i>discharge</i> baterai leac acid 0,5 Ah 12 Volt..	26
Gambar 3.5	(a) Topologi untuk transfer energi dari Baterai1 menuju Baterai2 (b) M4 dan M2 ON (c) M2 dan M6 ON	27
Gambar 3.6	Gelombang tegangan induktor	28
Gambar 3.7	Gelombang arus induktor.....	28
Gambar 3.8	SOC baterai saat kondisi <i>overcharging</i>	29
Gambar 3.9	Baterai yang medelak akibat penguapan air karena <i>overcharging</i>	30
Gambar 3.10	Sistem proteksi baterai terhadap <i>overcharging</i>	30
Gambar 4.1	SOC dan tegangan dari baterai dengan rangkaian ekualisasi pada kondisi idle.....	33
Gambar 4.2	SOC baterai tanpa menggunakan rangkaian ekualisasi	34

Gambar 4.3	Arus induktor pada baterai dengan rangkaian ekualisasi dalam kondisi idle	34
Gambar 4.4	Sinyal gate mosfet dari Baterai1 saat discharging	35
Gambar 4.5	SOC dan tegangan baterai dengan rangkaian ekualisasi saat kondisi charging	36
Gambar 4.6	SOC baterai tanpa rangkaian ekualisasi saat kondisi charging ...	37
Gambar 4.7	Arus induktor pada baterai dengan rangkaian ekualisasi saat kondisi charging	38
Gambar 4.8	SOC dan tegangan baterai dengan rangkaian ekualisasi saat kondisi terhubung beban atau discharging	39
Gambar 4.9	SOC dan tegangan baterai tanpa rangakain ekualisasi saat kondisi terhubung beban atau discharging	40
Gambar 4.10	Arus induktor pada baterai dengan rangkaian ekualisasi saat kondisi discharging atau terhubung beban	41
Gambar 4.11	Arus induktor pada baterai dengan rangkaian ekualisasi saat kondisi discharging atau terhubung beban	42
Gambar 4.12	Switch pemutus pada rangkaian proteksi	42
Gambar 4.13	SOC dan tegangan baterai dengan rangkaian ekualisasi dengan resistansi internal berbeda	43
Gambar 4.14	Tegngan pada baterai tanpa rangkaian ekualisasi dengan resistansi internal berbeda	44
Gambar 4.15	Tegangan dan SOC pada baterai dengan koefisien Aberbeda.....	44

BIOGRAFI PENULIS



Penulis memiliki nama lengkap Siti Aisyah. Lahir di Cilacap pada tanggal 4 Mei 1992. Anak kelima dari pasangan Abdul Haris dan Fatimatuz Zahrok ini mengawali pendidikannya di SD Muhammadiyah 1-2 Taman pada tahun 1997-2003, kemudian melanjutkan ke SMP Negeri 1 Surabaya hingga tahun 2006. Setelah lulus dari SMA Negeri 5 Surabaya pada tahun 2009, penulis melanjutkan pendidikan Sarjana di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, Jurusan Teknik Elektro, Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga. Penulis lulus pada tahun 2013 dan pada tahun yang sama melanjutkan pendidikan Magister di Institut yang sama. Semasa kuliah penulis aktif mengikuti berbagai seminar dan pelatihan. Penulis yang merupakan salah satu asisten di Laboratorium Konversi Energi Teknik Sistem Tenaga (B.101). Penulis dapat dihubungi di alamat *email* aisyah4592@gmail.com.

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring perkembangan teknologi smartgrid dan *Electric Vehicles* (EVs) yang semakin pesat, baterai menjadi salah satu komponen penyimpanan yang penting. Baterai pada Smartgrid berfungsi sebagai media penyimpanan energi sedangkan pada EVs baterai berfungsi sebagai sumber energi utama. Pada umumnya, jumlah baterai yang digunakan pada kedua aplikasi tersebut lebih dari satu. Baterai-baterai tersebut dapat dihubungkan secara seri maupun paralel.

Hal yang perlu diperhatikan ketika baterai tersusun secara seri dan paralel adalah tegangan pada masing-masing baterai harus sama. Namun pada kenyataannya, tegangan baterai tidak selalu sama antara satu dengan lainnya. Hal ini dikarenakan oleh kondisi eksternal (lingkungan) maupun internal (manufaktur) dari baterai tersebut. Kedua kondisi ini mempengaruhi umur baterai dan tegangan dari keseluruhan baterai (tegangan DC bus).

Berbagai macam metode telah dikembangkan guna mengatasi masalah tersebut. Salah satu metode yang efektif untuk menjaga umur sekaligus mengatur tegangan keluaran dari baterai adalah teknik ekualisasi antar baterai. Metode ini berbasis kepada pengaturan *charge* dan *discharge* masing –masing sel baterai. Namun, perkembangan metode ini seringkali menggunakan elemen pasif sehingga banyak energi yang terbuang serta tidak mempertimbangkan proteksi terhadap *overcharge* dan *over-discharge* baterai. Oleh karena itu, pada rencana penelitian ini akan diusulkan sebuah metode BMS berbasis konverter DC/DC *bi-directional* yang turut mempertimbangkan perlindungan baterai saat kondisi *overcharge*.

1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan yang dibahas dalam penelitian ini adalah rangkaian ekualisasi untuk pemodelan baterai lead acid dengan mempertimbangkan *State of charge* (SOC). Rangkaian ekualisasi yang digunakan adalah rangkaian konverter *bi-*

directional serta dapat melindungi baterai dari *overcharge*. Rangkaian ekualisasi terhadap baterai disimulasikan dalam software.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dari penelitian ekualisasi baterai menggunakan konverter *buck-boost bi-directional* ini adalah sebagai berikut:

1. Pemodelan baterai yang digunakan adalah pemodelan baterai lead acid dengan mempertimbangkan SOC.
2. Perlindungan baterai hanya terbatas pada perlindungan terhadap *overcharge*.

1.4 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan sebuah sistem baterai terhubung seri dengan SOC yang sama antara satu dengan yang lain. Ekualisasi baterai menggunakan teknik ekualisasi aktif berupa rangkaian konverter DC/DC *bi-directional*. Dalam kondisi *charging* baterai seringkali *overcharge* sehingga timbul korosi pada plat positif, oleh karena itu penelitian ini bertujuan melindungi baterai terhadap *overcharge* yang berbahaya bagi baterai.

1.5 Manfaat Penelitian

Hasil yang diperoleh dari penelitian ini diharapkan bisa memberikan maafaat sebagai berikut:

1. Dapat menjadi referensi bagi peneliti lain yang akan melakukan penelitian dengan topik yang sama.
2. Dapat meningkatkan penguasaan materi tentang sistem konverter DC-DC bidirectional dua arah bagi penulis dan pembaca.
3. Diharapkan dapat memberikan manfaat tentang perkembangan teknologi pada salahsatu sistem mobil listrik.

BAB 2

KARAKTERISTIK BATERAI DAN SISTEM PENGISIAN

BATERAI

Baterai adalah sebuah perangkat yang terdiri dari satu atau lebih senyawa elektrokimia sehingga dapat mengkonversikan energi kimia menjadi energi listrik.

Sebuah sel baterai tersusun atas terminal positif atau katoda, terminal negatif atau anoda dan senyawa elektrolit.

Baterai dapat diklasifikasikan menjadi dua jenis yaitu:

- Baterai Primer (*single-use* atau *disposable*). Baterai jenis ini hanya dapat digunakan sekali dan elektroda yang tersusun didalamnya tidak dapat kembali lagi saat setelah proses *discharge*.
- Baterai Sekunder (*rechargeable*) dapat melalui proses *charge* dan *discharge* berulang kali. Komposisi dari elektroda yang tersusun didalamnya dapat dipulihkan kembali dengan arus terbalik.

Pada baterai digunakan secara luas dalam kehidupan sehari-hari. Baterai primer sering digunakan untuk keperluan dengan kebutuhan spesifik yang tinggi, waktu penyimpanan lama dan kesiapan instan. Baterai primer yang sering digunakan adalah *alkaline* untuk penerangan dan perangkat portabel. Berbeda dengan baterai primer, baterai sekunder memainkan peranan penting dalam kehidupan. Faktor penting dalam baterai sekunder adalah energi spesifik, *lifetime*, karakteristik beban, *self-discharge*, kebutuhan pemeliharaan dan pembuangan.

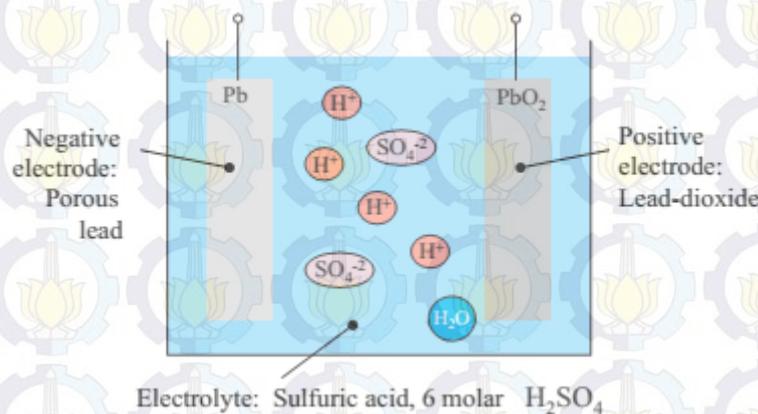
Untuk mendapatkan energi spesifik yang diperlukan beberapa baterai seringkali dihubungkan secara seri maupun paralel. Sejumlah baterai terhubung seri untuk mendapatkan tegangan yang diinginkan sedangkan baterai dihubungkan paralel untuk meningkatkan kapasitas. Hampir seluruh jenis baterai dapat terhubung seri maupun paralel namun harus dengan jenis baterai yang sama dan kapasitas yang sama. Baterai terhubung seri sering kali digunakan karena tegangan yang terukur adalah penjumlahan dari tegangan masing-masing baterai yang dihubungkan seri.

Jika dalam sebuah *pack* baterai terdapat baterai lemah maka dapat mengakibatkan ketidakseimbangan. Hal tersebut dapat mengakibatkan kerusakan pada baterai

yang lemah. Sebagai ilustrasi, terdapat sebuah *pack* baterai terdiri dari baterai lemah dan baterai kuat, *pack* tersebut masih dapat mensuplai beban kecil. Namun, bila untuk beban yang besar maka baterai lemah akan rusak. Hal yang sama terjadi bila menghubungkan baterai dengan kapasitas yang berbeda. Baterai dengan kapasitas yang lemah akan rusak terlebih dahulu.

2.1 Karakteristik Baterai Lead acid

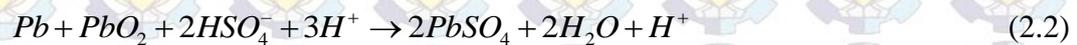
Jenis baterai yang sering digunakan dalam bidang industri adalah baterai sekunder jenis NiCd, Lead acid, NiMH, NiZn dan Lithium-ion. Baterai jenis Lead acid sering digunakan pada mobil listrik dan renewable energy. Baterai lead acid terdiri dari plat positif dan plat negative yang dipisahkan oleh satu ataupun lebih lapisan material. Pada umumnya, plat dibuat dari material aktif yang dilekatkan pada sebuah struktur grid yang terbuat dari timah atau timah campuran. Elektrolit pada baterai lead acid adalah campuran dari air dan senyawa sulfur. Gambar 2.1 menunjukkan sebuah ilustrasi dari baterai lead acid secara umum.



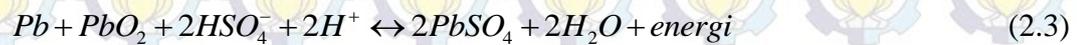
Gambar 2.1 Konstruksi baterai lead acid secara umum

Baterai Kelebihan baterai lead acid adalah biaya per-watt yang relative murah, *self-discharge* kecil dan kemampuan untuk mensuplai kebutuhan dengan arus yang tinggi. Selain itu, baterai Lead acid juga digunakan untuk aplikasi dengan *deep-cycle* yaitu dirancang untuk *discharged* hingga 80% Depth of Discharge (DOD).

Adapun reaksi elektrokimia dari baterai lead acid adalah sebagai berikut :



Reaksi Keseluruhan :



Dari reaksi keseluruhan dapat disimpulkan bahwa dari kiri ke kanan adalah reaksi *discharge* dan dari kanan ke kiri adalah reaksi *charge*.

Baterai lead acid digunakan untuk sektor industri dan transportasi . Beberapa keuntungan dari penggunaan baterai jenis lead acid ditunjukkan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Keuntungan dan kerugian penggunaan baterai lead acid

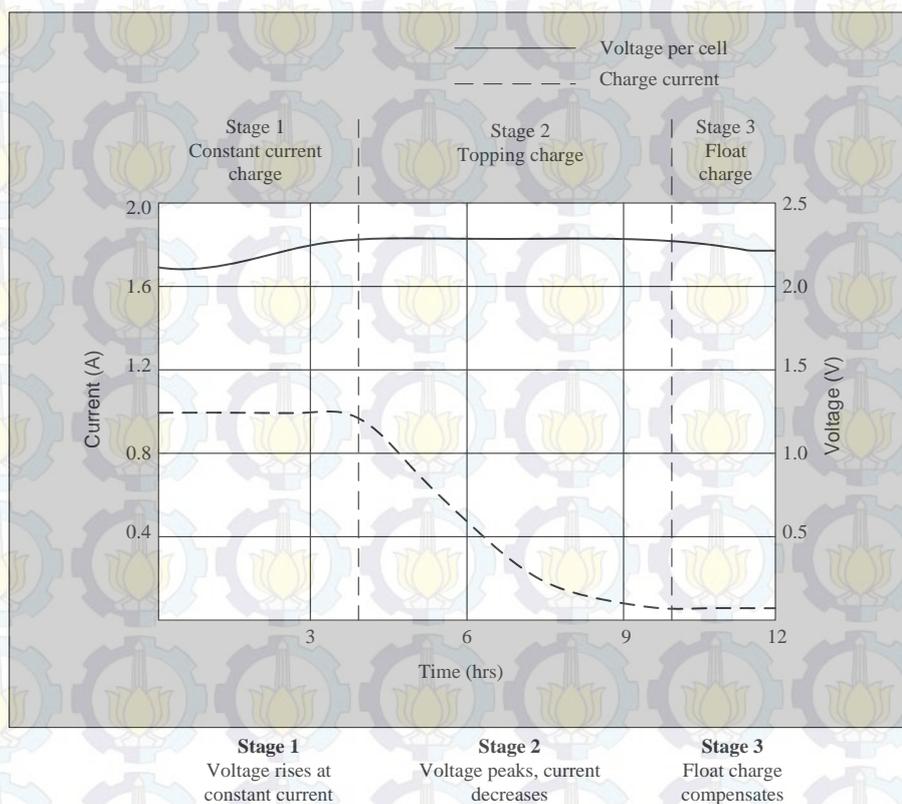
Keuntungan	Memiliki <i>self-discharge</i> terkecil
	Ekonomis dan Mannufatur yang sederhana.
	Mampu digunakan untuk kebutuhan akan arus <i>discharge</i> yang besar
Kerugian	Stabil digunakan saat suhu tinggi maupun rendah
	Berat
	Slow <i>charge</i> (Full <i>charge</i> bisa mencapai 14 jam)
	Harus disimpan dalam kondisi <i>charge</i> untuk mencegah <i>sulfation</i>
	Cycle terbatas
	Tidak ramah lingkungan

2.2 Charging pada Baterai Lead acid

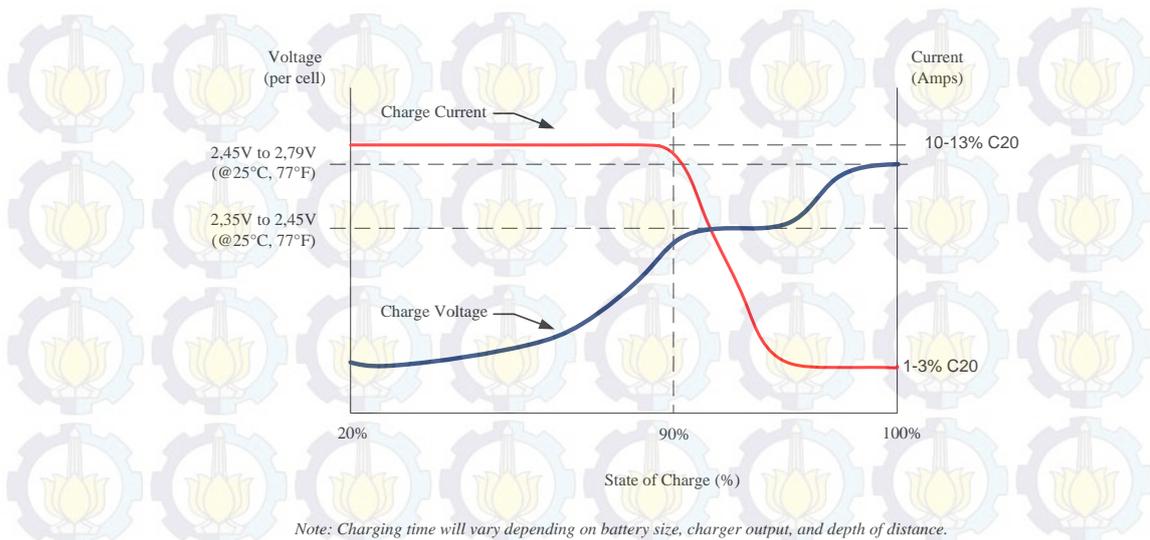
Charging pada baterai Lead acid menggunakan algoritma berbasis tegangan yang serupa dengan sistem *charging* pada baterai lithium-ion. Waktu *charging* sebuah baterai lead acid berkisar kurang lebih 12-16 jam untuk baterai dengan kapasitas yang besar. Untuk mengatasi waktu *charging* yang cukup lama dibutuhkan arus yang cukup besar dan metode *charge* multi-stage namun baterai lead acid tidak dapat mengalami *charging* secepat baterai lain.

Baterai lead acid memiliki tiga tahapan *charge* yang hampir sama dengan tiga tahapan *charging* pada baterai secara umum yaitu *charge* menggunakan arus konstan (*bulk*), *topping charge* beroperasi pada arus yang lebih rendah dan dalam keadaan saturasi serta float *charge* yang berfungsi sebagai kompensasi atas rugi-rugi dari *self-discharge* dari baterai.

Tahap pertama membutuhkan waktu sekitar setengah dari waktu *charging*. Pada saat tahap ini kapasitas baterai dapat terpenuhi hingga sekitar 70% dari kapasitas total. Tahap selanjutnya yaitu *topping charge* akan mengisi sisa kapasitas yang dibutuhkan oleh baterai. Tahap kedua memiliki tahap yang penting karena jika dihilangkan baterai tidak bisa mencapai kapasitas penuh. Baterai perlu *charging* hingga 100% dari kapasitas untuk menghindari sulfasi pada pelat negatif baterai.



Gambar 2.2 Karakteristik *Charging* pada Baterai Lead acid



Gambar 2.3 *Charging* menggunakan *constant current* pada baterai lead acid jenis Trojan (Trojan Battery Company, 2015)

Metode *charging* baterai lead acid constant current adalah metode *charging* termudah yang dapat diterapkan secara langsung. Gambar 2.3 adalah metode *charging* yang sering digunakan untuk baterai jenis lead acid. Saat kondisi *charging* Namun, metode *constant current* tidak disarankan digunakan untuk baterai yang terhubung seri karena beberapa sel baterai akan mencapai kapasitas maksimum sebelum sel yang lain mencapainya. Jika hal ini diteruskan maka akan mengakibatkan kerusakan pada baterai.

Tabel 2.2 Batas tegangan yang diperkenankan pada mode *charging* ((Trojan Battery Company, 2015)

Tegangan Baterai	6 Volt	8 Volt	12 Volt
<i>Daily Charge</i>	7,4	9,87	14,8
<i>Absorption Charge for RE Application</i>	7,05-7,35	9,4-9,8	14,1-14,7
<i>Float Charge</i>	6,6	8,8	13,2
<i>Equalize Charge</i>	7,8	10,4	15,5

2.3 Faktor yang Mempengaruhi Baterai

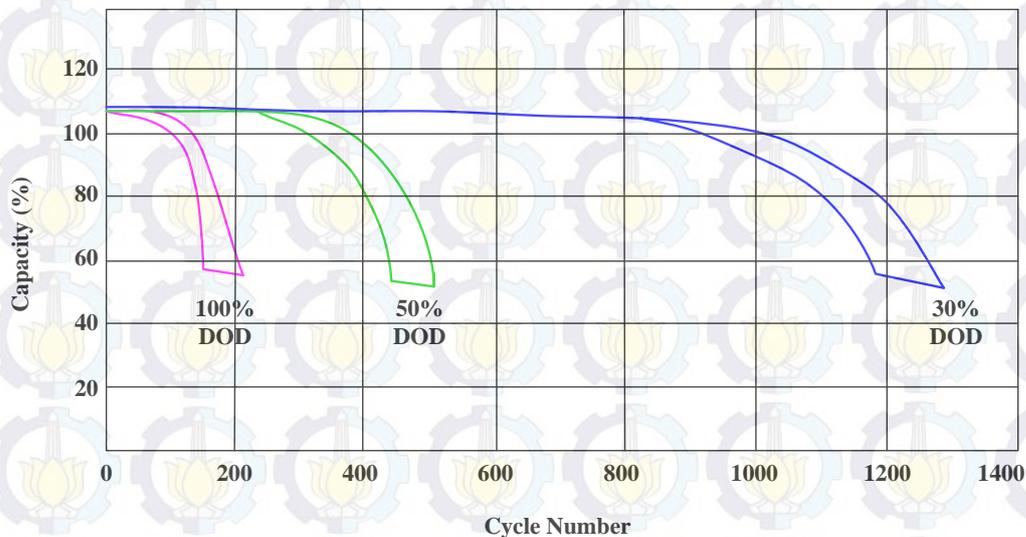
Seiring dengan waktu pemakaian, kapasitas baterai akan berangsur turun dikarenakan sulfasi dari pelat baterai akibat dari berbagai macam keadaan . Adapapun beberapa hal yang perlu diperhatikan yaitu :

- Kondisi *charging* atau *discharging* yang telah dialami baterai
- DOD baterai

- c. *Overcharge* dan *under discharge*
- d. Suhu rata-rata baterai

2.3.1. *Depth of Discharge (DOD)*

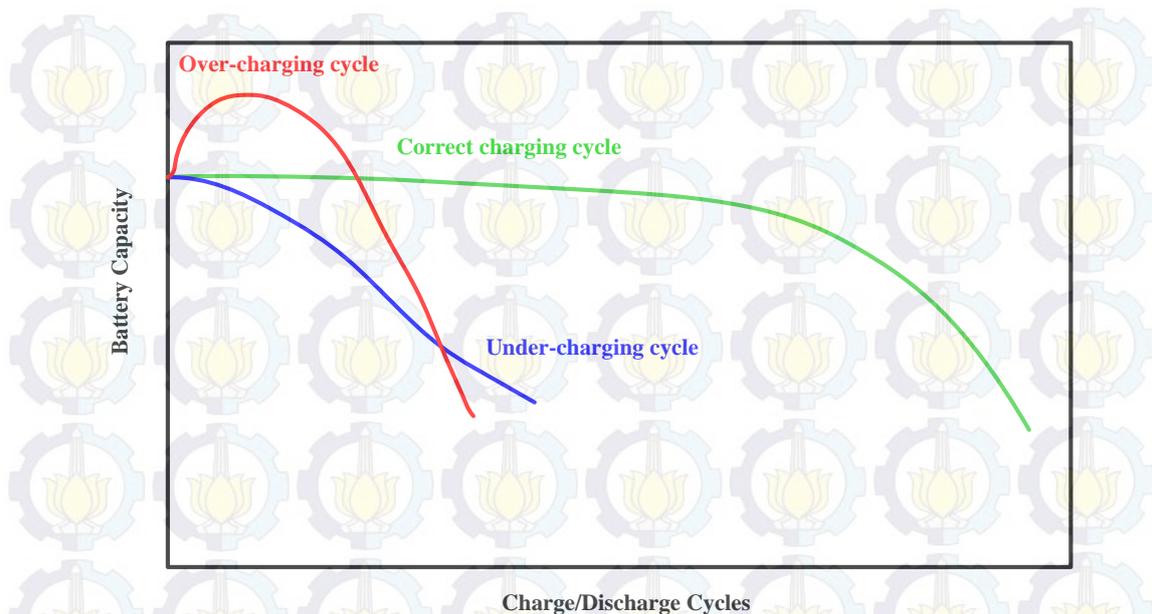
Depth of Discharge (DOD) adalah hubungan antara kapasitas baterai atau SOC sebagai parameter utama dalam merancang baterai untuk ditempatkan dalam sistem. Pada umumnya baterai dapat dikategorikan sebagai baterai dengan *deep-cycle* dan *shallow-cycle*. Baterai dengan *deep-cycle* memiliki DOD lebih dari 50% hingga 80%. Gambar 2.4 menunjukkan fungsi baterai terhadap jumlah siklus baterai dan DOD untuk baterai dengan *deep-cycle* dan *shallow-cycle*. Dari gambar 2.4 menunjukkan bahwa baterai dengan *deep-cycle* DOD lebih dari 50% dapat digunakan hingga 1000 siklus



Gambar 2.4 Hubungan antara kapasitas baterai, dod dan siklus baterai untuk baterai dengan *shallow-cycle*

2.3.2. *Overcharge* dan *Undercharge*

Selain DOD siklus pengisian muatan atau *charging* pada baterai juga memiliki peranan yang penting dalam menentukan lifetime dari baterai. Pengisian yang berlebihan maupun penggunaan yang berlebihan akan mempersingkat umur baterai.



Gambar 2.5 Pengaruh *overcharge* dan *undercharge* terhadap siklus baterai

Kondisi *overcharge/overdischarge* dapat mempengaruhi umur baterai karena dapat berakibat pada oksidasi, timbul gas serta dekomposisi eksotermik dari material aktif. *Overdischarge* pada elektroda positif dapat berakibat pada perubahan susunan kimiawi pada material aktif yang dapat berujung pada kerusakan masing-masing sela baterai. Gambar 2.5 menunjukkan pengaruh *charge* dan *discharge* terhadap umur baterai

2.4 *State of Charge* (SOC) dan Kapasitas Baterai Lead acid

State of charge (SOC) adalah salah satu bagian penting dalam transfer energi menggunakan baterai. SOC bermanfaat untuk menentukan kapasitas yang masih tersedia pada baterai karena SOC merepresentasikan presentase dari rating kapasitas total baterai. Selain itu, SOC dapat berfungsi sebagai indikator berapa jumlah energi yang dapat disalurkan sebelum dilakukan *charging* ulang. Gambar 2.6. adalah contoh sebuah penunjuk SOC pada baterai. Pada umumnya, SOC direpresentasikan sebagai prosentase dari kapasitas rating baterai bukan dari kapasitas baterai terakhir *charging*. Kapasitas rating baterai berbeda dengan kapasitas baterai terakhir *charging* karena faktor umur dan kondisi lingkungan baterai.



Gambar 2.6 Kapasitas baterai secara umum

Berbagai macam metode telah digunakan untuk menentukan mengukur SOC pada sebuah baterai namun belum memungkinkan untuk mengukur SOC secara langsung berdasarkan parameter fisik yang terukur. Adapun beberapa metode penentuan SOC adalah sebagai berikut :

- a. Pengukuran langsung
- b. Estimasi SOC berbasis *open circuit voltage (OCV)*
- c. Estimasi SOC berbasis Arus atau *Coulomb Counting*
- d. Pengukuran SOC dengan Hydrometer
- e. Pengukuran SOC dengan metode lainnya

Pada umumnya kapasitas dari sebuah sel baterai menunjukkan muatan atau kapasitas yang tersedia. Satuan dari kapasitas baterai adalah Ampere-hour (Ah). Satu Ampere adalah unit pengukuran yang digunakan sebagai satuan arus listrik dan didefinisikan sebagai Coulomb dari muatan yang melewati konduktor dalam satu detik. Kapasitas dari sebuah sel baterai berkaitan dari kuantitas material aktif yang terkandung di dalamnya yaitu elektrolit dan luas permukaan dari plat. Kapasitas baterai diukur saat kondisi *discharging* dengan arus yang konstan hingga mencapai tegangan terminal. Hal tersebut dilakukan dengan suhu konstan yaitu sekitar 25°C (77F). Kapasitas dari baterai didapatkan dari hasil perkalian arus *discharging* dengan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai tegangan terminal.

Rated capacity adalah salah satu istilah umum yang digunakan untuk mendefinisikan kemampuan baterai dalam memberikan arusnya. Manufaktur

produsen baterai seringkali mencantumkan rated capacity baterai dalam bentuk ampere-hours pada rating *discharge* tertentu. Sebagai contoh, sebuah baterai lead acid memiliki kapasitas 200Ah untuk rating 10 jam akan memberikan arus 20 A dalam waktu 10 jam dalam kondisi suhu standar (25°C). sebagai kemungkinan lain, *discharge* rate dapat didefinisikan sebagai *charge* rate atau C-rate dari baterai. sebagai contoh sebuah baterai memiliki rating kapasitas sebesar 200ah pada *discharge* rate sebesar C/10. *Discharge* rate dari baterai tersebut dapat didapatkan dari :

$$C/10 \text{rate}(\text{amperes}) = 200\text{Ah} / 10\text{h} = 20\text{A} \quad (2.4)$$

Semakin besar *discharge* rate dari sebuah baterai maka semakin kecil kapasitas baterai tersebut dan begitu pula sebaliknya. *Discharge* rate dari baterai lead acid yang digunakan sebagai UPS biasanya adalah C/8, C/10 dan C/20.

2.4.1. Pengukuran Langsung

Pada metode pengukuran langsung mengasumsikan bahwa arus yang mengalir dalam sel baterai adalah konstan. SOC dihitung berdasarkan perubahan waktu sesuai dengan persamaan

$$\Delta q = i \Delta t \quad (2.5)$$

Pada metode ini waktu saat *charging* dan *discharging* akan dijumlahkan baik positif maupun negatif untuk menentukan SOC. Metode ini memiliki kelemahan yaitu arus diasumsikan selalu konstan. Pada kenyataannya arus yang mengalir pada baterai tidak pernah konstan, arus pada baterai akan berbeda saat proses *charging* dan *discharging*.

2.4.2. SOC Berdasarkan *Open Circuit Voltage* (OCV)

Metode ini dapat diaplikasikan untuk baterai dengan tegangan yang sebanding dengan SOC seperti pada baterai lead acid. SOC dapat dihitung dengan mengukur *open circuit voltage* (OCV). Untuk mendapatkan tegangan OCV baterai lead acid harus dikondisikan *idle* selama 6 jam sebelum dilakukan pengukuran. Adapun contoh pengukuran SOC berdasarkan tegangan pada baterai lead acid Trojan ditunjukkan oleh tabel 2.3.

Tabel 2.3 pengukuran SOC berdasarkan tegangan OCV pada trojan (Trojan Battery Company, 2015)

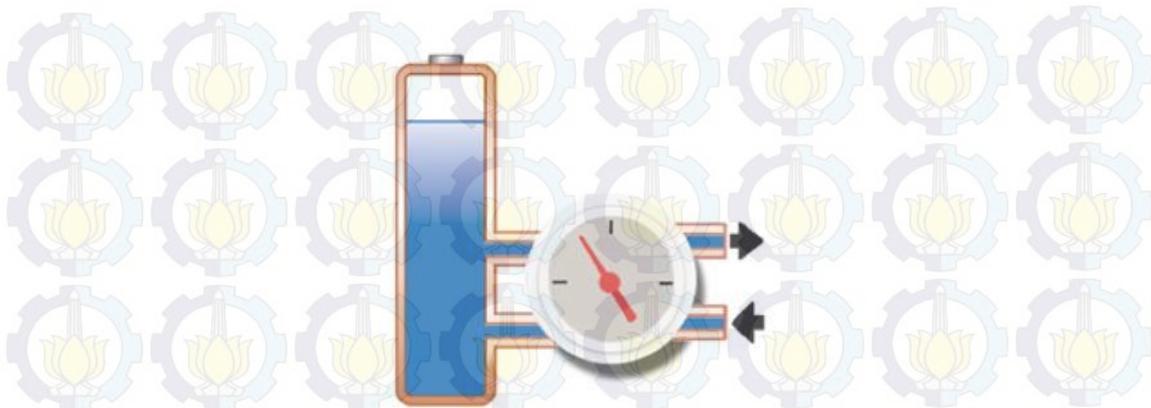
SOC (%)	Open Circuit Voltage (Volts), suhu 25°C		
	Tegangan sel	Baterai 6 V	Baterai 12 V
100	2,212	6,37	12,73
90	2,103	6,31	12,62
80	2,083	6,25	12,50
70	2,062	6,19	12,37
60	2,04	6,12	12,24
50	2,017	6,05	12,10
40	1,993	5,98	11,96
30	1,969	5,91	11,81
20	1,943	5,83	11,66
10	1,918	5,75	11,51

2.4.3. *Coulomb Counting* atau Pengukuran SOC berbasis Arus

Estimasi SOC menggunakan metode ini hampir sama dengan metode pengukuran SOC secara langsung yang menggunakan persamaan dasar yaitu :

$$q = \int_0^t i(t) dt \quad (2.6)$$

Nilai q diperoleh dari nilai integral dari arus. Metode ini menjumlahkan arus yang masuk dan keluar dari baterai dalam waktu yang sama untuk menentukan kapasitas dari baterai tersebut. Metode ini disebut pula sebagai metode *Coulomb Counting*. Arus yang mengalir masuk dan keluar dari baterai diperoleh dengan cara mengukur tegangan drop pada resistor dengan menggunakan hukum Ohm. Metode *Coulomb counting* hanya menghitung arus yang keluar masuk baterai melalui rangkaian eksternal dengan mengasumsikan bahwa nilai kapasitas baterai adalah hanya fungsi arus. Pada kenyataannya, SOC dari baterai tidak hanya ditentukan oleh fungsi arus saja, melainkan bergantung pada suhu, *self-discharge rate*, kapasitas yang diperkenankan dan umur baterai. Kelemahan dari metode ini adalah seringkali menimbulkan eror yang dapat dihindari dengan upaya kalibrasi dan memprogram ulang secara berkala.



Gambar 2.7 Ilustrasi Pengukuran Berdasarkan *Coulomb Counting*

2.4.4. Hydrometer

Salah satu metode untuk memperkirakan SOC adalah menggunakan hydrometer namun metode ini hanya dapat diterapkan untuk baterai lead acid yang *overcharging* dan baterai nickel-cadmium. Cara kerja dari metode ini adalah saat baterai dalam kondisi *charging*, asam sulfat didalam sel baterai akan menjadi lebih berat disebabkan oleh gravitasi spesifik (*Specific gravity*) yang meningkat. Sebaliknya, jika baterai dalam kondisi *discharge* sehingga SOC mengalami penurunan maka asam sulfat akan melepaskan diri dari elektrolit yang menempel pada plat dan membentuk lead sulfate. Kerapatan dari elektrolit akan menjadi lebih ringan serupa dengan air dan *specific gravity* akan menjadi lebih rendah.

Tabel 2.4 menunjukkan standar BCI untuk estimasi SOC saat perawatan baterai free starter dengan antimony.

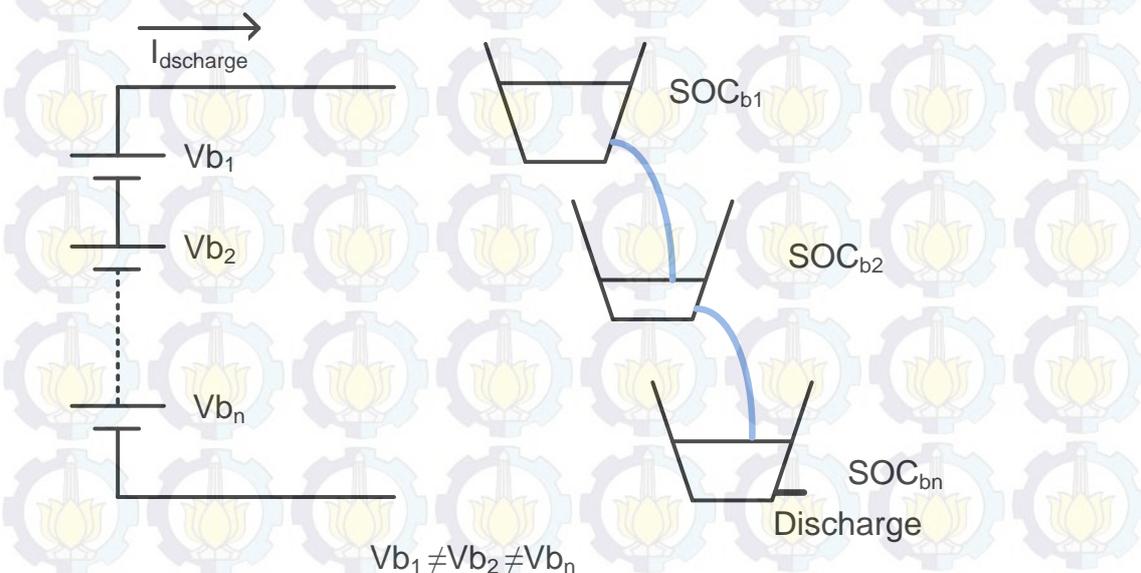
Tabel 2.4 Standar BCI untuk estimasi SOC dari *maintenance-free starter battery* dengan *antimony*

SOC	<i>Specific Gravity</i> rata-rata	Open Circuit Voltage			
		2 Volt	6 Volt	8 Volt	12 Volt
100%	1,265	2,10	6,32	8,43	12,65
75%	1,225	2,08	6,22	8,30	12,45
50%	1,190	2,04	6,12	8,16	12,24
25%	1,155	2,01	6,03	8,04	12,06
0%	1,120	1,98	5,95	7,72	11,89

Estimasi menggunakan hydrometer dilakukan dalam suhu 26°C (78°F) dan baterai diistirahatkan selama 24 jam setelah kondisi *charge* dan *discharge*.

