



**TUGAS AKHIR - TE 141599**

**PEMANTAUAN, PROTEKSI, DAN EKUALISASI BATERAI  
LITHIUM-ION TERSUSUN SERI MENGGUNAKAN  
KONVERTER *BUCK-BOOST* DAN LC SERI DENGAN  
KONTROL *SYNCHRONOUS PHASE SHIFT***

Diaz Ficry Arfianto  
NRP 2212100162

Dosen Pembimbing  
Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D.  
Daniar Fahmi, S.T., M.T.

JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2016

*Halaman ini sengaja dikosongkan*



**FINAL PROJECT - TE 141599**

**MONITORING, PROTECTION, AND EQUALIZATION OF  
SERIES LITHIUM-ION BATTERIES USING BUCK-BOOST  
AND SERIES LC CONVERTER WITH SYNCHRONOUS  
PHASE SHIFT CONTROL**

Diaz Ficry Arfianto  
NRP 2212100162

Advisor  
Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D.  
Daniar Fahmi, S.T., M.T.

ELECTRICAL ENGINEERING DEPARTMENT  
Faculty of Industrial Technology  
Sepuluh Nopember Institute of Technology  
Surabaya 2016

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR**

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul “**Pemantauan, Proteksi, dan Ekualisasi Baterai Lithium-Ion Tersusun Seri Menggunakan Konverter *Buck-Boost* dan LC Seri dengan Kontrol *Synchronous Phase Shift***” adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, 22 Juni 2016

**Diaz Ficry Arfianto**  
NRP. 2212100162

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

**PEMANTAUAN, PROTEKSI, DAN EKUALISASI  
BATERAI LITHIUM-ION TERSUSUN SERI  
MENGUNAKAN KONVERTER *BUCK-BOOST* DAN LC  
SERI DENGAN KONTROL *SYNCHRONOUS PHASE  
SHIFT***

**TUGAS AKHIR**

**Diajukan untuk Memenuhi Sebagian Persyaratan  
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Pada  
Bidang Teknik Sistem Tenaga  
Jurusan Teknik Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

**Menyetujui:**

**Dosen Pembimbing I**



**Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D.**  
**NIP 198109052005011002**

**Dosen Pembimbing II**



**Daniar Fahmi, S.T., M.T.**  
**NIP 198909252014041002**



**PEMANTAUAN, PROTEKSI, DAN EKUALISASI  
BATERAI LITHIUM-ION TERSUSUN SERI  
MENGUNAKAN KONVERTER *BUCK-BOOST* DAN LC  
SERI DENGAN KONTROL *SYNCHRONOUS PHASE  
SHIFT***

Diaz Ficry Arfianto  
2212100162

Dosen Pembimbing 1 : Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D  
Dosen Pembimbing 2 : Daniar Fahmi, S.T., M.T.

**ABSTRAK**

Baterai jenis lithium-ion kini dipilih sebagai penyimpan energi pada kendaraan listrik dikarenakan *power density* dan *energy density* yang lebih besar dibandingkan baterai jenis lain. Namun, baterai lithium ion memiliki kekurangan yakni sangat sensitif terhadap *overcharge*. Selain itu, masalah ketidakseimbangan kapasitas baterai tersusun seri dapat mempengaruhi performa baterai secara keseluruhan.

Dalam tugas akhir ini diimplementasikan skala laboratorium sistem pemantauan dan proteksi pada empat sel baterai lithium-ion tersusun seri agar baterai lebih aman dari *overvoltage*, *undervoltage* dan *overheat*. Selain itu ekualisasi untuk menyeimbangkan kapasistas baterai sehingga masa hidup dan kapasitas baterai dapat diperpanjang..

Hasil pengujian skala laboratorium menunjukkan pemantauan tegangan mendapat error terbesar 1,25% dan pemantauan suhu mencapai error terbesar 4,9%. Sistem proteksi baterai dapat bekerja memutus koneksi baterai sehingga menjadi sirkuit terbuka jika mendeteksi *overvoltage*, *undervoltage*, dan *overheat*. Serta ekualisasi 4 baterai lithium tersusun seri dapat dilakukan dengan waktu tempuh 48 menit.

**Kata Kunci:** Baterai Lithium-Ion, Pemantauan dan Proteksi Baterai, Ekualiasi, konverter Buck-boost dan LC seri.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# **MONITORING, PROTECTION, AND EQUALIZATION OF SERIES LITHIUM-ION BATTERY USING BUCK- BOOST AND SERIES LC CONVERTER WITH SYNCHRONOUS PHASE SHIFT CONTROL**

Diaz Ficry Arfianto  
2212100162

1<sup>st</sup> Advisor : Dimas Anton Asfani, S.T., M.T., Ph.D  
2<sup>nd</sup> Advisor : Daniar Fahmi, S.T., M.T.

## **ABSTRACT**

Lithium-Ion batteries are now chosen as the energy storage in electric vehicles because the power density and energy density that are greater than other batteries. However, lithium ion batteries have a deficiency that is very sensitive to overcharge. In addition, the battery capacity imbalance composed of series may affect overall battery performance.

In this final project will be implemented in laboratory scale, monitoring and protection systems in four cell lithium-ion batteries composed of series to be more secure from overvoltage, undervoltage, and overheat. Additionally equalization to balance the battery capacity so that the life span and the battery capacity can be extended.

The test results show from laboratory scale. Voltage monitoring got the biggest error around 1,25% and temperature monitoring got the biggest error around 4,9%. Battery protection systems can work and disconnect the battery so that becomes an open circuit if detects overvoltage, undervoltage, and overheat. As well as equalization of 4 series lithium battery can be completed and takes about 48 minutes.

**Key Words :** Lithium-Ion bateries, battery monitoring and protection, equaliztion, buck-boost and series LC converter.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat, taufik, dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul **“Pemantauan, Proteksi, dan Ekualisasi Baterai Lithium-Ion Tersusun Seri Menggunakan Konverter *Buck-Boost* dengan Kontrol *Synchronous Phase Shift*”** dengan tepat waktu.

Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi salah satu persyaratan menyelesaikan pendidikan sarjana pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Pelaksanaan dan penyelesaian Tugas Akhir ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Yeyen Heriyani, Ibuku tercinta dan Ukar Usianto bapakku tercinta yang selalu memotivasi penulis untuk tetap tegar dan tidak putus asa selama penyusunan tugas akhir.
2. Ayu Septiani dan Maukar Suyendi yang selalu ada ketika adik kecilnya butuh motivasi dikala suntuk dalam pengerjaan tugas akhir.
3. Bapak Dimas Anton dan Bapak Daniar Fahmi yang selalu membimbing penulis selama pengerjaan tugas akhir.
4. Tim tugas akhir *Charging station* yang akhirnya pusing sendiri, Onang, Ubaid, Acong, Ruli, ayo berjuang kedepannya.
5. *My Best Friends : State Offical*, Edhu, Onang, Farid, Faizal, Istiqomah, Nabila, Aul, Ajeng, Asti yang selalu membuat penulis bangkit dari kesedihan dan menjadi tempat sandaran penulis. Jangan lupa reunian satu tahun sejak buku ini terbit.
6. Pujangga seperjuangan LAB Konversi Energi 2012 yang selalu mencurahkan perhatian dan waktunya untuk penulis.
7. Adik-adik LAB Konversi Energi 2013 dan 2014 yang memberikan support untuk penulis dan menyediakan barang-barang yang dibutuhkan penulis untuk mengambil data.
8. Miftah, Aldi, Hafizh tim buat alat yang selalu menemani penulis ketika pengerjaan tugas akhir dan selalu menjadi teman diskusi dikala butuh kejelasan.
9. Geng Kontrakan Keputih A8 yang selalu sedia menghancurkan kontrakan sehingga penulis betah di laboratorium untuk mengambil data.

10. Mas Uta dari tim Molina yang memberi masukan kepada penulis dalam proses pembuatan prottipe.
11. Mas Soni yang membimbing penulis dan mengijinkan penulis meneruskan Tugas Akhirnya.
12. Mas Eden dan Juli si master statistik sebagai penasehat statistik yang memberi pencerahan untuk pengolahan data .
13. Teman–teman Angkatan 2012 yang membantu penulis dalam mengerjakan tugas akhir.
14. Calon istri yang sama-sama menempuh studi dan berada di Bandung sekarang, semoga diberi kemudahan kedepanya.
15. Seluruh dosen dan staff karyawan Jurusan Teknik Elektro-FTI, ITS yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.
16. Semua pihak yang penulis tidak dapat sebutkan satu persatu.  
Terima kasih

Besar harapan penulis bahwa buku tugas akhir ini dapat memberikan informasi dan manfaat bagi mahasiswa Teknik Elektro ITS pada khususnya dan seluruh pembaca pada umumnya.

Surabaya, 22 Juni 2016

Penulis

# DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b>	
<b>PERNYATAAN KEASLIAN</b>	
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b>	
<b>ABSTRAK</b> .....	i
<b>ABSTRACT</b> .....	iii
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	v
<b>DAFTAR ISI</b> .....	vii
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	ix
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xi

## **BAB 1. PENDAHULUAN**

1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Permasalahan .....	2
1.3 Tujuan .....	2
1.4 Metodologi Penelitian .....	2
1.4.1 Perancangan Sistem .....	3
1.4.2 Pengujian Sistem .....	3
1.4.3 Analisis .....	3
1.5 Sistematika Penulisan .....	3
1.6 Relevansi atau Manfaat .....	4

## **BAB 2. PEMANTAUAN, PROTEKSI, DAN EKUALISASI BATERAI LITHIUM-ION TERSUSUN SERI MENGGUNAKAN KONVERTER *BUCK-BOOST* DAN LC SERI DENGAN KONTROL *SYNCHRONOUS PHASE SHIFT***

2.1 Baterai Lithium Ion .....	5
2.2 Pemantuan Baterai Terusun Seri .....	6
2.3 Proteksi Baterai .....	8
2.4 Ekualiasi dengan Konverter Buck-Boost dan LC Seri .....	9
2.4.1 Prinsip Kerja Konverter Buck-Boost dan LC Seri dengan Kontrol <i>Synchronous Phase Shift</i> .....	10
2.4.2 Rangkaian <i>Phase Shift</i> .....	14

## **BAB 3. DESAIN SISTEM DAN SIMULASI**

3.1 Sistem Pemantauan .....	18
3.1.1 Pemantauan Tegangan .....	18

3.1.2	Pemantauan <i>State of Charge</i> .....	20
3.1.3	Pemantauan Suhu .....	21
3.2	Sistem Proteksi .....	23
3.2.1	Proteksi Tegangan .....	23
3.2.2	Proteksi Suhu.....	24
3.3	Sistem Ekuialiasi .....	25
3.3.1	Desain Simulasi Konverter Buck-Boost dan LC Seri. ....	25
3.3.2	Perhitungan Parameter L1, L2, L <sub>r</sub> dan C <sub>r</sub> .....	25
3.3.3	Simulasi Konverter.....	27
3.3.4	Pembangkit Sinyal PWM di Arduino .....	30
3.3.5	Performa Rangkaian .....	31
3.3.6	Desain Driver Mosfet .....	32
3.3.7	Desain <i>Synchronous Phase Shift</i> .....	34
<b>BAB 4</b>	<b>PENGUJIAN DAN ANALISIS SISTEM</b>	
4.1	Pengujian Error Pemantauan Tegangan.....	35
4.2	Pengujian Error Pemantauan Suhu .....	37
4.3	Pengujian <i>State of Charge</i> .....	38
4.4	Pengujian Proteksi <i>Overvoltage &amp; Undervoltage</i> .....	40
4.5	Pengujian <i>Overheat</i> .....	41
4.6	Pengujian Arus Induktor L1 & L2 .....	42
4.7	Pengujian Arus LC Seri .....	45
4.8	Pengujian Tegangan LC Seri .....	46
4.9	Pengujian Tegangan Baterai .....	48
<b>BAB 5</b>	<b>PENUTUP</b>	
5.1	Kesimpulan.....	51
5.2	Saran .....	51
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....		53
<b>LAMPIRAN</b> .....		55
<b>RIWAYAT HIDUP</b> .....		61

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Satu Sel Baterai Lithium-Ion .....	5
Gambar 2.2.	<i>Multiplexing</i> Pemantauan Baterai .....	7
Gambar 2.3.	Korelasi Tegangan dengan Kapasitas Baterai.....	7
Gambar 2.4.	<i>Battery Management System</i> sebagai Proteksi Baterai .	8
Gambar 2.5.	Rangkaian Konverter Buck-Boost dan LC Seri.....	9
Gambar 2.6.	Peripindahan Arus Rangkaian Kondisi I.....	11
Gambar 2.7.	Peripindahan Arus Rangkaian Kondisi II .....	11
Gambar 2.8.	Peripindahan Arus Rangkaian Kondisi III.....	12
Gambar 2.9.	Peripindahan Arus Rangkaian Kondisi IV.....	12
Gambar 2.10.	Bentuk Gelombang Konverter dalam Dua Periode.....	14
Gambar 2.11.	Rangkaian <i>Phase Shift</i> .....	15
Gambar 3.1.	<i>Flowchart</i> Sistem Keseluruhan.....	17
Gambar 3.2.	IC BQ76925.....	18
Gambar 3.3.	Skema Pemantauan dengan BQ76925 .....	19
Gambar 3.4.	Grafik <i>State of Charge (Charging)</i> .....	20
Gambar 3.5.	Grafik <i>State of Charge (Discharging)</i> .....	21
Gambar 3.6.	Sensor Suhu LM35 .....	21
Gambar 3.7.	Skema Akuisisi Suhu dengan LM35.....	22
Gambar 3.8.	Skema Proteksi Tegangan pada Baterai.....	23
Gambar 3.9.	Skema Proteksi Suhu Berlebih .....	24
Gambar 3.10.	Simulasi Ekualisasi Konverter <i>Buck-Boost</i> dan LC Seri .....	25
Gambar 3.11.	Gelombang Arus Induktor L1 .....	28
Gambar 3.12.	Gelombang Arus Induktor L2.....	28
Gambar 3.13.	Gelombang Arus LC Seri .....	29
Gambar 3.14.	Gelombang Tegangan LC Seri .....	29
Gambar 3.15.	Grafik Ekualisasi Baterai .....	30
Gambar 3.16.	Gelombang Arus Baterai, Arus LC, dan Tegangan Kapasitor .....	31
Gambar 3.17.	Rangkain <i>Driver</i> Mosfet .....	32
Gambar 3.18.	Rangkaian <i>Driver</i> Mosfet Terisolasi.....	33
Gambar 3.19.	Rangkaian Penggeser Fasa Sinyal PWM.....	34
Gambar 4.1.	Grafik Korelasi Pengukuran Voltmeter dengan Pemantauan Tegangan .....	36
Gambar 4.2.	Grafik Korelasi Pengukuran Termometer dengan Pemantuan Suhu .....	38
Gambar 4.3.	Grafik Tegangan dan SOC saat <i>Charging</i> .....	39

Gambar 4.4.	Grafik Tegangan dan SOC saat <i>Discharging</i> .....	39
Gambar 4.5.	Pengujian Proteksi <i>Overvoltage</i> saat <i>Charging</i> .....	40
Gambar 4.6.	Pengujian Proteksi <i>Undervoltage</i> saat <i>Discharging</i> .....	41
Gambar 4.7.	Pengujian Proteksi <i>Overheat</i> .....	42
Gambar 4.8.	Gelombang Arus Induktor L1 .....	43
Gambar 4.9.	Gelombang Arus Induktor L2 .....	44
Gambar 4.10.	Gelombang Arus Induktor LC .....	45
Gambar 4.11.	Gelombang Arus Tegangan LC .....	47
Gambar 4.12.	Grafik Tegangan Baterai Terhadap Waktu .....	49

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Perbandingan Baterai Lithium-Ion dengan Baterai Jenis Lain .....	6
Tabel 3.1. Parameter Komponen .....	27
Tabel 4.1. Perbandingan Simulasi dan Pengujian Arus Induktor L1 .	44
Tabel 4.2. Perbandingan Simulasi dan Pengujian Arus Induktor L2.	46
Tabel 4.3. Perbandingan Simulasi dan Pengujian Arus LC Seri .....	47
Tabel 4.4. Perbandingan Simulasi dan Pengujian Tegangan LC Seri.	49
Tabel 4.5. Pengukuran Tegangan Baterai.....	49

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Baterai merupakan penyimpan energi yang sangat penting bagi prasyarat kendaraan listrik saat ini. Tanpa adanya baterai, kendaraan listrik tidak akan bisa melaju sebagaimana mestinya. Baterai terbuat dari berbagai macam bahan kimia, untuk baterai yang digunakan pada kendaraan listrik digunakan baterai berbasis Lithium, baik Lithium Ion maupun *Lithium Polymer*. Baterai berbasis Lithium memiliki banyak kelebihan dibanding baterai konvensional seperti *Nickel-Cadmium*, *Nickel-Metalhydrate* ataupun *Lead Acid* [1]. Kelebihan baterai berbasis Lithium adalah densiti energi yang tinggi, densiti daya yang tinggi, *self-discharge* yang rendah, *fast charging*, rasio massa-ke-energy yang tinggi, tidak ada *memory effect*, tahan lama jika proses *charging* sesuai [2]. Namun, baterai berbasis Lithium juga memiliki kekurangan kurang toleran, sehingga memerlukan pemantauan dan prosedur proteksi yang akurat untuk memastikan tidak *overcharge* pada salah satu sel baterai serta memastikan baterai tidak *overheat* yang dapat mengurangi umur baterai.

Perlunya baterai sebagai sumber energi pada sumber listrik menitikberatkan pada keandalan baterai dan keamanan dalam penggunaannya. Baterai Lithium dalam bentuk *pack* memungkinkan memiliki perbedaan karakteristik pada setiap sel di dalamnya baik dalam karakteristik kimia maupun kelistrikannya [3]. Ketidaksamaan ini dapat menyebabkan baterai panas dengan keadaan terparahnya terbakar yang membuat ekualisasi baterai menjadi tidak terdispensasi untuk menjaga baterai dan memanjangkan umur baterai [3]. Metode yang digunakan pada proses ekualisasi pun bermacam-macam, proses ekualisasi harus efisien dan juga mudah diaplikasikan serta mempunyai keandalan yang tinggi. Metode yang sesuai dengan kriteria tersebut salah satunya adalah *buck-boost LC seri converter*[4].

Pada tugas akhir ini direncanakan proses ekualisasi menggunakan metode *buck-boost LC seri converter* dengan *phase shift controller* yang memiliki kemampuan lebih baik dari metode lainya (efisiensi, kecepatan pengisian, kemudahan membuat) [5,6]. Proses ekualisasi ini direncanakan secara otomatis bergabung dengan sistem pemantauan dan proteksi melanjutkan dari tugas akhir yang sudah dikerjakan sebelumnya. Selain

itu, proses pemantauan tegangan dan suhu serta proteksi baterai terhadap *overcharge*, *overdischarge*, dan *overheat* [2,4] juga akan diimplementasikan demi menjadi kondisi baterai tetap baik sehingga tetap aman dan berumur panjang.

## 1.2. Permasalahan

Adapun rumusan masalah dalam proposal tugas akhir ini adalah :

1. Perlunya implementasi Pemantauan dan Proteksi pada sistem ekualisasi baterai Li-Ion tersusun seri sehingga sistem ekualisasi serta sistem *charging* dan *discharging* lebih simultan dan handal.
2. Perlunya algoritma rangkain sehingga proses ekualisasi secara otomatis dan algoritma proteksi yang diaplikasikan saat pengisian dan penggunaan baterai untuk mengantisipasi *overvoltage*, *undervoltage*, dan *overheat*.

## 1.3. Tujuan

Tugas Akhir ini bertujuan untuk :

1. Mengimplementasi sistem pemantuan dan proteksi sehingga sistem ekualisasi dan sistem *charging/discharging* yang sudah ada menjadi lebih mudah dan aman
2. Mendapatkan algoritma otomatis rangkaian ekualisasi dan proteksi baterai Li-Ion dengan adanya sistem pemantauan dan proteksi

Sedangkan manfaat dari penelitian tugas akhir ini diharapkan dapat diaplikasikan sebagai solusi bagi proses pengisian baterai kendaraan listrik guna memperpanjang umur baterai dan mencegah baterai dari kerusakan berupa *overvoltage*, *undervoltage*, dan *overheat* ketika proses pengisian.

## 1.4. Batasan Masalah

Batasan masalah yang diuraikan dalam penelitian ini adalah :

1. Baterai lithium-ion tersusun seri sebanyak empat buah dengan pemantauan berupa tegangan, suhu, dan estimasi *state of charge*.

2. Proteksi yang diimplementasikan adalah proteksi terhadap *overvoltage (overcharge)* , *undervoltage (overdischarge)*, dan *overheat*.
3. Ekualisasi menggunakan konverter buck-boost dan LC seri dengan kontrol synchronous phase shift .