2.5 Teknik Ekualisasi Baterai

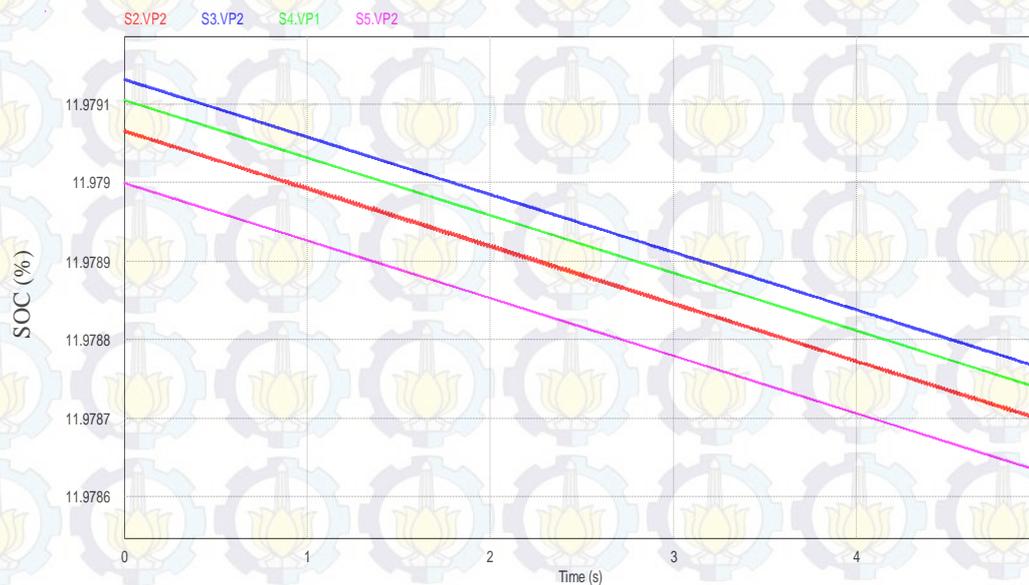
Untuk mendapatkan tegangan maupun kapasitas yang sesuai dengan keinginan seringkali baterai dihubungkan seri maupun paralel. Baterai dihubungkan seri untuk mendapatkan tegangan yang sesuai sedangkan baterai dihubungkan paralel untuk mendapatkan kapasitas yang diinginkan. Pada aplikasinya saat baterai dihubungkan seri, tegangan baterai antara satu dengan lainnya berbeda sehingga kapasitas masing-masing baterai pun akan berbeda. Gambar 2.8 menunjukkan ilustrasi tegangan dan kapasitas yang berbeda pada baterai terhubung seri. Perbedaan tersebut akan berpengaruh bila baterai dihubungkan dengan beban atau terhubung dengan *charger*. V_{b1} , V_{b2} , V_{bn} memiliki tegangan yang berbeda sehingga SOC_{b1} , SOC_{b2} dan SOC_{bn} akan berbeda pula. Ketika baterai terhubung beban atau mengalirkan $I_{discharge}$ maka kapasitas masing masing baterai atau SOC akan menurun, hal ini diilustrasikan sebagai air pada masing-masing wadah. Air dalam wadah tersebut akan berbeda sesuai dengan kondisi awal air dalam wadah. Semakin sedikit air dalam wadah maka semakin cepat habis teralirkan. Jika wadah dengan air paling sedikit sudah habis maka air dalam wadah lainnya belum tentu habis. Hal tersebut adalah ilustrasi SOC pada baterai.



Gambar 2.8 Ilustrasi tegangan dan kapasitas baterai yang tidak sama

Ketidakeimbangan sel baterai dalam sistem manajemen baterai adalah salah satu faktor yang mempengaruhi umur baterai. Jika sebuah sistem baterai tidak memiliki sistem penyeimbang antara baterai akan mengakibatkan kapasitas total dari sistem baterai akan menurun dan berakibat pada gagalnya sistem baterai tersebut. Beberapa faktor yang mengakibatkan ketidakeimbangan sel baterai dibagi menjadi dua faktor utama yaitu faktor eksternal dan faktor internal. Faktor internal adalah manufaktur baterai, resistansi internal yang berbeda dan self *discharge* yang berbeda sedangkan faktor eksternal diakibatkan oleh peralatan di luar baterai yang mengakibatkan berkurangnya energi baterai. Ekualisasi baterai dalam sebuah sistem manajemen baterai dibuat untuk mengatasi ketidakeimbangan baterai. Ekualisasi mengatur sedemikian rupa agar SOC pada masing-masing baterai memiliki nilai yang sama.

Gambar 2.9 menunjukkan sebuah sistem yang terdiri dari empat baterai yang terhubung seri dengan SOC yang berbeda. Jika dalam sistem tersebut diberikan rangkaian ekualisasi maka dapat meningkatkan kapasitas pack baterai dan dapat dioperasikan lebih lama.



Gambar 2.9 Tegangan dari baterai tanpa menggunakan rangkaian ekualisasi

Teknik ekualisasi diklasifikasikan menjadi 2 macam berdasarkan media disipasi yaitu teknik ekualisasi aktif dan teknik ekualisasi pasif.

2.5.1 Teknik Ekualisasi Pasif

Teknik ekualisasi pasif seringkali disebut sebagai *dissipative charge equalization technique* karena elemen disipasi dihubungkan paralel dan digunakan untuk mengurangi energi ekstra dari sel baterai. Jika dalam sebuah sistem baterai terdapat baterai dengan SOC maksimum atau tegangan maksimum saat kondisi *charging* maka sel tersebut akan di-*bypassed* melalui elemen disipasi. Saat kondisi arus *charging* melewati elemen disipasi, energi ekstra baterai dengan SOC maksimum akan menurun sehingga seluruh sel baterai akan memiliki SOC yang sama. Teknik ekualisasi aktif dibagi menjadi 2 macam antara lain :

- Resistive shunt equalization
- Analog shunt equalization.

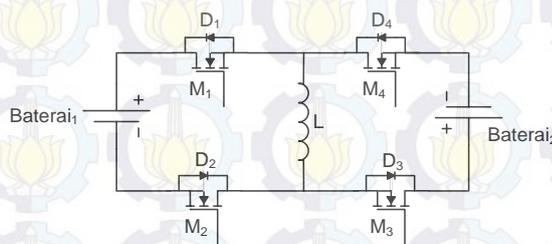
2.5.2 Teknik Ekualisasi Aktif

Teknik ekualisasi aktif berbeda dengan teknik ekualisasi pasif. Teknik ekualisasi pasif disebut juga dengan *non-dissipative charge equalization technique* karena energi tidak dikurangi melalui elemen pasif namun metode ini menggunakan elemen aktif atau non-disipasi untuk transfer energi dari baterai satu menuju baterai lainnya. Berdasarkan energi transfer antar baterai, teknik ekualisasi aktif dibagi menjadi ekualisasi secara global dan ekualisasi secara local. Jika transfer energi dilakukan antara baterai satu dengan baterai yang terletak disampingnya saja, maka termasuk dalam ekualisasi lokal. Bila transfer energi berlangsung antara baterai berkapasitas atau SOC maksimal dengan baterai berkapasitas minimum maka disebut ekualisasi secara global. Beberapa metodologi ekualisasi menggunakan teknik ekualisasi aktif antara lain :

- *Switched capacitor equalization,*
- *Switched reactor equalization,*
- *Resonant equalization,*
- *Flyback DC-DC converter equalization,*
- *Magnetic core equalization,*
- *Non-dissipative current diverter.*

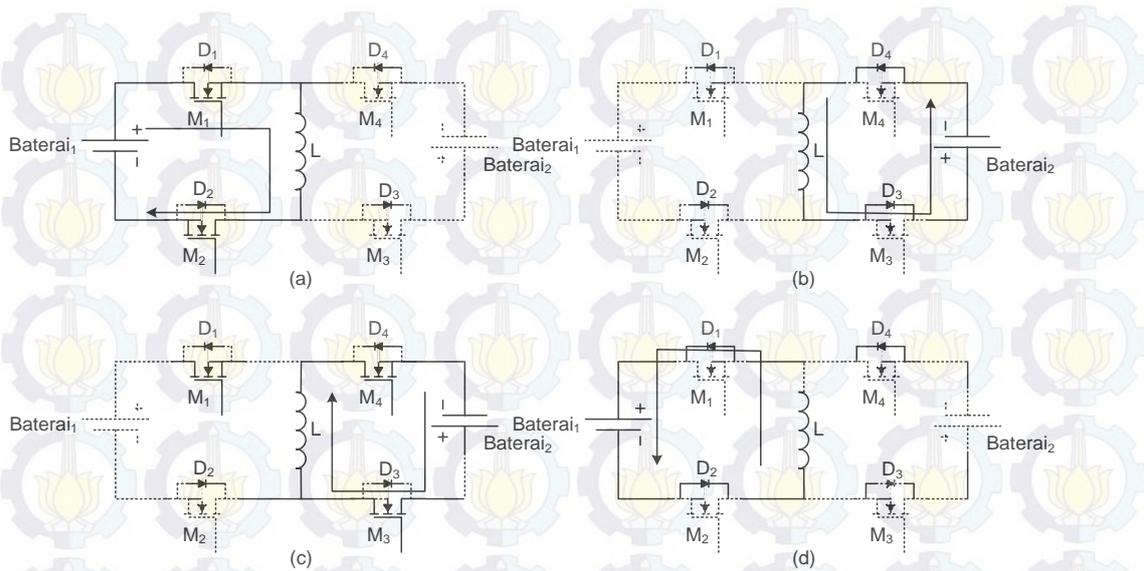
2.6 Rangkaian Ekualisasi dengan Buck/Boost Bi-Directional

Topologi Konverter DC-DC yang digunakan menggunakan induktor sebagai media penyimpanan sementara untuk menyalurkan energi yang tersimpan dari baterai dengan SOC tertinggi menuju baterai dengan SOC yang paling rendah. Topologi konverter *bi-directional* DC/DC untuk dua baterai ditunjukkan pada Gambar 2.10. Transfer Energi dilakukan dengan mentrigger mosfet M_1 - M_2 dan M_3 - M_4 secara bergantian. Sebagai contoh, Baterai₁ memiliki SOC yang lebih tinggi dibandingkan dengan Baterai₂.



Gambar 2.10 Topologi rangkaian ekualisasi menggunakan konverter DC/DC bi-directional pada dua baterai

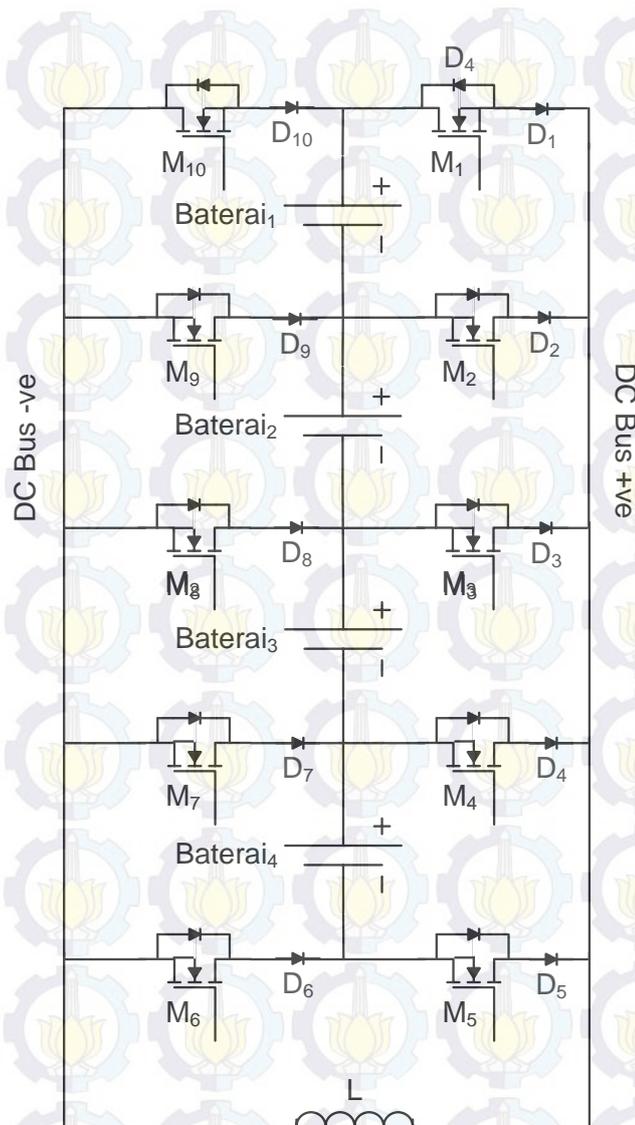
Pada kondisi pertama *switching* akan mentrigger M_1 dan M_2 sehingga Baterai₁ akan mengalirkan energi menuju induktor. Pada kondisi berikutnya *switching* akan menyalakan M_3 dan M_4 untuk mengalirkan energi yang tersimpan di induktor menuju Baterai₂. Hal tersebut akan berlangsung hingga SOC pada Baterai₁ sama dengan Baterai₂. Topologi transfer energi antara Baterai₁ dan Baterai₂ dapat dilihat pada Gambar 2.11(a) dan Gambar 2.11(b). Kondisi yang berkebalikan akan berlaku ketika Baterai₂ memiliki SOC yang lebih besar daripada Baterai₁. Kondisi transfer energi antara Baterai₂ menuju Baterai₁ dapat dilihat pada Gambar 2.11(c) dan Gambar 2.11(d) Pada Kondisi pertama M_3 - M_4 akan menyala terlebih dahulu untuk mengalirkan energi dari Baterai₂ menuju Baterai₁, kemudian pada kondisi selanjutnya M_1 - M_2 akan mengalirkan energi dari induktor menuju Baterai₁ hingga SOC Baterai₁ dan Baterai₂ memiliki nilai yang sama. Semakin besar jumlah baterai yang terhubung seri maka akan semakin kompleks rangkaian konverter yang digunakan. DC bus Untuk mempermudah transfer energi antar baterai terhubung seri dengan lebih dari dua buah. Rangkaian ekualisasi untuk empat baterai ditunjukkan pada Gambar 2.12.



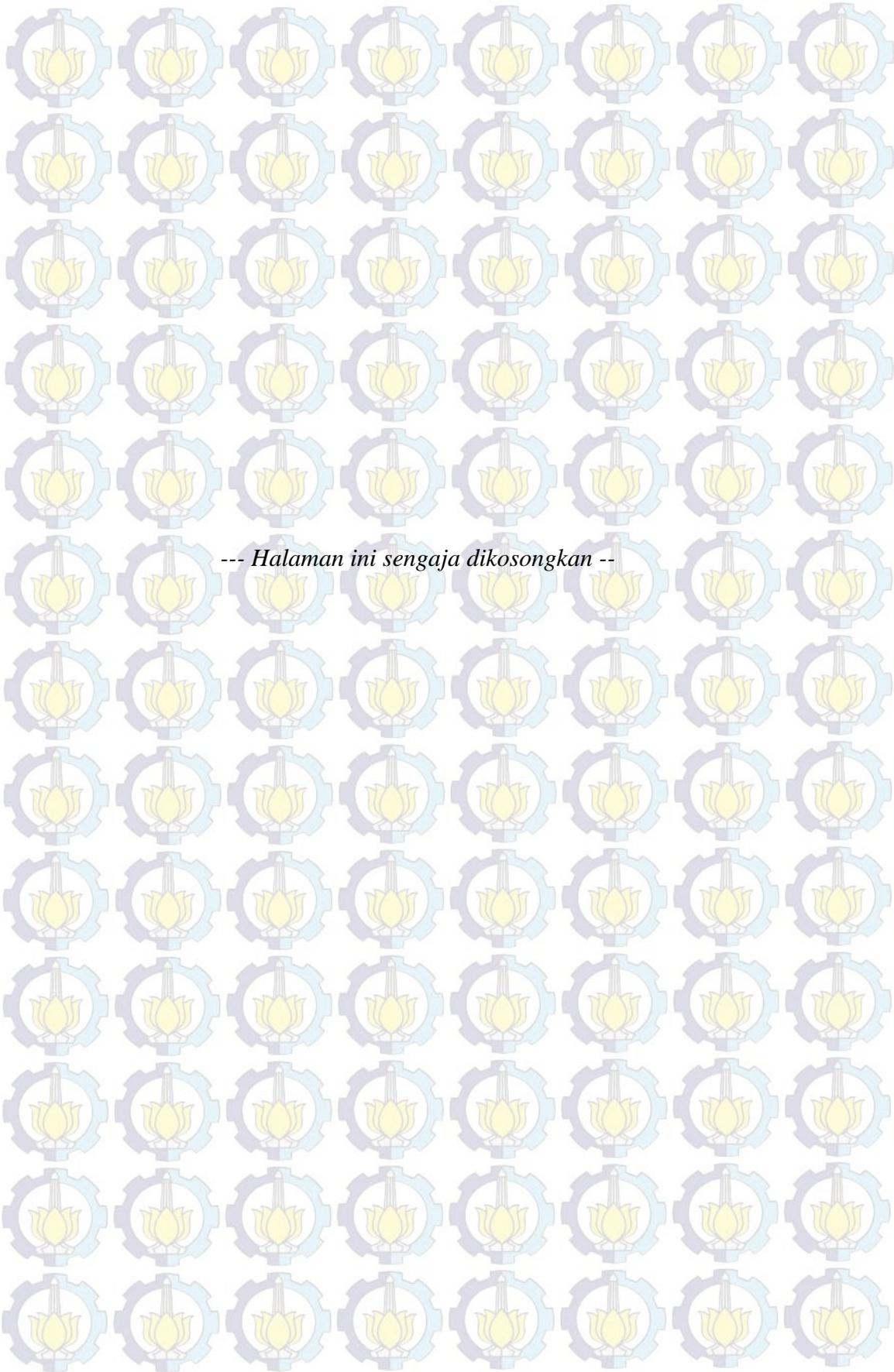
Gambar 2.11 (a) Baterai₁ discharge; (b) Baterai₂ charge; (c) Baterai₂ discharge; (d) Baterai₁ charge (Sriram, 2013)

Sebagai contoh Baterai₁ sebagai baterai yang dengan SOC tertinggi dan Baterai₄ dengan SOC terendah sehingga tahapan aliran energi adalah sebagai berikut :

- Kondisi pertama M_1 - M_9 ON sehingga energi akan mengalir dari Baterai₁ menuju induktor.
- Kondisi selanjutnya M_1 - M_9 OFF dan M_5 - M_7 ON sehingga energi akan mengalir dari induktor menuju Baterai₄
- Hal ini akan berlangsung bergantian hingga tegangan seluruh baterai memiliki SOC yang sama.



Gambar 2.12 Topologi ekualisasi untuk empat baterai (Sriram, 2013)

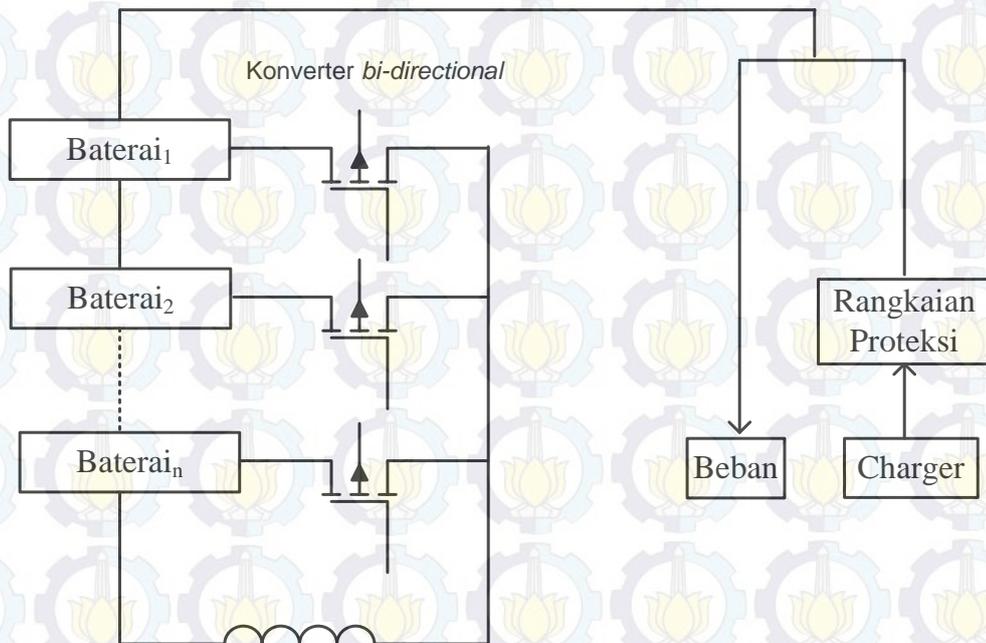


BAB 3

DESAIN SISTEM EKUALISASI BATERAI

3.1 Konfigurasi Sistem

Secara umum sistem keseluruhan dari ekualisasi baterai ditunjukkan pada Gambar 3.1. Baterai yang digunakan adalah baterai jenis lead acid. Komponen utama dalam sistem ini adalah konverter *bi-directional* sebagai rangkaian ekualisasi aktif, pemodelan baterai, rangkaian proteksi, rangkaian beban, dan *constant current* sebagai *charger*.

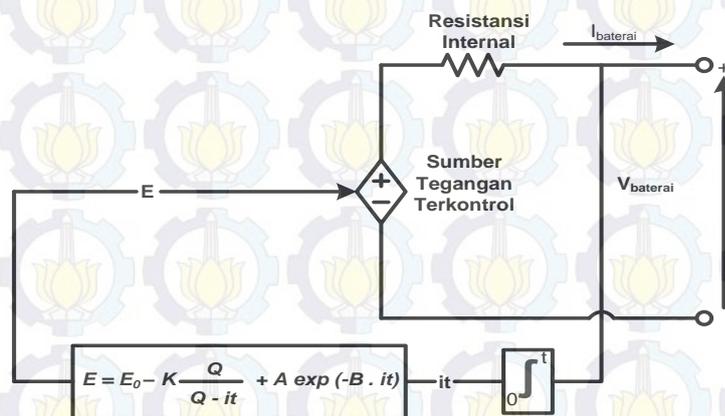


Gambar 3. 1 Konfigurasi sistem keseluruhan

3.2 Parameter Baterai Lead acid

Hampir semua jenis baterai dapat digunakan untuk sistem dengan energi terbarukan. Baterai Lead acid seringkali menjadi pilihan utama dalam penggunaan baterai karena harganya yang ekonomis, *deep cycle* dan umur baterai yang cukup panjang. Pada umumnya terdapat tiga macam pemodelan baterai yang digunakan secara luas yaitu pemodelan secara eksperimen, elektrokimia dan rangkaian

ekivalen. Pemodelan secara eksperimen dan pemodelan elektrokimia tidak cocok untuk merepresentasikan dinamika sel baterai yang digunakan untuk estimasi SOC. Pemodelan yang paling cocok digunakan untuk merepresentasikan karakteristik baterai adalah pemodelan dengan rangkaian ekivalen. Pemodelan rangkaian ekivalen sederhana yang digunakan adalah model Sheperd. Sheperd mengembangkan model baterai yang terdiri dari sumber tegangan yang terhubung seri dengan resistansi internal seperti pada Gambar 3.1. Sumber tegangan tersebut diatur oleh persamaan yang merepresentasikan perilaku elektrokimia dari baterai yang terdiri dari tegangan terminal, *open circuit voltage*, resistansi internal, arus *discharge* dan SOC.



Gambar 3.2 Rangkaian Ekivalen Baterai Non-Linear (Oliver,T., Louis, D. Abdel-Allah, 2007)

Dimana :

$\int idt$ adalah kapasitas aktual baterai (Ah)

E adalah tegangan tanpa beban (V),

E_0 adalah tegangan konstan baterai (V),

K adalah tegangan polarisasi (V),

Q adalah kapasitas baterai (Ah),

R adalah resistansi internal (Ω),

V_{baterai} adalah tegangan baterai (V)

A adalah amplitude daerah eksponensial (V), dan

B adalah konstanta waktu invers daerah eksponensial (Ah^{-1}).

Model Sheperd memiliki persamaan non-linear :

$$E = E_0 - K \frac{Q}{Q - it} + A \exp(-B \cdot it) \quad (3.1)$$

Persamaan tersebut merupakan tegangan non-linear yang merepresentasikan tegangan baterai yang sesungguhnya. Maksud dari pernyataan tersebut adalah ketika baterai hampir dalam kondisi *discharge* sepenuhnya dan tidak ada arus yang mengalir, tegangan akan bernilai mendekati nol. Model ini memiliki hasil yang akurat dan dapat merepresentasikan perilaku baterai pada umumnya.

Model baterai Sheperd berdasarkan beberapa asumsi dan memiliki batasan antara lain sebagai berikut :

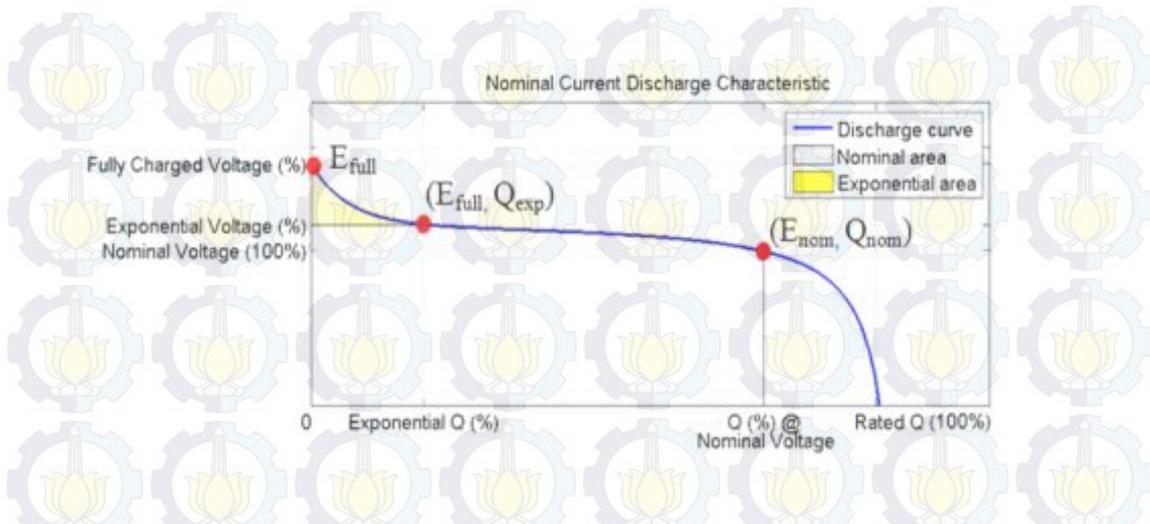
1. Asumsi model baterai

- Resistansi internal diasumsikan konstan baik saat kondisi *charging* maupun *discharging* dan tidak berubah dengan amplitudo arus.
- Parameter model baterai diperoleh dari karakteristik baterai saat kondisi *discharging* dan diasumsikan sama ketika kondisi *charging*.
- Kapasitas baterai tidak berubah seiring dengan perubahan amplitudo arus (tidak ada efek Peukert)
- Suhu tidak berpengaruh pada perilaku baterai
- Self-*discharge* dari baterai tidak direpresentasikan secara detail
- Model baterai ini tidak dipengaruhi oleh memori yang tersimpan

2. Batasan terhadap model baterai

- Tegangan minimal baterai adalah 0 V dan tegangan maksimal dari baterai adalah tak terhingga
- Kapasitas maksimum dari baterai adalah 0Ah dan kapasitas maksimum baterai tidak terbatas. (SOC baterai dapat melebihi nilai 100% jika baterai mengalami *overcharge*)

Parameter dari model baterai lead acid dapat diperoleh dari karakteristik kurva *discharge* dari baterai. Gambar 3.3 menunjukkan karakteristik *discharge* dari baterai lead acid pada model ini. Seluruh parameter dapat diperoleh dari perhitungan tiga titik, yaitu tegangan *charging* (E_{full}), daerah eksponensial (E_{exp} , Q_{exp}), dan daerah nominal (E_{nom} , Q_{nom}).



Gambar 3.3 Karakteristik kurva *discharge* dari baterai

3.2.1 Resistansi Internal

Resistansi internal merepresentasikan tegangan drop yang diakibatkan oleh current deviation dari baterai selain itu, resistansi internal mempengaruhi tegangan output dari baterai dan efisiensi. Hubungan antara kapasitas baterai, efisiensi, dan tegangan nominal baterai ditunjukkan persamaan :
Arus rating diperoleh dari persamaan kurva *discharge*

$$I_{nom} = Q_{nom} \times C / 1jam \quad (3.2)$$

Sehingga didapatkan persamaan

$$\eta = 1 - \frac{0,2 \times R \times Q_{nom}}{V_{nom}} \quad (3.3)$$

$$R = V_{nom} \frac{1 - \eta}{C / 1jam \times Q_{nom}} \quad (3.4)$$

$$R = 12 \frac{1 - 99,95\%}{0,5 \times 0,2517} \quad (3.5)$$

$$R = 0,6\Omega \quad (3.6)$$

3.2.2. Parameter Model Baterai

Parameter – parameter diperoleh dari tiga titik dari kurva yang ditunjukkan pada Gambar 3.3. Tegangan *fully charge*, titik akhir dari zona eksponensial

(tegangan dan *charge*) dan titik akhir dari zona nominal (tegangan dan *charge*).

Dari titik tersebut dapat diperoleh nilai parameter –parameter :

$$\left. \begin{aligned} A &= E_{full} - E_{exp} \\ B &= \frac{3}{Q_{exp}} \\ K &= [E_{full} - E_{nom} + A(-BQ_{nom}) - 1] \frac{Q - Q_{nom}}{Q_{nom}} \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

dengan,

E_{full} adalah tegangan baterai saat terisi penuh,

E_{exp} adalah tegangan baterai saat kondisi eksponensial,

E_{nom} adalah tegangan nominal baterai,

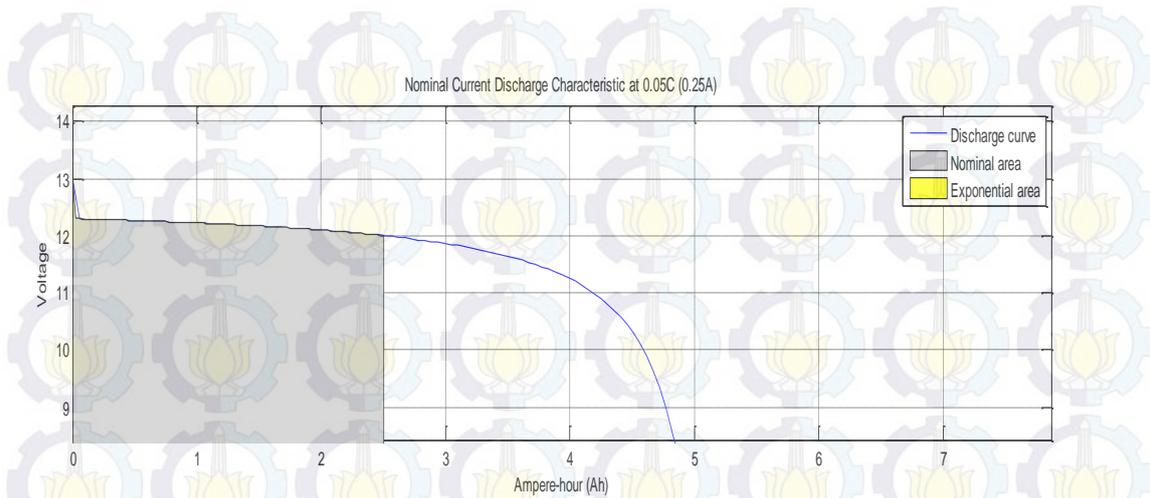
Q_{exp} adalah muatan baterai saat kondisi eksponensial,

Q_{nom} adalah muatan nominal baterai.

Dari persamaan diatas diperoleh parameter baterai seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.1.

Tabel 3. 1 Parameter baterai

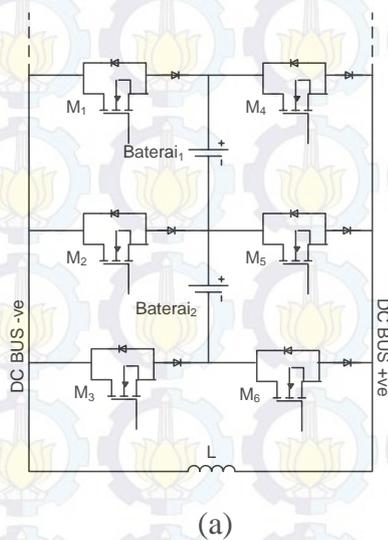
Parameter	Nilai
Q_{exp}	0,005245
Q_{nom}	0,2517
E_{exp}	12,3Volt
E_{nom}	12 Volt
E_{full}	12,96 Volt
A	0,66
B	7500
K	0,33
$R_{internal}$	0,6 Ω

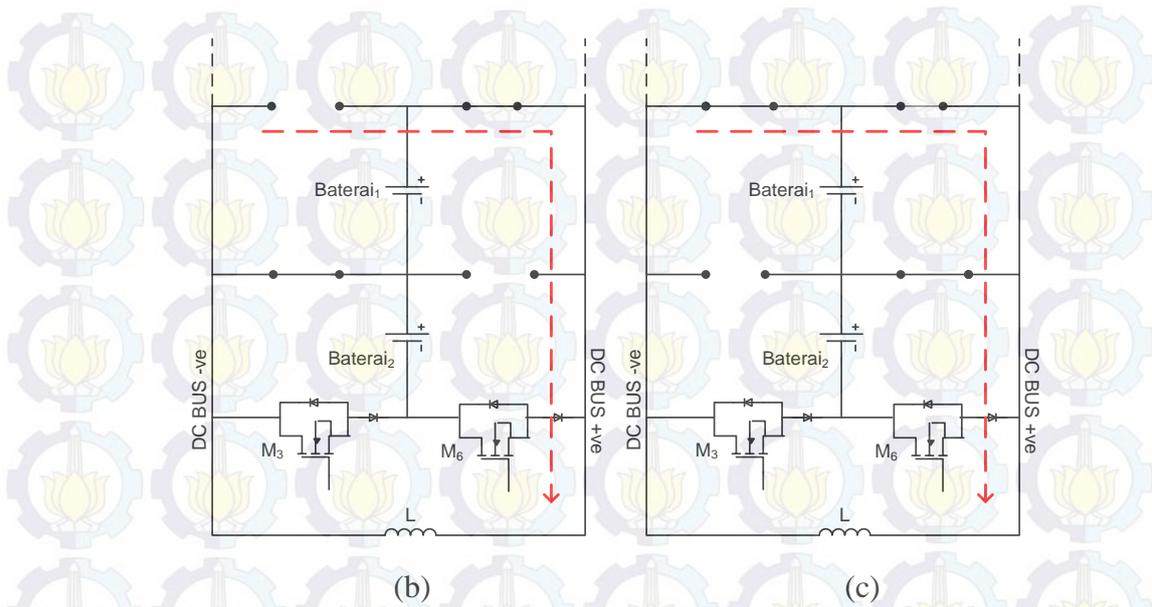


Gambar 3.4 Kurva karakteristik *discharge* baterai lead acid 0,5Ah 12 Volt

3.3 Karakteristik Rangkaian Konverter *Bi-Directional*

Rangkaian konverter merupakan rangkaian utama dalam proses ekualisasi baterai terhubung seri. Penentuan parameter konverter Bi-directional diperoleh dari penurunan persamaan rangkain konverter *bi-directional*. Sebagai asumsi aliran daya mengalir dari Baterai₁ menuju induktor kemudian dari induktor menuju Baterai₂ seperti yang terlihat pada Gambar 3.5(a). Pada kondisi pertama M_1 - M_2 ON sehingga energi akan mengalir dari Baterai₁ menuju induktor. M_1 - M_2 OFF dan M_3 - M_4 ON pada kondisi berikutnya sehingga mengalirkan energi dari induktor menuju Baterai₂





Gambar 3.5(a) Topologi untuk transfer energi dari Baterai₁ menuju Baterai₂ (b) M₄ dan M₂ ON (c) M₂ dan M₆ ON

Saat Baterai₁ kuat dan Baterai₂ lemah maka :

1. M₄ dan M₂ ON

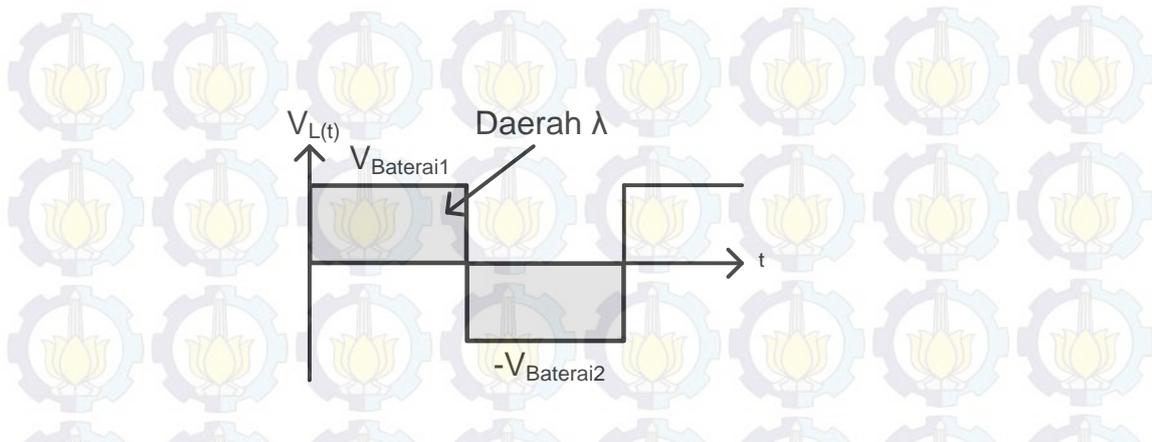
$$\left\{ \begin{array}{l} -V_{B1} + V_L(t_{4,2}) = 0 \\ V_L(t) = V_{B1} \\ \frac{di_L}{dt_{4,2}} = \frac{V_{B1}}{L} \end{array} \right\} \quad (3.8)$$

Sedangkan pada saat kondisi M₂ dan M₆ ON diperoleh :

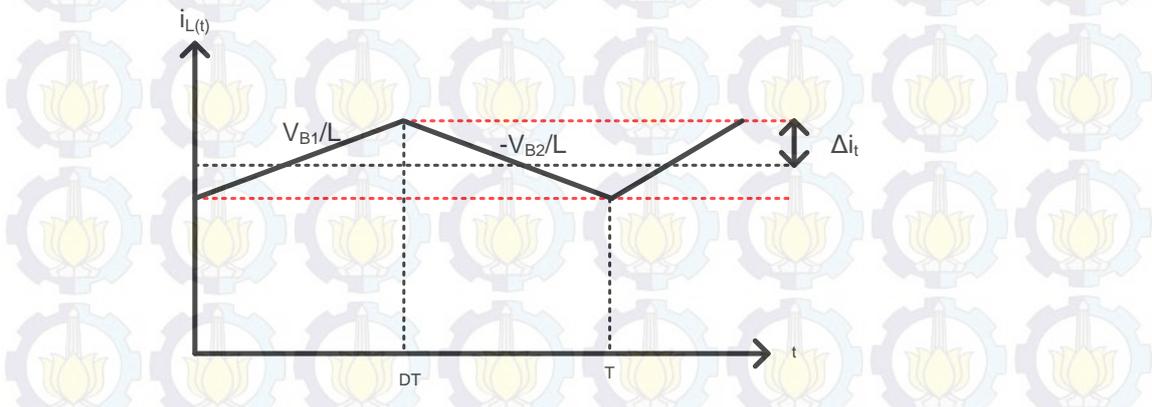
2. M₂ dan M₆ ON

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{B2} + V_L(t_{7,3}) = 0 \\ V_L(t_{7,3}) = -V_{B2} \\ L \frac{di_L}{dt_{7,3}} = -V_{B2} \\ \frac{di_L}{dt_{7,3}} = \frac{-V_{B2}}{L} \end{array} \right\} \quad (3.9)$$

Dari persamaan (3.8) dan (3.9) diperoleh gelombang tegangan induktor saat M₄ dan M₂ ON yang ditunjukkan oleh Gambar 3.6 dan gelombang arus induktor M₂ dan M₆ ON pada Gambar 3.7.