## **1.5. Metodologi**

Metode yang digunakan pada penelitian ini terbagi menjadi tiga tahap, yaitu tahap perancangan sistem, tahap pengujian sistem dan tahap analisis, adapun keterangan mengenai masing-masing tahapan yang dilakukan dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

### **1.5.1. Tahap Perancangan Sistem**

Tahap perancangan sistem dilakukan dengan merancang secara simulasi sistem lalu membuat prototipe dari sistem. Adapun langkah-langkah pada tahap pengambilan data antara lain:

1. Perancangan algoritma sistem pemantauan dan proteksi serta simulasi ekualisasi dalam SIMULINK. Proses ini dilakukan dengan membuat algoritma untuk proses pemantauan dan proses proteksi. Sedangkan simulasi dalam SIMULINK digunakan untuk mendapatkan kondisi optimal proses ekualisasi pada baterai dan menganalisis apakah topologi ekualisasi dapat buat menjadi prototipe.
2. Pembuatan sistem menjadi prototipe, dilakukan untuk mendapatkan data riil setelah sistem diuji dalam simulasi. Ini bertujuan untuk menguji sistem dalam kondisi sesuai dengan lapangan.

### **1.5.2. Tahap Pengujian Sistem**

Dalam tahap ini sistem yang telah dirancang sebelumnya, khususnya pemantauan, proteksi dan ekualisasi. Proses pengujian yang dilakukan akan melibatkan beberapa parameter yang mendukung kinerja sistem sehingga dapat memudahkan proses selanjutnya.

### **1.5.3. Tahap Analisis**

Tahap analisis dilakukan untuk mengidentifikasi kondisi hasil perancangan dan pengujian yang telah dilakukan. Tahap analisis dilakukan pada pemantauan, proteksi, dan ekualisasi pada baterai

memperbandingkan desain dengan hasil prototipe serta memperoleh nilai-nilai error yang kemungkinan terjadi.

## **1.6. Sistematika Penulisan**

Laporan penelitian ini dibagi menjadi lima bab. Adapun susunan laporan ini adalah sebagai berikut:

### **BAB 1. Pendahuluan**

Bab ini berisi tentang latar belakang, permasalahan, tujuan, batasan masalah, metodologi penelitian, dan sistematika penulisan serta relevansi atau manfaat laporan tugas akhir.

### **BAB 2. Pemantauan, Proteksi, dan Ekuivalensi Baterai Lithium-Ion Tersusun Seri Menggunakan Konverter *Buck-Boost* dan LC Seri dengan Kontrol *Synchronous Phase Shift***

Bab ini berisi teori-teori penunjang yang berhubungan dengan permasalahan yang dibahas pada tugas akhir ini. Teori ini digunakan sebagai dasar dalam penulisan tugas akhir.

### **BAB 3. Desain Sistem dan Simulasi**

Bab ini berisi tentang rancangan bagaimana sistem pemantauan, proteksi, dan ekuivalensi pada baterai lithium-ion tersusun seri.

### **BAB 4. Pengujian dan Analisis Sistem**

Bab ini berisi tentang pengujian dari sistem yang telah dirancang beserta analisisnya.

### **BAB 5. Penutup**

Bab ini berisi tentang penutup yang memuat tentang kesimpulan yang dapat diambil dari hasil eksperimen dan pengujian yang telah dilakukan.

## **1.7. Relevansi atau Manfaat**

Tugas akhir ini diharapkan dapat diaplikasikan sebagai pemantauan dan proteksi pada baterai lithium-ion tersusun seri, serta untuk proses ekuivalensi jika kapasitas pada baterai pack tidak sama, sehingga umur baterai lebih panjang dan terhindar dari kerusakan atau bahaya yang mengancam. Selain penelitian ini diharapkan dapat menginspirasi untuk penelitian selanjutnya yang lebih dalam.

## BAB 2

# PEMANTAUAN, PROTEKSI, DAN EKUALISASI BATERAI LITHIUM-ION TERSUSUN SERI MENGUNAKAN KONVERTER *BUCK-BOOST* DAN LC SERI DENGAN KONTROL *SYNCHRONOUS PHASE SHIFT*

### 2.1. Baterai Lithium-Ion

Baterai Lithium-Ion merupakan salah satu jenis baterai dengan *energy density* dan *power density* yang tinggi jika dibandingkan dengan baterai jenis lain [4]. Tak hanya itu, baterai lithium ion memiliki arus *discharge* yang besar dan proses pengisian yang cepat membuat baterai jenis lithium-Ion sangat efektif bila digunakan di berbagai sektor khususnya dalam kendaraan listrik. Baterai Lithium-Ion terbuat dari logam lithium dan logam oksida sebagai elektrodanya dan cairan ion sebagai elektrolitnya. Gambar 2.1. merupakan bentuk dari Lithium-Ion jenis silindris yang banyak digunakan dalam perangkat mobi listrik. Tabel 2.1. merupakan perbandingan dari berbagai jenis baterai. Terlihat dari tabel bahwa baterai lithium ion tidak hanya memiliki kelebihan dari *energy density* dan *power density*, namun *self-discharge* yang rendah dan masa hidup yang lebih panjang walaupun memiliki kekutangan dari toleransi *overcharge* yang sangat kecil.



**Gambar 2.1.** Satu Sel Baterai Lithium-Ion [7].

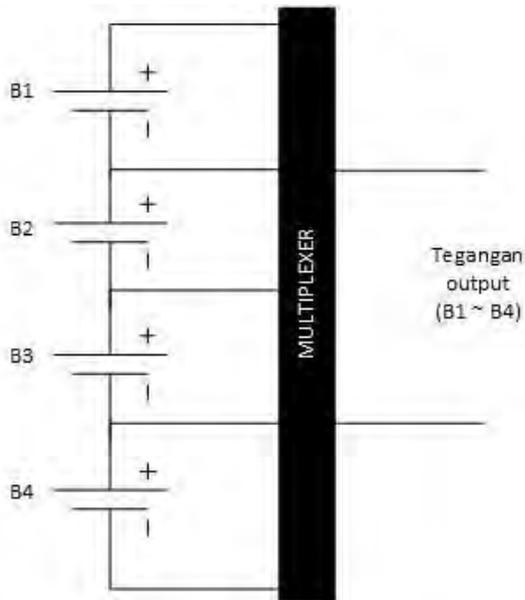
**Tabel 2.1.** Perbandingan Baterai Lithium Ion dengan Baterai Lain [2]

<b>Tipe Baterai</b>	Lead-acid	Ni-Cd	Ni-MH	Lithium-ion
<b>Energy Density (W/kg)</b>	30-50	45-80	60-120	110-160
<b>Power Density</b>	180	150	250-1000	1800
<b>Nominal Voltage</b>	2 V	1,25 V	1,25 V	3,6 V
<b>Overcharge Toleran</b>	High	Moderate	Low	Very Low
<b>Self-discharge</b>	Low	Moderate	High	Very Low
<b>Operating Temperature</b>	-20 - 60 °C	-40 - 60 °C	-20 - 60 °C	-20 - 60 °C
<b>Cycle Life</b>	200 - 300	1500	300 - 500	500 - 1000

## 2.2. Pemantauan Baterai Tersusun Seri

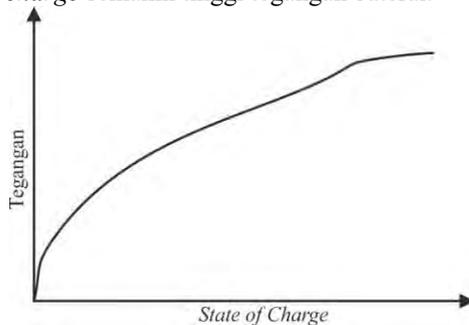
Proses transfer daya yang efisien membutuhkan tegangan yang lebih tinggi agar arus yang mengalir tidak besar. Tak hanya itu dengan menaikkan tegangan nominal maka baterai dapat menyuplai tegangan yang sesuai dengan beban. Dengan tegangan nominal 3,6 volt per sel baterai, lithium-ion dapat disusun hingga puluhan untuk mencapai tegangan nominal yang diinginkan.

Baterai yang tersusun seri sangat sulit untuk dipantau tegangan pada tiap sel. Tegangan pada baterai tersusun seri dapat dipantau menggunakan sebuah sistem pemantauan yang menggunakan prinsip *multiplexing* pada proses pemantauanya. Baterai dipantau dengan mengukur tegangan baterai secara bergantian dengan frekuensi *multiplexing* yang cepat. Pada gambar 2.2. empat buah betarai tersusun seri akan secara bergantian diukur teganganya sehingga didapat tegangan baterai. Selanjutnya tegangan yang terukur akan melalui proses konversi kedalam digital melalui *Analog to Digital Converter* yang ada pada mikrokontroler yang selanjutnya dikembalikan kembali menjadi nilai sebenarnya.



**Gambar 2.2.** *Multiplexing* Pemantauan Baterai

Setelah mengetahui tegangan pada setiap sel baterai yang tersusun seri dapat diestimasi *state of charge* (SOC)/kapasitas yang tersisa pada baterai dengan mentranslasi tegangan ke dalam nilai kapasitas baterai yang setelah didapat karakteristik *charge* dan *discharge test*. Gambar 2.3. menunjukkan korelasi *state of charge* dengan tegangan baterai. Semakin tinggi *state of charge* semakin tinggi tegangan baterai.

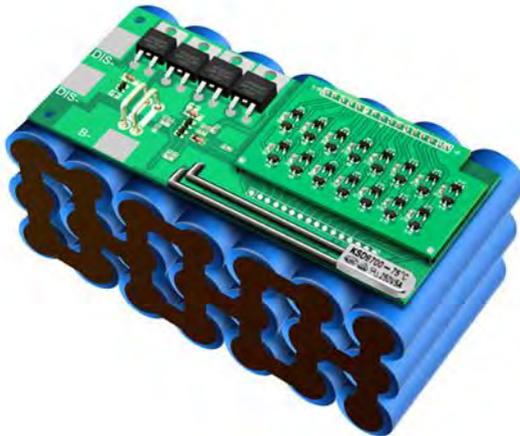


**Gambar 2.3.** Korelasi Tegangan dengan Kapasitas Baterai

### 2.3. Proteksi Baterai

Baterai Lithium-Ion sangat rentan terhadap perubahan suhu yang teralalu ekstrim. Baterai Lithium-Ion dapat mengalami pemanasan seketika jika arus *charging* dan *discharging* terlalu besar atau mengalami hubung singkat. Selain itu, *overvoltage* karena *charging* berlebih (*overcharging*) dan *undervoltage* karena *discharge* berlebih (*overdischarging*) dapat merusak baterai dari mengurangi kapasitas, mengurangi siklus hidup sampai menyebabkan ledakan [5].

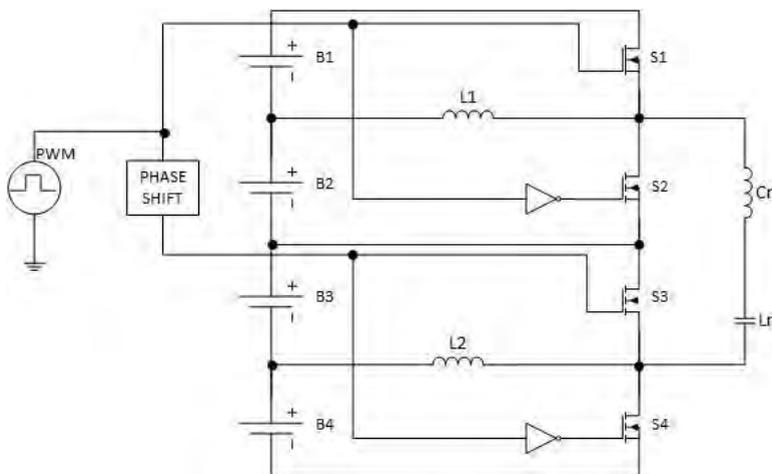
Keadaan yang tidak terkontrol harus dihindari untuk memastikan baterai lithium-ion tidak mengalami kenaikan suhu serta kenaikan dan penurunan tegangan secara seketika sehingga aman digunakan. Jika terjadi kesalahan berupa kenaikan suhu baterai harus segera diturunkan suhunya. Jika proses pendinginan tidak bergungsi, relay proteksi harus memutus semua rangkaian terhubung ke baterai agar tidak terjadi kenaikan suhu. Begitu pula dalam proses *charging* dan *discharging* proteksi dengan memutus rangkaian dapat mencegah *overvoltage* dan *undervoltage* pada baterai. Selain itu, Proteksi pada baterai juga berlaku pada baterai yang sedang diekualisasi dapat berupa pemutusan secara langsung semua saklar yang bekerja dengan mengatur agar gelombang keluaran mikrokontroler (PWM) menjadi nol sehingga baterai menjadi sirkuit terbuka dan menghentikan arus yang mengalir.



**Gambar 2.4.** *Battery Management System* sebagai Proteksi Baterai [8]

## 2.4. Ekualisasi dengan Konverter *Buck-Boost* dan LC Seri

Konverter *buck-boost* dalam ekualisasi ini memiliki empat buah switch (mosfet), dua buah induktor untuk menaikkan dan menurunkan tegangan, serta satu set induktor dan kapasitor untuk menyimpan energi dan menyalurkan dari kapasitas yang lebih ke kapasitas yang kurang [4]. Pada gambar 2.5 dibawah dapat dilihat terdapat empat buah sel baterai yang terhubung secara seri dengan rangkaian konver *buk-boost* dan LCseri. Keepemat seri tersebut dibagi menjadi dua grup, dimana B1 dan B2 adalah baterai yang memiliki tegangan lebih tinggi sedangkan B3 dan B4 adalah baterai yang memiliki tegangan lebih rendah.



**Gambar 2.5.** Rangkaian Konverter *Buck-Boost* dan LC Seri

Dalam konverter ini terdiri dari tiga induktor dan satu kapasitor. Induktor L1 berfungsi sebagai pentransfer energi dari B1 ke B2 dikarenakan B1 memiliki kapasitas yang lebih besar dari B2. Sama seperti L1, induktor L2 berfungsi sebagai jalur transfer energi dari B3 ke B4 dikarenakan B3 memiliki kapasitas yang lebih besar dari B4. Komponen Lr dan Cr merupakan rangkain resonan untuk menyimpan enegi sementara yang akan dialirkan dari B1 dan B2 menuju B3 dan B4.

Switching pada rangkaian akan dikendalikan sinyal PWM dengan siklus kerja 50%. Namun untuk fasa S3 dan S4 berasal dari sinyal PWM yang digeser (*delay*).

### 2.4.1. Prinsip Kerja Konverter *Buck-Boost* dan LC seri dengan Kontrol *Synchronous Phase Shift*

Prinsip kerja dari rangkaian konverter ini memanfaatkan rangkaian resonansi ( $L_r$  dan  $C_r$ ) yang dihubungkan seri untuk menyimpan energi. Rangkaian resonansi ini diberi sinyal kotak yang berasal dari proses *switching* melalui keempat MOSFET dengan frekuensi tertentu sehingga ada transfer energi menuju rangkaian resonansi ( $L_r$  dan  $C_r$ ).

Frekuensi *switching* yang diterapkan pada rangkaian resonansi dapat mempengaruhi sifat dari rangkaian resonansi tersebut. Berikut ini penjelasannya

$$X_L = \omega.L \quad (2.1)$$

$$X_C = \frac{1}{\omega.C} \text{ s} \quad (2.2)$$

Resonansi dapat terjadi jika  $X_L = X_C$ , atau dengan kata lain

$$\omega.L = \frac{1}{\omega.C} \quad (2.3)$$

Jika

$$\omega = 2.\pi.f \quad (2.4)$$

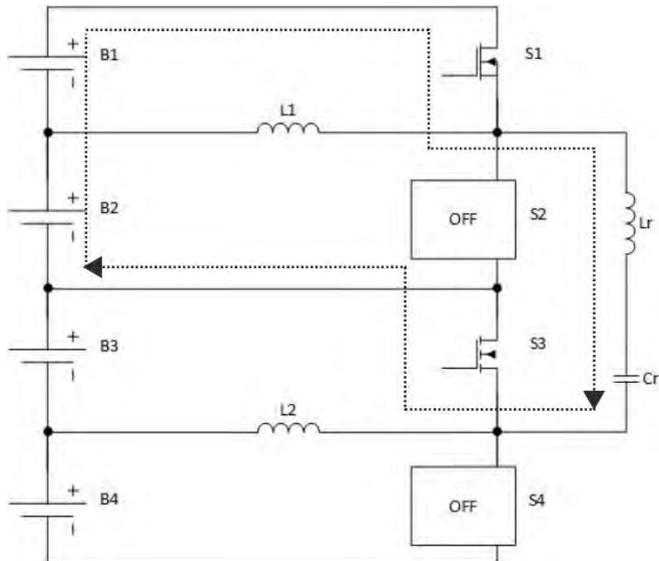
Maka dengan mensubstitusikan (2.3) ke (2.4) akan diperoleh

$$f_r = \frac{1}{2.\pi.\sqrt{L.C}} \quad (2.5)$$

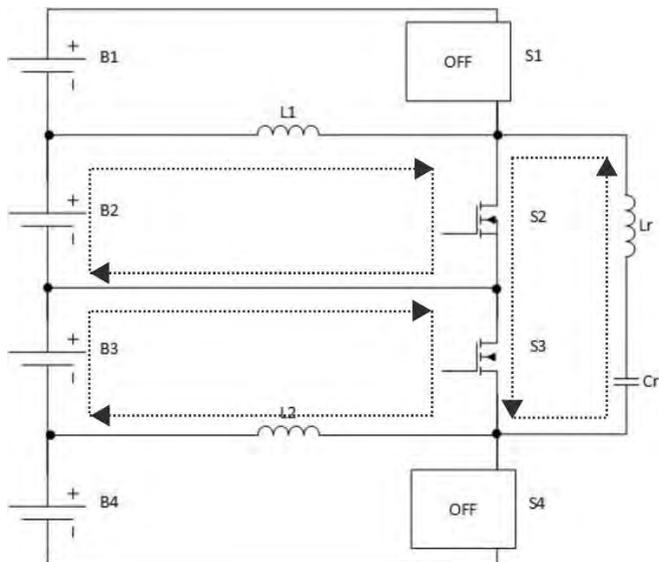
Dimana  $L$  adalah nilai induktansi (Henri),  $C$  adalah nilai kapasitansi (Farad), dan  $f_r$  adalah frekuensi resonansi (Hz)

Dengan menentukan nilai induktansi  $L$  dan kapasitansi  $C$ , maka akan diperoleh suatu nilai frekuensi resonansi. Kemudian dengan nilai induktansi  $L$  dan kapasitansi  $C$  yang sama, frekuensi *switching* yang diterapkan diubah, maka akan mempengaruhi sifat rangkaian resonansi tersebut. Jika frekuensi *switching* lebih besar daripada frekuensi resonansi, maka nilai  $X_L > X_C$ , hal ini menunjukkan bahwa rangkaian resonansi bersifat induktif, sebaliknya jika *switching* lebih kecil dari frekuensi resonansi, maka nilai  $X_C > X_L$ , hal ini menunjukkan bahwa rangkaian bersifat kapasitif.

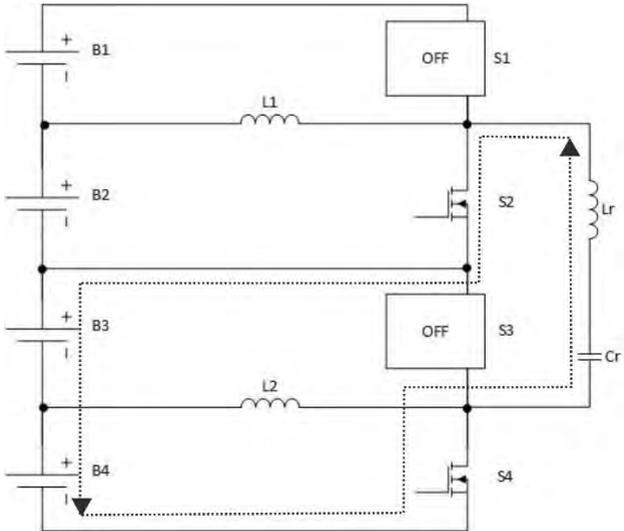
Dalam kasus ini frekuensi *switching* dibuat lebih besar daripada frekuensi resonansi yang berarti rangkaian LC seri bersifat induktif.