Gambar 3.6 Gelombang tegangan induktor



Gambar 3.7 Gelombang arus induktor

Daerah λ pada Gambar 3.6

$$\lambda = \int_0^{T_s} V_L(t) dt = (V_{B1} \cdot DT_{4,2}) + (-V_{B2} \cdot DT_{2,6})$$

$$\langle V_L \rangle = \frac{\lambda}{T} = DT_{4,2} V_{B1} - DT_{2,6} V_{B2}$$

$$0 = DV_{B1} - DV_{B2}$$

$$DV_{B1} = DV_{B2}$$

$$DV_{B1} = (1-D)V_{B2}$$

$$DV_{B1} = V_{B2} - DV_{B2}$$

$$D(V_{B1} + V_{B2}) = V_{B2}$$

$$D = \frac{V_{B2}}{V_{B1} + V_{B2}}$$

(3.10)

Dari persamaan *duty cycle* pada persamaan (3.8) didapatkan kesimpulan bahwa *duty cycle* dari rangkaian ini tidak dapat melebihi nilai 0.5. Untuk menghitung Δi_L pada Gambar 3.7 adalah sebagai berikut :

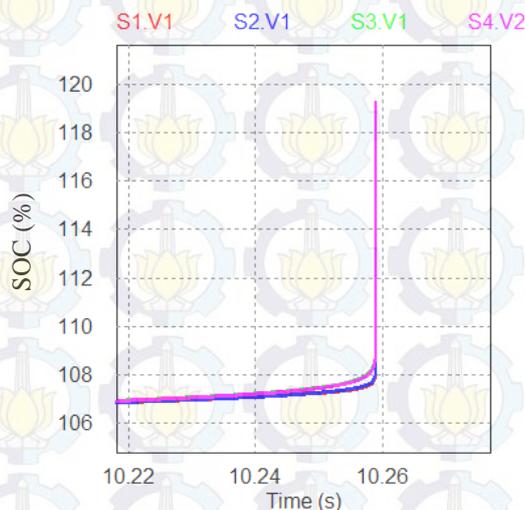
Perubahan $\Delta i_L = (slope)(\text{panjang subinterval})$

$$2\Delta i_L = \frac{V_{B1}}{L} DT \quad (3.11)$$

$$\Delta i_L = \frac{V_{B1}}{2L} DT \quad (3.12)$$

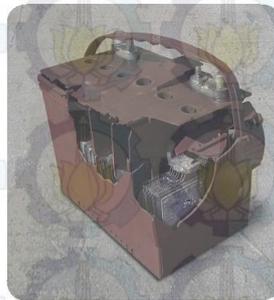
3.4 Rangkaian Proteksi Baterai

Dalam keadaan *charging* menggunakan power supply bernilai besar maupun *charging* dalam waktu yang cukup lama mengakibatkan siklus baterai menjadi lebih singkat dan berujung kepada kerusakan baterai secara permanen. Hal ini disebabkan oleh saat terjadi *overcharge* pada baterai, di dalam baterai tersebut akan terbentuk korosi grid, pembentukan gas, dan konsumsi air di dalam senyawa elektrolit baterai. Fenomena *overcharging* seringkali menjadi penyebab utama kegagalan pada baterai. Selain dapat mempersingkat umur baterai, *overcharging* dapat mengakibatkan kejadian yang lebih berbahaya. Oleh karena itu dibutuhkan sebuah rangkaian proteksi terhadap *overcharge* untuk menjaga siklus hidup baterai dan dapat digunakan secara aman. Gambar 3.8 adalah SOC baterai saat kondisi *overcharge*.



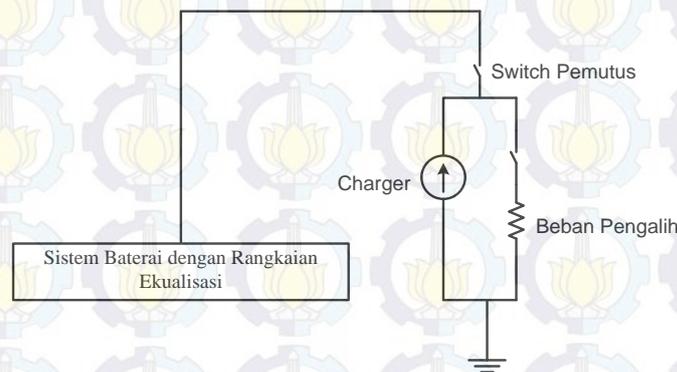
Gambar 3.8 SOC baterai saat kondisi *overcharging*

Salah satu akibat utama dari *overcharging* adalah timbul gas secara berlebihan. Dalam kondisi normal beberapa gas bermunculan, namun saat baterai dalam kondisi *overcharge* elektrolit dalam baterai akan *overheat* sehingga mengakibatkan hydrogen dan oksigen sehingga tekanan dalam baterai akan naik. Beberapa jenis baterai lead acid seperti unsealed flooded lead acid menggunakan metode sirkulasi udara untuk mengatasi tekanan dan sirkulasi gas pada baterai. Pembentukan gas secara yang lebih besar dari kapasitas sirkulasi udara atau malfungsi dapat berakibat pada mendidihnya air di dalam elektrolit sehingga dapat berakibat pada hilangnya air yang dapat merusak baterai. Baterai dalam kondisi *overcharging* dan *overheating* dapat mengakibatkan produksi hydrogen dan oksigen berlebih sehingga baterai dapat meledak seperti ditunjukkan pada gambar 3.9.



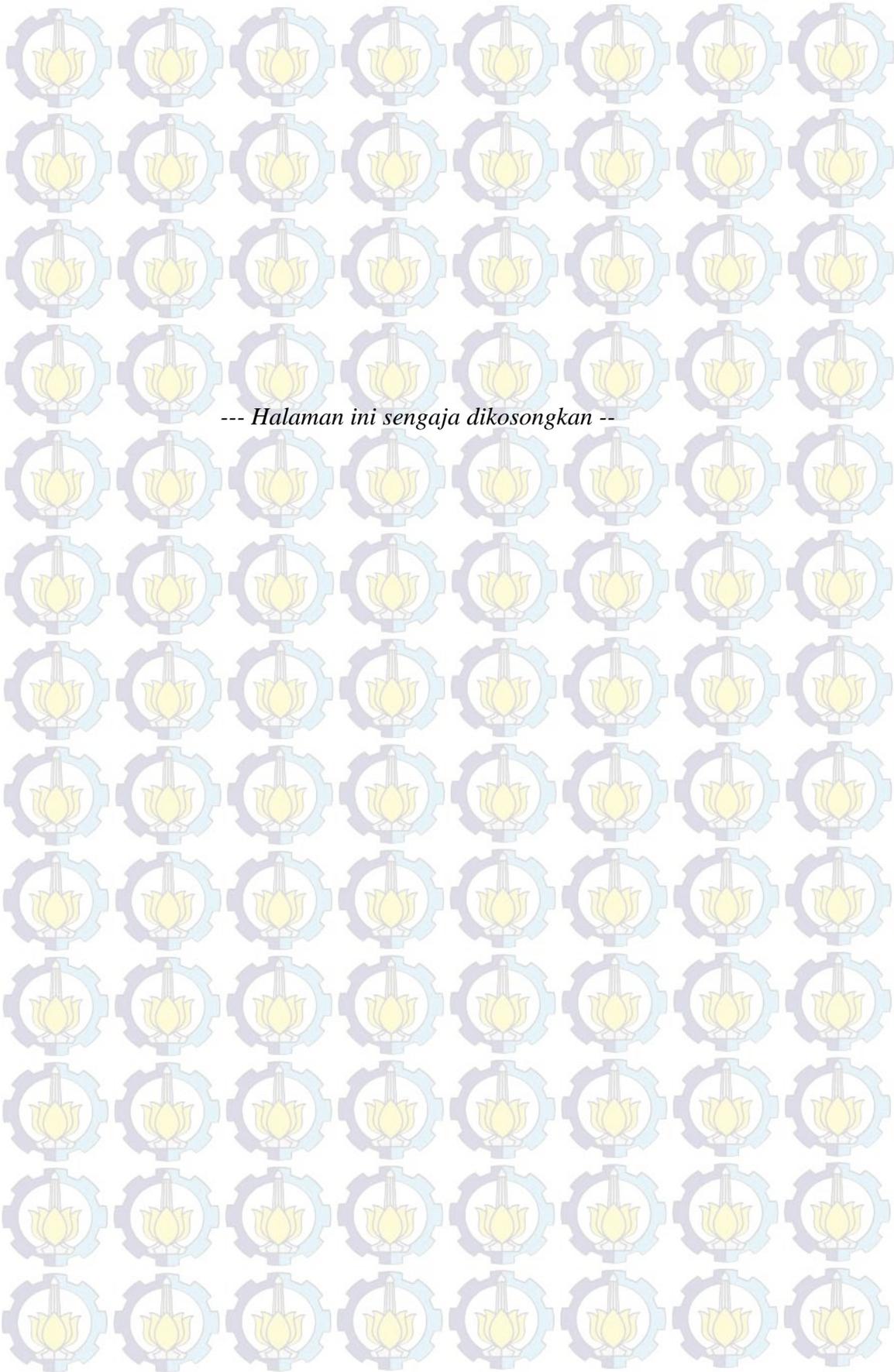
Gambar 3.9 Baterai yang meledak akibat dari penguapan air akibat dari *overcharging* (Olson, 2000)

Dalam penelitian ini sistem proteksi baterai terhadap *overcharging* ditunjukkan pada Gambar 3.10.



Gambar 3.10 Sistem proteksi baterai terhadap *overcharging*

Sistem proteksi ini bekerja sama dengan sistem ekualisasi baterai sehingga sebelum baterai mencapai kondisi maksimum semua sel baterai dalam pack baterai memiliki SOC dan tegangan yang sama. Ketika ekualisasi SOC baterai telah terpenuhi maka SOC baterai akan tetap naik hingga mencapai SOC maksimum dari sistem. Sistem proteksi akan bekerja bila tegangan baterai mencapai tegangan maksimum yang diperkenankan untuk baterai lead acid. Sistem proteksi akan bekerja dan melepas sumber arus atau *power supply* dengan membuka *switch* sehingga tidak ada lagi arus yang masuk ke dalam baterai.

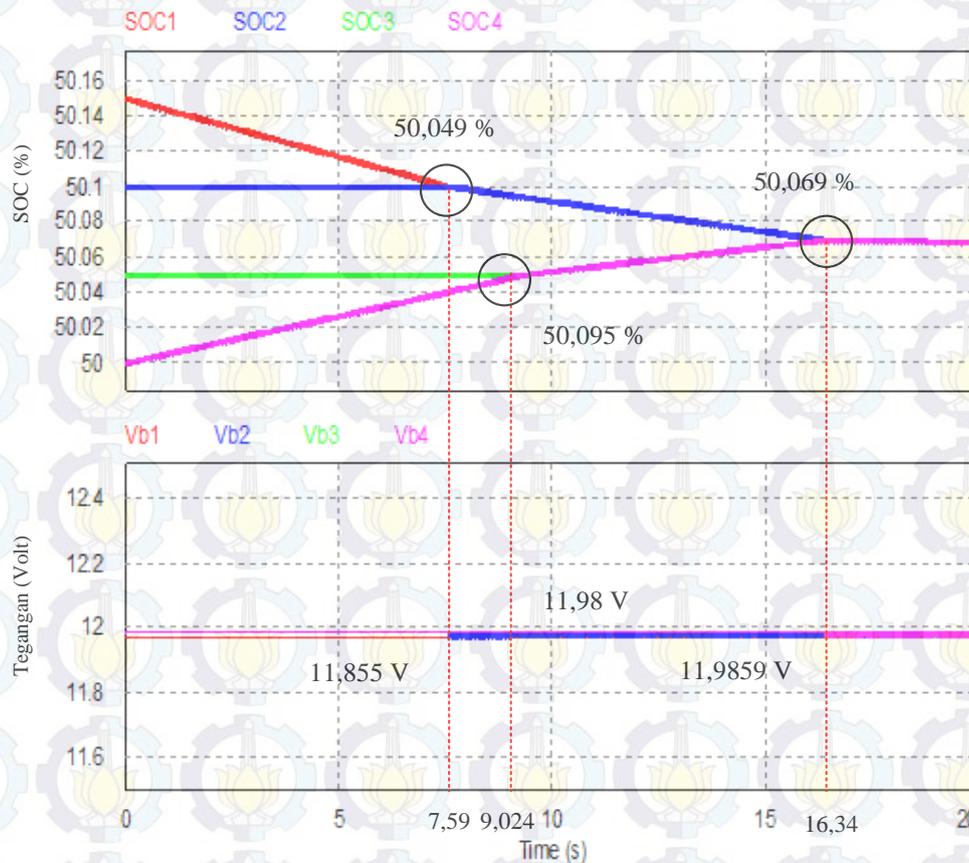


BAB 4 HASIL SIMULASI DAN ANALISIS

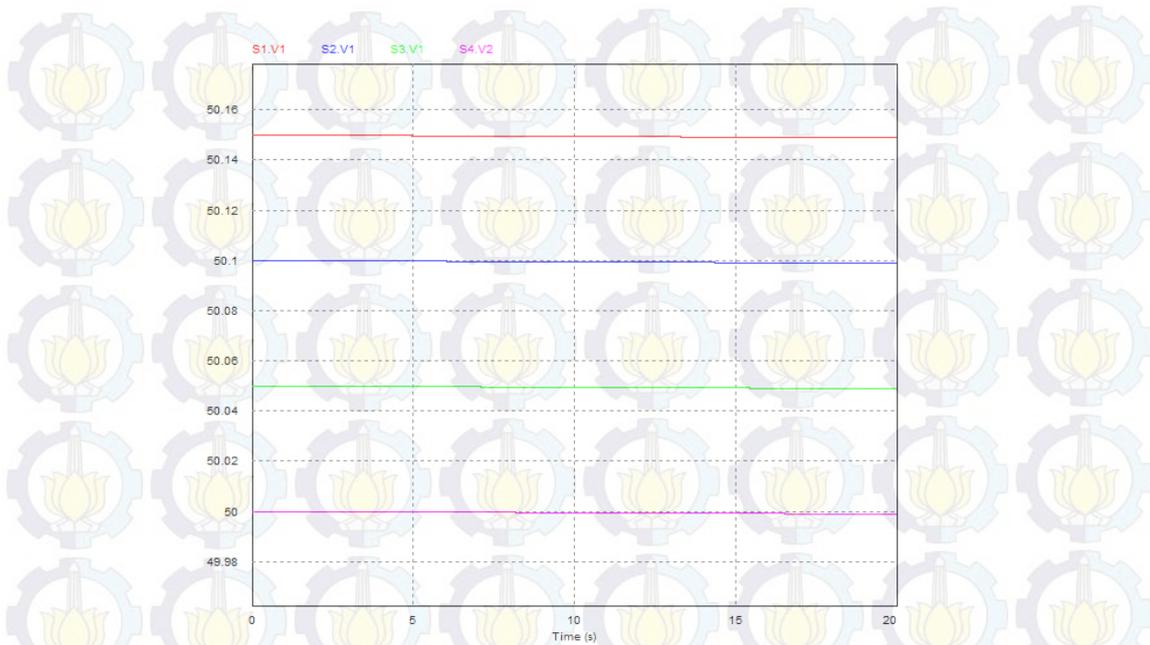
Bab ini membahas tentang kinerja rangkaian ekualisasi dalam beberapa kondisi. Simulasi dilakukan dalam kondisi idle, *charging*, terhubung beban dan proteksi untuk *overcharge*. Analisis akan dilakukan terhadap data – data yang didapatkan dari beberapa kondisi simulasi tersebut.

4.1 Kondisi Idle

Kondisi Idle adalah kondisi dimana sistem tidak menerima *charging* maupun tidak terhubung beban. Masing – masing baterai memiliki perbedaan SOC yaitu sebesar : $SOC_1 = 50,15\%$, $SOC_2 = 50,1\%$, $SOC_3 = 50,05\%$, $SOC_4 = 50\%$, SOC_3 $V_1 = 11,97$ Volt. $V_2 = 11,986$ Volt, $V_3 = 11,9856$ Volt, $V_4 = 11,9850$ Volt.



Gambar 4. 1 SOC dan tegangan dari baterai dengan rangkaian ekualisasi pada kondisi idle



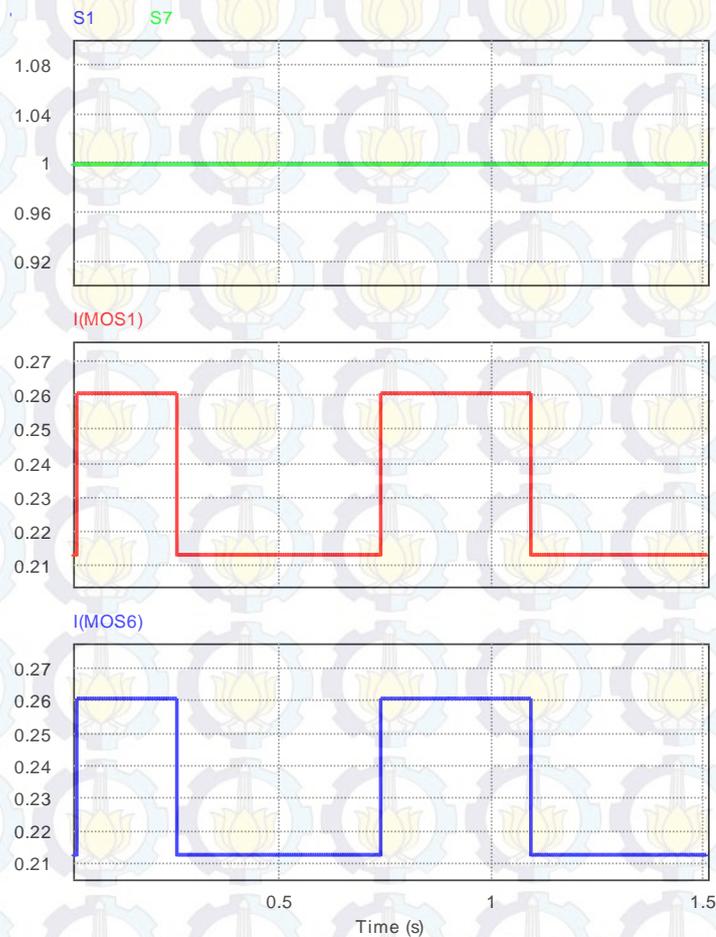
Gambar 4. 2 SOC baterai tanpa menggunakan rangkaian ekualisasi

Baterai₁ dengan SOC tertinggi akan memberikan energi lebih pada baterai₄ yang memiliki SOC terendah sehingga SOC dan tegangan baterai₁ akan turun hingga sedangkan baterai₄ akan naik. Pada saat $t = 7,59$ detik, SOC pada baterai₁ akan memiliki nilai yang sama dengan SOC pada baterai₂ yaitu sebesar 50,049% sehingga kedua baterai ini akan saling mengisi baterai₄. Pada saat $t = 9,024$ detik, terjadilah ekualisasi yang kedua, SOC pada baterai₃ dan baterai₄ akan bertemu pada SOC 50,095%. Baterai₁ dan baterai₂ akan terus mengisi kekurangan energi pada baterai₃ dan baterai₄ hingga keempat baterai tersebut memiliki SOC dan tegangan yang serupa. Titik ekualisasi akhir terjadi pada saat $t = 16,34$ detik dengan SOC sebesar 50,069%.



Gambar 4. 3 Arus induktor pada baterai dengan rangkaian ekualisasi dalam kondisi idle

Proses transfer energi dari satu baterai dengan SOC tertinggi menuju baterai dengan SOC terendah dapat diamati dari arus *charging* dan *discharging* pada induktor saat kondisi *idle* seperti pada Gambar 4.3.



Gambar 4. 4 Sinyal gate mosfet dari Baterai₁ saat *discharging*

Gambar 4.4 menunjukkan gerbang mosfet dari Baterai₁ saat proses transfer energi menuju Baterai₄ yaitu baterai dengan kapasitas terendah. Gerbang *switching* akan me-*trigger* Mosfet₁ dan Mosfet₇ ON sehingga Baterai₁ akan mentransfer kelebihan energi menuju baterai dengan kapasitas terendah.

4.2 Kondisi *Charging*

Teknik ekualisasi saat *charging* dilakukan pada empat baterai terhubung seri dan memiliki SOC sama seperti pada kondisi *idle*. Sebuah *power supply* atau *battery charger* dengan arus konstan sebesar 0,1 A dipilih untuk *charging* baterai

terhubung seri. Dipilih arus *charging* sebesar 0,1 A karena arus *charging* tidak diperkenankan melebihi 20% dari rating kapasitas baterai. Sistem ekualisasi ini akan mengukur SOC dari masing-masing baterai dan arus yang mengalir untuk masing-masing baterai berbeda bergantung pada SOC masing-masing baterai. Jika salah satu baterai memiliki SOC lebih tinggi dibandingkan dengan yang lainnya, maka baterai tersebut harus ikut andil melakukan transfer energi kepada baterai dengan SOC terendah.



Gambar 4. 5 SOC dan tegangan baterai dengan rangkaian ekualisasi saat kondisi *charging*

Gambar 4.5 menunjukkan proses ekualisasi pada saat kondisi *charging*. Ekualisasi pertama terjadi pada saat $t = 7,526$ detik, SOC baterai₁ akan sama dengan SOC baterai₂ yaitu sebesar 50,14%. Baterai₁ dengan SOC tertinggi akan memberikan energinya kepada baterai₄ yang memiliki SOC terendah, sehingga

arus yang mengalir menuju baterai₄ adalah penjumlahan dari arus ekualisasi dengan arus *charging*. Setelah mencapai titik ekualisasi pertama, baterai₁ dan baterai₂ akan bergantian memberikan kelebihan energinya kepada baterai₄ hingga mencapai titik ekualisasi kedua ($t = 9,044$ detik). Pada saat titik ekualisasi kedua baterai₃ dan baterai₄ memiliki SOC dan tegangan yang sama yaitu sebesar 50,10% dan 11,9929 Volt. Hal ini akan berlanjut terus menerus hingga keempat baterai memiliki SOC dan tegangan yang sama pada titik ekualisasi ketiga yaitu pada saat $t = 16,32$ detik dengan SOC sebesar 50,16% dan tegangan sebesar 11,9931 Volt



Gambar 4. 6 SOC baterai tanpa rangkaian ekualisasi saat kondisi *charging*

SOC pada baterai tanpa menggunakan rangkaian ekualisasi ditunjukkan oleh Gambar 4.6. SOC tanpa menggunakan rangkaian ekualisasi memiliki nilai yang berbeda-beda begitu pula tegangannya. SOC maksimal pada rangkaian tanpa ekualisasi adalah sebesar 50,24% namun SOC paling minimal adalah 50,09%. Hal ini akan berbahaya bila rentang perbedaan SOC masing-masing baterai semakin besar.



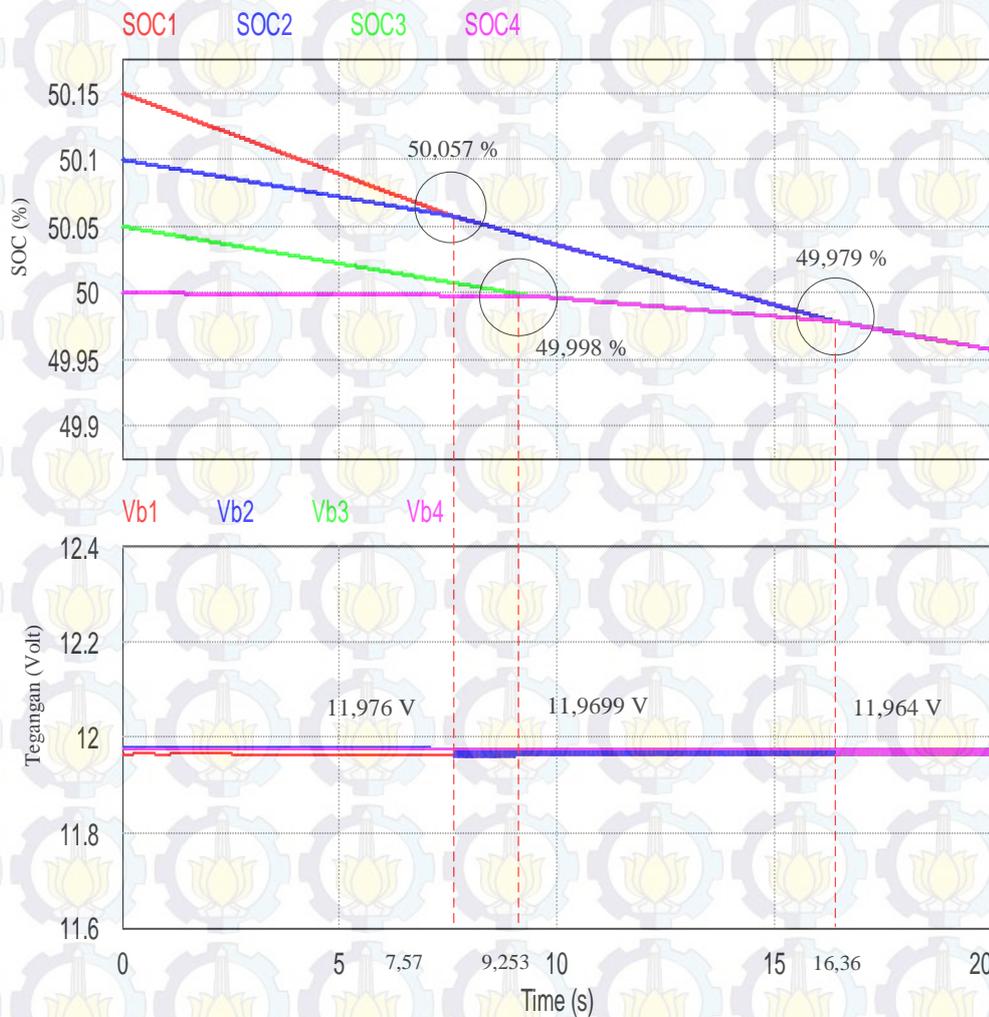
Gambar 4. 7 Arus induktor pada baterai dengan rangkaian ekualisasi saat kondisi *charging*

Pada Gambar 4.7 dapat dilihat bahwa rangkaian ekualisasi tetap bekerja saat kondisi *charging*. Baterai dengan SOC tertinggi akan tetap memberikan kelebihan energinya kepada baterai dengan SOC yang lebih rendah. Baterai

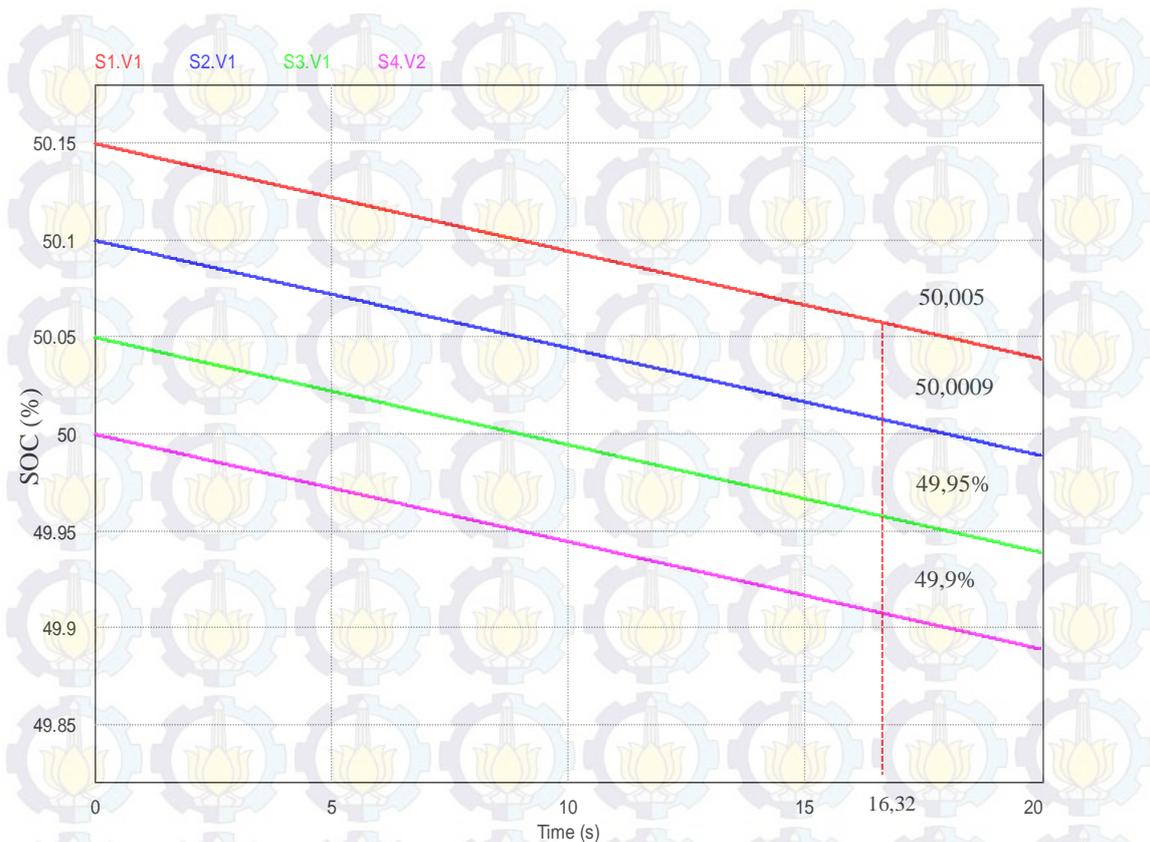
4.3 Kondisi terhubung beban

Baterai dengan rangkaian ekualisasi dalam kondisi beban untuk dapat melihat karakteristik sistem saat proses *discharging*. Sebuah sumber arus konstan sebesar 0,1A digunakan untuk menyerap energi dari baterai. Seperti halnya saat kondisi *charging*, arus yang melewati masing-masing baterai saat *discharging* juga bergantung pada SOC masing-masing baterai. Titik ekualisasi pertama terjadi pada saat $t = 7,57$ detik. Sama halnya pada saat kondisi *charging* dan *idle*, baterai₄ akan memberikan energi lebih pada baterai dengan SOC minimum yaitu baterai₄ hingga baterai₃ dan baterai₄ memiliki SOC yang sama. Pada titik ekualisasi kedua ($t = 9,253$ detik) baterai₃ dan baterai₄ akan memiliki SOC dan tegangan yang sama yaitu sebesar 49,9989% dan 11,969 Volt . Setelah mencapai titik ekualisasi kedua, baterai₁ dan baterai₂ akan bergantian mengisi baterai dengan SOC yang paling kecil, sedangkan baterai₃ dan baterai₄ akan bergantian menerima atau *charging* energi dari baterai terkuat. Kondisi tersebut akan berlangsung terus menerus

hingga keempat baterai mencapai titik ekualisasi keempat ($t = 16,36$ detik) dengan SOC dan tegangan yang sama yaitu sebesar 49,979% dan 11,964 Volt.



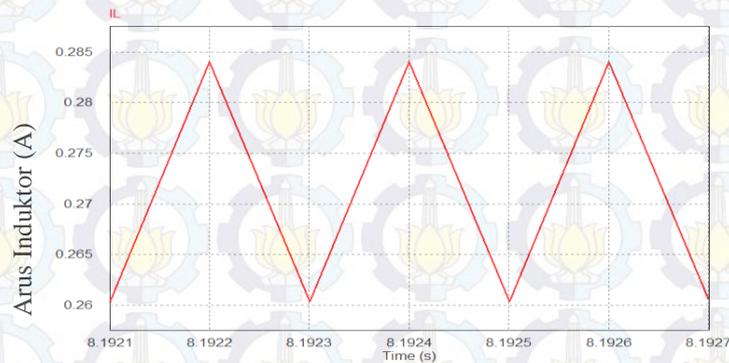
Gambar 4. 8 SOC dan tegangan baterai dengan rangkaian ekualisasi saat kondisi terhubung beban atau *discharging*



Gambar 4. 9 SOC dan tegangan baterai tanpa rangkaian ekualisasi saat kondisi terhubung beban atau *discharging*

Gambar 4.8 menunjukkan SOC baterai saat kondisi *discharging* dan Gambar 4.9 menunjukkan SOC baterai saat tanpa rangkaian ekualisasi saat kondisi *discharging* dalam rentang waktu yang sama. Dari kedua gambar tersebut didapatkan bahwa baterai dengan rangkaian ekualisasi memiliki SOC yang lebih tinggi dibandingkan dengan SOC baterai tanpa rangkaian ekualisasi. SOC baterai dengan rangkaian ekualisasi sebesar 49,979% sedangkan SOC baterai tanpa rangkaian ekualisasi memiliki SOC minimum sebesar 49,9%. Dari selisih SOC antara keduanya didapatkan analisis baterai dengan rangkaian ekualisasi dapat dioperasikan lebih lama dibandingkan dengan baterai tanpa rangkaian ekualisasi. Selisih SOC dan tegangan antara baterai dengan menggunakan rangkaian ekualisasi dan tanpa menggunakan rangkaian ekualisasi akan semakin besar seiring dengan besarnya kapasitas baterai yang digunakan.

sedangkan baterai tanpa ekualisasi memiliki SOC terendah sebesar 49,9%. Selisih antara SOC rangkaian ekualisasi dengan SOC tanpa rangkaian ekualisasi akan semakin besar bila kapasitas baterai semakin besar.

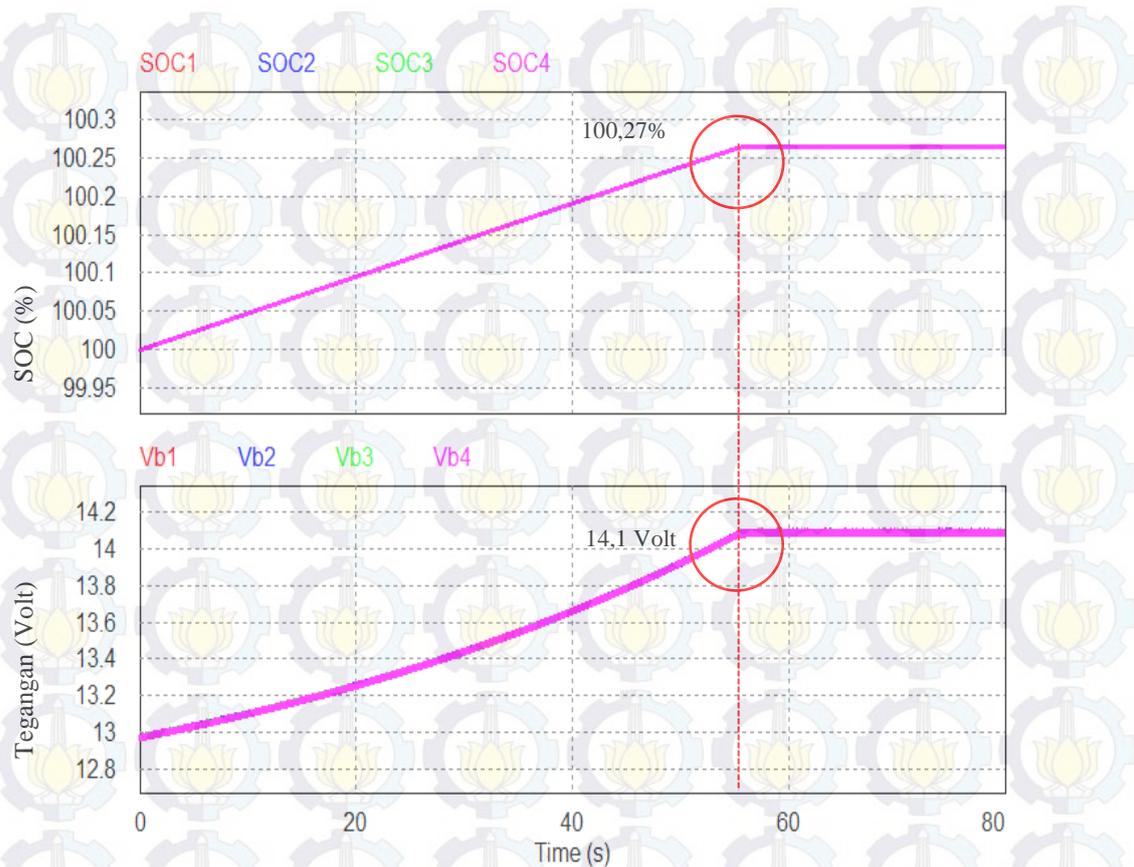


Gambar 4. 10 Arus induktor pada baterai dengan rangkaian ekualisasi saat kondisi *discharging* atau terhubung beban

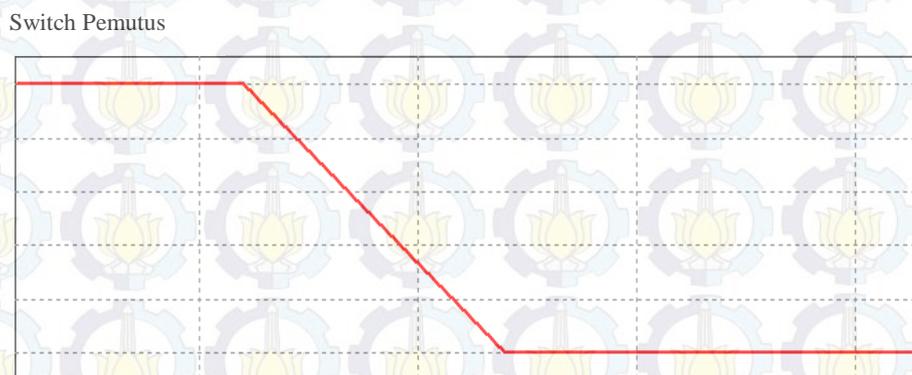
Arus induktor pada kondisi *discharging* dapat dilihat pada gambar 4.10. Arus induktor membuktikan bahwa terjadi proses *charging* dan *discharging* dari baterai dengan SOC tertinggi menuju induktor dan dari induktor menuju baterai dengan SOC terendah saat kondisi *discharging* atau terhubung beban.

4.4 Kondisi *Overcharge*

Pada kondisi ini baterai dioperasikan mendekati tegangan maksimum dengan diberi sumber arus konstan sebesar 0,1A. Batas tegangan maksimum didapatkan dari *datasheet* baterai. Pada Gambar 4.10 terlihat bahwa ketika baterai telah mencapai tegangan maksimal yaitu sebesar 14,1 Volt dengan SOC sebesar 100,27% maka arus dari sumber arus konstan akan dialihkan sehingga arus tersebut tidak dialirkan menuju baterai. Hal tersebut dapat dilihat pada gambar 4.11. sinyal gate switch yang berfungsi sebagai pemutus akan berubah dari 1 menjadi 0 sehingga arus *charging* akan dialihkan menuju rangkaian beban pengalih.