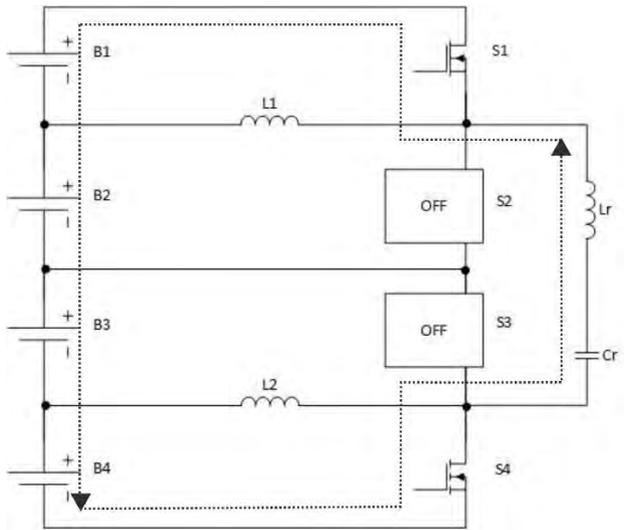
**Gambar 2.6.** Perpindahan Arus Rangkaian Kondisi I



**Gambar 2.7.** Perpindahan Arus Rangkaian Kondisi II



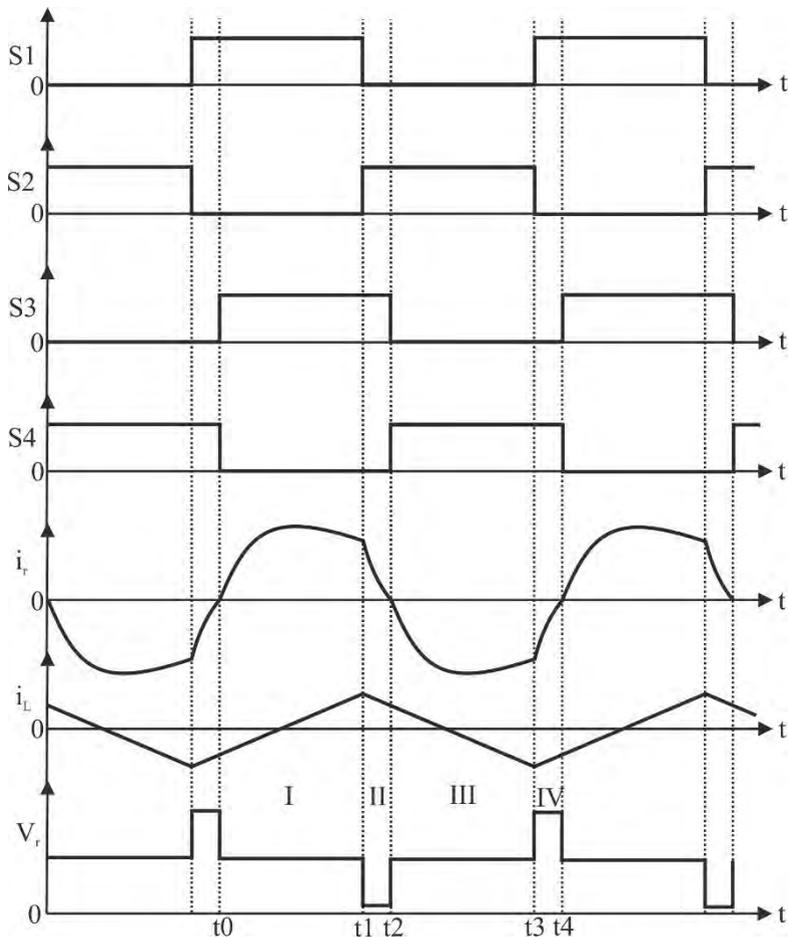
**Gambar 2.8.** Perpindahan Arus Rangkaian Kondisi III



**Gambar 2.9.** Perpindahan Arus Rangkaian Kondisi IV

Gambar 2.6 sampai dengan gambar 2.9 merupakan ilustrasi proses kerja konverter *Buck-Boost* dan LC seri dengan Kontrol *Synchronous Phase-Shift*. Dari gambar 2.6 s.d. 2.9 dapat dijabarkan cara kerja rangkaian sebagai berikut.

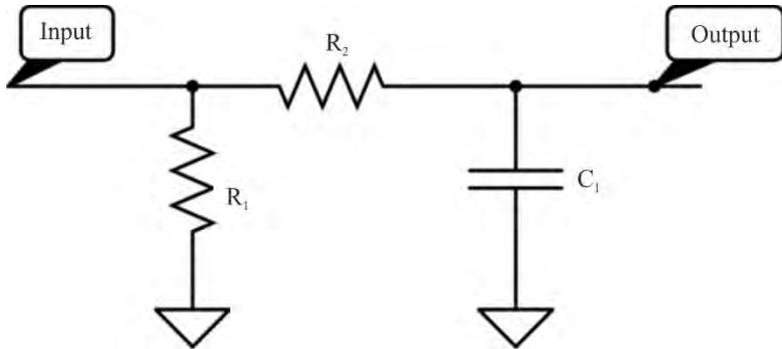
1. Gambar 2.6 yaitu kondisi I, dimana induktor  $L_r$  dan kapasitor  $C_r$  terhubung dengan B1 dan B2. Oleh karena itu kapasitor  $C_r$  terisi muatan oleh B1 dan B2, dan arus  $L_r$  dan  $C_r$  ( $i_r$ ) meningkat dari nol. Pada kondisi ini energi ditransfer dari B1 dan B2 menuju  $L_r$  dan  $C_r$ . Dapat dilihat dari bentuk gelombangnya seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.10 dari periode  $t_0$  sampai  $t_1$ .
2. Gambar 2.7 yaitu kondisi II, dimana S2 dan S3 dalam kondisi on, sebaliknya S1 dan S4 off. Rangkaian induktor  $L$  dan kapasitor  $C_r$  terhubung singkat karena S2 dan S3 on. Kapasitor  $C_r$  akan terisi dari muatan yang berasal dari induktor  $L_r$  menyebabkan transfer energi dari induktor  $L_r$  dan  $i_r$  akan berkruang mendekati nol. Dapat dilihat dari bentuk gelombangnya seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.10 dari periode  $t_1$  sampai  $t_2$ .
3. Gambar 2.8 yaitu kondisi III, dimana S2 dan S4 dalam kondisi on, sebaliknya S1 dan S3 off. Induktor  $L_r$  dan kapasitor  $C_r$  terhubung dengan B3 dan B4. B3 dan B4 terisi muatan oleh kapasitor  $C_r$  sedangkan  $i_r$  akan berkurang dari nol menjadi negatif. Oleh karena itu proses ini adalah transfer energi dari  $L_r$  dan  $C_r$  menuju B3 dan B4. Dapat dilihat dari bentuk gelombangnya seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.10 dari periode  $t_2$  sampai  $t_3$ .
4. Gambar 2.9 yaitu kondisi IV, dimana S1 dan S4 dalam kondisi on, sebaliknya S2 dan S3 off. Oleh karena itu induktor  $L_r$  dan kapsitor  $C_r$  terhubung dengan keempat baterai yang terhubung seri. B1, B2, B3, dan B4 terisi muatan oleh induktor  $L_r$  dan kapasitor  $C_r$  serta  $i_r$  meningkat menuju nol. Dapat dilihat dari bentuk gelombangnya seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.10 dari periode  $t_3$  sampai  $t_4$ .



**Gambar 2.10** Bentuk Gelombang Konverter dalam Dua Periode

### 2.4.2 Rangkaian *Phase Shift*

. Rangkaian *phase shift* adalah rangkaian penggeser fasa yang terdiri dari rangkaian *time delay* yang mana akan menunda gelombang sesuai waktu yang telah diatur. Gambar 2.11. meunjukkan rangkaian *Phase Shift*.



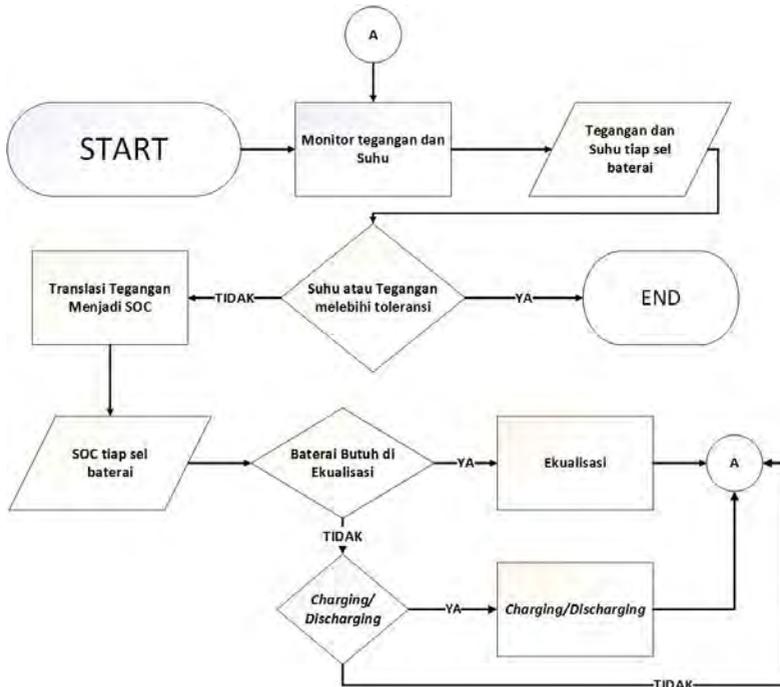
**Gambar 2.11.** Rangkaian *Phase Shift*

Pada gambar 2.11 terlihat titik input sebagai titik masukan sinyal untuk *time delay* sedangkan titik output adalah titik keluaran *time delay* yang mana gelombang sudah mengalami pergeseran fasa.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## BAB 3 DESAIN SISTEM DAN SIMULASI

Sistem pada tugas akhir ini disesain menyeluruh yakni terdiri dari pemantauan, proteksi dan ekualisasi. Desain sistem tersebut saling berkaitan untuk mendukung kinerja satu-sama lain. Berikut gambar 3.1. merupakan *flowchart* sistem keseluruhan.



**Gambar 3.1** *Flowchart* Sistem Keseluruhan

Mulai-mula baterai akan diukur tegangan dan suhunya. Setelah didapat tegangan dan suhu program akan mengecek apakah melebihi toleransi. Jika tegangan dan suhu melebihi toleransi maka sistem akan berhenti. Jika tidak melebihi toleransi, soc akan ditranslasi dari tegangan lalu akan ditentukan apakah dibutuhkan ekualisasi berdasarkan tegangan baterai. Jika dibutuhkan maka ekualisasi akan berlangsung. Jika tidak

maka baterai diarahkan ke proses *charging/discharing*. Jika tidak melakukan keduanya maka sistem akan siaga(*idle*).

### 3.1. Sistem Pemantauan

Baterai lithium-ion dalam pengoprasianya memerlukan kondisi yang baik sehingga tidak timbul masalah. Proses pemantauan pada baterai mutlak diperlukan agar dapat memantau keadaan baterai apakah baik atau tidak. Baterai lithium-ion memiliki toleransi yang sangat kecil pada keadaan *overcharge* serta *overdischarge* yang digambarkan dengan *overvoltage* pada baterai dan *undervoltage* pada baterai. Selain itu, baterai lithium-ion yang rentan oleh kenaikan suhu harus dipantau terakut suhunya agar tidak melebihi rating kerja dari baterai lithium-ion sendiri sehingga tidak mengurangi masa hidup baterai dan menimbulkan masalah lain.

#### 3.1.1. Pemantauan Tegangan

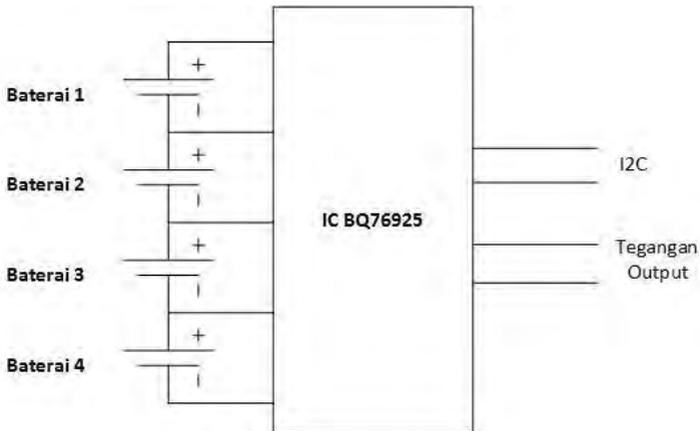
Baterai tersusun seri tidak bisa secara langsung didapati tegangan baterai per sel hanya dengan pengukuran tegangan sederhana. Untuk mendapatkan tegangan per sel baterai tersusun seri penggunaan metode multiplexing untuk mengukur secara bergantian. Pemantauan baterai lithium-ion tersusun seri dengan metode multiplexing memerlukan sebuah IC (*integrated circuit*) pemantauan baterai agar mendapat tegangan yang akurat meskipun telah di multiplexing sehingga tidak ada kesalahan pengambilan data pada sistem pemantauan tegangan. IC yang digunakan pada pemantauan tegangan ialah BQ76925 buatan Texas Instrument. Gambar 3.2. merupakan IC BQ76925.



**Gambar 3.2** IC BQ76925 [9].

BQ7625 merupakan IC dengan metode komunikasi berupa I2C (*inter-integrated circuit*) sehingga diperlukan mikrokontroler dengan kemampuan I2C untuk mengambil data yang diinginkan dari IC BQ76825

seperti Arduino Uno. I2C adalah bus universal dengan konsep *master & slave* yang memungkinkan mikrokontroler dipasangkan dengan ribuan IC yang berfungsi sebagai sensor maupun aktuator. ICBQ7625 tidak memerlukan sumber catu daya dari external dikarenakan sumber daya akan diambil dari baterai itu sendiri, hanya saja grounding harus disatukan antara *high current ground* dan *low current ground* agar pemantauan lebih optimal dan akurasi yang lebih tinggi tanpa ada perbedaan titik referensi (ground) antara mikrokontroler dan baterai.



**Gambar 3.2.** Skema Pemantauan dengan BQ76925

Keluaran dari BQ76925 merupakan tegangan dari baterai yang sudah dimultiplexing sesuai baterai yang kita pilih sebelum mengambil masukanya. Tidak hanya itu, prinsip BQ76925 adalah menurunkan tegangan input (*levelshifter*) sehingga keluaran dari BQ7625 perlu dieskalasi untuk mengembalikan kepada nilai asli sebelum masuk ke IC BQ76925. Dengan meilihat datasheet pada IC BQ769245 didapati persamaan 3.1. untuk mengembalikan tegangan yang telah diturunkan ke nilai aslinya:

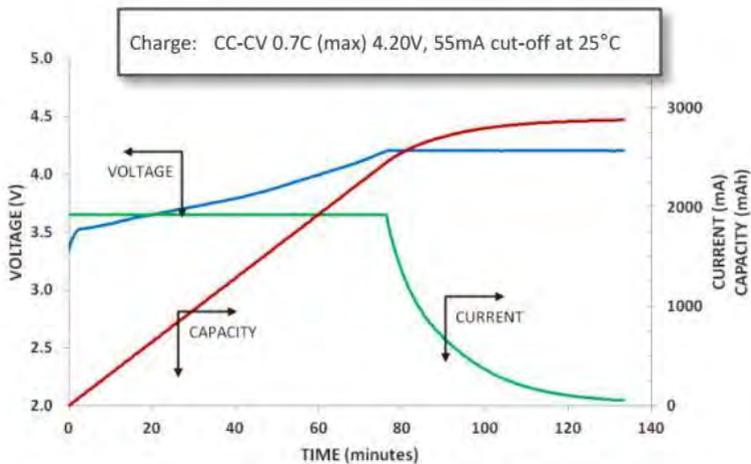
$$V_B = V_{out}.Gain \quad (3.1)$$

Dimana :  $V_B$  = Tegangan baterai sebenarnya (Volt)  
 $V_{out}$  = Tegangan keluaran ICBQ76925 (Volt)  
Gain = konstantan gain IC BQ76925

### 3.1.2. Pemantauan *State Of Charge* (SOC)

Setelah mendapatkan tegangan pada baterai, tegangan dapat pula ditranslasi untuk mendapatkan SOC pada tiap-tiap sel baterai. SOC merujuk pada datasheet dan pengujian. Pada gambar 3.4 merupakan grafik tegangan, kapasitas dan arus terhadap waktu. Jika diambil antara grafik tegangan dan kapasitas maka dapat terlihat semakin tinggi tegangan akan semakin besar kapasitas terisi pada baterai ketika mengalami proses charging, sampai pada titik dimana grafik kapasitas yang linear berubah menjadi eksponensial yang disebabkan arus yang turun secara perlahan.

Gambar 3.4 dan 3.5. merupakan kurva dari datasheet NCR18650PF saat charging dan discharging yang akan menjadi acuan pengujian SOC pada BAB 4. Saat proses charging berlangsung terlihat bahwa tegangan akan berada pada kisaran 3.2 sampai 4.1 sedangkan proses discharge tegangan akan berada pada tegangan 4.1 sampai dengan 2.5 tergantung seberapa besar arus discharge yang diinginkan.



Gambar 3.4. Grafik *State Of Charge* (Charging)[8].

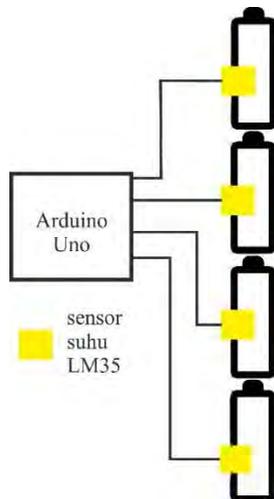


Pemasang LM35 cukup ditempelkan pada bagian baterai untuk mengukur suhu yang ada pada baterai dengan proses konduksi yang akan dirasakan LM35 yang kemudian dirubah menjadi tegangan tertentu oleh LM35. Kelebihan dari LM35 adalah hasil tegangan yang linear terhdap perubahan suhunya namun karena LM35 merupakan sensor dengan proses konduksi respon terhadap suhu akan menjadi lambat karena proses perpindahan panas.

Merujuk spesifikasi pada LM35, tegangan output dapat ditranslasi dengan nilai tertentu untuk menghasilkan suhu. Dengan akurasi pada LM35 yakni 10 mV/°C maka suhu didapatkan dengan persamaan berikut.

$$T_B = \frac{V_{sensor}}{0,01} \quad (3.2)$$

Dimana :  $T_B$  = Suhu baterai sebenarnya (°C)  
 $V_{sensor}$  = Tegangan keluaran LM35 (Volt)



**Gambar 3.7** Skema Akusisi Suhu dengan LM35

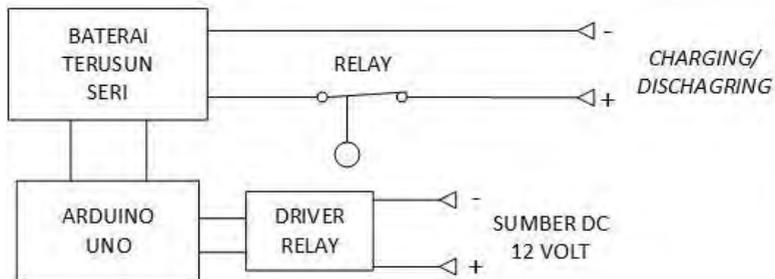
Gambar 3.7 merupakan skema pemasangan sensor suhu LM35, sensor hanya ditempelkan saja baterai baterai kemudain tegangan akan diambil oleh arduino uno sekalu mikronoktroller.

### 3.2. Sistem Proteksi

Proses pemantauan pada baterai akan mengacu pada sistem proteksi sehingga baterai aman ketika digunakan. Proteksi pada baterai tentu bergantung pada parameter yang menjadi masalah pada baterai, yakni berupa tegangan dan suhu yang secara langsung mempengaruhi kinerja baterai.

#### 3.2.1. Proteksi Tegangan

Baterai Lithiuom-Ion memiliki parameter tertentu terkait tegangan. Baterai Panasonic NCR18650 memiliki batas tegangan chargin pada 4.2 volt dan batas discharge 2.5 volt. Rating ini menandakan baterai tidak boleh melebihi batas kerja atau membuat baterai kehilangan sejumlah umur dan pengurangan kapasitas. Gambar 3.8. adalah skema proteksi tegangan pada baterai. Pada skema proteksi tegangan dibuat dua sistem proteksi yakni terhadap *overvoltage* dan *undervoltage* dimana ketika baterai di *charge / discharge* sampai batas yang sudah di setting akan ada sistem otomoatis memutus relay dari rangkaian baterai menuju rangkaian *charing/discharging*.



**Gambar 3.8.** Skema Proteksi Tegangan pada Baterai

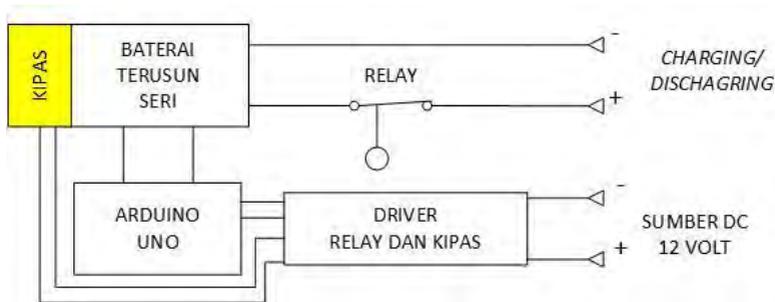
Agar pengaplikasian berjalan secara otomatis dan terintegrasi dengan proses pemantauan sejumlah algoritma intersupsi disisipkan untuk mengamankan baterai seketika terjadi gangguan dengan

berdasarkan parameter tegangan baterai. Gambar 3.9. adalah algoritma program untuk proteksi tegangan.

Program pada gambar 3.9. adalah dengan mengukur apakah baterai melebihi batas overvoltage yakni 4.1. volt dan undervoltage yakni 2.5. volt. Ketika tegangan melebihi batas tersebut maka secara otomatis pin digital arduino akan menyala dan memutuskan semua rangkaian yang terhubung dengan baterai sehingga tidak ada arus yang mengalir.