Gambar 4. 11 Arus induktor pada baterai dengan rangkaian ekualisasi saat kondisi *discharging* atau terhubung beban

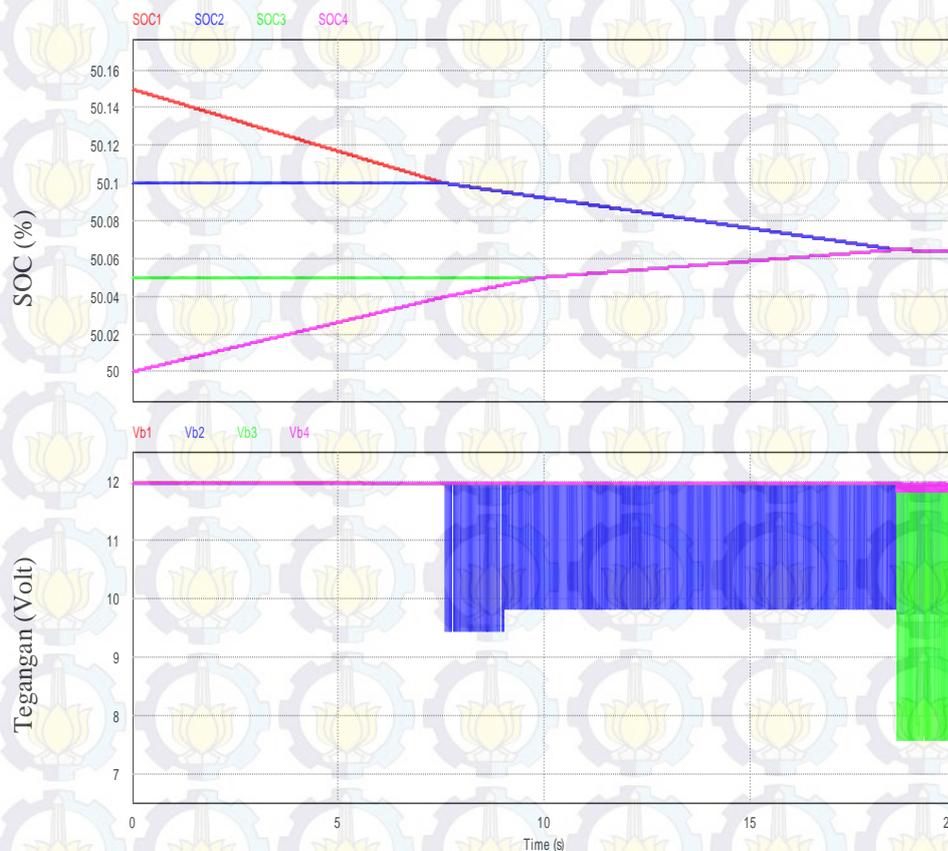


Gambar 4. 12 *Switch* pemutus pada rangkaian proteksi

4.5 Resistansi Internal berbeda

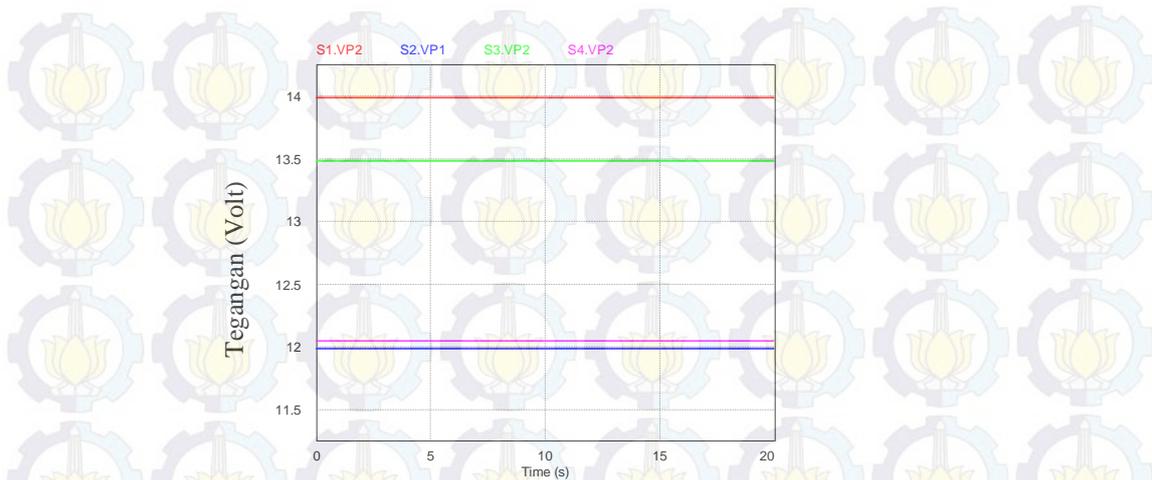
Pada pemodelan baterai Sheperd, resistansi internal berpengaruh pada fungsi tegangan *open circuit voltage* (OCV) baterai, sedangkan SOC pada baterai tidak

dipengaruhi oleh resistansi internal. Pada bagian ini, dilakukan sebuah studi kasus dimana resistansi internal pada masing-masing baterai memiliki nilai yang berbeda. $R_{\text{internal Baterai}_1} = 20\Omega$, $R_{\text{internal Baterai}_2} = 15\Omega$, $R_{\text{internal Baterai}_3} = 0,6\Omega$ dan $R_{\text{internal Baterai}_4} = 1\text{m}\Omega$. pada bagian ini dilakukan perbandingan antara rangkaian dengan ekualisasi dengan rangkaian tanpa ekualisasi.



Gambar 4. 13 SOC dan tegangan baterai dengan rangkaian ekualisasi dengan resistansi internal berbeda

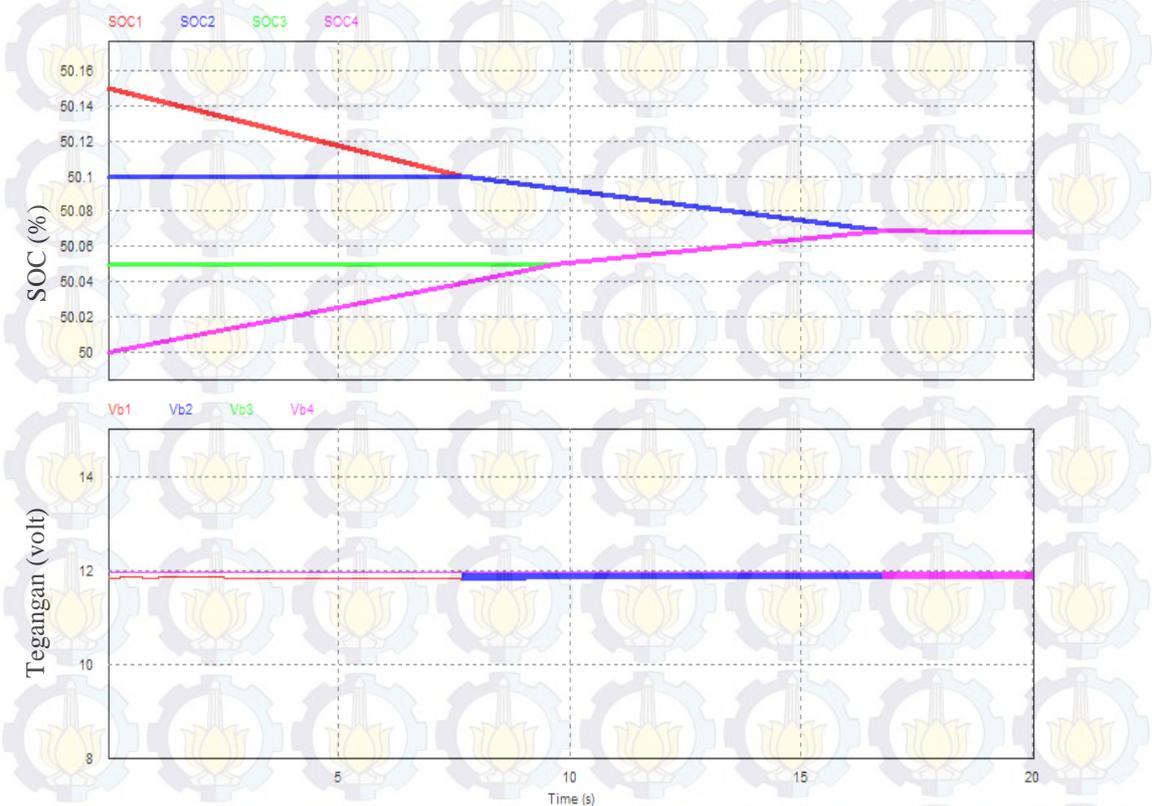
Pada Gambar 4.12 terlihat bahwa SOC tidak lagi menunjukkan kapasitas baterai yang sebanding dengan tegangan. Ketika SOC telah mencapai titik ekualisasi tegangan juga mencapai titik ekualisasi. Namun, ripple tegangan yang muncul sangat besar. Gambar 4.13 menunjukkan hasil tegangan dari baterai tanpa menggunakan rangkaian ekualisasi saat kondisi charging dengan *constant current* sebesar 0,1 A. Dari hasil tersebut dapat dilihat bahwa tegangan masing-masing baterai berbeda jauh dibandingkan dengan saat resistansi internal masing-masing baterai memiliki nilai yang sama.



Gambar 4. 14 Tegangan pada baterai tanpa rangkaian ekualisasi dengan resistansi internal berbeda

4.6 Perbedaan Koefisien A

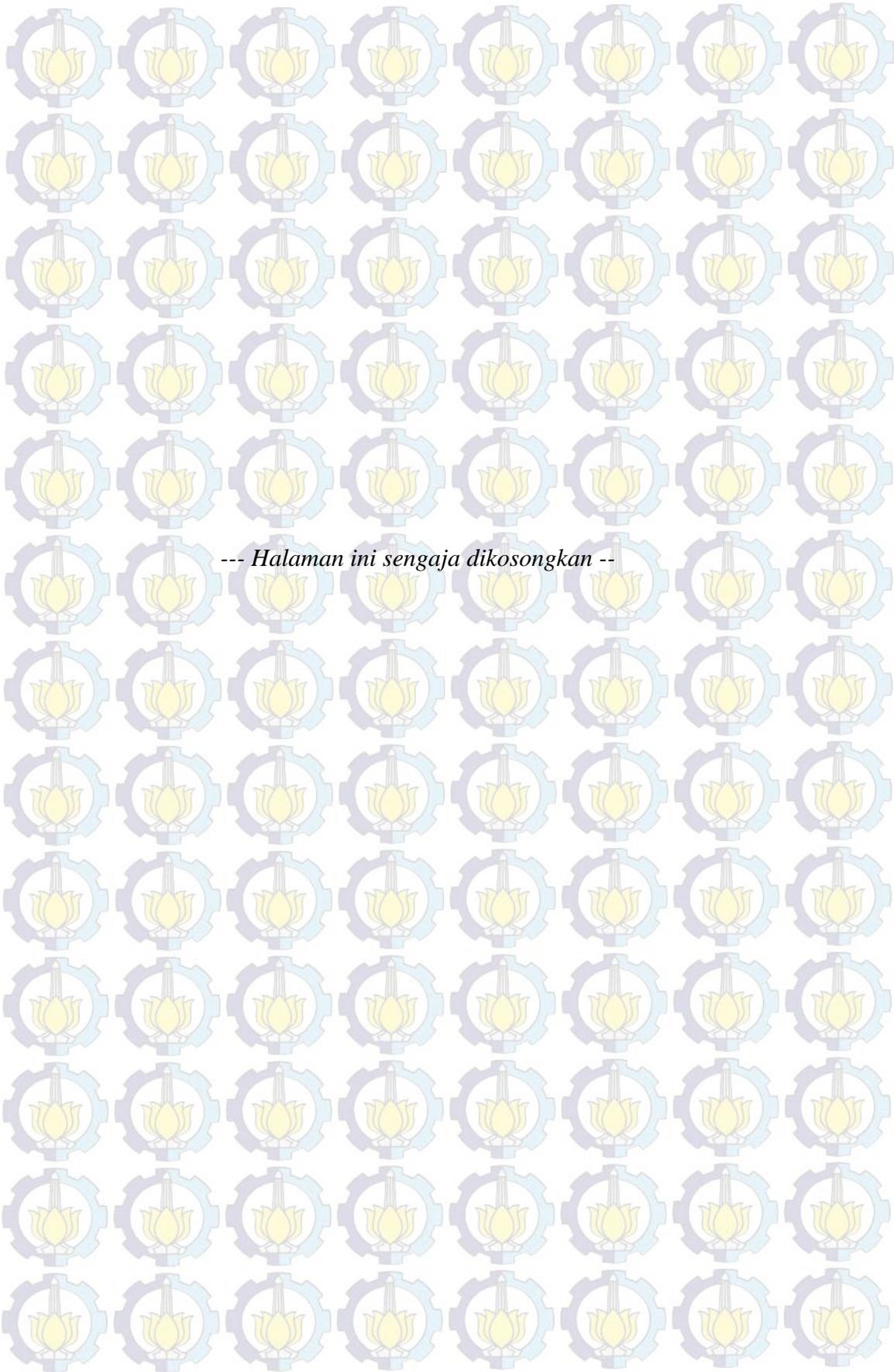
Pada model ini, koefisien A didapatkan dari selisih antara E_{full} dengan E_{exp} . Jika koefisien A pada tiap baterai dirubah, maka akan terjadi perubahan pada kurva *discharge* dan kurva *charging* pada baterai.



Gambar 4. 15 Tegnan dan SOC pada baterai dengan koefisien Aberbeda

Pada studi kasus ini, koefisien A pada tiap tiap baterai akan dibedakan. Koefisien A pada masing-masing baterai yaitu: $A_{\text{Baterai}_1} = 8$, $A_{\text{baterai}_2} = 5$, $A_{\text{baterai}_3} = 0,66$, $A_{\text{baterai}_4} = 2$.

Gambar 4.15 menunjukkan hasil simulasi dari baterai dengan koefisien A yang berbeda-beda. Perbedaan koefisien A pada baterai tidak cukup besar sehingga tidak banyak berpengaruh pada perubahan tegangan masing-masing baterai. Pada titik ekualisasi SOC pertama, tegangan baterai masih dapat mengikuti proses ekualisasi yang dilakukan. Begitu pula pada titik ekualisasi kedua dan titik ekualisasi yang terakhir.



--- Halaman ini sengaja dikosongkan ---

DAFTAR PUSTAKA

Churchill T. L. (2000), "Battery condition management: an important way to protect a critical asset", *IEEE Ann. Batt Conf. Appl. Advances*, 2000, pp. 71-76

Daowd, M., Omar, N., Peter Van Den Bossche, and Joeri Van Mierlo (2011), "Passive and Active Battery Balancing comparison based on MATLAB Simulation", *7th IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC'11*, 2011.

Fahmi, Daniar (2013), "Desain Sistem Dual Inputs SEPIC – Bidirectional Converter Menggunakan Fuzzy Logic Controller untuk Manajemen Daya Pembangkit Hibrida Photovoltaic / Battery pada Area Terpencil", *Thesis Book, Institut Teknologi Sepuluh Nopember*. 2013.

Gottwald, T.; Ye, Z.; Stuart, T.(1997), "Equalization of EV and HEV batteries with a ramp converter. Aerospace and Electronic Systems", *IEEE Transactions on*, Vol.33, Issue: 1, Jan. 1997, pp.307 – 312

K. Zhi-Guo, Z. Chun-Bo, L. Ren-Gui and C. Shu-Kang (2006), "Comparison and Evaluation of Charge Equalization Technique for Series Connected Batteries", *37th IEEE Power Electronics Specialists Conference*, pp. 1-6, 2006.

Lohner A., Karden E., DeDoncker R. W. (1997), "Charge equalizing and lifetime increasing with a new charging method for VRLA batteries", *IEEE Intl. Telecommunications Energy Conf.*, 1997, pp. 407-411.

M. J. Isaacson, R. P. Hollandsworth, P. J. Giampaoli, F. A. Linkowsky, A. Salim, and V. L. Teofilo (2000), "Advanced lithium ion battery charger", *Proc. 15th Annu. IEEE Battery Conf. Appl. Adv.*, Jan. 2000, pp. 193–198.

Moo, C.S., Hsieh, Y.C., Tsai, I.S., and Cheng, J.C. (2003), "Dynamic Charge Equalisation for Series-Connected Batteries", *IEEE Proceedings Electric Power Applications*, Vol. 150, No. 5, pp.501-505, 2003.

Nasser H. Kutkut, Herman L. N. Wiegman, Deepak M. Divan, and Donald W.(1999), Novotny, "Design considerations for charge equalization of an

- electric vehicle battery system", *IEEE Trans. On Industry Applications*, vol. 35, No.1,,pp.28-35, Jan 1999.
- Olson J. B., Sexton E. D. (2000), "Operation of lead-acid batteries for HEV applications", *IEEE Ann. Battery Conf. Appl. Advances*, 2000, pp. 205-21.
- R.E,Habiballah, Ojha Unnati, Baronti Federico, M.Y Chow (2013), "Battery Management System – An Overview of Its Application in the Smart Grid and Electrical Vehicles". *IEEE Industrial Magazines*, June. 2013
- Ron D. Brost (1998), "Performance of valve-regulated lead acid batteries in EV1 extended strings", *Proc. IEEE Ann. Battery Conf. Appl. Advances*, 1998, pp. 25-29.
- Shane Duryea, Syed Islam, William Lawrence (2001), "A Battery Management System for Stand-Alone Photovoltaic Energy Systems",*IEEE Industrial Magazine*. May/June.2001.
- Sriram Yarlagadda, Tom T. Hartley, Iqbal Husain (2013), "A Battery Management System Using an Active Charge Equalization Technique Based on a DC/DC Converter Topology", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 49, No. 6, November/December 2013.
- Stephen T. Hung, Douglas C. Hopkins, and Charles R. Mosling, (1993) "Extension of battery life via charge equalization control", *IEEE trans on industrial electronics*, vol. 40, No.1, pp.96-104, Feb. 1993.
- T. Olivier, A. Louis, D. Abdel-Allah (2007), " A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles", *Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2007. IEEE*, 2007.
- Trojan Battery Company (2015), "Trojan Battery user's guide", Mei 2015.
- West S., Krein P. T. (2000), "Equalization of valve-regulated lead-acid batteries: issues and life tests", *IEEE Intl. Telecommunications Energy Conf.*, 2000, pp. 439-446.

BAB 5 PENUTUP

Pada bab ini akan diuraikan beberapa kesimpulan yang dapat diambil dari pembahasan sebelumnya dan saran mengenai masalah yang bisa dibahas sebagai kelanjutan dari penelitian ini.

5.1 Kesimpulan

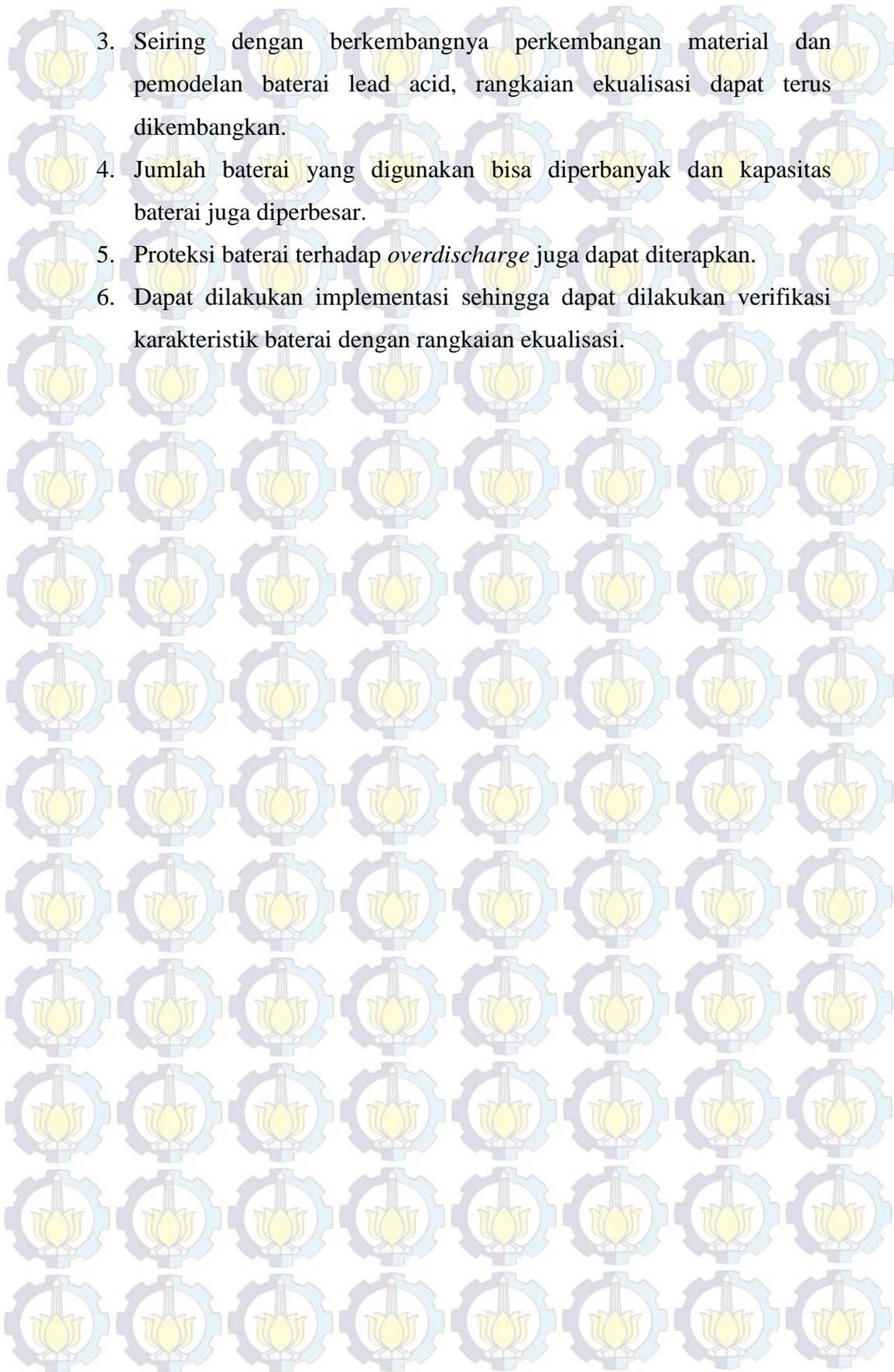
Dari simulasi dan analisis data yang telah dilakukan, maka dapat ditarik kesimpulan bahwa :

1. Topologi konverter DC/DC *bi-directional* dapat digunakan untuk ekualisasi SOC dan tegangan.
2. Rangkaian ekualisasi dapat diterapkan pada saat *kondisi charging, discharging* hingga kondisi *idle*.
3. Hasil simulasi menunjukkan bahwa string baterai dengan ekualisasi memiliki kapasitas yang lebih besar dibandingkan tanpa ekualisasi. Pada saat kondisi *idle*, SOC dari baterai dengan ekualisasi adalah sebesar 50,06% sedangkan tanpa rangkaian ekualisasi sebesar 49,89%. Dalam kondisi *charging*, SOC dari rangkaian dengan ekualisasi bernilai 50,18% sedangkan tanpa ekualisasi sebesar 50,11% dan saat kondisi *discharging* dengan ekualisasi 49,95% dan tanpa ekualisasi sebesar 49,89%.
4. Rangkaian proteksi terhadap *overcharge* untuk mempertahankan baterai sehingga beroperasi pada batas aman

5.2 Saran

Adapun saran dari penulis untuk para peneliti yang ingin mengembangkan penelitian ini di masa yang akan datang adalah sebagai berikut:

1. Hasil penelitian ini hendaknya dapat dijadikan sebagai bahan referensi bagi para peneliti yang lain untuk melakukan penelitian lebih lanjut.
2. Sistem kontrol pada konverter ini masih bisa dikembangkan.

- 
3. Seiring dengan berkembangnya perkembangan material dan pemodelan baterai lead acid, rangkaian ekualisasi dapat terus dikembangkan.
 4. Jumlah baterai yang digunakan bisa diperbanyak dan kapasitas baterai juga diperbesar.
 5. Proteksi baterai terhadap *overdischarge* juga dapat diterapkan.
 6. Dapat dilakukan implementasi sehingga dapat dilakukan verifikasi karakteristik baterai dengan rangkaian ekualisasi.



Thesis - TE142599

Battery Equalization Using Buck-Boost Bi-Directional Converter on Battery Management System

SITI AISYAH
2213201020

ADVISOR

Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D

Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D

MAGISTER PROGRAM

POWER SYSTEM ENGINEERING

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT

FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

SURABAYA

2015

Telah disusun untuk salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (MT)
di
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :
SITI AISYAH
NRP. 2213201020

Tanggal Ujian : 17 Juni 2015
Periode Wisuda : September 2015

Disetujui Oleh :



1. Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D. (Pembimbing I)
NIP. 198006032006041003

35/26/15

2. Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D (Pembimbing II)
NIP. 197311192000031001

3. Dr. Ir. Soediby, M.MT (Penguji)
NIP. 195512071980031004

4. Dr.Eng.I Made Yulistya Negara, ST.,M.Sc. (Penguji)
NIP. 197007121998021001

5. Dr. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng (Penguji)
NIP. 197309271998031004

Direktur Program Pascasarjana

Prof.Dr.Ir.Adi Soeprijanto, MT.
NIP. 196404051990021001



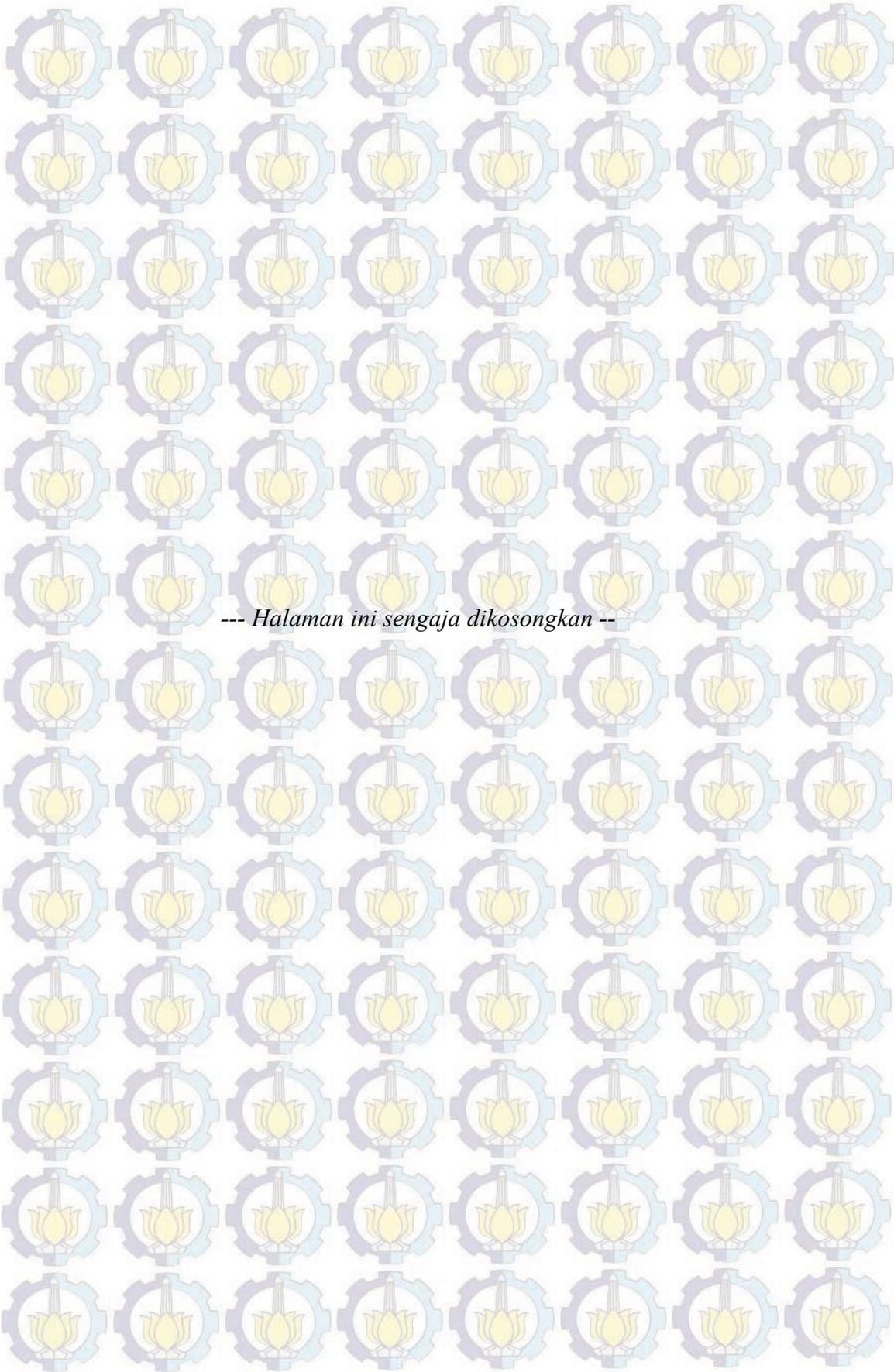
EKUALISASI BATERAI MENGGUNAKAN KONVERTER BUCK-BOOST BI-DIRECTIONAL PADA SISTEM MANAJEMEN BATERAI

Nama Mahasiswa : Siti Aisyah
NRP : 2213201020
Pembimbing : Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D
: Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D

ABSTRAK

Baterai adalah salah satu elemen penyimpanan sementara yang sangat penting. Baterai dihubungkan secara seri maupun paralel untuk mendapatkan tegangan dan kapasitas yang diinginkan. Saat baterai terhubung seri seringkali muncul ketidakseimbangan antar *state of charge* (SOC) dari sel baterai satu dengan yang lain akibat proses *charge* dan *discharge* yang berulang. Ketidakseimbangan ini dapat mempengaruhi umur baterai dan kapasitas total dari *pack* baterai tersebut. Oleh karena itu, perlu dilakukan ekualisasi SOC baterai dengan teknik ekualisasi aktif dan pasif. Pada penelitian ini, dilakukan pengembangan teknik ekualisasi aktif berbasis konverter DC/DC *bi-directional*. Keunggulan penerapan metode ini dari penelitian sebelumnya adalah dapat diaplikasikan untuk tiga kondisi yang berbeda. Tiga kondisi tersebut, yaitu: kondisi *charging*, kondisi terhubung beban, dan kondisi *idle*. Simulasi dari teknik ekualisasi berbasis konverter DC/DC telah dilakukan. Hasil simulasi saat kondisi *idle*, SOC dari baterai dengan ekualisasi adalah sebesar 50,06% sedangkan tanpa rangkain ekualisasi sebesar 49,89%. Dalam kondisi *charging*, SOC dari rangkain dengan ekualisasi bernilai 50,18% sedangkan tanpa ekualisasi sebesar 50,11% dan saat kondisi *discharging* dengan ekualisasi 49,95% dan tanpa ekualisasi sebesar 49,89%. Sistem baterai dengan ekualisasi menghasilkan SOC baterai yang lebih besar dan baterai dapat dioperasikan dalam waktu yang lebih lama. Selain itu, proteksi baterai terhadap *overcharge* juga diterapkan sehingga baterai dapat dioperasikan pada batas aman dan terhindar dari kerusakan lebih dini.

Kata Kunci: konverter DC-DC *bi-directional*, *state of charge*, baterai.



--- Halaman ini sengaja dikosongkan ---

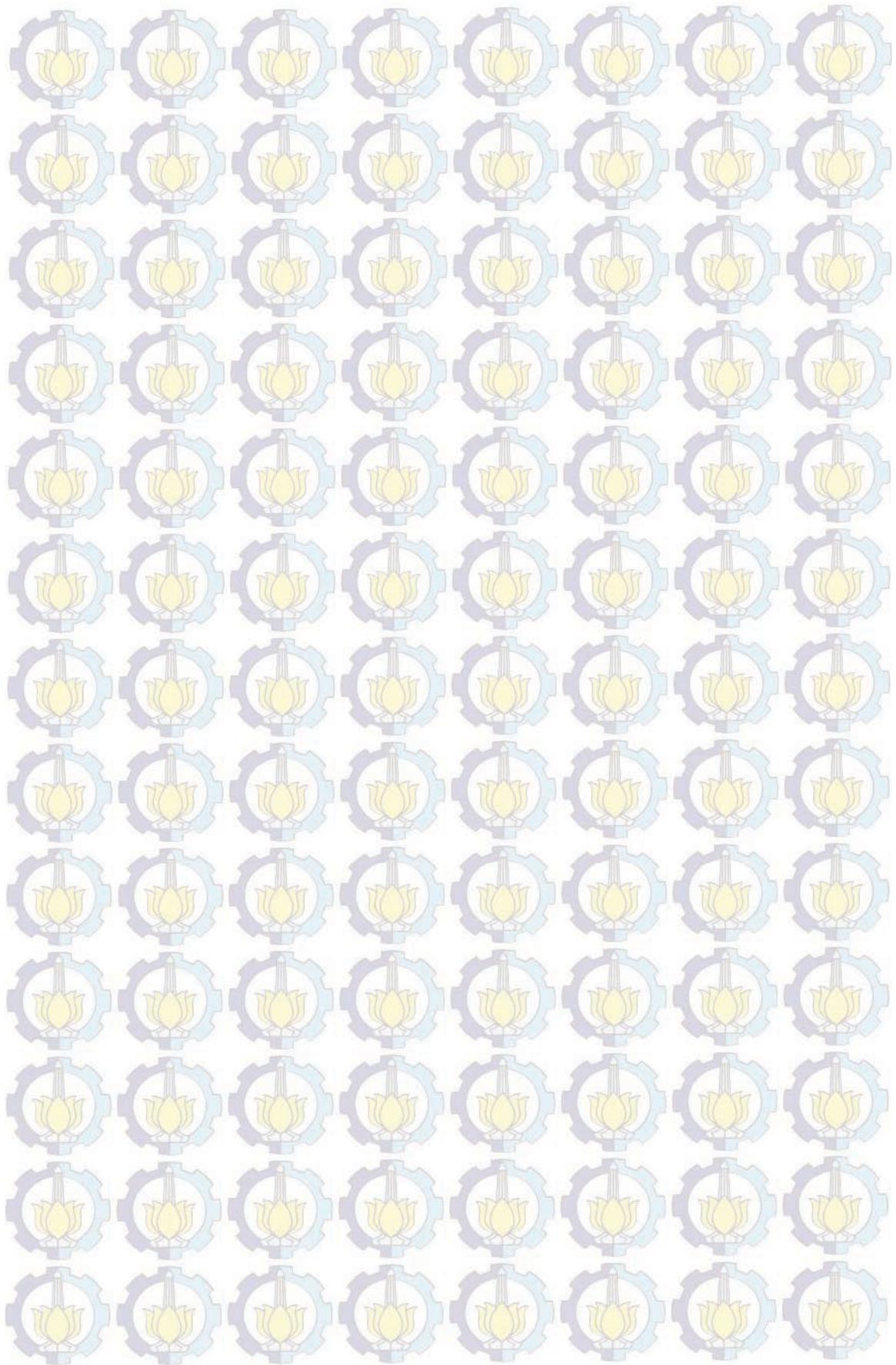
BATTERY EQUALIZATION USING BUCK-BOOST BI-DIRECTIONAL KONVERTER ON BATTERY MANAGEMENT SYSTEM

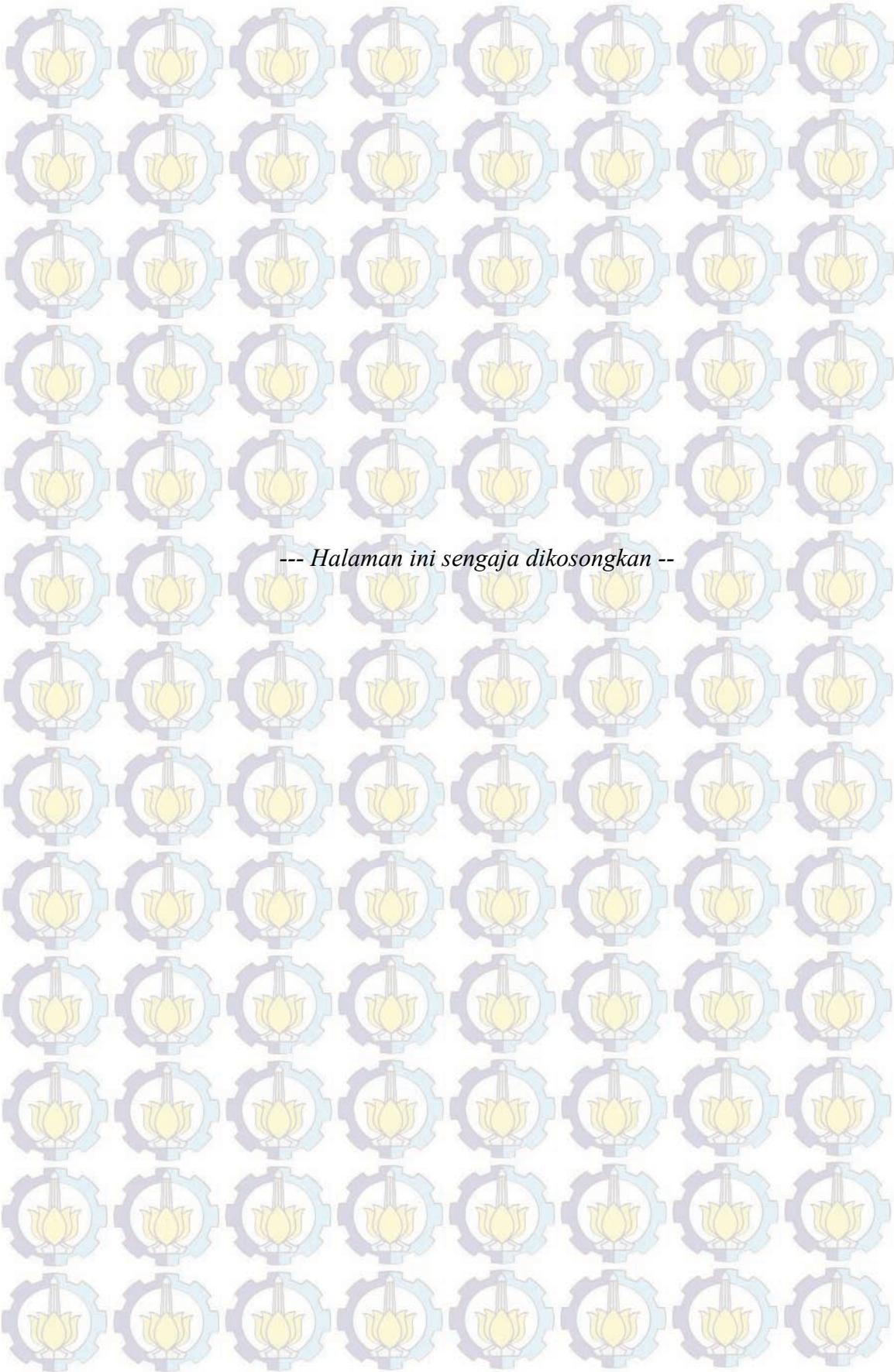
Name : Siti Aisyah
NRP : 2213201020
Advisor : Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D
: Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D

ABSTRACT

The battery is one of the important temporary storage elements. Batteries connected in series or parallel to obtain the desired voltage and capacity. When the battery is connected in series often appear imbalance between the state of charge (SOC) of the battery cells to each other due to charge and discharge cycles are repeated. This imbalance can affect battery life and the total capacity of the battery pack. Therefore, the battery SOC equalization needs to be done with active and passive equalization techniques. In this research, the development of active equalization technique based converter DC / DC bi-directional. Excellence application of this method from previous research is that it can be applied to three different conditions. The three conditions, namely: charging conditions, conditions connected load and idle conditions. Simulation of the equalization technique based DC converter / DC has done. The simulation results when idle, SOC of battery with equalization amounted to 50,06% while without rangakain equalization amounted to 49,89%. Under conditions of charging, the SOC of rangakain with equalization worth 50,18% while without the equalization of 50,11% and is currently discharging condition with equalization of 49,95% and amounted to 49,89% without equalization. The battery system with equalization produce larger battery SOC and the battery can be operated in a longer time. In addition, the battery against overcharge protection also applied so that the battery can be operated at safe limits and to avoid early damage.

Key words: bi-directional DC-DC converter, state of charge, battery.