### 3.2.2. Proteksi Suhu

Selain proteksi terhadap perubahan tegangan, proteksi terhadap suhu mutlak diperlukan. Batas operasi baterai NCR18650PF adalah 0 °C s.d 45 °C ketika *charging* dan 0 °C s.d. 60 °C ketika *discharging*. Proteksi suhu akan membuka semua saklar yang terhubung dengan baterai jika sensor suhu merasakan gangguan yang melebihi rating. Gambar 3.9. adalah ilustrasi skema rangkaian proteksi jika terjadi overheat pada baterai.



**Gambar 3.9.** Skema Proteksi Suhu Berlebih

Sama seperti proteksi tegangan, agar berjalan secara otomatis dan terintegrasi proses pemantauan dan ekualisasi sejumlah algoritma interupsi disisipkan agar menginterupsi proses pemantauan dan ekualisasi jika terjadi masalah suhu pada baterai. Gambar 3.11. adalah algoritma proteksi suhu lebih (overheat).

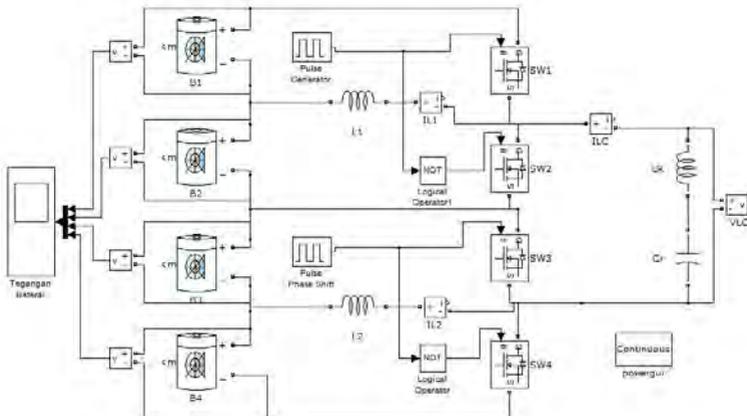
Pada gambar 3.9 program proteksi bermula ketika suhu mencapai 35°C sehingga kipas akan dinyalakan otomatis dengan harapan suhu baterai akan turun. Jika suhu baterai turun sampai 30 °C maka kipas akan dimatikan secara otomatis. Namun, jika suhu baterai tak kunjung

turun dan menyentuh suhu 45 °C maka menyulut relay non aktif untuk memutus saklar charging dan discharging serta membuat PWM nol.

### 3.3. Sistem Ekualisasi

#### 3.3.1. Desain Simulasi Konverter Buck-Boost dan LC Seri

Setelah mendesain sistem pemantauan dan proteksi, sistem ekualisasi terlebih dahulu di desain agar bisa diimplementasikan. Namun sebelum diimplementasikan untuk mengurangi kegagalan perlu perencanaan dengan metode simulasi. Gambar 3.10. merupakan simulasi Ekualisasi konverter *buck-boost* dan LC seri dalam MATLAB SIMULINK R2009.



**Gambar 3.10** Simulasi Ekualisasi Konverter Buck-Boost dan LC Seri

#### 3.3.2 Penentuan Parameter L1, L2, Lr dan Cr

Parameter L2 dan L2 dapat ditentukan oleh persamaan 3.3.

$$V_{Baterai} = L \cdot \frac{di}{dt} = L \cdot \frac{\Delta i}{\Delta t}$$

$$L = \frac{V_{Baterai}}{\frac{\Delta i}{\Delta t}} \quad (3.3)$$

Dimana :  $V_{baterai}$  adalah tegangan baterai (V)

L adalah induktansi L1 atau L2 (H)

$\Delta i$  adalah perbedaan arus maksimum dan minimum (A)

$\Delta t$  adalah perbedaan waktu (detik)

Dari persamaan (3.3) dapat diperoleh nilai induktansi L1 dan L2 . Dengan asumsi  $V_{\text{baterai}}$  untuk menentukan induktansi L1 adalah sebesar 4.04V, sedangkan  $V_{\text{baterai}}$  untuk menentukan nilai induktansi adalah sebesar 3.82 V. Nilai di untuk menentukan L1 dan L2 diasumsikan 1,1 A.

- **Induktansi L1**

$$V_{\text{Baterai}} = 4,04 \text{ V}$$

$$\Delta i = 1.1 \text{ A}$$

$$\Delta t = \frac{1}{2.60000} = 8,33.10^{-6} \text{ sekon}$$

$$L = \frac{4,4}{\frac{1,1}{(8,33.10^{-6})}} = 30,6.10^{-6} \text{ H} = 30,6\mu\text{H}$$

$$L2 = 30,6\mu\text{H} \approx 31\mu\text{H}$$

- **Induktansi L**

$$V_{\text{Baterai}} = 3,82 \text{ V}$$

$$\Delta i = 1.1 \text{ A}$$

$$\Delta t = \frac{1}{2.60000} = 8,33.10^{-6} \text{ sekon}$$

$$L = \frac{3,82}{\frac{1,1}{(8,33.10^{-6})}} = 28,9.10^{-6} \text{ H} = 28,9\mu\text{H}$$

$$L2 = 29,9\mu\text{H} \approx 29\mu\text{H}$$

Sedangkan nilai  $L_r$  dan  $C_r$  (LC Seri) dapat ditentukan dari persamaan (2.5). Dengan asumsi nilai :

$$L_r = 10 \text{ uH}$$

$$F_r = 60000 \text{ Hz}$$

Maka akan diperoleh

$$60000 = \frac{1}{2.3,14 \sqrt{(10 \cdot 10^{-6}) \cdot C_r}}$$

$$60000 = \frac{1}{4.9,86 \cdot (10 \cdot 10^{-6}) \cdot C_r}$$

$$C_r = \frac{1}{4.9,86 \cdot (10 \cdot 10^{-6}) \cdot (60000)^2}$$

$$C_r = 7,04 \cdot 10^{-7} = 0,704 \mu F$$

Agar rangkaian induktansi  $L_r$  dan kapasitansi  $C_r$  bersifat induktif, maka nilai  $f_r$  harus lebih kecil dari 60000 Hz, oleh karena itu nilai  $C_r$  dibulatkan menjadi 1  $\mu F$ .

### 3.3.3. Simulasi Konverter

Setelah ditentukan parameter yang akan digunakan, maka selanjutnya adalah simulasi rangkaian konverter buck-boost dan LC seri. Tabel 3.1. Menunjukkan nilai-nilai komponen yang telah ditentukan sebelumnya:

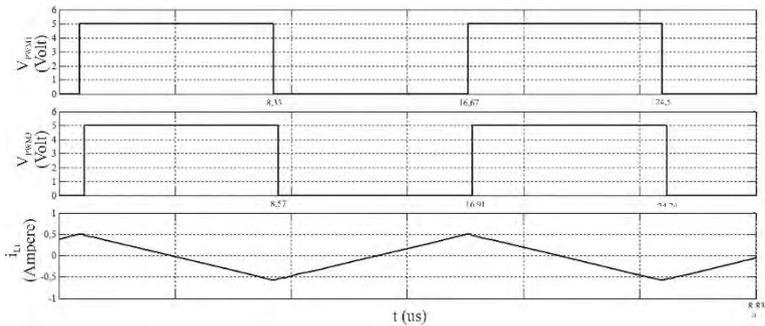
**Tabel 3.1.** Parameter Komponen

Komponen	Nilai
L1	31 $\mu H$
L2	29 $\mu H$
Le	10 $\mu H$
$C_r$	1 $\mu F$
Frekuensi Switching	60 kHz

Simulasi yang dihasilkan menghasilkan bentuk gelombang arus induktor L1, arus induktor L2, arus LC seri ( $L_r$  dan  $C_r$ ), dan tegangan LC seri ( $L_r$  dan  $C_r$ ).

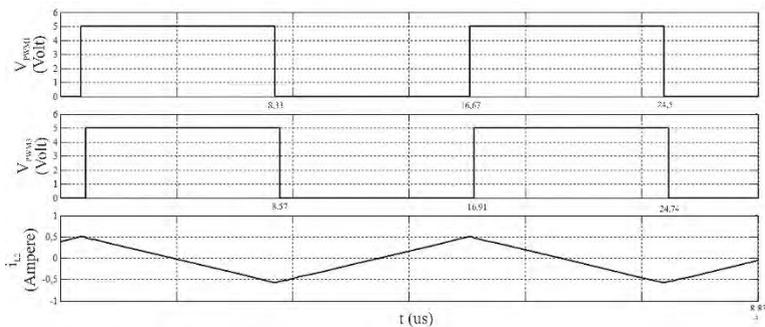
- **Gelombang Arus Induktor L1 dan L2**

Gelombang 3.11. menunjukan bentuk gelombang arus induktor L1, sedangkan gambar 3.12. menunjukan bentuk gelombang arus induktor L2. Dari gambar 3.11. dapat dilihat arus maksimum adalah sebesar 0,5 A dan nilai arus minimum adalah -0,5 A. Hal ini berarti  $\Delta i$  adalah sebesar 1 A.



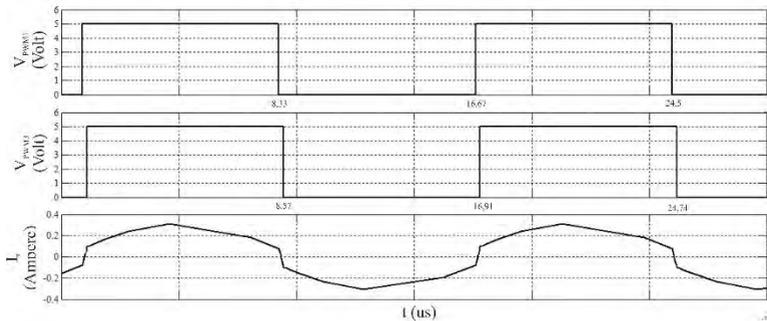
**Gambar 3.11.** Gelombang Arus Induktor L1

Sedangkan, dari gambar 3.12. dapat dilihat arus maksimum ( $I_{maks}$ ) adalah sebesar 0,5 A dan nilai arus minimum adalah -0,5 A. Hal ini berarti  $\Delta i$  adalah sebesar 1 A.



**Gambar 3.12.** Gelombang Arus Induktor L2

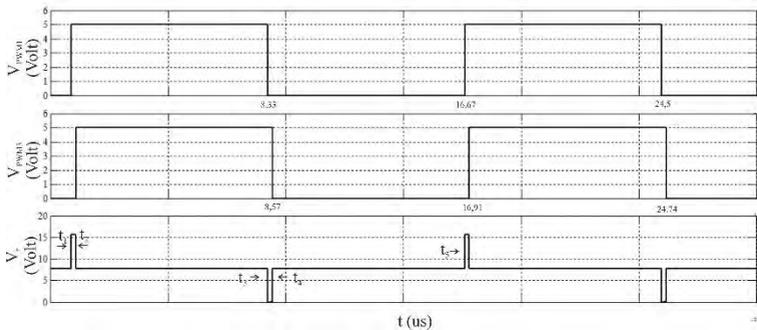
- **Gelombang Arus LC Seri**  
Gelombang 3.13. menunjukan bahwa bentuk gelombang arus LC seri. Dari gambar 3.14. dapat dilihat bahwa arus maksimum LC seri adalah 0,4 A , sedangkan arus minimum LC seri adalah -0,4 A.