KATA PENGANTAR

Alhamdulillah Robbil 'Alamin, terucap syukur kehadiran Allah atas limpahan rahmat dan karunianya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tesis yang berjudul “EKUALISASI BATERAI MENGGUNAKAN KONVERTER BUCK-BOOST *BI-DIRECTIONAL* PADA SISTEM MANAJEMEN BATERAI”. Adapun tujuan dari penyusunan Tesis ini adalah sebagai salah satu persyaratan untuk mendapatkan gelar master teknik pada bidang studi Teknik Sistem Tenaga, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

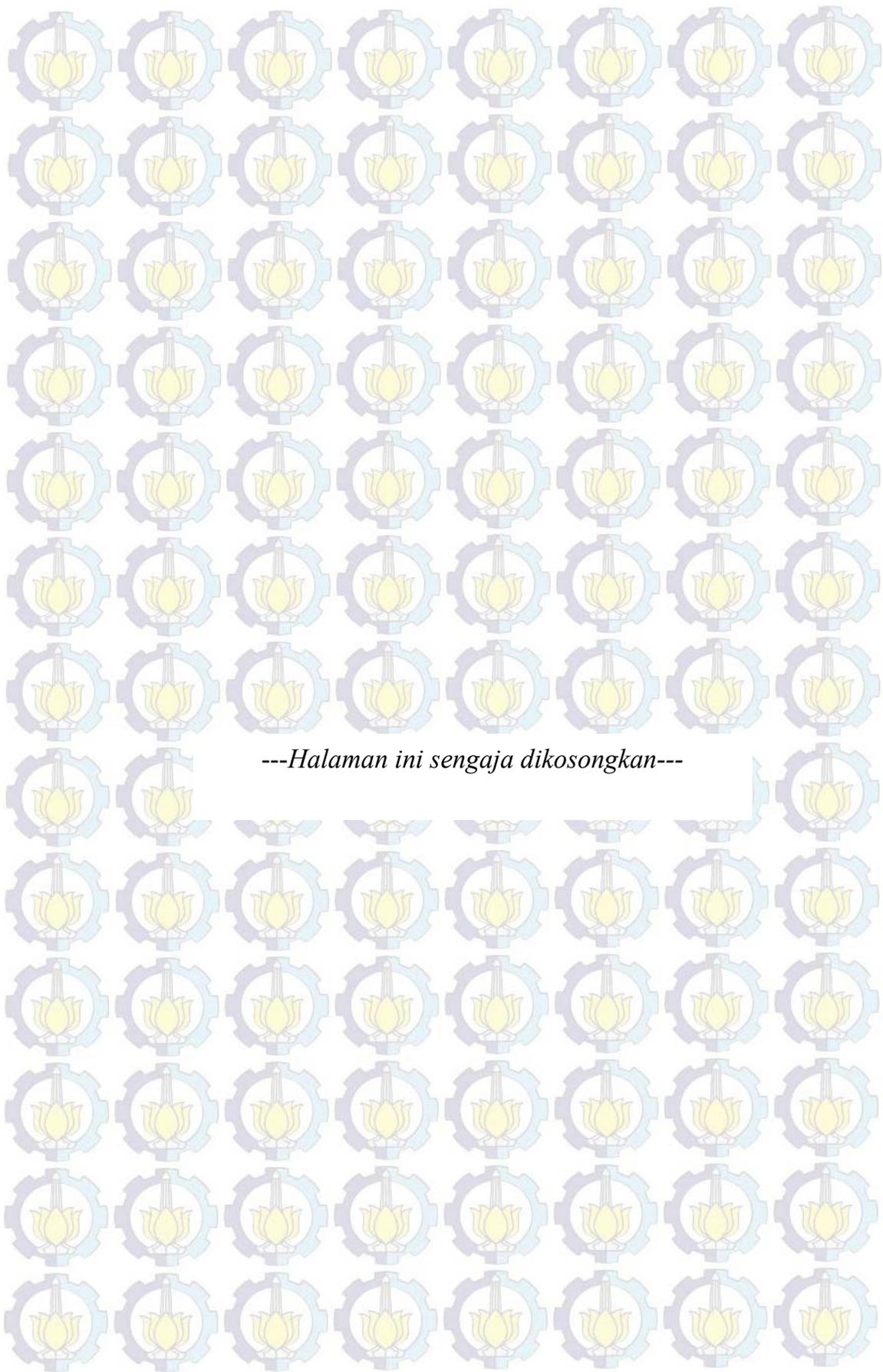
Dalam kesempatan ini penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang banyak berjasa terutama dalam penyusunan tugas Akhir ini, yaitu :

1. Kementrian Pendidikan dan Kebudayaan khususnya Direktorat Jendral Pendidikan Tinggi yang telah memberikan beasiswa *fresh graduate* sehingga saya dapat menempuh pendidikan magister.
2. Segenap keluarga besar terutama Bapak, Ibu, Mbak Ela, Mbak Aas, Mbak Hani, dan Mbak Eni, Mas Ival, Mas Diki, Nawfal dan Rasvi tercinta yang selalu memberikan dukungan baik finansial, semangat, dan doa untuk keberhasilan penulis.
3. Bapak Heri Suryoatmojo, ST., MT., Ph.D dan Bapak Dedet Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan waktu, saran serta bimbingannya.
4. Seluruh rekan-rekan S2 angkaran 2013 atas dukungan, masukan, dan kerjasamanya selama masa kuliah dan proses pengerjaan tesis.

Besar harapan penulis agar tesis ini dapat memberikan manfaat dan masukan bagi banyak pihak. Oleh karena itu penulis mengharapkan kritik, koreksi, dan saran dari pembaca yang bersifat membangun untuk pengembangan ke arah yang lebih baik.

Surabaya, 1 Juli 2015

Penulis



DAFTAR ISI

	Hal
HALAMAN PENGESAHAN.....	i
ABSTRAK.....	iii
ABSTRACT.....	v
KATA PENGANTAR.....	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
 BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	1
1.3 Batasan Masalah.....	2
1.4 Tujuan.....	2
1.5 Kontribusi Penelitian.....	3
 BAB II KARAKTERISTIK BATERAI DAN SISTEM PENGISIAN BATERAI	
2.1 Karakteristik Baterai Lead Acid.....	3
2.2 Charging pada Baterai Lead Acid.....	5
2.3 Faktor yang Mempengaruhi Baterai.....	7
2.3.1. <i>Depth of Discharge (DOD)</i>	8
2.3.2. <i>Overcharge dan Underdischarge</i>	8
2.4. State of Charge (SOC) dan Kapasitas Baterai Leac Acid.....	9
2.4.1. Pengukuran Langsung.....	11
2.4.2. SOC Berdasarkan <i>Open Circuit Voltage (OCV)</i>	11
2.4.3. <i>Coulomb Counting</i> atau Pengukuran SOC berbasis arus.....	12
2.4.4. Hydrometer.....	13
2.5. Teknik Ekualisasi Baterai.....	14
2.5.1. Teknik Ekualisasi Pasif.....	16
2.5.2. Teknik Ekualisasi Aktif.....	16

2.6.	Rangkaian Ekualisasi dengan Buck/Boost <i>Bi-Directional</i>	17
------	--	----

BAB III DESAIN SISTEM EKUALISASI BATERAI

3.1.	Konfigurasi Sistem	21
3.2.	Parameter Baterai Lead Acid	21
3.2.1	Resistansi Internal	24
3.2.2	Parameter Model Baterai	24
3.3.	Karakteristik Rangkaian Konverter <i>Bi-Directional</i>	26
3.4.	Rangkaian Proteksi Baterai	29

BAB IV HASIL SIMULASI DAN ANALISIS DATA

4.1	Kondisi <i>Idle</i>	33
4.2	Kondisi <i>Charging</i>	35
4.3	Kondisi Terhubung Beban	38
4.4	Kondisi <i>Overcharge</i>	41
4.5	Resistansi Internal Berbeda	42
4.6	Perbedaan Koefisien A	44

BAB V PENUTUP

5.1.	Kesimpulan	47
5.2.	Saran	47

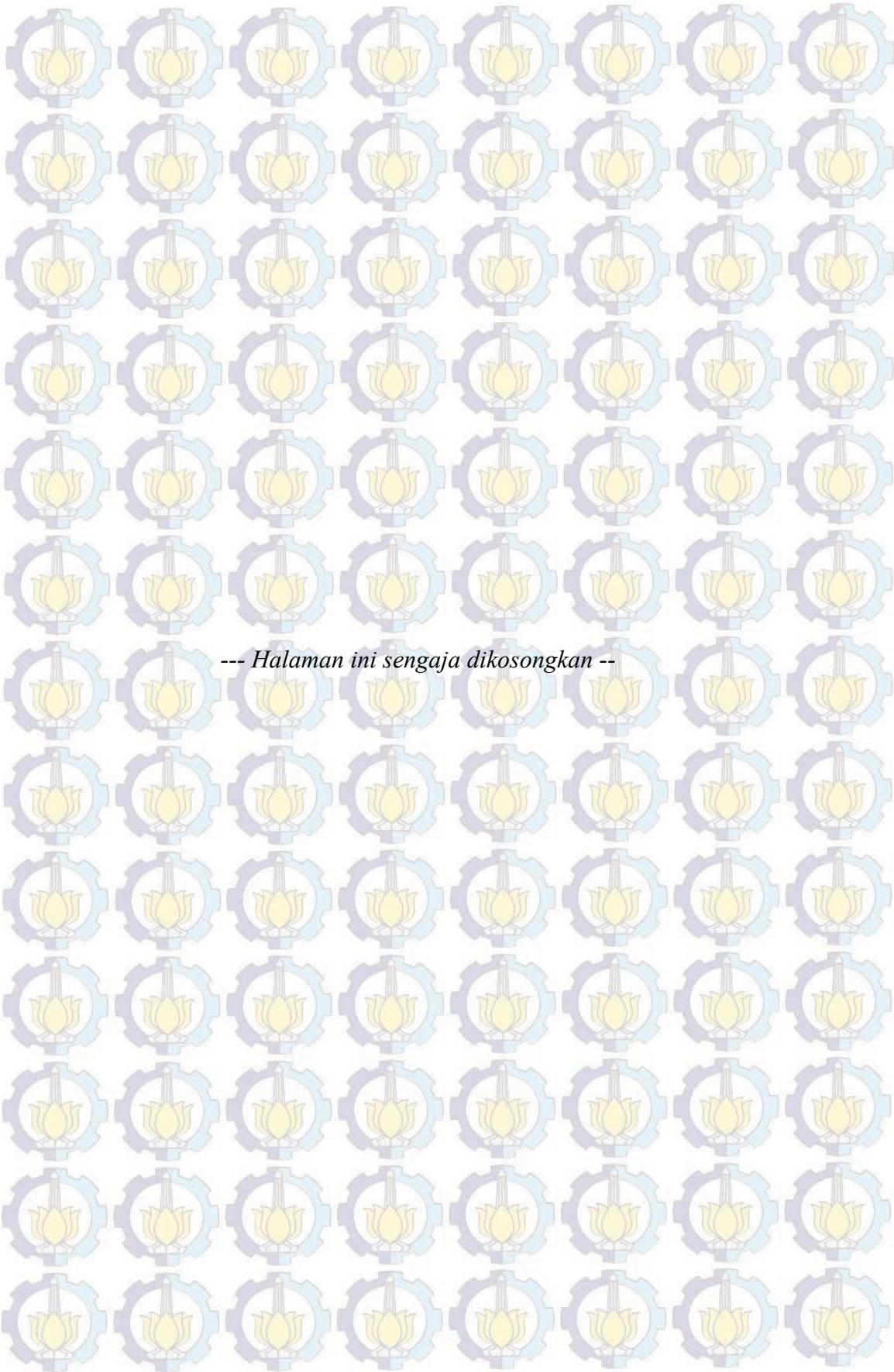
DAFTAR PUSTAKA	49
----------------------	----

BIOGRAFI PENULIS	50
------------------------	----

LAMPIRAN	51
----------------	----

DAFTAR TABEL

	Hal
Tabel 2.1 Keuntungan dan kerugian penggunaan baterai lead acid.....	5
Tabel 2.2 Batas tegangan yang diperkenankan pada mode charging (Trojan Battery Comapany, 2015).....	7
Tabel 2.3 Pengukuran SOC berdasarkan tegangan OCV pada trojan (Trojan Battery Comapany, 2015).....	12
Tabel 2.4 Standar BCI untuk estimasi SOC dari maintenance-free starter battery dengan antimony.....	13
Tabel 3.1 Parameter baterai.....	25



DAFTAR GAMBAR

	Hal
Gambar 2.1	Konstruksi baterai lead acid secara umum..... 4
Gambar 2.2	Karakteristik <i>charging</i> pada baterai lead acid 6
Gambar 2.3	<i>Charging</i> menggunakan <i>constant curreny</i> pada baterai lead acid ... jenis Trojan [3]..... 7
Gambar 2.4	Hubungan antara kapasitas baterai, DOD dan siklus baterai untuk baterai jenis <i>shallow cycle</i> 8
Gambar 2.5	Pengaruh overcharge dan undercharge terhadap siklus baterai 9
Gambar 2.6	Kapasitas baterai secara umum 10
Gambar 2.7	Ilustrasi pengukuran berdasarkan <i>Coulomb Counting</i> 13
Gambar 2.8	Ilustrasi tegangan dan kapasitas baterai yang tidak sama 14
Gambar 2.9	Tegangan dari baterai tanpa menggunakan rangkaian ekualisasi 15
Gambar 2.10	Topologi rangkaian ekualisasi menggunakan konverter DC/DC <i>bi-directional</i> 17
Gambar 2.11	(a) Baterai1 discharge; (b) Baterai2 charge; (c) Baterai2 discharge; (d) Baterai1 charge 18
Gambar 2.12	Topologi ekualisasi untuk empat baterai..... 19
Gambar 3.1	Konfigurasi sistem keseluruhan 21
Gambar 3.2	Rangkaian ekivalen baterai non-linear..... 22
Gambar 3.3	Karakteristik kurva <i>discharge</i> dari baterai 24
Gambar 3.4	Kurva karakteristik <i>discharge</i> baterai leac acid 0,5 Ah 12 Volt .. 26
Gambar 3.5	(a) Topologi untuk transfer energi dari Baterai1 menuju Baterai2 (b) M4 dan M2 ON (c) M2 dan M6 ON 27
Gambar 3.6	Gelombang tegangan induktor 28
Gambar 3.7	Gelombang arus induktor 28
Gambar 3.8	SOC baterai saat kondisi <i>overcharging</i> 29
Gambar 3.9	Baterai yang medelak akibat penguapan air karena <i>overcharging</i> 30
Gambar 3.10	Sistem proteksi baterai terhadap <i>overcharging</i> 30
Gambar 4.1	SOC dan tegangan dari baterai dengan rangkaian ekualisasi pada kondisi idle 33
Gambar 4.2	SOC baterai tanpa menggunakan rangkaian ekualisasi 34

Gambar 4.3	Arus induktor pada baterai dengan rangkaian ekualisasi dalam kondisi idle	34
Gambar 4.4	Sinyal gate mosfet dari Baterai1 saat discharging.....	35
Gambar 4.5	SOC dan tegangan baterai dengan rangkaian ekualisasi saat kondisi charging	36
Gambar 4.6	SOC baterai tanpa rangkaian ekualisasi saat kondisi charging ...	37
Gambar 4.7	Arus induktor pada baterai dengan rangkaian ekualisasi saat kondisi charging	38
Gambar 4.8	SOC dan tegangan baterai dengan rangkaian ekualisasi saat kondisi terhubung beban atau discharging	39
Gambar 4.9	SOC dan tegangan baterai tanpa rangakain ekualisasi saat kondisi terhubung beban atau discharging	40
Gambar 4.10	Arus induktor pada baterai dengan rangkaian ekualisasi saat kondisi discharging atau terhubung beban	41
Gambar 4.11	Arus induktor pada baterai dengan rangkaian ekualisasi saat kondisi discharging atau terhubung beban	42
Gambar 4.12	Switch pemutus pada rangkaian proteksi	42
Gambar 4.13	SOC dan tegangan baterai dengan rangkaian ekualisasi dengan resistansi internal berbeda	43
Gambar 4.14	Tegngan pada baterai tanpa rangkaian ekualisasi dengan resistansi internal berbeda	44
Gambar 4.15	Tegangan dan SOC pada baterai dengan koefisien Aberbeda.....	44

BIOGRAFI PENULIS



Penulis memiliki nama lengkap Siti Aisyah. Lahir di Cilacap pada tanggal 4 Mei 1992. Anak kelima dari pasangan Abdul Haris dan Fatimatuz Zahrok ini mengawali pendidikannya di SD Muhammadiyah 1-2 Taman pada tahun 1997-2003, kemudian melanjutkan ke SMP Negeri 1 Surabaya hingga tahun 2006. Setelah lulus dari SMA Negeri 5 Surabaya pada tahun 2009, penulis melanjutkan pendidikan Sarjana di Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, Jurusan Teknik Elektro, Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga. Penulis lulus pada tahun 2013 dan pada tahun yang sama melanjutkan pendidikan Magister di Institut yang sama. Semasa kuliah penulis aktif mengikuti berbagai seminar dan pelatihan. Penulis yang merupakan salah satu asisten di Laboratorium Konversi Energi Teknik Sistem Tenaga (B.101). Penulis dapat dihubungi di alamat *email* aisyah4592@gmail.com.

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Seiring perkembangan teknologi smartgrid dan *Electric Vehicles* (EVs) yang semakin pesat, baterai menjadi salah satu komponen penyimpanan yang penting. Baterai pada Smartgrid berfungsi sebagai media penyimpanan energi sedangkan pada EVs baterai berfungsi sebagai sumber energi utama. Pada umumnya, jumlah baterai yang digunakan pada kedua aplikasi tersebut lebih dari satu. Baterai-baterai tersebut dapat dihubungkan secara seri maupun paralel.

Hal yang perlu diperhatikan ketika baterai tersusun secara seri dan paralel adalah tegangan pada masing-masing baterai harus sama. Namun pada kenyataannya, tegangan baterai tidak selalu sama antara satu dengan lainnya. Hal ini dikarenakan oleh kondisi eksternal (lingkungan) maupun internal (manufaktur) dari baterai tersebut. Kedua kondisi ini mempengaruhi umur baterai dan tegangan dari keseluruhan baterai (tegangan DC bus).

Berbagai macam metode telah dikembangkan guna mengatasi masalah tersebut. Salah satu metode yang efektif untuk menjaga umur sekaligus mengatur tegangan keluaran dari baterai adalah teknik ekualisasi antar baterai. Metode ini berbasis kepada pengaturan *charge* dan *discharge* masing –masing sel baterai. Namun, perkembangan metode ini seringkali menggunakan elemen pasif sehingga banyak energi yang terbuang serta tidak mempertimbangkan proteksi terhadap *overcharge* dan *over-discharge* baterai. Oleh karena itu, pada rencana penelitian ini akan diusulkan sebuah metode BMS berbasis konverter DC/DC *bi-directional* yang turut mempertimbangkan perlindungan baterai saat kondisi *overcharge*.

1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan yang dibahas dalam penelitian ini adalah rangkaian ekualisasi untuk pemodelan baterai lead acid dengan mempertimbangkan *State of charge* (SOC). Rangkaian ekualisasi yang digunakan adalah rangkaian konverter *bi-*

directional serta dapat melindungi baterai dari *overcharge*. Rangkaian ekualisasi terhadap baterai disimulasikan dalam software.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah dari penelitian ekualisasi baterai menggunakan konverter *buck-boost bi-directional* ini adalah sebagai berikut:

1. Pemodelan baterai yang digunakan adalah pemodelan baterai lead acid dengan mempertimbangkan SOC.
2. Perlindungan baterai hanya terbatas pada perlindungan terhadap *overcharge*.

1.4 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan sebuah sistem baterai terhubung seri dengan SOC yang sama antara satu dengan yang lain. Ekualisasi baterai menggunakan teknik ekualisasi aktif berupa rangkaian konverter DC/DC *bi-directional*. Dalam kondisi *charging* baterai seringkali *overcharge* sehingga timbul korosi pada plat positif, oleh karena itu penelitian ini bertujuan melindungi baterai terhadap *overcharge* yang berbahaya bagi baterai.

1.5 Manfaat Penelitian

Hasil yang diperoleh dari penelitian ini diharapkan bisa memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Dapat menjadi referensi bagi peneliti lain yang akan melakukan penelitian dengan topik yang sama.
2. Dapat meningkatkan penguasaan materi tentang sistem konverter DC-DC bidirectional dua arah bagi penulis dan pembaca.
3. Diharapkan dapat memberikan manfaat tentang perkembangan teknologi pada salahsatu sistem mobil listrik.

BAB 2

KARAKTERISTIK BATERAI DAN SISTEM PENGISIAN BATERAI

Baterai adalah sebuah perangkat yang terdiri dari satu atau lebih senyawa elektrokimia sehingga dapat mengkonversikan energi kimia menjadi energi listrik.

Sebuah sel baterai tersusun atas terminal positif atau katoda, terminal negatif atau anoda dan senyawa elektrolit.

Baterai dapat diklasifikasikan menjadi dua jenis yaitu:

- Baterai Primer (*single-use* atau *disposable*). Baterai jenis ini hanya dapat digunakan sekali dan elektroda yang tersusun didalamnya tidak dapat kembali lagi saat setelah proses *discharge*.
- Baterai Sekunder (*rechargeable*) dapat melalui proses *charge* dan *discharge* berulang kali. Komposisi dari elektroda yang tersusun didalamnya dapat dipulihkan kembali dengan arus terbalik.

Pada baterai digunakan secara luas dalam kehidupan sehari-hari. Baterai primer sering digunakan untuk keperluan dengan kebutuhan spesifik yang tinggi, waktu penyimpanan lama dan kesiapan instan. Baterai primer yang sering digunakan adalah *alkaline* untuk penerangan dan perangkat portabel. Berbeda dengan baterai primer, baterai sekunder memainkan peranan penting dalam kehidupan. Faktor penting dalam baterai sekunder adalah energi spesifik, *lifetime*, karakteristik beban, *self-discharge*, kebutuhan pemeliharaan dan pembuangan.

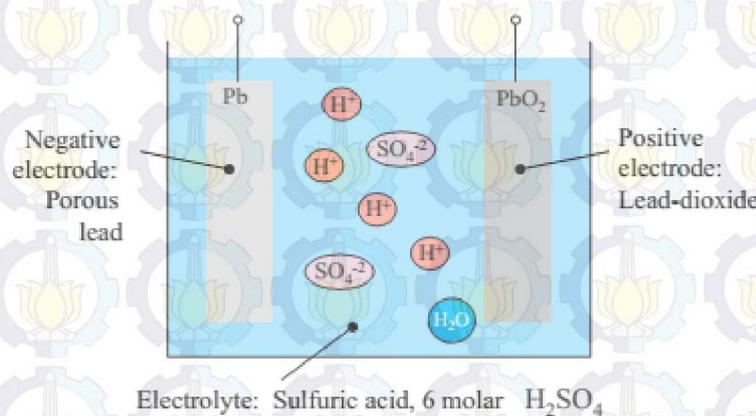
Untuk mendapatkan energi spesifik yang diperlukan beberapa baterai seringkali dihubungkan secara seri maupun paralel. Sejumlah baterai terhubung seri untuk mendapatkan tegangan yang diinginkan sedangkan baterai dihubungkan paralel untuk meningkatkan kapasitas. Hampir seluruh jenis baterai dapat terhubung seri maupun paralel namun harus dengan jenis baterai yang sama dan kapasitas yang sama. Baterai terhubung seri sering kali digunakan karena tegangan yang terukur adalah penjumlahan dari tegangan masing-masing baterai yang dihubungkan seri.

Jika dalam sebuah *pack* baterai terdapat baterai lemah maka dapat mengakibatkan ketidakseimbangan. Hal tersebut dapat mengakibatkan kerusakan pada baterai

yang lemah. Sebagai ilustrasi, terdapat sebuah *pack* baterai terdiri dari baterai lemah dan baterai kuat, *pack* tersebut masih dapat mensuplai beban kecil. Namun, bila untuk beban yang besar maka baterai lemah akan rusak. Hal yang sama terjadi bila menghubungkan baterai dengan kapasitas yang berbeda. Baterai dengan kapasitas yang lemah akan rusak terlebih dahulu.

2.1 Karakteristik Baterai Lead acid

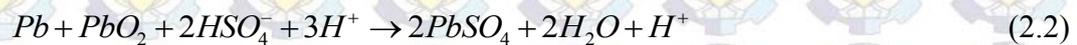
Jenis baterai yang sering digunakan dalam bidang industri adalah baterai sekunder jenis NiCd, Lead acid, NiMH, NiZn dan Lithium-ion. Baterai jenis Lead acid sering digunakan pada mobil listrik dan renewable energy. Baterai lead acid terdiri dari plat positif dan plat negative yang dipisahkan oleh satu ataupun lebih lapisan material. Pada umumnya, plat dibuat dari material aktif yang dilekatkan pada sebuah struktur grid yang terbuat dari timah atau timah campuran. Elektrolit pada baterai lead acid adalah campuran dari air dan senyawa sulfur. Gambar 2.1 menunjukkan sebuah ilustrasi dari baterai lead acid secara umum.



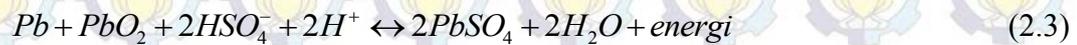
Gambar 2.1 Konstruksi baterai lead acid secara umum

Baterai Kelebihan baterai lead acid adalah biaya per-watt yang relative murah, *self-discharge* kecil dan kemampuan untuk mensuplai kebutuhan dengan arus yang tinggi. Selain itu, baterai Lead acid juga digunakan untuk aplikasi dengan *deep-cycle* yaitu dirancang untuk *discharged* hingga 80% Depth of Discharge (DOD).

Adapun reaksi elektrokimia dari baterai lead acid adalah sebagai berikut :



Reaksi Keseluruhan :



Dari reaksi keseluruhan dapat disimpulkan bahwa dari kiri ke kanan adalah reaksi *discharge* dan dari kanan ke kiri adalah reaksi *charge*.

Baterai lead acid digunakan untuk sektor industri dan transportasi . Beberapa keuntungan dari penggunaan baterai jenis lead acid ditunjukkan pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Keuntungan dan kerugian penggunaan baterai lead acid

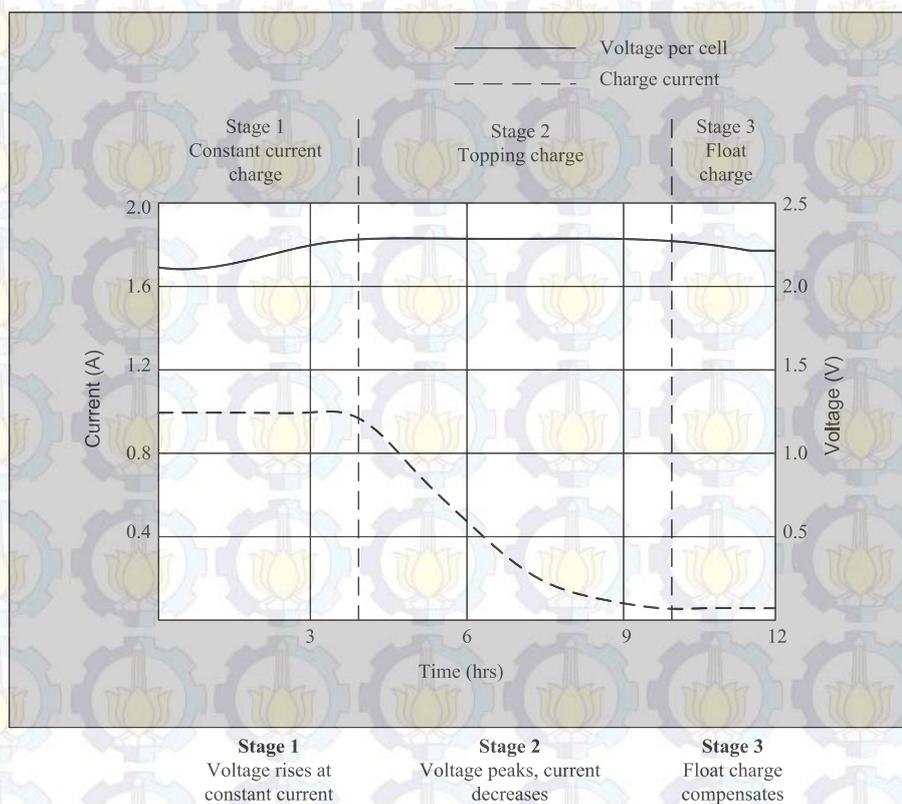
Keuntungan	Memiliki <i>self-discharge</i> terkecil
	Ekonomis dan Mannufatur yang sederhana.
	Mampu digunakan untuk kebutuhan akan arus <i>discharge</i> yang besar
	Stabil digunakan saat suhu tinggi maupun rendah
Kerugian	Berat
	Slow <i>charge</i> (Full <i>charge</i> bisa mencapai 14 jam)
	Harus disimpan dalam kondisi <i>charge</i> untuk mencegah <i>sulfation</i>
	<i>Cycle</i> terbatas
	Tidak ramah lingkungan

2.2 Charging pada Baterai Lead acid

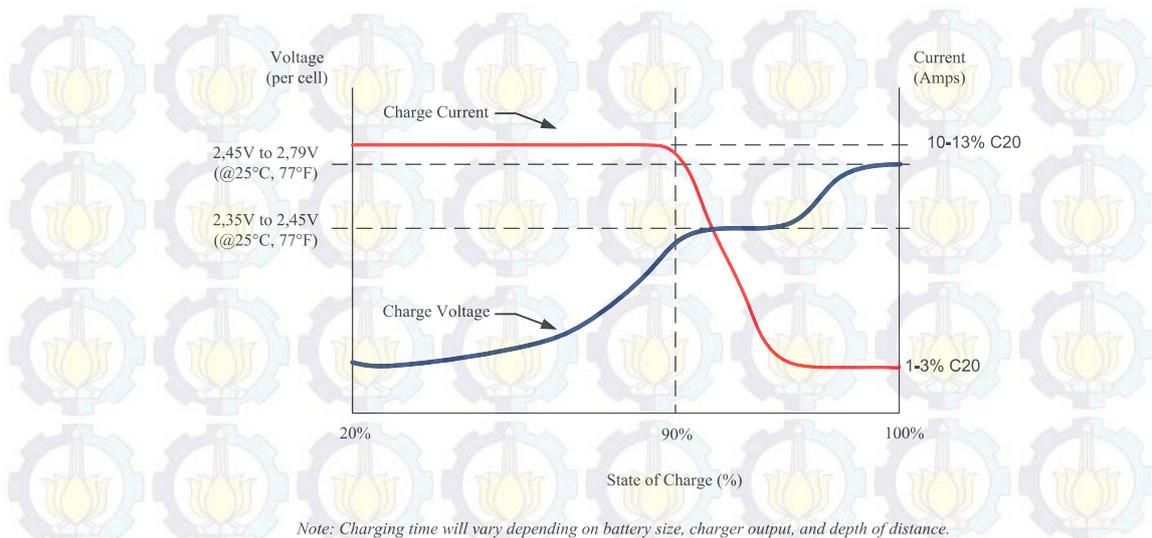
Charging pada baterai Lead acid menggunakan algoritma berbasis tegangan yang serupa dengan sistem *charging* pada baterai lithium-ion. Waktu *charging* sebuah baterai lead acid berkisar kurang lebih 12-16 jam untuk baterai dengan kapasitas yang besar. Untuk mengatasi waktu *charging* yang cukup lama dibutuhkan arus yang cukup besar dan metode *charge* multi-stage namun baterai lead acid tidak dapat mengalami *charging* secepat baterai lain.

Baterai lead acid memiliki tiga tahapan *charge* yang hampir sama dengan tiga tahapan *charging* pada baterai secara umum yaitu *charge* menggunakan arus konstan (*bulk*), *topping charge* beroperasi pada arus yang lebih rendah dan dalam keadaan saturasi serta float *charge* yang berfungsi sebagai kompensasi atas rugi-rugi dari *self-discharge* dari baterai.

Tahap pertama membutuhkan waktu sekitar setengah dari waktu *charging*. Pada saat tahap ini kapasitas baterai dapat terpenuhi hingga sekitar 70% dari kapasitas total. Tahap selanjutnya yaitu *topping charge* akan mengisi sisa kapasitas yang dibutuhkan oleh baterai. Tahap kedua memiliki tahap yang penting karena jika dihilangkan baterai tidak bisa mencapai kapasitas penuh. Baterai perlu *charging* hingga 100% dari kapasitas untuk menghindari sulfasi pada pelat negatif baterai.



Gambar 2.2 Karakteristik *Charging* pada Baterai Lead acid



Gambar 2.3 *Charging* menggunakan *constant current* pada baterai lead acid jenis Trojan (Trojan Battery Company, 2015)

Metode *charging* baterai lead acid constant current adalah metode *charging* termudah yang dapat diterapkan secara langsung. Gambar 2.3 adalah metode *charging* yang sering digunakan untuk baterai jenis lead acid. Saat kondisi *charging* Namun, metode *constant current* tidak disarankan digunakan untuk baterai yang terhubung seri karena beberapa sel baterai akan mencapai kapasitas maksimum sebelum sel yang lain mencapainya. Jika hal ini diteruskan maka akan mengakibatkan kerusakan pada baterai.

Tabel 2.2 Batas tegangan yang diperkenankan pada mode *charging* ((Trojan Battery Company, 2015)

Tegangan Baterai	6 Volt	8 Volt	12 Volt
<i>Daily Charge</i>	7,4	9,87	14,8
<i>Absorption Charge for RE Application</i>	7,05-7,35	9,4-9,8	14,1-14,7
<i>Float Charge</i>	6,6	8,8	13,2
<i>Equalize Charge</i>	7,8	10,4	15,5

2.3 Faktor yang Mempengaruhi Baterai

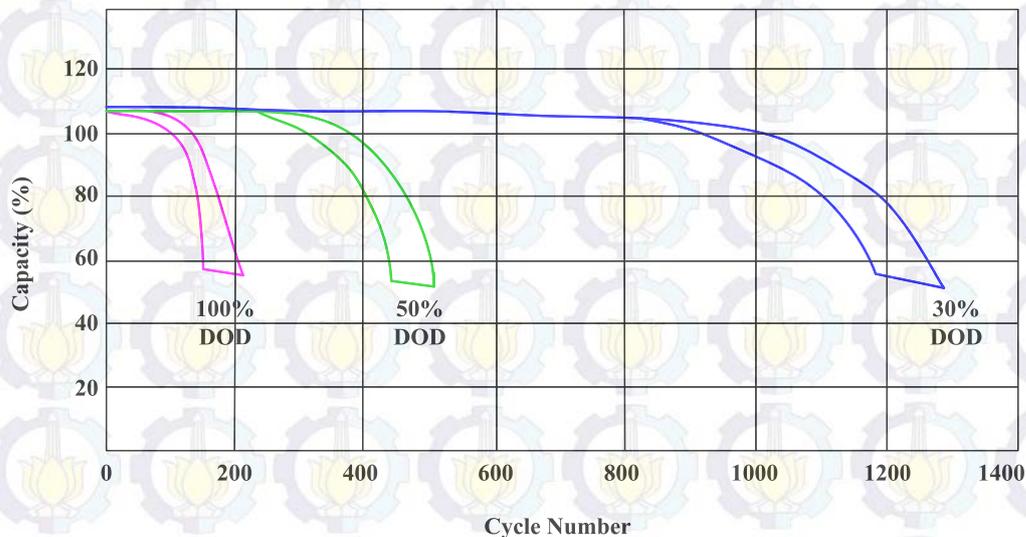
Seiring dengan waktu pemakaian, kapasitas baterai akan berangsur turun dikarenakan sulfasi dari pelat baterai akibat dari berbagai macam keadaan . Adapapun beberapa hal yang perlu diperhatikan yaitu :

- a. Kondisi *charging* atau *discharging* yang telah dialami baterai
- b. DOD baterai

- c. *Overcharge* dan *under discharge*
- d. Suhu rata-rata baterai

2.3.1. *Depth of Discharge (DOD)*

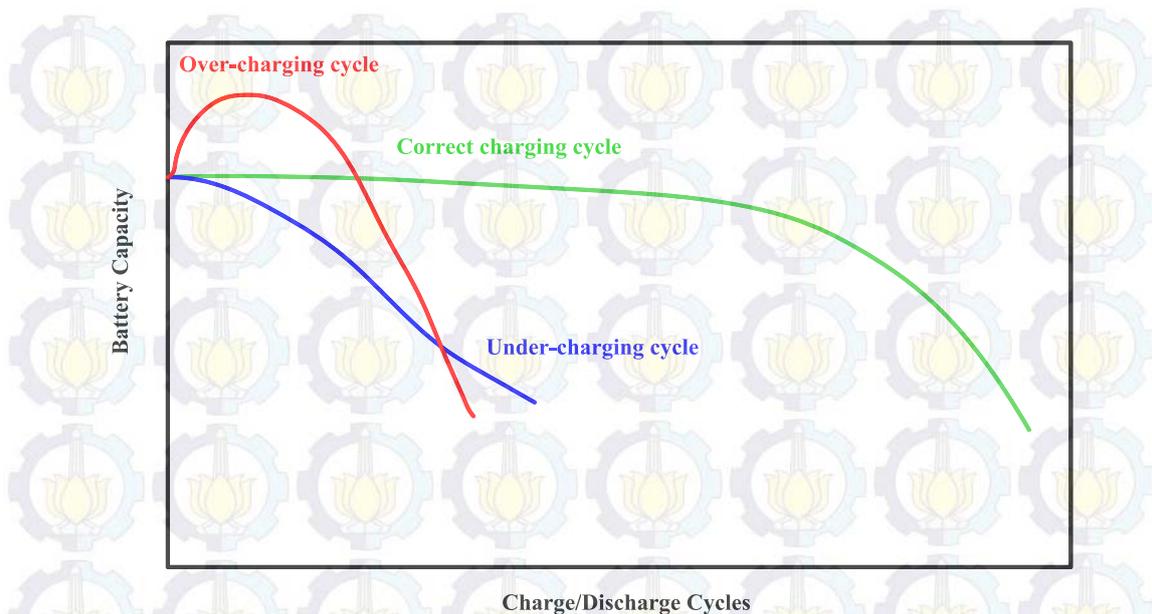
Depth of Discharge (DOD) adalah hubungan antara kapasitas baterai atau SOC sebagai parameter utama dalam merancang baterai untuk ditempatkan dalam sistem. Pada umumnya baterai dapat dikategorikan sebagai baterai dengan *deep-cycle* dan *shallow-cycle*. Baterai dengan *deep-cycle* memiliki DOD lebih dari 50% hingga 80%. Gambar 2.4 menunjukkan fungsi baterai terhadap jumlah siklus baterai dan DOD untuk baterai dengan *deep-cycle* dan *shallow-cycle*. Dari gambar 2.4 menunjukkan bahwa baterai dengan *deep-cycle* DOD lebih dari 50% dapat digunakan hingga 1000 siklus



Gambar 2.4 Hubungan antara kapasitas baterai, dod dan siklus baterai untuk baterai dengan *shallow-cycle*

2.3.2. *Overcharge* dan *Undercharge*

Selain DOD siklus pengisian muatan atau *charging* pada baterai juga memiliki peranan yang penting dalam menentukan lifetime dari baterai. Pengisian yang berlebihan maupun penggunaan yang berlebihan akan mempersingkat umur baterai.



Gambar 2.5 Pengaruh *overcharge* dan *undercharge* terhadap siklus baterai

Kondisi *overcharge/overdischarge* dapat mempengaruhi umur baterai karena dapat berakibat pada oksidasi, timbul gas serta dekomposisi eksotermik dari material aktif. *Overdischarge* pada elektroda positif dapat berakibat pada perubahan susunan kimiawi pada material aktif yang dapat berujung pada kerusakan masing-masing sela baterai. Gambar 2.5 menunjukkan pengaruh *charge* dan *discharge* terhadap umur baterai

2.4 *State of Charge* (SOC) dan Kapasitas Baterai Lead acid

State of charge (SOC) adalah salah satu bagian penting dalam transfer energi menggunakan baterai. SOC bermanfaat untuk menentukan kapasitas yang masih tersedia pada baterai karena SOC merepresentasikan presentase dari rating kapasitas total baterai. Selain itu, SOC dapat berfungsi sebagai indikator berapa jumlah energi yang dapat disalurkan sebelum dilakukan *charging* ulang. Gambar 2.6. adalah contoh sebuah penunjuk SOC pada baterai. Pada umumnya, SOC direpresentasikan sebagai prosentase dari kapasitas rating baterai bukan dari kapasitas baterai terakhir *charging*. Kapasitas rating baterai berbeda dengan kapasitas baterai terakhir *charging* karena faktor umur dan kondisi lingkungan baterai.



Gambar 2.6 Kapasitas baterai secara umum

Berbagai macam metode telah digunakan untuk menentukan mengukur SOC pada sebuah baterai namun belum memungkinkan untuk mengukur SOC secara langsung berdasarkan parameter fisik yang terukur. Adapun beberapa metode penentuan SOC adalah sebagai berikut :

- a. Pengukuran langsung
- b. Estimasi SOC berbasis *open circuit voltage (OCV)*
- c. Estimasi SOC berbasis Arus atau *Coulomb Counting*
- d. Pengukuran SOC dengan Hydrometer
- e. Pengukuran SOC dengan metode lainnya

Pada umumnya kapasitas dari sebuah sel baterai menunjukkan muatan atau kapasitas yang tersedia. Satuan dari kapasitas baterai adalah Ampere-hour (Ah). Satu Ampere adalah unit pengukuran yang digunakan sebagai satuan arus listrik dan didefinisikan sebagai Coulomb dari muatan yang melewati konduktor dalam satu detik. Kapasitas dari sebuah sel baterai berkaitan dari kuantitas material aktif yang terkandung di dalamnya yaitu elektrolit dan luas permukaan dari plat. Kapasitas baterai diukur saat kondisi *discharging* dengan arus yang konstan hingga mencapai tegangan terminal. Hal tersebut dilakukan dengan suhu konstan yaitu sekitar 25°C (77F). Kapasitas dari baterai didapatkan dari hasil perkalian arus *discharging* dengan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai tegangan terminal.

Rated capacity adalah salah satu istilah umum yang digunakan untuk mendefinisikan kemampuan baterai dalam memberikan arusnya. Manufaktur

produsen baterai seringkali mencantumkan rated capacity baterai dalam bentuk ampere-hours pada rating *discharge* tertentu. Sebagai contoh, sebuah baterai lead acid memiliki kapasitas 200Ah untuk rating 10 jam akan memberikan arus 20 A dalam waktu 10 jam dalam kondisi suhu standar (25°C). sebagai kemungkinan lain, *discharge* rate dapat didefinisikan sebagai *charge* rate atau C-rate dari baterai. sebagai contoh sebuah baterai memiliki rating kapasitas sebesar 200ah pada *discharge* rate sebesar C/10. *Discharge* rate dari baterai tersebut dapat didapatkan dari :

$$C/10 \text{rate(amperes)} = 200Ah / 10h = 20A \quad (2.4)$$

Semakin besar *discharge* rate dari sebuah baterai maka semakin kecil kapasitas baterai tersebut dan begitu pula sebaliknya. *Discharge* rate dari baterai lead acid yang digunakan sebagai UPS biasanya adalah C/8, C/10 dan C/20.

2.4.1. Pengukuran Langsung

Pada metode pengukuran langsung mengasumsikan bahwa arus yang mengalir dalam sel baterai adalah konstan. SOC dihitung berdasarkan perubahan waktu sesuai dengan persamaan

$$\Delta q = i \Delta t \quad (2.5)$$

Pada metode ini waktu saat *charging* dan *discharging* akan dijumlahkan baik positif maupun negatif untuk menentukan SOC. Metode ini memiliki kelemahan yaitu arus diasumsikan selalu konstan. Pada kenyataannya arus yang mengalir pada baterai tidak pernah konstan, arus pada baterai akan berbeda saat proses *charging* dan *discharging*.

2.4.2. SOC Berdasarkan *Open Circuit Voltage* (OCV)

Metode ini dapat diaplikasikan untuk baterai dengan tegangan yang sebanding dengan SOC seperti pada baterai lead acid. SOC dapat dihitung dengan mengukur *open circuit voltage* (OCV). Untuk mendapatkan tegangan OCV baterai lead acid harus dikondisikan *idle* selama 6 jam sebelum dilakukan pengukuran. Adapun contoh pengukuran SOC berdasarkan tegangan pada baterai lead acid Trojan ditunjukkan oleh tabel 2.3.

Tabel 2.3 pengukuran SOC berdasarkan tegangan OCV pada trojan (Trojan Battery Company, 2015)

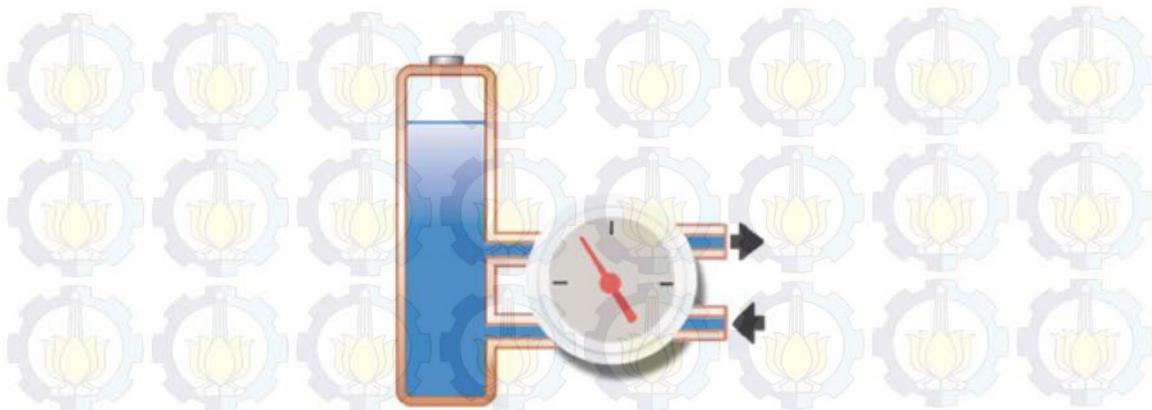
SOC (%)	Open Circuit Voltage (Volts), suhu 25°C		
	Tegangan sel	Baterai 6 V	Baterai 12 V
100	2,212	6,37	12,73
90	2,103	6,31	12,62
80	2,083	6,25	12,50
70	2,062	6,19	12,37
60	2,04	6,12	12,24
50	2,017	6,05	12,10
40	1,993	5,98	11,96
30	1,969	5,91	11,81
20	1,943	5,83	11,66
10	1,918	5,75	11,51

2.4.3. *Coulomb Counting* atau Pengukuran SOC berbasis Arus

Estimasi SOC menggunakan metode ini hampir sama dengan metode pengukuran SOC secara langsung yang menggunakan persamaan dasar yaitu :

$$q = \int_0^t i(t) dt \quad (2.6)$$

Nilai q diperoleh dari nilai integral dari arus. Metode ini menjumlahkan arus yang masuk dan keluar dari baterai dalam waktu yang sama untuk menentukan kapasitas dari baterai tersebut. Metode ini disebut pula sebagai metode Coulomb Counting. Arus yang mengalir masuk dan keluar dari baterai diperoleh dengan cara mengukur tegangan drop pada resistor dengan menggunakan hukum Ohm. Metode Coulomb *counting* hanya menghitung arus yang keluar masuk baterai melalui rangkaian eksternal dengan mengasumsikan bahwa nilai kapasitas baterai adalah hanya fungsi arus. Pada kenyataannya, SOC dari baterai tidak hanya ditentukan oleh fungsi arus saja, melainkan bergantung pada suhu, *self-discharge rate*, kapasitas yang diperkenankan dan umur baterai. Kelemahan dari metode ini adalah seringkali menimbulkan eror yang dapat dihindari dengan upaya kalibrasi dan memprogram ulang secara berkala.



Gambar 2.7 Ilustrasi Pengukuran Berdasarkan *Coulomb Counting*

2.4.4. Hydrometer

Salah satu metode untuk memperkirakan SOC adalah menggunakan hydrometer namun metode ini hanya dapat diterapkan untuk baterai lead acid yang *overcharging* dan baterai nickel-cadmium. Cara kerja dari metode ini adalah saat baterai dalam kondisi *charging*, asam sulfat didalam sel baterai akan menjadi lebih berat disebabkan oleh gravitasi spesifik (*Specific gravity*) yang meningkat. Sebaliknya, jika baterai dalam kondisi *discharge* sehingga SOC mengalami penurunan maka asam sulfat akan melepaskan diri dari elektrolit yang menempel pada plat dan membentuk lead sulfate. Kerapatan dari elektrolit akan menjadi lebih ringan serupa dengan air dan *specific gravity* akan menjadi lebih rendah. Tabel 2.4 menunjukkan standar BCI untuk estimasi SOC saat perawatan baterai free starter dengan antimony.

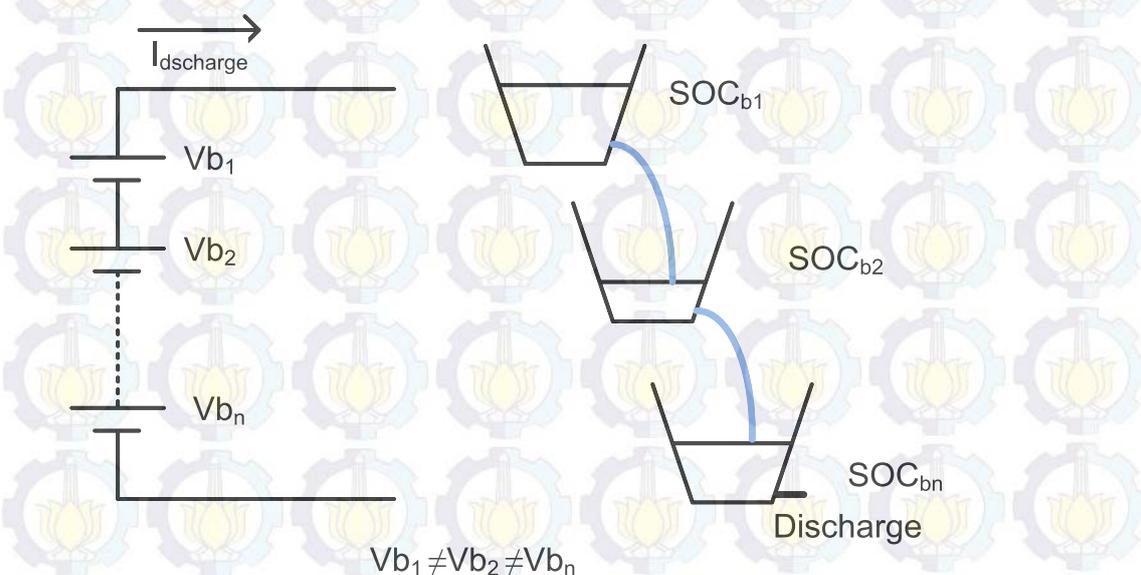
Tabel 2.4 Standar BCI untuk estimasi SOC dari *maintenance-free starter battery* dengan *antimony*

SOC	<i>Specific Gravity</i> rata-rata	Open Circuit Voltage			
		2 Volt	6 Volt	8 Volt	12 Volt
100%	1,265	2,10	6,32	8,43	12,65
75%	1,225	2,08	6,22	8,30	12,45
50%	1,190	2,04	6,12	8,16	12,24
25%	1,155	2,01	6,03	8,04	12,06
0%	1,120	1,98	5,95	7,72	11,89

Estimasi menggunakan hydrometer dilakukan dalam suhu 26°C (78°F) dan baterai diistirahatkan selama 24 jam setelah kondisi *charge* dan *discharge*.

2.5 Teknik Ekualisasi Baterai

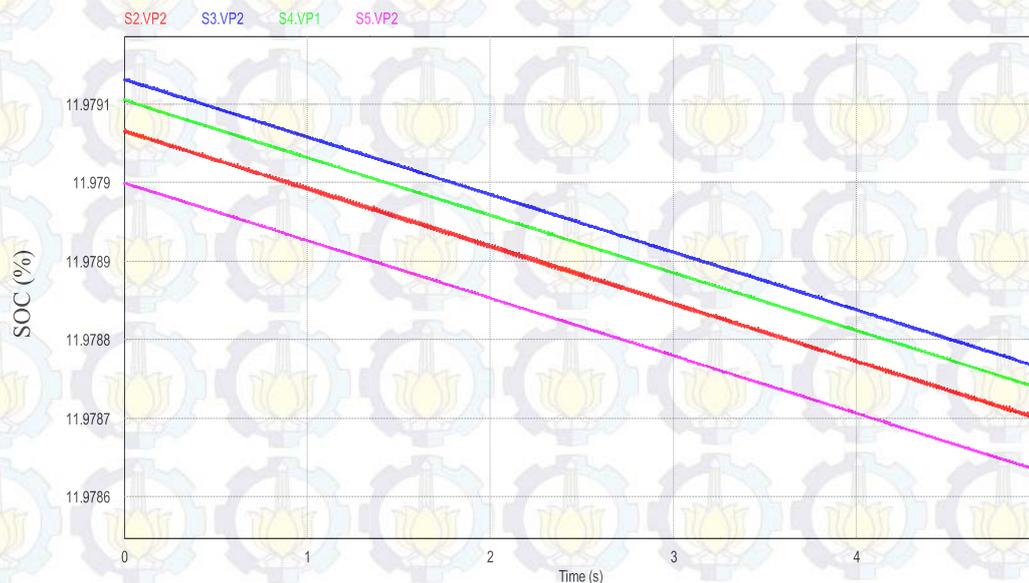
Untuk mendapatkan tegangan maupun kapasitas yang sesuai dengan keinginan seringkali baterai dihubungkan seri maupun paralel. Baterai dihubungkan seri untuk mendapatkan tegangan yang sesuai sedangkan baterai dihubungkan paralel untuk mendapatkan kapasitas yang diinginkan. Pada aplikasinya saat baterai dihubungkan seri, tegangan baterai antara satu dengan lainnya berbeda sehingga kapasitas masing-masing baterai pun akan berbeda. Gambar 2.8 menunjukkan ilustrasi tegangan dan kapasitas yang berbeda pada baterai terhubung seri. Perbedaan tersebut akan berpengaruh bila baterai dihubungkan dengan beban atau terhubung dengan *charger*. V_{b1} , V_{b2} , V_{bn} memiliki tegangan yang berbeda sehingga SOC_{b1} , SOC_{b2} dan SOC_{bn} akan berbeda pula. Ketika baterai terhubung beban atau mengalirkan $I_{discharge}$ maka kapasitas masing-masing baterai atau SOC akan menurun, hal ini diilustrasikan sebagai air pada masing-masing wadah. Air dalam wadah tersebut akan berbeda sesuai dengan kondisi awal air dalam wadah. Semakin sedikit air dalam wadah maka semakin cepat habis teralirkan. Jika wadah dengan air paling sedikit sudah habis maka air dalam wadah lainnya belum tentu habis. Hal tersebut adalah ilustrasi SOC pada baterai.



Gambar 2.8 Ilustrasi tegangan dan kapasitas baterai yang tidak sama

Ketidakeimbangan sel baterai dalam sistem manajemen baterai adalah salah satu faktor yang mempengaruhi umur baterai. Jika sebuah sistem baterai tidak memiliki sistem penyeimbang antara baterai akan mengakibatkan kapasitas total dari sistem baterai akan menurun dan berakibat pada gagalnya sistem baterai tersebut. Beberapa faktor yang mengakibatkan ketidakeimbangan sel baterai dibagi menjadi dua faktor utama yaitu faktor eksternal dan faktor internal. Faktor internal adalah manufaktur baterai, resistansi internal yang berbeda dan self *discharge* yang berbeda sedangkan faktor eksternal diakibatkan oleh peralatan di luar baterai yang mengakibatkan berkurangnya energi baterai. Ekualisasi baterai dalam sebuah sistem manajemen baterai dibuat untuk mengatasi ketidakeimbangan baterai. Ekualisasi mengatur sedemikian rupa agar SOC pada masing-masing baterai memiliki nilai yang sama.

Gambar 2.9 menunjukkan sebuah sistem yang terdiri dari empat baterai yang terhubung seri dengan SOC yang berbeda. Jika dalam sistem tersebut diberikan rangkaian ekualisasi maka dapat meningkatkan kapasitas pack baterai dan dapat dioperasikan lebih lama.



Gambar 2.9 Tegangan dari baterai tanpa menggunakan rangkaian ekualisasi

Teknik ekualisasi diklasifikasikan menjadi 2 macam berdasarkan media disipasi yaitu teknik ekualisasi aktif dan teknik ekualisasi pasif.

2.5.1 Teknik Ekualisasi Pasif

Teknik ekualisasi pasif seringkali disebut sebagai *dissipative charge equalization technique* karena elemen disipasi dihubungkan paralel dan digunakan untuk mengurangi energi ekstra dari sel baterai. Jika dalam sebuah sistem baterai terdapat baterai dengan SOC maksimum atau tegangan maksimum saat kondisi *charging* maka sel tersebut akan di-*bypassed* melalui elemen disipasi. Saat kondisi arus *charging* melewati elemen disipasi, energi ekstra baterai dengan SOC maksimum akan menurun sehingga seluruh sel baterai akan memiliki SOC yang sama. Teknik ekualisasi aktif dibagi menjadi 2 macam antara lain :

- Resistive shunt equalization
- Analog shunt equalization.

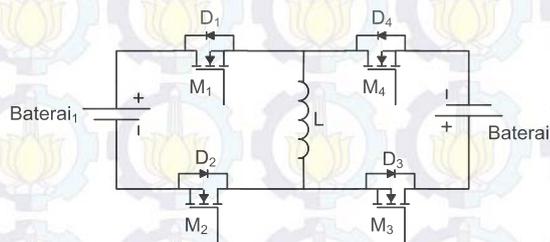
2.5.2 Teknik Ekualisasi Aktif

Teknik ekualisasi aktif berbeda dengan teknik ekualisasi pasif. Teknik ekualisasi pasif disebut juga dengan *non-dissipative charge equalization technique* karena energi tidak dikurangi melalui elemen pasif namun metode ini menggunakan elemen aktif atau non-disipasi untuk transfer energi dari baterai satu menuju baterai lainnya. Berdasarkan energi transfer antar baterai, teknik ekualisasi aktif dibagi menjadi ekualisasi secara global dan ekualisasi secara local. Jika transfer energi dilakukan antara baterai satu dengan baterai yang terletak disampingnya saja, maka termasuk dalam ekualisasi lokal. Bila transfer energi berlangsung antara baterai berkapasitas atau SOC maksimal dengan baterai berkapasitas minimum maka disebut ekualisasi secara global. Beberapa metodologi ekualisasi menggunakan teknik ekualisasi aktif antara lain :

- *Switched capacitor equalization,*
- *Switched reactor equalization,*
- *Resonant equalization,*
- *Flyback DC-DC converter equalization,*
- *Magnetic core equalization,*
- *Non-dissipative current diverter.*

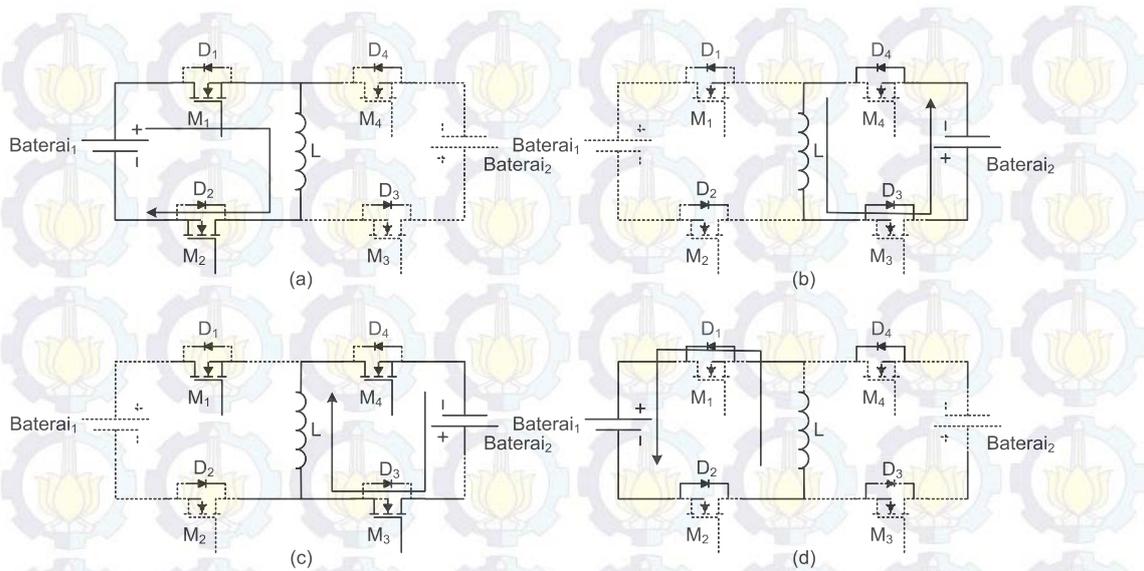
2.6 Rangkaian Ekualisasi dengan Buck/Boost Bi-Directional

Topologi Konverter DC-DC yang digunakan menggunakan induktor sebagai media penyimpanan sementara untuk menyalurkan energi yang tersimpan dari baterai dengan SOC tertinggi menuju baterai dengan SOC yang paling rendah. Topologi konverter *bi-directional* DC/DC untuk dua baterai ditunjukkan pada Gambar 2.10. Transfer Energi dilakukan dengan mentrigger mosfet M_1 - M_2 dan M_3 - M_4 secara bergantian. Sebagai contoh, Baterai₁ memiliki SOC yang lebih tinggi dibandingkan dengan Baterai₂.



Gambar 2.10 Topologi rangkaian ekualisasi menggunakan konverter DC/DC bi-directional pada dua baterai

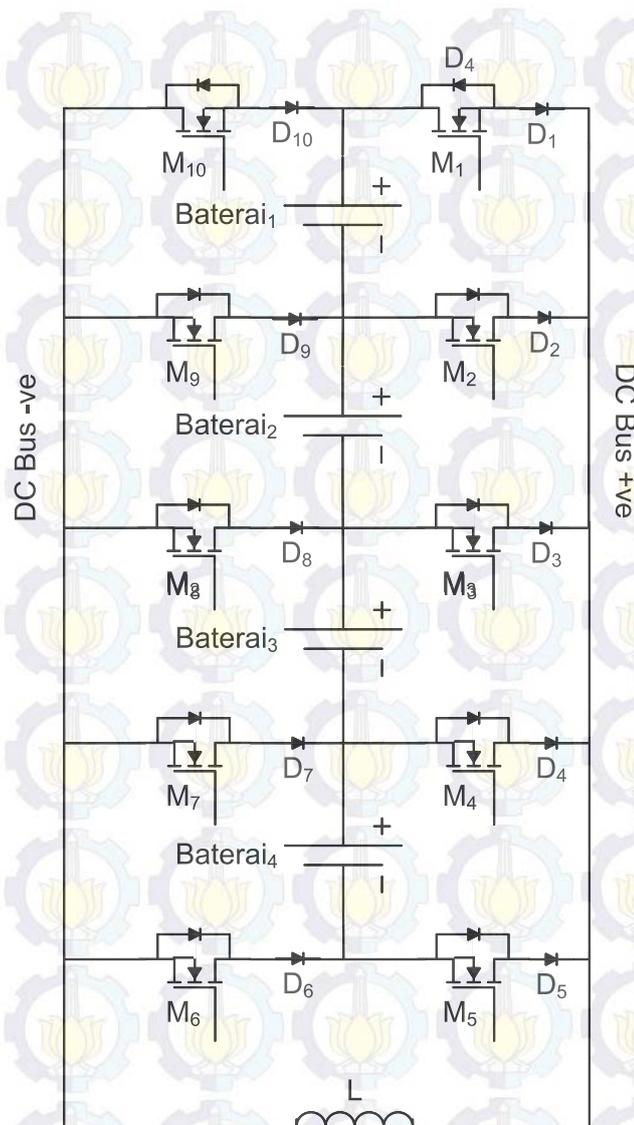
Pada kondisi pertama *switching* akan mentrigger M_1 dan M_2 sehingga Baterai₁ akan mengalirkan energi menuju induktor. Pada kondisi berikutnya *switching* akan menyalakan M_3 dan M_4 untuk mengalirkan energi yang tersimpan di induktor menuju Baterai₂. Hal tersebut akan berlangsung hingga SOC pada Baterai₁ sama dengan Baterai₂. Topologi transfer energi antara Baterai₁ dan Baterai₂ dapat dilihat pada Gambar 2.11(a) dan Gambar 2.11(b). Kondisi yang berkebalikan akan berlaku ketika Baterai₂ memiliki SOC yang lebih besar daripada Baterai₁. Kondisi transfer energi antara Baterai₂ menuju Baterai₁ dapat dilihat pada Gambar 2.11(c) dan Gambar 2.11(d) Pada Kondisi pertama M_3 - M_4 akan menyala terlebih dahulu untuk mengalirkan energi dari Baterai₂ menuju Baterai₁, kemudian pada kondisi selanjutnya M_1 - M_2 akan mengalirkan energi dari induktor menuju Baterai₁ hingga SOC Baterai₁ dan Baterai₂ memiliki nilai yang sama. Semakin besar jumlah baterai yang terhubung seri maka akan semakin kompleks rangkaian konverter yang digunakan. DC bus Untuk mempermudah transfer energi antar baterai terhubung seri dengan lebih dari dua buah. Rangkaian ekualisasi untuk empat baterai ditunjukkan pada Gambar 2.12.



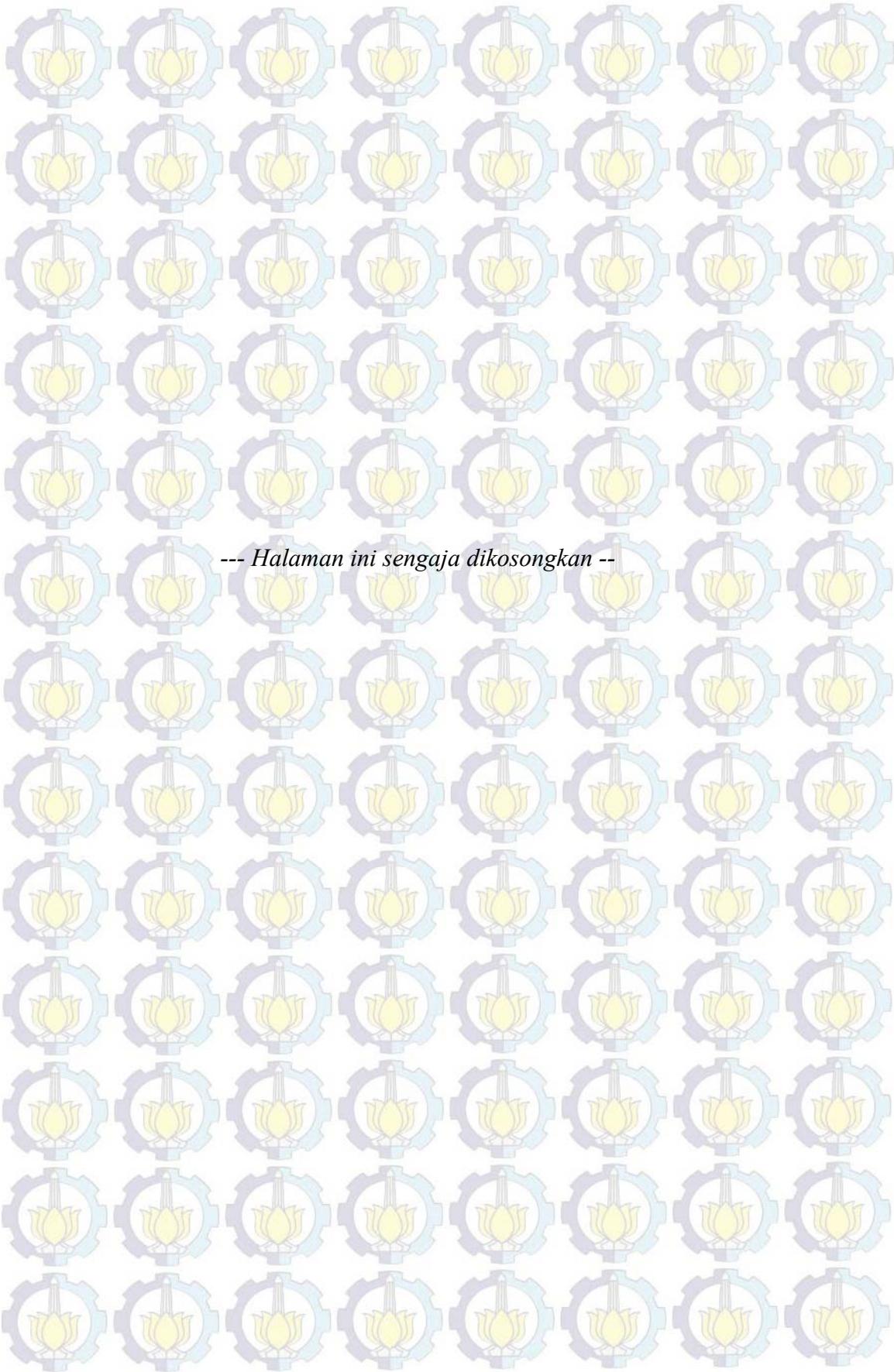
Gambar 2.11 (a) Baterai₁ discharge; (b) Baterai₂ charge; (c) Baterai₂ discharge; (d) Baterai₁ charge (Sriram, 2013)

Sebagai contoh Baterai₁ sebagai baterai yang dengan SOC tertinggi dan Baterai₄ dengan SOC terendah sehingga tahapan aliran energi adalah sebagai berikut :

- Kondisi pertama M_1 - M_2 ON sehingga energi akan mengalir dari Baterai₁ menuju induktor.
- Kondisi selanjutnya M_1 - M_2 OFF dan M_3 - M_4 ON sehingga energi akan mengalir dari induktor menuju Baterai₄
- Hal ini akan berlangsung bergantian hingga tegangan seluruh baterai memiliki SOC yang sama.



Gambar 2.12 Topologi ekualisasi untuk empat baterai (Sriram, 2013)



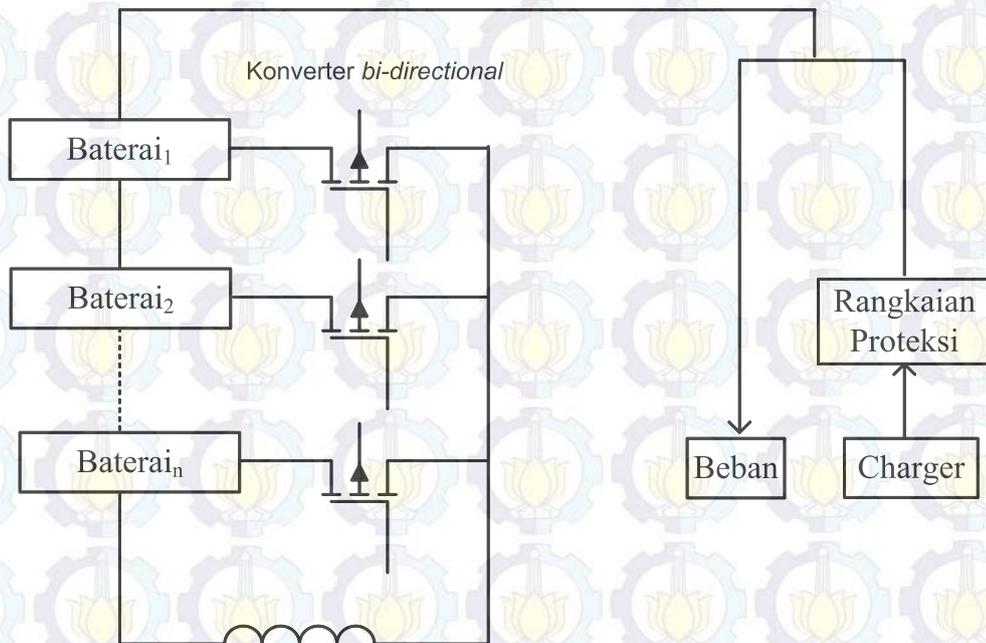
--- Halaman ini sengaja dikosongkan ---

BAB 3

DESAIN SISTEM EKUALISASI BATERAI

3.1 Konfigurasi Sistem

Secara umum sistem keseluruhan dari ekualisasi baterai ditunjukkan pada Gambar 3.1. Baterai yang digunakan adalah baterai jenis lead acid. Komponen utama dalam sistem ini adalah konverter *bi-directional* sebagai rangkaian ekualisasi aktif, pemodelan baterai, rangkaian proteksi, rangkaian beban, dan *constant current* sebagai *charger*.

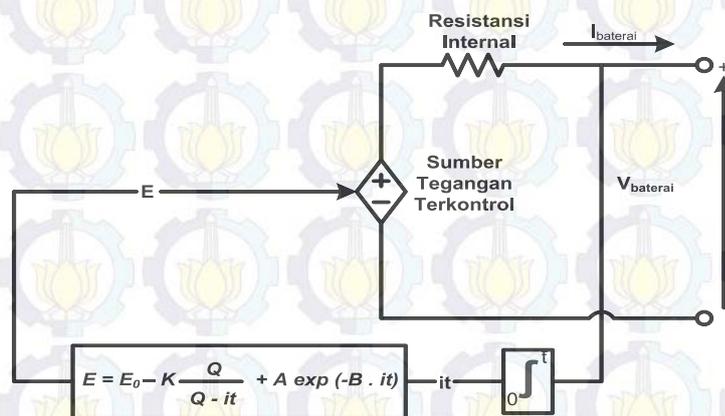


Gambar 3. 1 Konfigurasi sistem keseluruhan

3.2 Parameter Baterai Lead acid

Hampir semua jenis baterai dapat digunakan untuk sistem dengan energi terbarukan. Baterai Lead acid seringkali menjadi pilihan utama dalam penggunaan baterai karena harganya yang ekonomis, *deep cycle* dan umur baterai yang cukup panjang. Pada umumnya terdapat tiga macam pemodelan baterai yang digunakan secara luas yaitu pemodelan secara eksperimen, elektrokimia dan rangkaian

ekivalen. Pemodelan secara eksperimen dan pemodelan elektrokimia tidak cocok untuk merepresentasikan dinamika sel baterai yang digunakan untuk estimasi SOC. Pemodelan yang paling cocok digunakan untuk merepresentasikan karakteristik baterai adalah pemodelan dengan rangkaian ekivalen. Pemodelan rangkaian ekivalen sederhana yang digunakan adalah model Sheperd. Sheperd mengembangkan model baterai yang terdiri dari sumber tegangan yang terhubung seri dengan resistansi internal seperti pada Gambar 3.1. Sumber tegangan tersebut diatur oleh persamaan yang merepresentasikan perilaku elektrokimia dari baterai yang terdiri dari tegangan terminal, *open circuit voltage*, resistansi internal, arus *discharge* dan SOC.



Gambar 3.2 Rangkaian Ekivalen Baterai Non-Linear (Oliver,T., Louis, D. Abdel-Allah, 2007)

Dimana :

$\int idt$ adalah kapasitas aktual baterai (Ah)

E adalah tegangan tanpa beban (V),

E_0 adalah tegangan konstan baterai (V),

K adalah tegangan polarisasi (V),

Q adalah kapasitas baterai (Ah),

R adalah resistansi internal (Ω),

V_{baterai} adalah tegangan baterai (V)

A adalah amplitude daerah eksponensial (V), dan

B adalah konstanta waktu invers daerah eksponensial (Ah^{-1}).

Model Sheperd memiliki persamaan non-linear :

$$E = E_0 - K \frac{Q}{Q-it} + A \exp(-B \cdot it) \quad (3.1)$$

Persamaan tersebut merupakan tegangan non-linear yang merepresentasikan tegangan baterai yang sesungguhnya. Maksud dari pernyataan tersebut adalah ketika baterai hampir dalam kondisi *discharge* sepenuhnya dan tidak ada arus yang mengalir, tegangan akan bernilai mendekati nol. Model ini memiliki hasil yang akurat dan dapat merepresentasikan perilaku baterai pada umumnya.

Model baterai Sheperd berdasarkan beberapa asumsi dan memiliki batasan antara lain sebagai berikut :

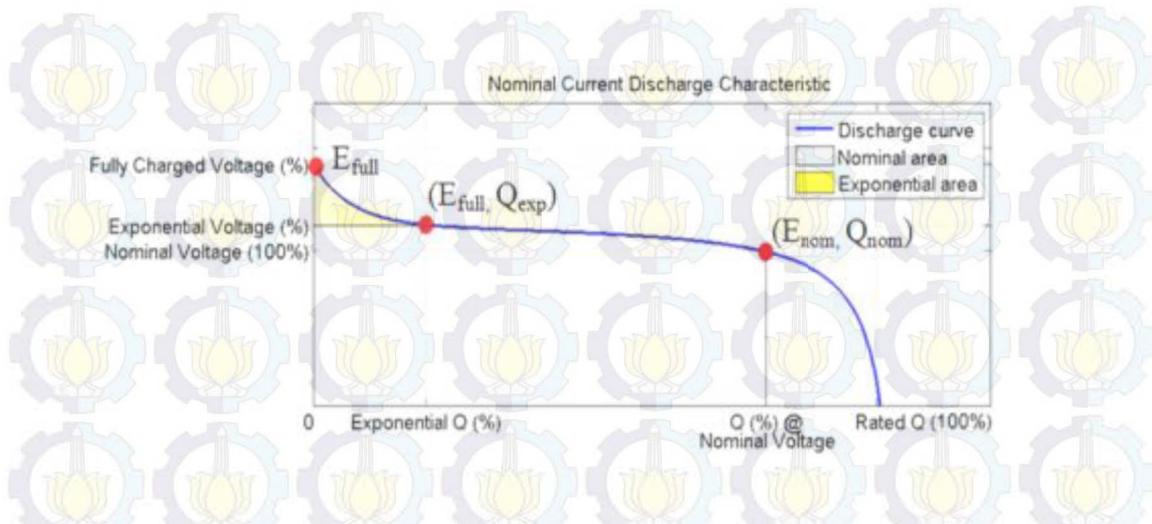
1. Asumsi model baterai

- Resistansi internal diasumsikan konstan baik saat kondisi *charging* maupun *discharging* dan tidak berubah dengan amplitudo arus.
- Parameter model baterai diperoleh dari karakteristik baterai saat kondisi *discharging* dan diasumsikan sama ketika kondisi *charging*.
- Kapasitas baterai tidak berubah seiring dengan perubahan amplitudo arus (tidak ada efek Peukert)
- Suhu tidak berpengaruh pada perilaku baterai
- Self-*discharge* dari baterai tidak direpresentasikan secara detail
- Model baterai ini tidak dipengaruhi oleh memori yang tersimpan

2. Batasan terhadap model baterai

- Tegangan minimal baterai adalah 0 V dan tegangan maksimal dari baterai adalah tak terhingga
- Kapasitas maksimum dari baterai adalah 0Ah dan kapasitas maksimum baterai tidak terbatas. (SOC baterai dapat melebihi nilai 100% jika baterai mengalami *overcharge*)

Parameter dari model baterai lead acid dapat diperoleh dari karakteristik kurva *discharge* dari baterai. Gambar 3.3 menunjukkan karakteristik *discharge* dari baterai lead acid pada model ini. Seluruh parameter dapat diperoleh dari perhitungan tiga titik, yaitu tegangan *charging* (E_{full}), daerah eksponensial (E_{exp} , Q_{exp}), dan daerah nominal (E_{nom} , Q_{nom}).



Gambar 3.3 Karakteristik kurva *discharge* dari baterai

3.2.1 Resistansi Internal

Resistansi internal merepresentasikan tegangan drop yang diakibatkan oleh current deviation dari baterai selain itu, resistansi internal mempengaruhi tegangan output dari baterai dan efisiensi. Hubungan antara kapasitas baterai, efisiensi, dan tegangan nominal baterai ditunjukkan persamaan :

Arus rating diperoleh dari persamaan kurva *discharge*

$$I_{nom} = Q_{nom} \times C / 1jam \quad (3.2)$$

Sehingga didapatkan persamaan

$$\eta = 1 - \frac{0,2 \times R \times Q_{nom}}{V_{nom}} \quad (3.3)$$

$$R = V_{nom} \frac{1 - \eta}{C / 1jam \times Q_{nom}} \quad (3.4)$$

$$R = 12 \frac{1 - 99,95\%}{0,5 \times 0,2517} \quad (3.5)$$

$$R = 0,6\Omega \quad (3.6)$$

3.2.2. Parameter Model Baterai

Parameter – parameter diperoleh dari tiga titik dari kurva yang ditunjukkan pada Gambar 3.3. Tegangan *fully charge*, titik akhir dari zona eksponensial

(tegangan dan *charge*) dan titik akhir dari zona nominal (tegangan dan *charge*).

Dari titik tersebut dapat diperoleh nilai parameter –parameter :

$$\left\{ \begin{array}{l} A = E_{full} - E_{exp} \\ B = \frac{3}{Q_{exp}} \\ K = [E_{full} - E_{nom} + A(-BQ_{nom}) - 1] \frac{Q - Q_{nom}}{Q_{nom}} \end{array} \right\} \quad (3.7)$$

dengan,

E_{full} adalah tegangan baterai saat terisi penuh,

E_{exp} adalah tegangan baterai saat kondisi eksponensial,

E_{nom} adalah tegangan nominal baterai,

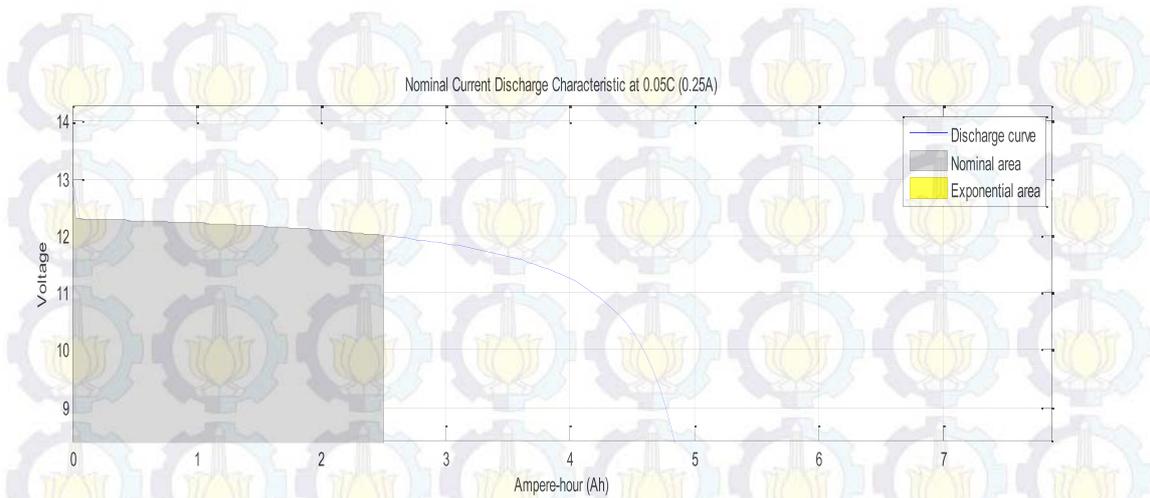
Q_{exp} adalah muatan baterai saat kondisi eksponensial,

Q_{nom} adalah muatan nominal baterai.

Dari persamaan diatas diperoleh parameter baterai seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.1.

Tabel 3. 1 Parameter baterai

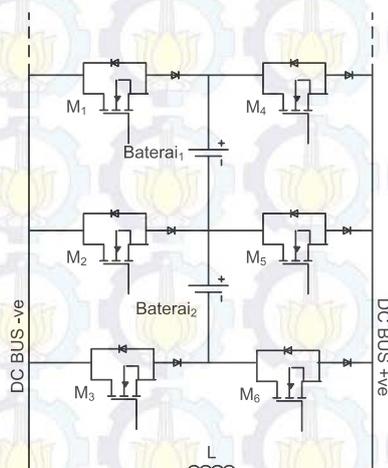
Parameter	Nilai
Q_{exp}	0,005245
Q_{nom}	0,2517
E_{exp}	12,3Volt
E_{nom}	12 Volt
E_{full}	12,96 Volt
A	0,66
B	7500
K	0,33
$R_{internal}$	0,6 Ω



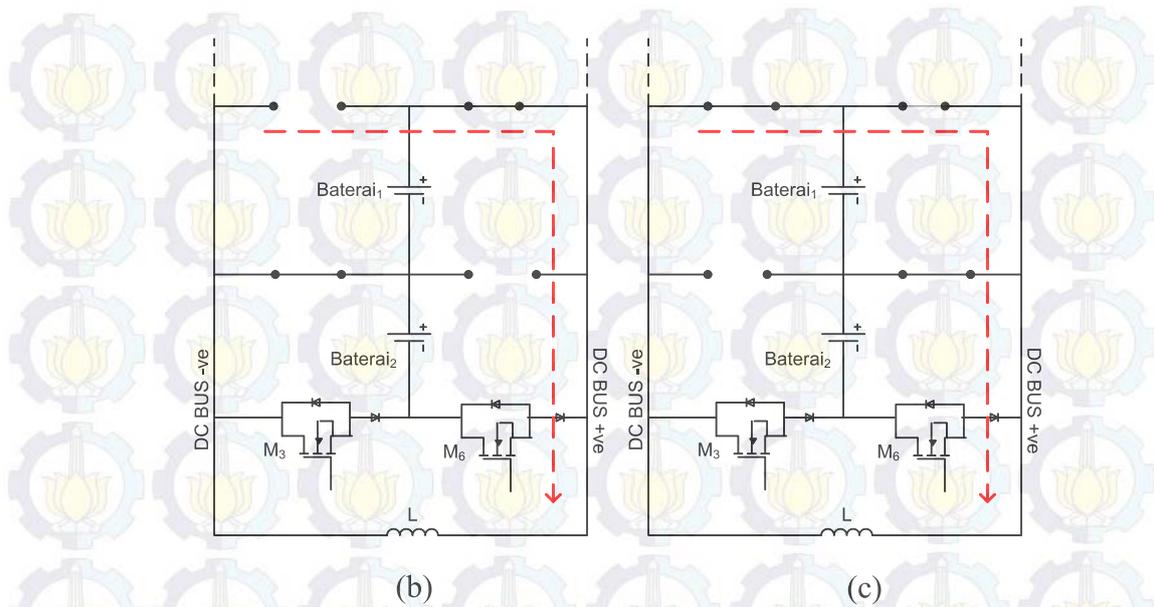
Gambar 3.4 Kurva karakteristik *discharge* baterai lead acid 0,5Ah 12 Volt

3.3 Karakteristik Rangkaian Konverter *Bi-Directional*

Rangkaian konverter merupakan rangkaian utama dalam proses ekualisasi baterai terhubung seri. Penentuan parameter konverter Bi-directional diperoleh dari penurunan persamaan rangkain konverter *bi-directional*. Sebagai asumsi aliran daya mengalir dari Baterai₁ menuju induktor kemudian dari induktor menuju Baterai₂ seperti yang terlihat pada Gambar 3.5(a). Pada kondisi pertama M_1 - M_2 ON sehingga energi akan mengalir dari Baterai₁ menuju induktor. M_1 - M_2 OFF dan M_3 - M_4 ON pada kondisi berikutnya sehingga mengalirkan energi dari induktor menuju Baterai₂



(a)



Gambar 3.5(a) Topologi untuk transfer energi dari Baterai₁ menuju Baterai₂ (b) M₄ dan M₂ ON (c) M₂ dan M₆ ON

Saat Baterai₁ kuat dan Baterai₂ lemah maka :

1. M₄ dan M₂ ON

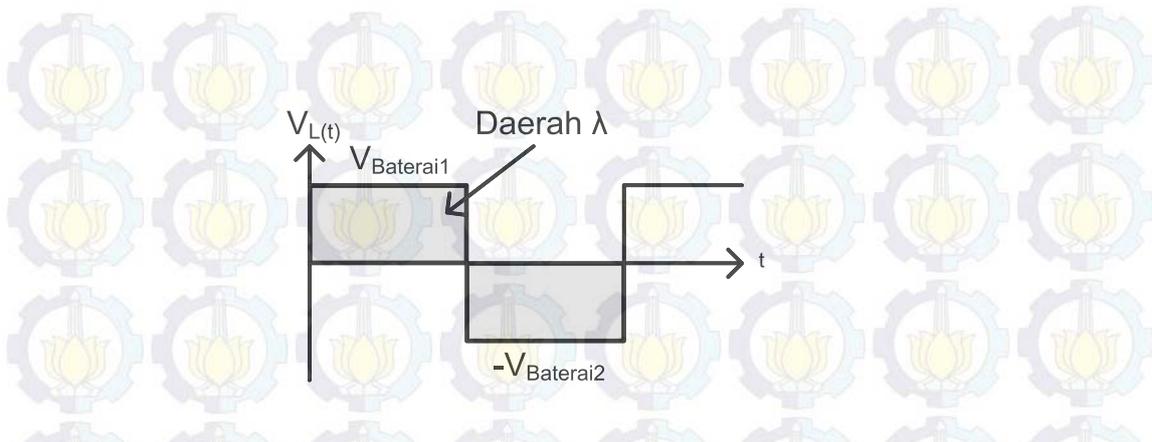
$$\left\{ \begin{array}{l} -V_{B1} + V_L(t_{4,2}) = 0 \\ V_L(t) = V_{B1} \\ \frac{di_L}{dT_{4,2}} = \frac{V_{B1}}{L} \end{array} \right. \quad (3.8)$$

Sedangkan pada saat kondisi M₂ dan M₆ ON diperoleh :

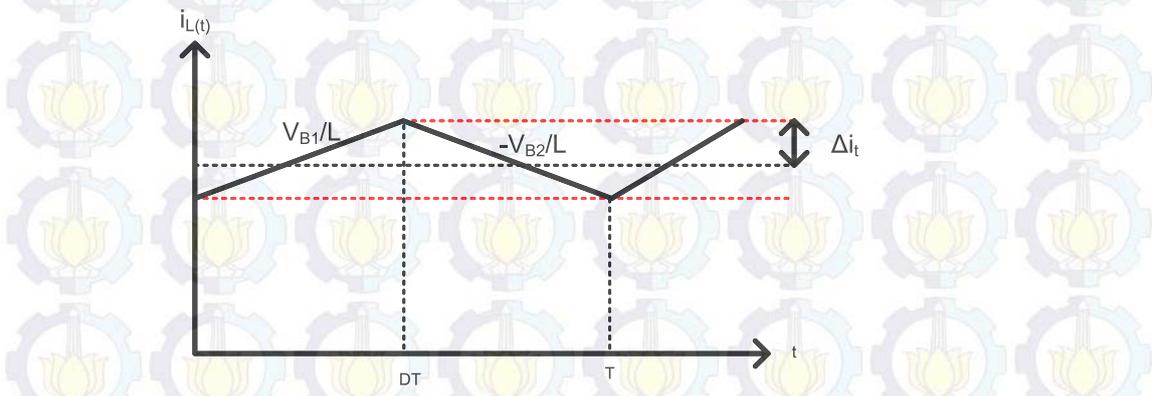
2. M₂ dan M₆ ON

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{B2} + V_L(t_{7,3}) = 0 \\ V_L(t_{7,3}) = -V_{B2} \\ L \frac{di_L}{dT_{7,3}} = -V_{B2} \\ \frac{di_L}{dT_{7,3}} = \frac{-V_{B2}}{L} \end{array} \right. \quad (3.9)$$

Dari persamaan (3.8) dan (3.9) diperoleh gelombang tegangan induktor saat M₄ dan M₂ ON yang ditunjukkan oleh Gambar 3.6 dan gelombang arus induktor M₂ dan M₆ ON pada Gambar 3.7.



Gambar 3.6 Gelombang tegangan induktor



Gambar 3.7 Gelombang arus induktor

Daerah λ pada Gambar 3.6

$$\lambda = \int_0^{T_s} V_L(t) dt = (V_{B1} \cdot DT_{4,2}) + (-V_{B2} \cdot DT_{2,6})$$

$$\langle V_L \rangle = \frac{\lambda}{T} = DT_{4,2} V_{B1} - DT_{2,6} V_{B2}$$

$$0 = DV_{B1} - D'V_{B2}$$

$$DV_{B1} = D'V_{B2}$$

$$DV_{B1} = (1-D)V_{B2}$$

$$DV_{B1} = V_{B2} - DV_{B2}$$

$$D(V_{B1} + V_{B2}) = V_{B2}$$

$$D = \frac{V_{B2}}{V_{B1} + V_{B2}}$$

(3.10)

Dari persamaan *duty cycle* pada persamaan (3.8) didapatkan kesimpulan bahwa *duty cycle* dari rangkaian ini tidak dapat melebihi nilai 0.5. Untuk menghitung Δi_L pada Gambar 3.7 adalah sebagai berikut :

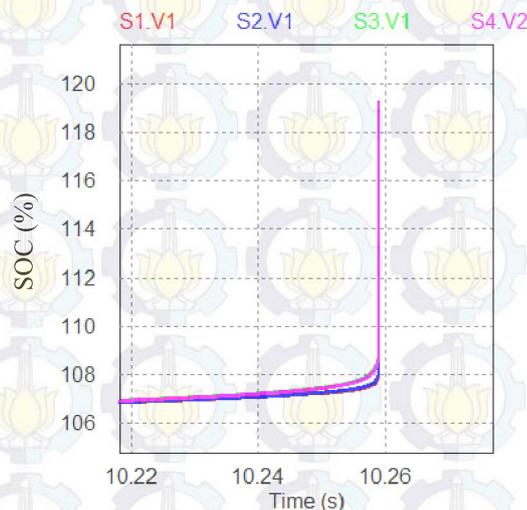
Perubahan $\Delta i_L = (slope)(\text{panjang subinterval})$

$$2\Delta i_L = \frac{V_{B1}}{L} DT \quad (3.11)$$

$$\Delta i_L = \frac{V_{B1}}{2L} DT \quad (3.12)$$

3.4 Rangkaian Proteksi Baterai

Dalam keadaan *charging* menggunakan power supply bernilai besar maupun *charging* dalam waktu yang cukup lama mengakibatkan siklus baterai menjadi lebih singkat dan berujung kepada kerusakan baterai secara permanen. Hal ini disebabkan oleh saat terjadi *overcharge* pada baterai, di dalam baterai tersebut akan terbentuk korosi grid, pembentukan gas, dan konsumsi air di dalam senyawa elektrolit baterai. Fenomena *overcharging* seringkali menjadi penyebab utama kegagalan pada baterai. Selain dapat mempersingkat umur baterai, *overcharging* dapat mengakibatkan kejadian yang lebih berbahaya. Oleh karena itu dibutuhkan sebuah rangkaian proteksi terhadap *overcharge* untuk menjaga siklus hidup baterai dan dapat digunakan secara aman. Gambar 3.8 adalah SOC baterai saat kondisi *overcharge*.



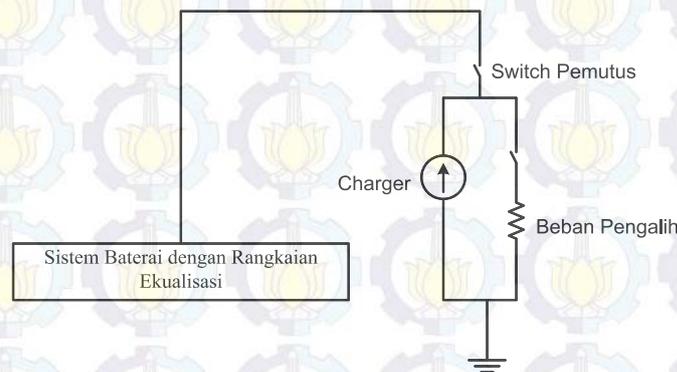
Gambar 3.8 SOC baterai saat kondisi *overcharging*

Salah satu akibat utama dari *overcharging* adalah timbul gas secara berlebihan. Dalam kondisi normal beberapa gas bermunculan, namun saat baterai dalam kondisi *overcharge* elektrolit dalam baterai akan *overheat* sehingga mengakibatkan hydrogen dan oksigen sehingga tekanan dalam baterai akan naik. Beberapa jenis baterai lead acid seperti unsealed flooded lead acid menggunakan metode sirkulasi udara untuk mengatasi tekanan dan sirkulasi gas pada baterai. Pembentukan gas secara yang lebih besar dari kapasitas sirkulasi udara atau malfungsi dapat berakibat pada mendidihnya air di dalam elektrolit sehingga dapat berakibat pada hilangnya air yang dapat merusak baterai. Baterai dalam kondisi *overcharging* dan *overheating* dapat mengakibatkan produksi hydrogen dan oksigen berlebih sehingga baterai dapat meledak seperti ditunjukkan pada gambar 3.9.



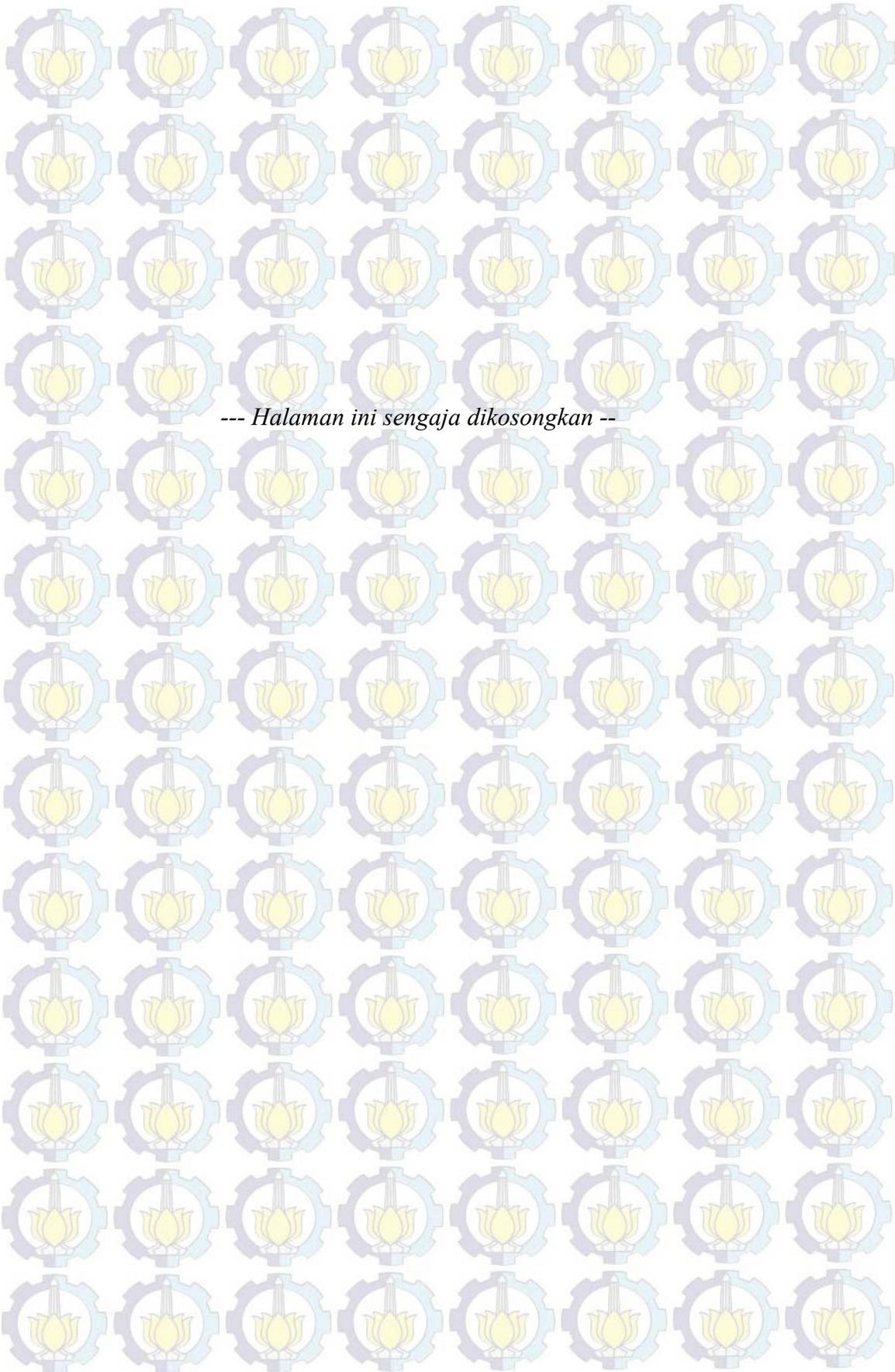
Gambar 3.9 Baterai yang meledak akibat dari penguapan air akibat dari *overcharging* (Olson, 2000)

Dalam penelitian ini sistem proteksi baterai terhadap *overcharging* ditunjukkan pada Gambar 3.10.



Gambar 3.10 Sistem proteksi baterai terhadap *overcharging*

Sistem proteksi ini bekerja sama dengan sistem ekualisasi baterai sehingga sebelum baterai mencapai kondisi maksimum semua sel baterai dalam pack baterai memiliki SOC dan tegangan yang sama. Ketika ekualisasi SOC baterai telah terpenuhi maka SOC baterai akan tetap naik hingga mencapai SOC maksimum dari sistem. Sistem proteksi akan bekerja bila tegangan baterai mencapai tegangan maksimum yang diperkenankan untuk baterai lead acid. Sistem proteksi akan bekerja dan melepas sumber arus atau *power supply* dengan membuka *switch* sehingga tidak ada lagi arus yang masuk ke dalam baterai.



--- Halaman ini sengaja dikosongkan ---

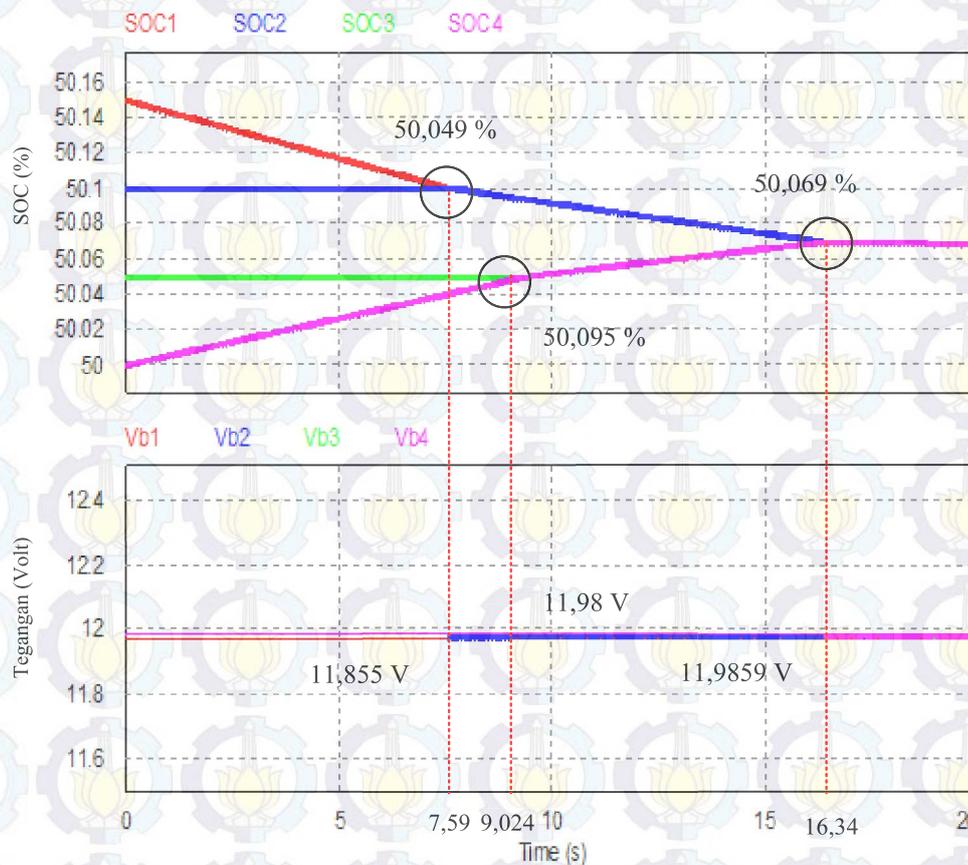
BAB 4

HASIL SIMULASI DAN ANALISIS

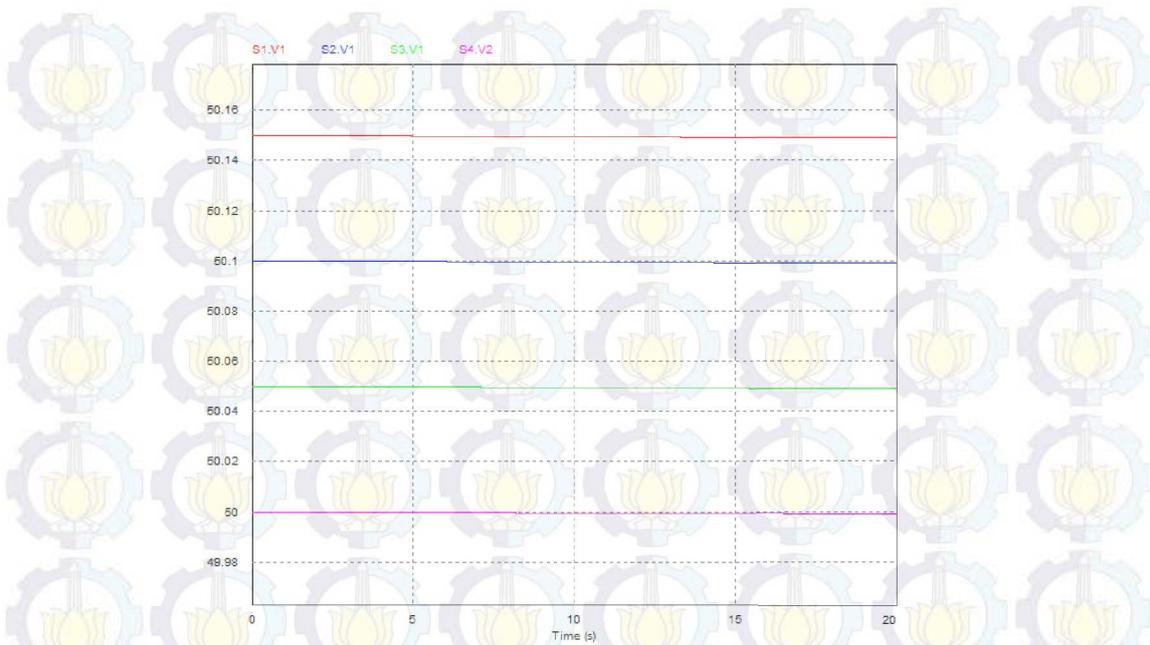
Bab ini membahas tentang kinerja rangkaian ekualisasi dalam beberapa kondisi. Simulasi dilakukan dalam kondisi idle, *charging*, terhubung beban dan proteksi untuk *overcharge*. Analisis akan dilakukan terhadap data – data yang didapatkan dari beberapa kondisi simulasi tersebut.

4.1 Kondisi Idle

Kondisi Idle adalah kondisi dimana sistem tidak menerima *charging* maupun tidak terhubung beban. Masing – masing baterai memiliki perbedaan SOC yaitu sebesar : $SOC_1 = 50,15\%$, $SOC_2 = 50,1\%$, $SOC_3 = 50,05\%$, $SOC_4 = 50\%$, SOC_3 , $V_1 = 11,97$ Volt, $V_2 = 11,986$ Volt, $V_3 = 11,9856$ Volt, $V_4 = 11,9850$ Volt.



Gambar 4. 1 SOC dan tegangan dari baterai dengan rangkaian ekualisasi pada kondisi idle



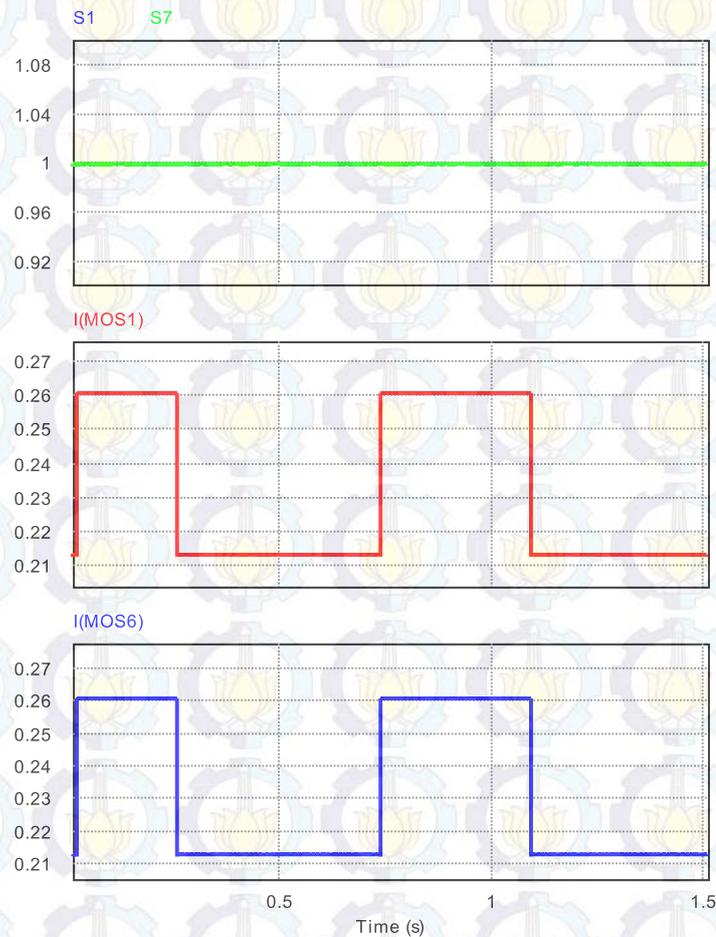
Gambar 4. 2 SOC baterai tanpa menggunakan rangkaian ekualisasi

Baterai₁ dengan SOC terdinggi akan memberikan energi lebih pada baterai₄ yang memiliki SOC terendah sehingga SOC dan tegangan baterai₁ akan turun hingga sedangkan baterai₄ akan naik. Pada saat $t = 7,59$ detik, SOC pada baterai₁ akan memiliki nilai yang sama dengan SOC pada baterai₂ yaitu sebesar 50,049% sehingga kedua baterai ini akan saling mengisi baterai₄. Pada saat $t = 9,024$ detik, terjadialah ekualisasi yang kedua, SOC pada baterai₃ dan baterai₄ akan bertemu pada SOC 50,095%. Baterai₁ dan baterai₂ akan terus mengisi kekurangan energi pada baterai₃ dan baterai₄ hingga keempat baterai tersebut memiliki SOC dan tegangan yang serupa. Titik ekualisasi akhir terjadi pada saat $t = 16,34$ detik dengan SOC sebesar 50,069%.



Gambar 4. 3 Arus induktor pada baterai dengan rangkaian ekualisasi dalam kondisi idle

Proses transfer energi dari satu baterai dengan SOC tertinggi menuju baterai dengan SOC terendah dapat diamati dari arus *charging* dan *discharging* pada induktor saat kondisi *idle* seperti pada Gambar 4.3.



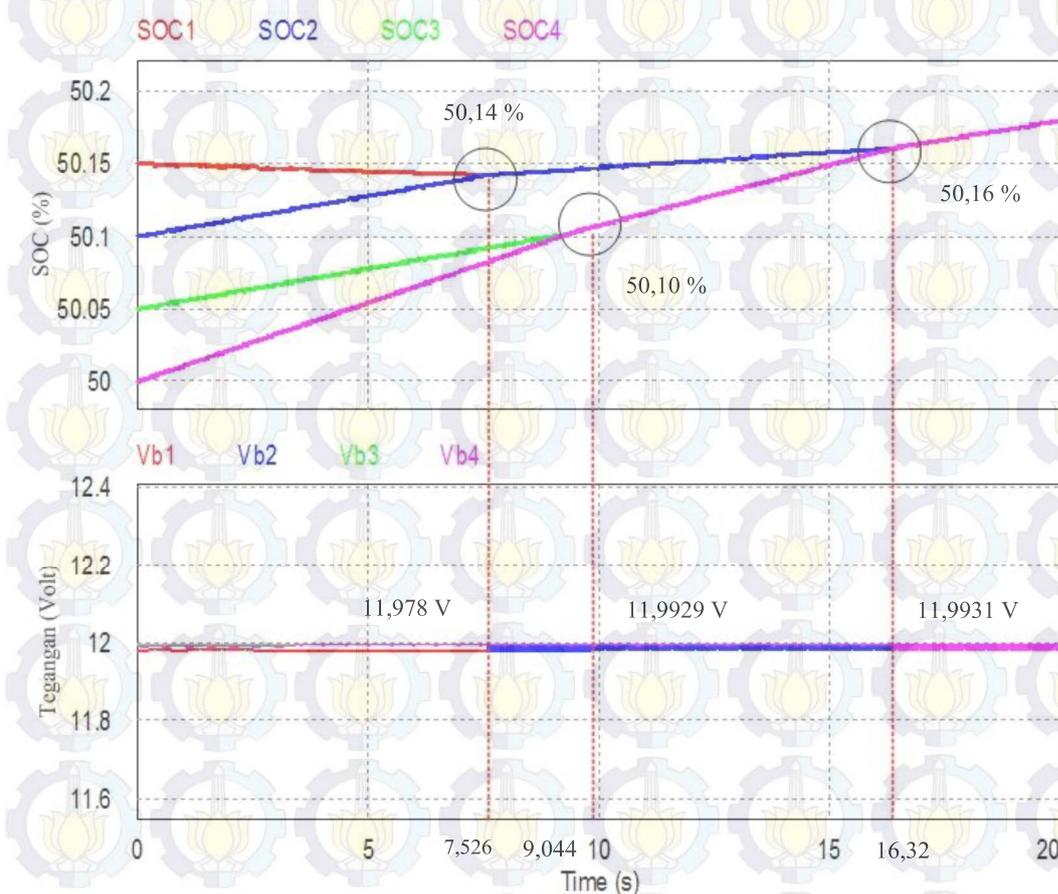
Gambar 4. 4 Sinyal gate mosfet dari Baterai₁ saat *discharging*

Gambar 4.4 menunjukkan gerbang mosfet dari Baterai₁ saat proses transfer energi menuju Baterai₄ yaitu baterai dengan kapasitas terendah. Gerbang *switching* akan me-*trigger* Mosfet₁ dan Mosfet₇ ON sehingga Baterai₁ akan mentransfer kelebihan energi menuju baterai dengan kapasitas terendah.

4.2 Kondisi *Charging*

Teknik ekualisasi saat *charging* dilakukan pada empat baterai terhubung seri dan memiliki SOC sama seperti pada kondisi *idle*. Sebuah *power supply* atau *battery charger* dengan arus konstan sebesar 0,1 A dipilih untuk *charging* baterai

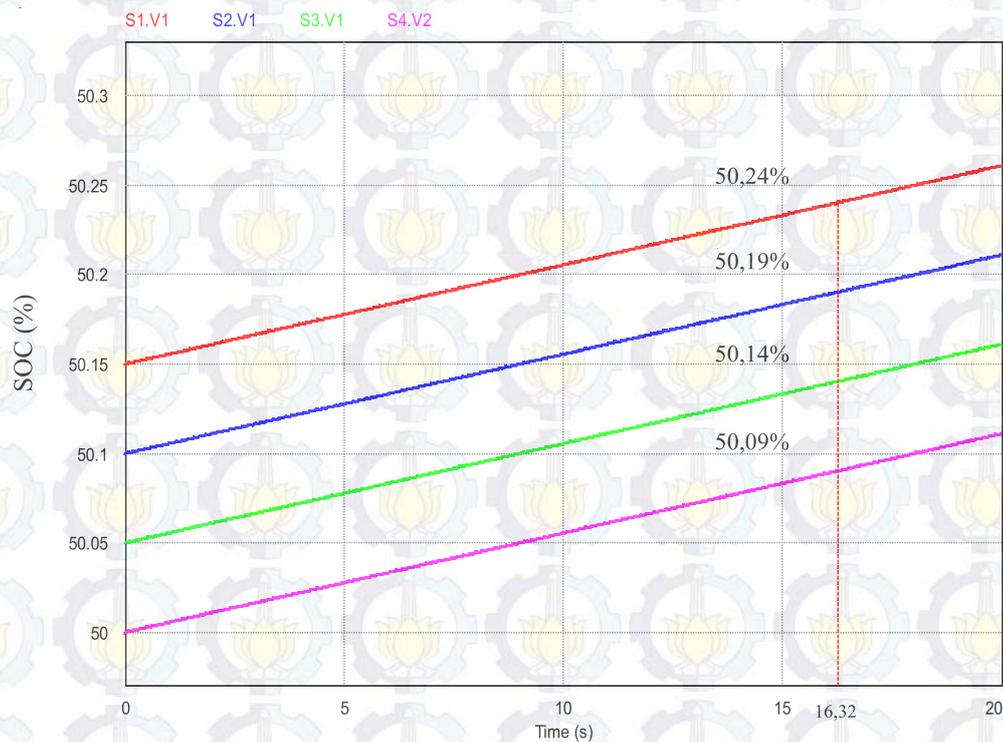
terhubung seri. Dipilih arus *charging* sebesar 0,1 A karena arus *charging* tidak diperkenankan melebihi 20% dari rating kapasitas baterai. Sistem ekualisasi ini akan mengukur SOC dari masing-masing baterai dan arus yang mengalir untuk masing-masing baterai berbeda bergantung pada SOC masing-masing baterai. Jika salah satu baterai memiliki SOC lebih tinggi dibandingkan dengan yang lainnya, maka baterai tersebut harus ikut andil melakukan transfer energi kepada baterai dengan SOC terendah.



Gambar 4. 5 SOC dan tegangan baterai dengan rangkaian ekualisasi saat kondisi *charging*

Gambar 4.5 menunjukkan proses ekualisasi pada saat kondisi *charging*. Ekualisasi pertama terjadi pada saat $t = 7,526$ detik, SOC baterai₁ akan sama dengan SOC baterai₂ yaitu sebesar 50,14%. Baterai₁ dengan SOC tertinggi akan memberikan energinya kepada baterai₄ yang memiliki SOC terendah, sehingga

arus yang mengalir menuju baterai₄ adalah penjumlahan dari arus ekualisasi dengan arus *charging*. Setelah mencapai titik ekualisasi pertama, baterai₁ dan baterai₂ akan bergantian memberikan kelebihan energinya kepada baterai₄ hingga mencapai titik ekualisasi kedua ($t = 9,044$ detik). Pada saat titik ekualisasi kedua baterai₃ dan baterai₄ memiliki SOC dan tegangan yang sama yaitu sebesar 50,10% dan 11,9929 Volt. Hal ini akan berlanjut terus menerus hingga keempat baterai memiliki SOC dan tegangan yang sama pada titik ekualisasi ketiga yaitu pada saat $t = 16,32$ detik dengan SOC sebesar 50,16% dan tegangan sebesar 11,9931 Volt



Gambar 4. 6 SOC baterai tanpa rangkaian ekualisasi saat kondisi *charging*

SOC pada baterai tanpa menggunakan rangkaian ekualisasi ditunjukkan oleh Gambar 4.6. SOC tanpa menggunakan rangkaian ekualisasi memiliki nilai yang berbeda-beda begitu pula tegangannya. SOC maksimal pada rangkaian tanpa ekualisasi adalah sebesar 50,24% namun SOC paling minimal adalah 50,09%. Hal ini akan berbahaya bila rentang perbedaan SOC masing-masing baterai semakin besar.



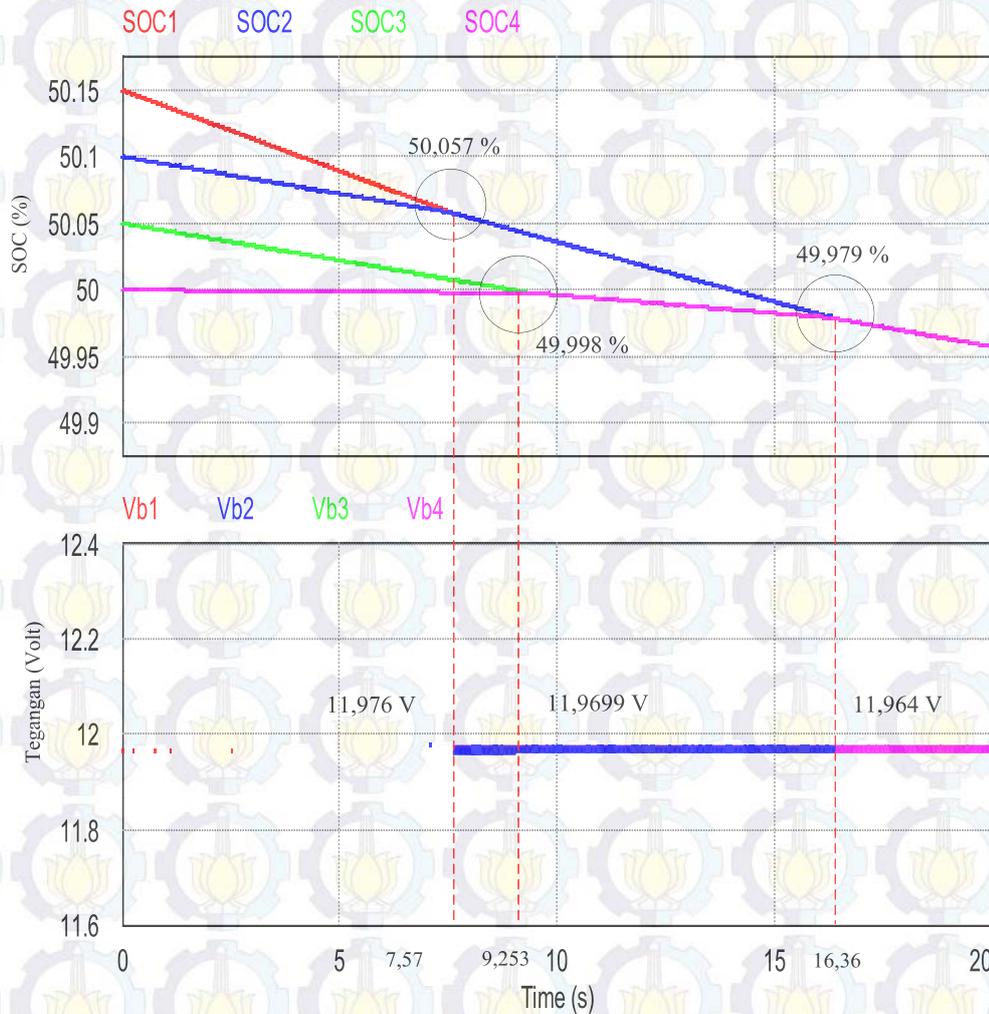
Gambar 4. 7 Arus induktor pada baterai dengan rangkaian ekualisasi saat kondisi *charging*

Pada Gambar 4.7 dapat dilihat bahwa rangkaian ekualisasi tetap bekerja saat kondisi *charging*. Baterai dengan SOC tertinggi akan tetap memberikan kelebihan energinya kepada baterai dengan SOC yang lebih rendah. Baterai

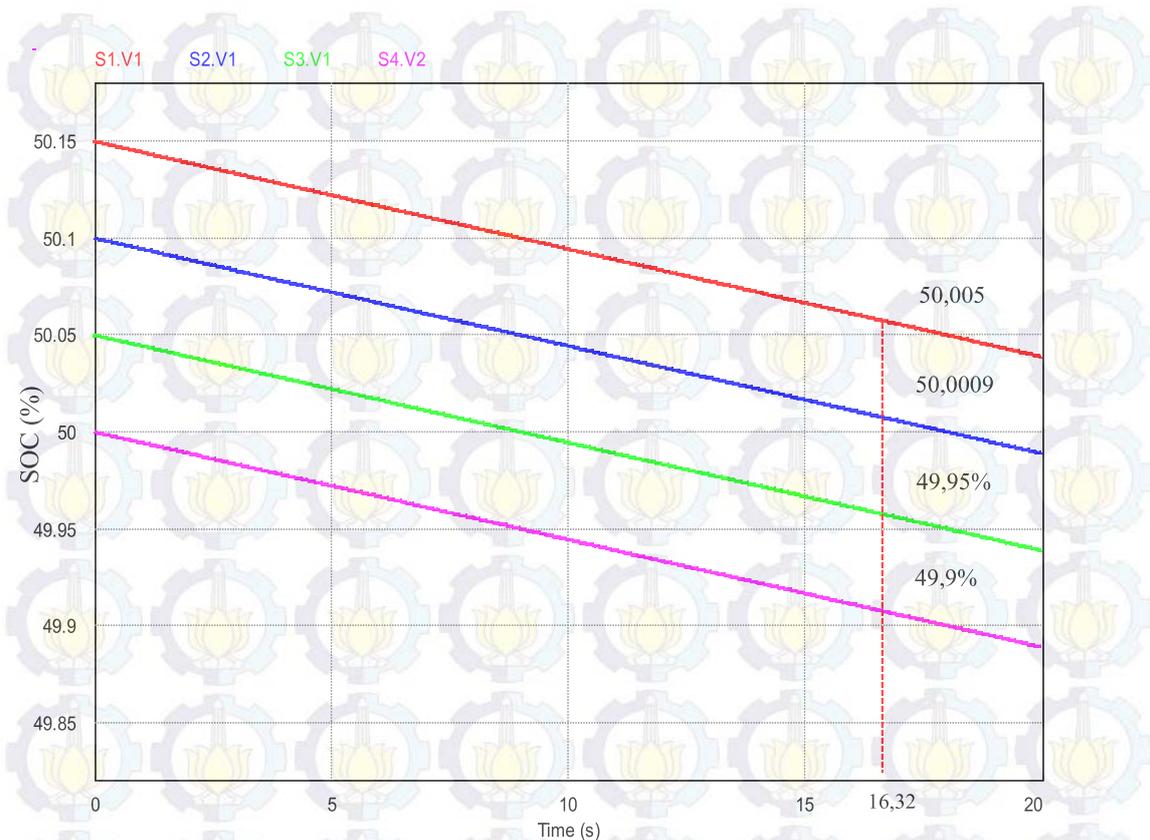
4.3 Kondisi terhubung beban

Baterai dengan rangkaian ekualisasi dalam kondisi beban untuk dapat melihat karakteristik sistem saat proses *discharging*. Sebuah sumber arus konstan sebesar 0,1A digunakan untuk menyerap energi dari baterai. Seperti halnya saat kondisi *charging*, arus yang melewati masing-masing baterai saat *discharging* juga bergantung pada SOC masing-masing baterai. Titik ekualisasi pertama terjadi pada saat $t = 7,57$ detik. Sama halnya pada saat kondisi *charging* dan *idle*, baterai₄ akan memberikan energi lebih pada baterai dengan SOC minimum yaitu baterai₄ hingga baterai₃ dan baterai₄ memiliki SOC yang sama. Pada titik ekualisasi kedua ($t = 9,253$ detik) baterai₃ dan baterai₄ akan memiliki SOC dan tegangan yang sama yaitu sebesar 49,9989% dan 11,969 Volt . Setelah mencapai titik ekualisasi kedua, baterai₁ dan baterai₂ akan bergantian mengisi baterai dengan SOC yang paling kecil, sedangkan baterai₃ dan baterai₄ akan bergantian menerima atau *charging* energi dari baterai terkuat. Kondisi tersebut akan berlangsung terus menerus

hingga keempat baterai mencapai titik ekualisasi keempat ($t = 16,36$ detik) dengan SOC dan tegangan yang sama yaitu sebesar 49,979% dan 11,964 Volt.



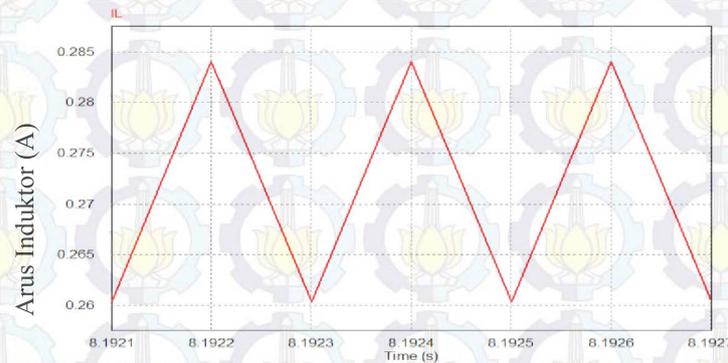
Gambar 4. 8 SOC dan tegangan baterai dengan rangkaian ekualisasi saat kondisi terhubung beban atau *discharging*



Gambar 4. 9 SOC dan tegangan baterai tanpa rangkaian ekualisasi saat kondisi terhubung beban atau *discharging*

Gambar 4.8 menunjukkan SOC baterai saat kondisi *discharging* dan Gambar 4.9 menunjukkan SOC baterai saat tanpa rangkaian ekualisasi saat kondisi *discharging* dalam rentang waktu yang sama. Dari kedua gambar tersebut didapatkan bahwa baterai dengan rangkaian ekualisasi memiliki SOC yang lebih tinggi dibandingkan dengan SOC baterai tanpa rangkaian ekualisasi. SOC baterai dengan rangkaian ekualisasi sebesar 49,979% sedangkan SOC baterai tanpa rangkaian ekualisasi memiliki SOC minimum sebesar 49,9%. Dari selisih SOC antara keduanya didapatkan analisis baterai dengan rangkaian ekualisasi dapat dioperasikan lebih lama dibandingkan dengan baterai tanpa rangkaian ekualisasi. Selisih SOC dan tegangan antara baterai dengan menggunakan rangkaian ekualisasi dan tanpa menggunakan rangkaian ekualisasi akan semakin besar seiring dengan besarnya kapasitas baterai yang digunakan.

sedangkan baterai tanpa ekualisasi memiliki SOC terendah sebesar 49,9%. Selisih antara SOC rangkaian ekualisasi dengan SOC tanpa rangkaian ekualisasi akan semakin besar bila kapasitas baterai semakin besar.

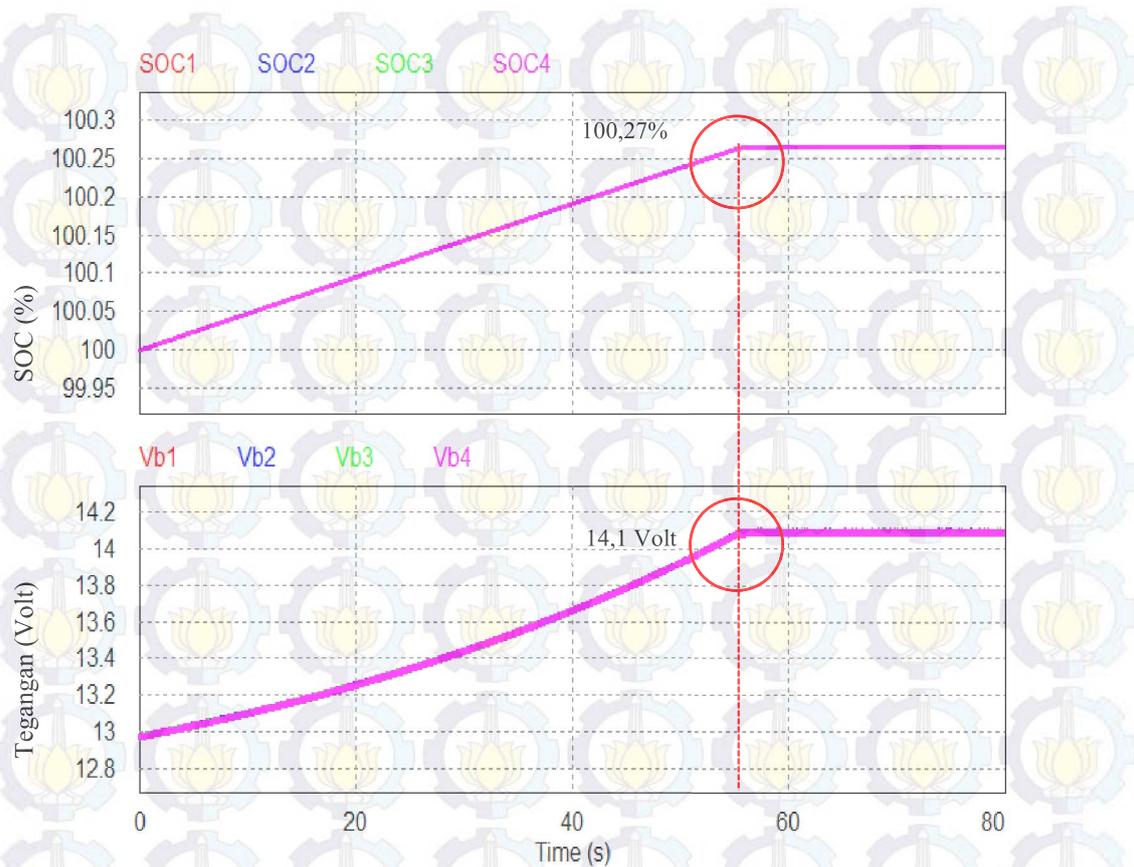


Gambar 4. 10 Arus induktor pada baterai dengan rangkaian ekualisasi saat kondisi *discharging* atau terhubung beban

Arus induktor pada kondisi *discharging* dapat dilihat pada gambar 4.10. Arus induktor membuktikan bahwa terjadi proses *charging* dan *discharging* dari baterai dengan SOC tertinggi menuju induktor dan dari induktor menuju baterai dengan SOC terendah saat kondisi *discharging* atau terhubung beban.

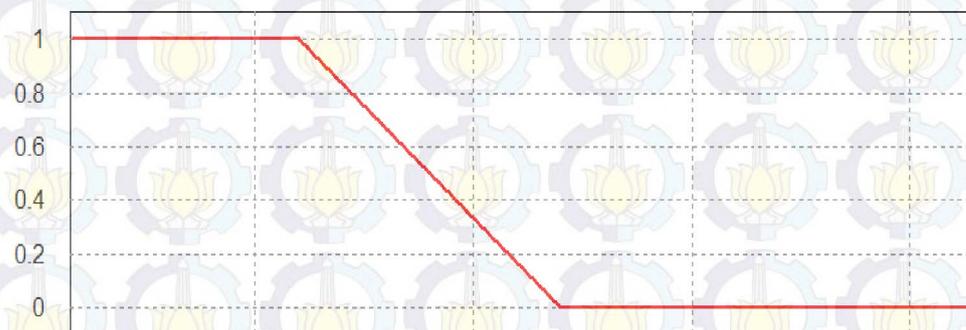
4.4 Kondisi *Overcharge*

Pada kondisi ini baterai dioperasikan mendekati tegangan maksimum dengan diberi sumber arus konstan sebesar 0,1A. Batas tegangan maksimum didapatkan dari *datasheet* baterai. Pada Gambar 4.10 terlihat bahwa ketika baterai telah mencapai tegangan maksimal yaitu sebesar 14,1 Volt dengan SOC sebesar 100,27% maka arus dari sumber arus konstan akan dialihkan sehingga arus tersebut tidak dialirkan menuju baterai. Hal tersebut dapat dilihat pada gambar 4.11. sinyal gate switch yang berfungsi sebagai pemutus akan berubah dari 1 menjadi 0 sehingga arus *charging* akan dialihkan menuju rangkaian beban pengalih.



Gambar 4. 11 Arus induktor pada baterai dengan rangkaian ekualisasi saat kondisi *discharging* atau terhubung beban

Switch Pemutus

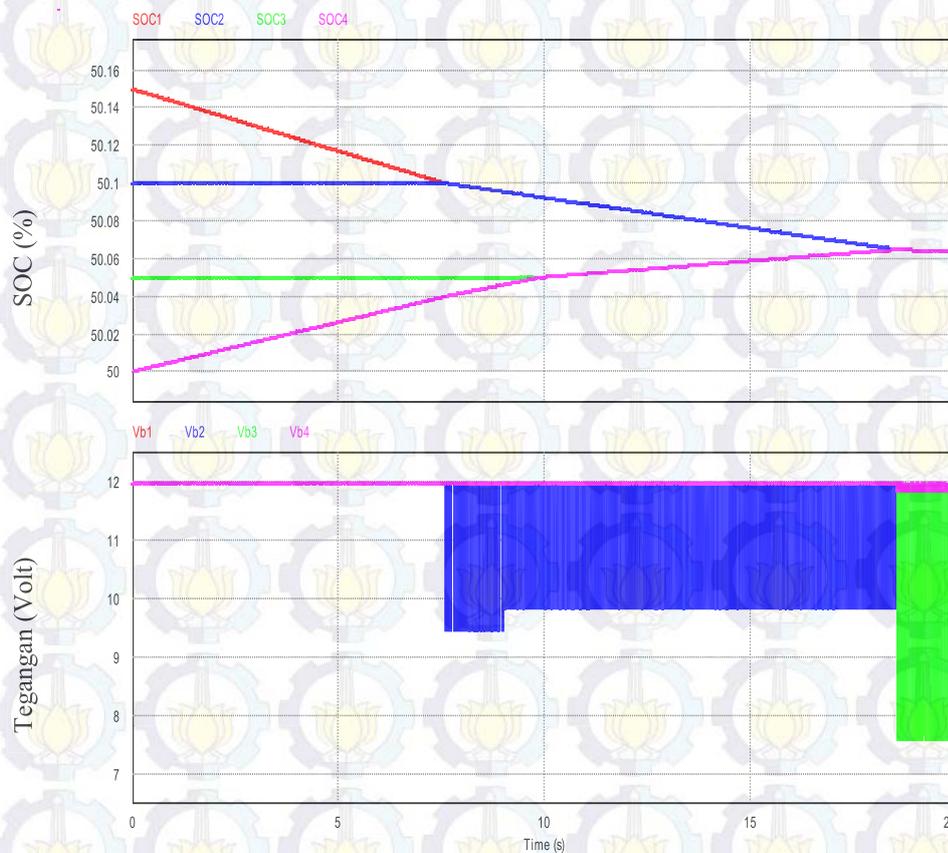


Gambar 4. 12 *Switch* pemutus pada rangkaian proteksi

4.5 Resistansi Internal berbeda

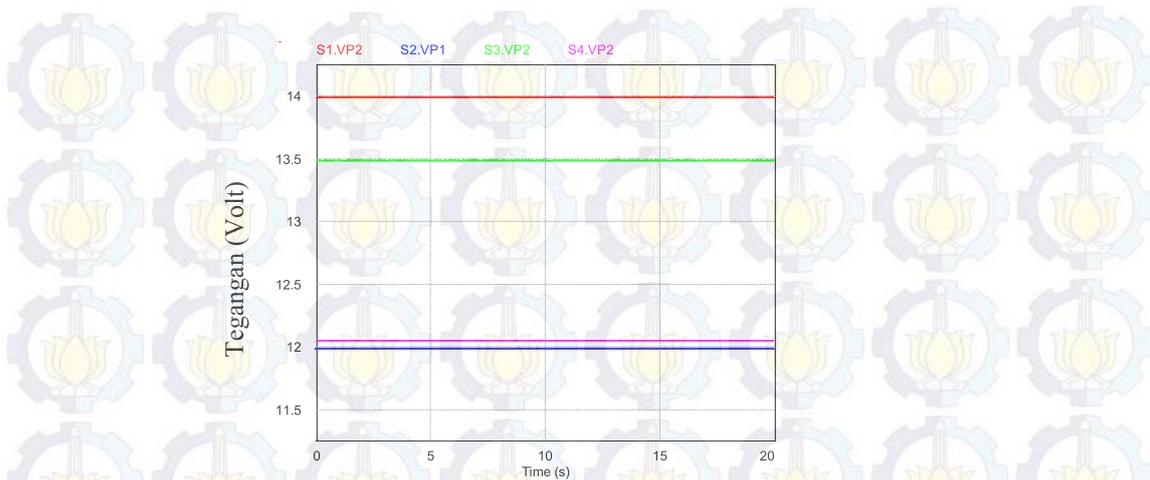
Pada pemodelan baterai Sheperd, resistansi internal berpengaruh pada fungsi tegangan *open circuit voltage* (OCV) baterai, sedangkan SOC pada baterai tidak

dipengaruhi oleh resistansi internal. Pada bagian ini, dilakukan sebuah studi kasus dimana resistansi internal pada masing-masing baterai memiliki nilai yang berbeda. $R_{\text{internal Baterai}_1} = 20\Omega$, $R_{\text{internal Baterai}_2} = 15\Omega$, $R_{\text{internal Baterai}_3} = 0,6\Omega$ dan $R_{\text{internal Baterai}_4} = 1\text{m}\Omega$. pada bagian ini dilakukan perbandingan antara rangkaian dengan ekualisasi dengan rangkaian tanpa ekualisasi.



Gambar 4. 13 SOC dan tegangan baterai dengan rangkaian ekualisasi dengan resistansi internal berbeda

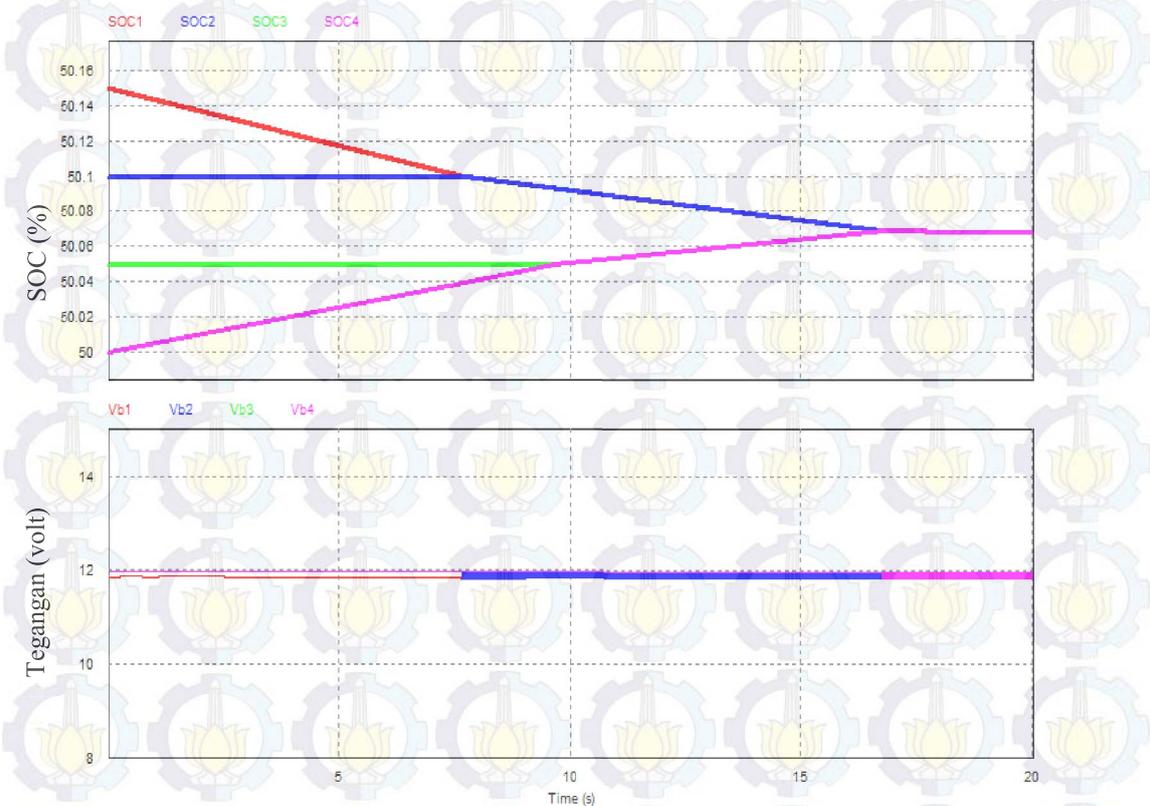
Pada Gambar 4.12 terlihat bahwa SOC tidak lagi menunjukkan kapasitas baterai yang sebanding dengan tegangan. Ketika SOC telah mencapai titik ekualisasi tegangan juga mencapai titik ekualisasi. Namun, ripple tegangan yang muncul sangat besar. Gambar 4.13 menunjukkan hasil tegangan dari baterai tanpa menggunakan rangkaian ekualisasi saat kondisi charging dengan *constant current* sebesar 0,1 A. Dari hasil tersebut dapat dilihat bahwa tegangan masing-masing baterai berbeda jauh dibandingkan dengan saat resistansi internal masing-masing baterai memiliki nilai yang sama.



Gambar 4. 14 Tegangan pada baterai tanpa rangkaian ekualisasi dengan resistansi internal berbeda

4.6 Perbedaan Koefisien A

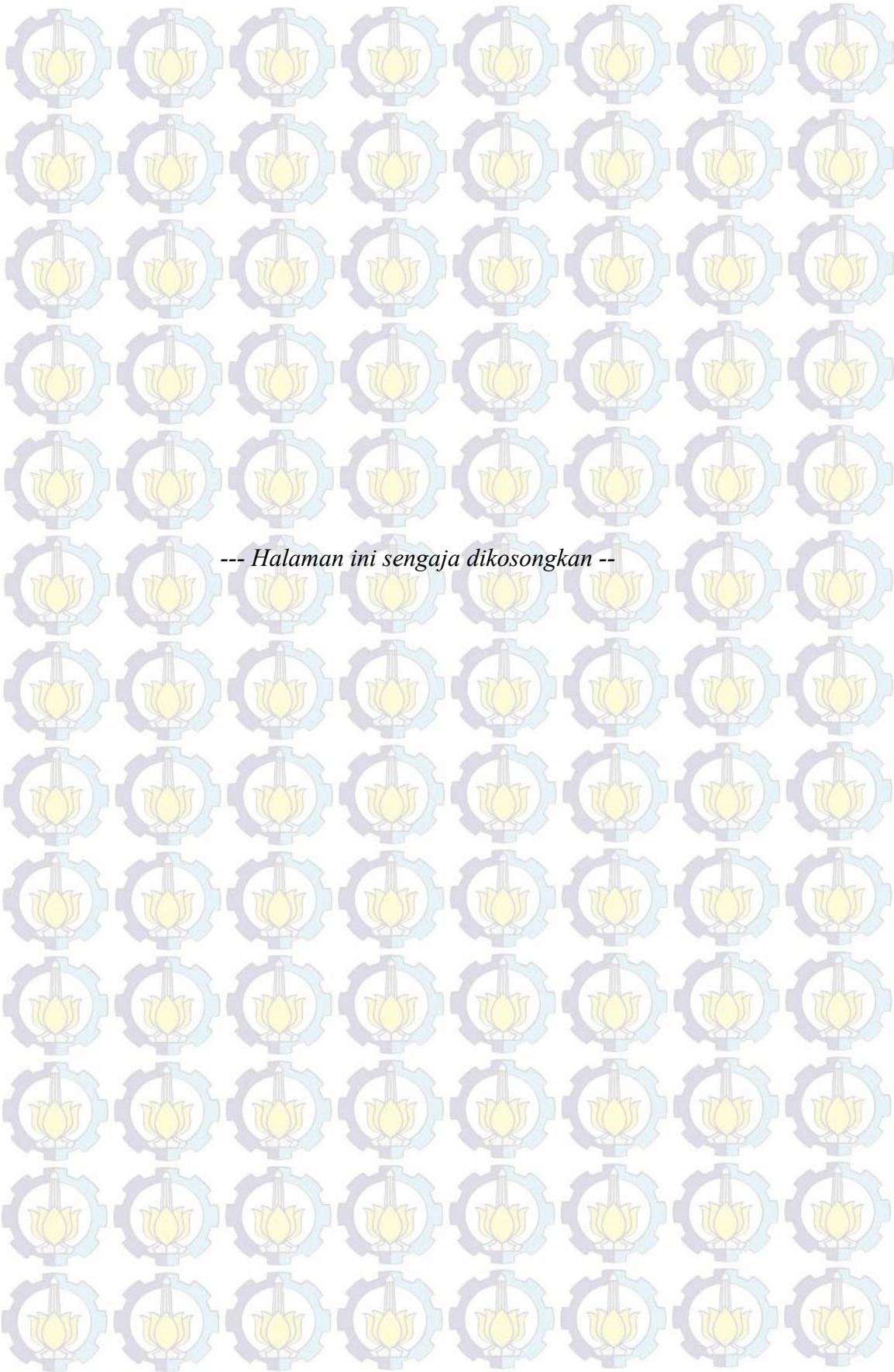
Pada model ini, koefisien A didapatkan dari selisih antara E_{full} dengan E_{exp} . Jika koefisien A pada tiap baterai dirubah, maka akan terjadi perubahan pada kurva *discharge* dan kurva *charging* pada baterai.



Gambar 4. 15 Tegnan dan SOC pada baterai dengan koefisien Aberbeda

Pada studi kasus ini, koefisien A pada tiap tiap baterai akan dibedakan. Koefisien A pada masing-masing baterai yaitu: $A_{\text{Baterai}_1} = 8$, $A_{\text{baterai}_2} = 5$, $A_{\text{baterai}_3} = 0,66$, $A_{\text{baterai}_4} = 2$.

Gambar 4.15 menunjukkan hasil simulasi dari baterai dengan koefisien A yang berbeda-beda. Perbedaan koefisien A pada baterai tidak cukup besar sehingga tidak banyak berpengaruh pada perubahan tegangan masing-masing baterai. Pada titik ekualisasi SOC pertama, tegangan baterai masih dapat mengikuti proses ekualisasi yang dilakukan. Begitu pula pada titik ekualisasi kedua dan titik ekualisasi yang terakhir.



DAFTAR PUSTAKA

Churchill T. L. (2000), "Battery condition management: an important way to protect a critical asset", *IEEE Ann. Batt Conf. Appl. Advances*, 2000, pp. 71-76

Daowd, M., Omar, N., Peter Van Den Bossche, and Joeri Van Mierlo (2011), "Passive and Active Battery Balancing comparison based on MATLAB Simulation", *7th IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC'11, 2011.*

Fahmi, Daniar (2013), "Desain Sistem Dual Inputs SEPIC – Bidirectional Converter Menggunakan Fuzzy Logic Controller untuk Manajemen Daya Pembangkit Hibrida Photovoltaic / Battery pada Area Terpencil", *Thesis Book, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. 2013.*

Gottwald, T.; Ye, Z.; Stuart, T.(1997), "Equalization of EV and HEV batteries with a ramp converter. Aerospace and Electronic Systems", *IEEE Transactions on, Vol.33, Issue: 1, Jan. 1997, pp.307 – 312*

K. Zhi-Guo, Z. Chun-Bo, L. Ren-Gui and C. Shu-Kang (2006), "Comparison and Evaluation of Charge Equalization Technique for Series Connected Batteries", *37th IEEE Power Electronics Specialists Conference, pp. 1-6, 2006.*

Lohner A., Karden E., DeDoncker R. W. (1997), "Charge equalizing and lifetime increasing with a new charging method for VRLA batteries", *IEEE Intl. Telecommunications Energy Conf., 1997, pp. 407-411.*

M. J. Isaacson, R. P. Hollandsworth, P. J. Giampaoli, F. A. Linkowsky, A. Salim, and V. L. Teofilo (2000), "Advanced lithium ion battery charger", *Proc. 15th Annu. IEEE Battery Conf. Appl. Adv., Jan. 2000, pp. 193–198.*

Moo, C.S., Hsieh, Y.C., Tsai, I.S., and Cheng, J.C. (2003), "Dynamic Charge Equalisation for Series-Connected Batteries", *IEEE Proceedings Electric Power Applications, Vol. 150, No. 5, pp.501-505, 2003.*

Nasser H. Kutkut, Herman L. N. Wiegman, Deepak M. Divan, and Donald W.(1999), Novotny, "Design considerations for charge equalization of an

- electric vehicle battery system", *IEEE Trans. On Industry Applications*, vol. 35, No.1,,pp.28-35, Jan 1999.
- Olson J. B., Sexton E. D. (2000), "Operation of lead-acid batteries for HEV applications", *IEEE Ann. Battery Conf. Appl. Advances*, 2000, pp. 205-21.
- R.E,Habiballah, Ojha Unnati, Baronti Federico, M.Y Chow (2013), "Battery Management System – An Overview of Its Application in the Smart Grid and Electrical Vehicles". *IEEE Industrial Magazines*, June. 2013
- Ron D. Brost (1998), "Performance of valve-regulated lead acid batteries in EV1 extended strings", *Proc. IEEE Ann. Battery Conf. Appl. Advances*, 1998, pp. 25-29.
- Shane Duryea, Syed Islam, William Lawrence (2001), "A Battery Management System for Stand-Alone Photovoltaic Energy Systems",*IEEE Industrial Magazine*. May/June.2001.
- Sriram Yarlagadda, Tom T. Hartley, Iqbal Husain (2013), "A Battery Management System Using an Active Charge Equalization Technique Based on a DC/DC Converter Topology", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 49, No. 6, November/December 2013.
- Stephen T. Hung, Douglas C. Hopkins, and Charles R. Mosling, (1993) "Extension of battery life via charge equalization control", *IEEE trans on industrial electronics*, vol. 40, No.1, pp.96-104, Feb. 1993.
- T. Olivier, A. Louis, D. Abdel-Allah (2007), " A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles", *Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2007. IEEE*, 2007.
- Trojan Battery Company (2015), "Trojan Battery user's guide", Mei 2015.
- West S., Krein P. T. (2000), "Equalization of valve-regulated lead-acid batteries: issues and life tests", *IEEE Intl. Telecommunications Energy Conf.*, 2000, pp. 439-446.

BAB 5 PENUTUP

Pada bab ini akan diuraikan beberapa kesimpulan yang dapat diambil dari pembahasan sebelumnya dan saran mengenai masalah yang bisa dibahas sebagai kelanjutan dari penelitian ini.

5.1 Kesimpulan

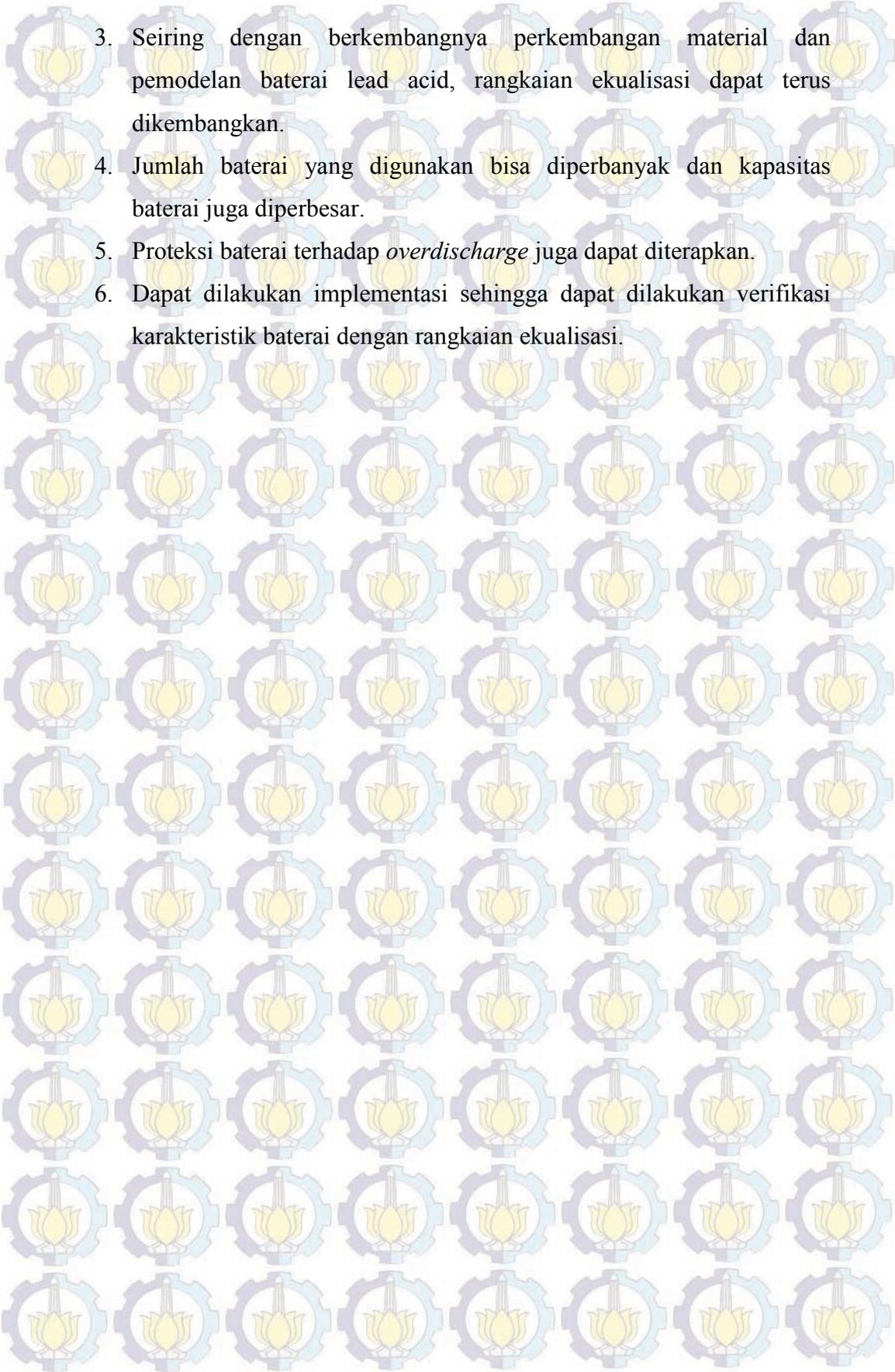
Dari simulasi dan analisis data yang telah dilakukan, maka dapat ditarik kesimpulan bahwa :

1. Topologi konverter DC/DC *bi-directional* dapat digunakan untuk ekualisasi SOC dan tegangan.
2. Rangkaian ekualisasi dapat diterapkan pada saat *kondisi charging, discharging* hingga kondisi *idle*.
3. Hasil simulasi menunjukkan bahwa string baterai dengan ekualisasi memiliki kapasitas yang lebih besar dibandingkan tanpa ekualisasi. Pada saat kondisi *idle*, SOC dari baterai dengan ekualisasi adalah sebesar 50,06% sedangkan tanpa rangkaian ekualisasi sebesar 49,89%. Dalam kondisi *charging*, SOC dari rangkaian dengan ekualisasi bernilai 50,18% sedangkan tanpa ekualisasi sebesar 50,11% dan saat kondisi *discharging* dengan ekualisasi 49,95% dan tanpa ekualisasi sebesar 49,89%.
4. Rangkaian proteksi terhadap *overcharge* untuk mempertahankan baterai sehingga beroperasi pada batas aman

5.2 Saran

Adapun saran dari penulis untuk para peneliti yang ingin mengembangkan penelitian ini di masa yang akan datang adalah sebagai berikut:

1. Hasil penelitian ini hendaknya dapat dijadikan sebagai bahan referensi bagi para peneliti yang lain untuk melakukan penelitian lebih lanjut.
2. Sistem kontrol pada konverter ini masih bisa dikembangkan.

- 
3. Seiring dengan berkembangnya perkembangan material dan pemodelan baterai lead acid, rangkaian ekualisasi dapat terus dikembangkan.
 4. Jumlah baterai yang digunakan bisa diperbanyak dan kapasitas baterai juga diperbesar.
 5. Proteksi baterai terhadap *overdischarge* juga dapat diterapkan.
 6. Dapat dilakukan implementasi sehingga dapat dilakukan verifikasi karakteristik baterai dengan rangkaian ekualisasi.