**Gambar 3.13.** Gelombang Arus Induktor LC seri

- **Gelombang Tegangan LC Seri**

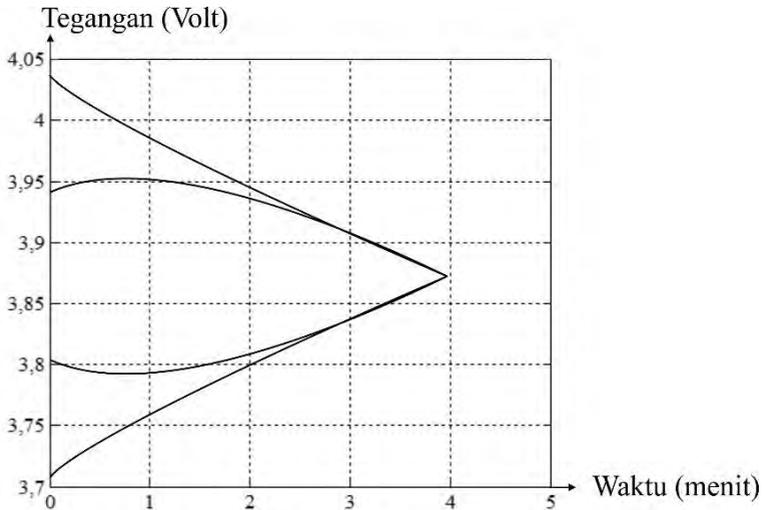
Dari gambar 3.14. dapat dilihat 5 nilai tegangan pada rentang waktu, yaitu nilai tegangan pada saat  $t_1$ - $t_2$ ,  $t_2$ - $t_3$ ,  $t_3$ - $t_4$ ,  $t_4$ - $t_5$ . Dari gambar 3.15. Didapatkan bahwa pada saat kondisi  $t_1$ - $t_2$  nilai tegangan LC seri adalah 8,1 volt sedangkan kondisi  $t_2$ - $t_3$  tegangan naik menuju 16,5 volt. Saat kondisi  $t_3$ - $t_4$  tegangan kembali turun menjadi 7,9 volt sedangkan saat kondisi  $t_4$ - $t_5$  tegangan turun menjadi 0 volt.



**Gambar 3.14** Gelombang Tegangan LC Seri

- **Ekualisasi Baterai**

Gambar 3.15. menunjukkan Ekualisasi Baterai dengan menggunakan konverter buck-boost dan LC Seri dengan synchronous phase shift control.



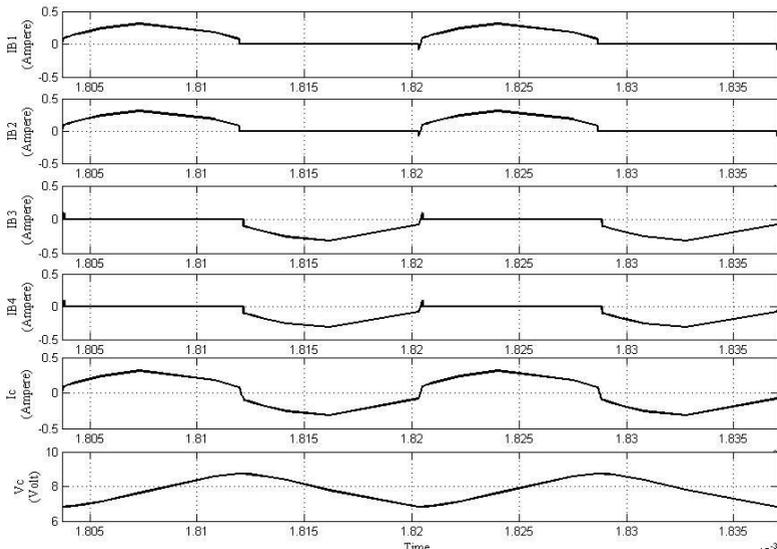
**Gambar 3.15.** Grafik Ekualisasi baterai

Gambar 3.15 merupakan grafik hasil ekualisasi dalam software MATLAB SIMULINK. Dapat dilihat bahwa jika dimulaskan di SIMULINK waktu tempuh untuk proses ekualisasi hanya berlangsung selama 4 menit. Ekualisasi terjadi dimana dua baterai memiliki tegangan yang lebih tinggi dua baterai lainnya. Dapat dilihat juga titik kesamaan dari keempat baterai setelah melaluia proses ekualisasi.

### 3.3.4. Pembangkit Sinyal PWM di Arduino

Pada tugas akhir ini menggunakan mikrokontroler arduino uno sebagai pembangkit PWM menggunakan library PWM yang telah tersedia. Duty cycle dari PWM adalah 0,5 dengan frekuensi yang diatur sebesar 60 kHz

### 3.3.5. Performa Rangkaian



**Gambar 3.16.** Gelombang Arus Baterai, Arus LC dan Tegangan Kapasitor

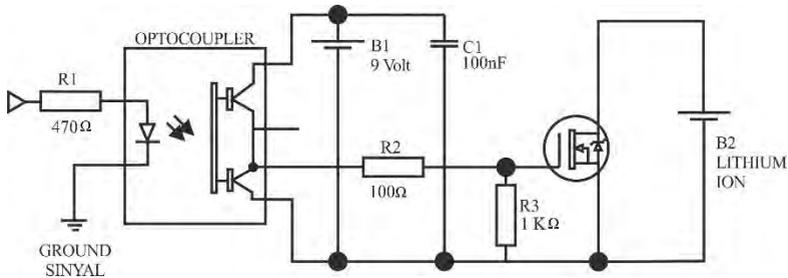
Gambar 3.16 merupakan gelombang arus pada tiap baterai, arus LC dan tegangan kapasitor dalam dua periode. Dapat dilihat dari gambar bahwa kapasitor akan *charge* dan *discharge* dalam satu periode dimana tegangan tertinggi kapasitor pada tegangan 9 volt. Dalam setengah periode pertama arus pada kapasitor mengalami polaritas positif dimana dalam posisi tersebut kapasitor akan di *charge* oleh baterai mengakibatkan tegangan kapasitor meningkat menuju titik maksimum. Pada setengah periode yang sama juga, arus dari baterai 1 dan baterai 2 bernilai positif menandakan ada arus mengalir dari baterai 1 dan baterai 2 menuju kapasitor.

Sedangkan saat setengah periode berikutnya tegangan kapasitor menurun dari 9 volt menuju 7 volt dimana terjadi proses *discharge*. Arus pada kapasitor mengalami polaritas negatif menandakan proses *discharge* dari kapasitor terjadi. Proses *discharge* ini berlangsung dari kapasitor menuju baterai 3 dan baterai 4. Dapat dilihat baterai 3 dan baterai 4 mempunyai arus negatif berarti arus mengalir menuju baterai 3 dan 4.

### 3.3.6. Desain Driver Mosfet

Pada rangkaian konverter buck-boost dan LC seri terdapat 3 buah mosfet yang bekerja sebagai saklar. Agar mosfet dapat bekerja sebagai saklar maka diperlukan rangkaian driver. Rangkaian driver ini dihubungkan dengan gate dan source mosfet.

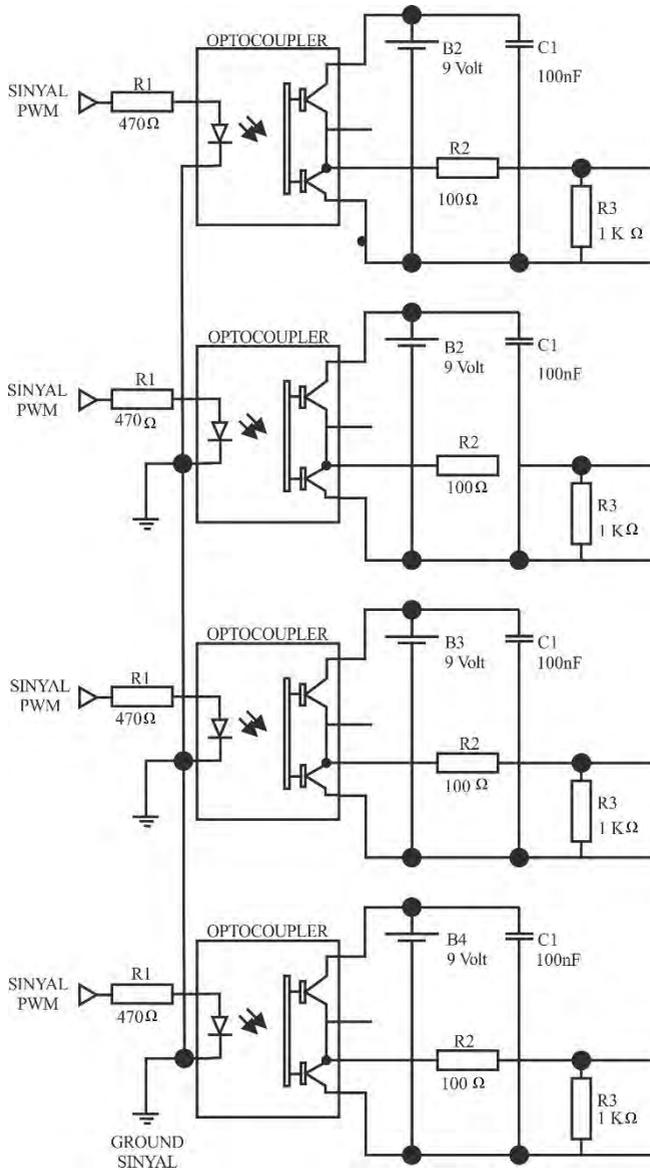
Rangkaian yang digunakan untuk driver mosfet pada tugas akhir ini adalah optocoupler FOD3184 sebagai driver dan isolator antara mikrokontroler dengan mosfet. Sinyal masukanya berasal dari mikrokontroler dan digunakan untuk menyulut mosfet IRF54N. Bentuk umum rangkaian *driver* mosfet ditunjukkan pada gambar 3.18.



**Gambar 3.17.** Rangkaian *Driver* Mosfet

Rangkaian driver pada gambar 3.16. diterapkan untuk satu buah mosfet, sedangkan pada rangkaian konverter *buck-boost* dan LC seri terdapat empat buah mosfet, oleh karena itu perlu empat rangkaian driver seperti gambar 3.18. Namun, suplai tegangan penguatan keempat driver tersebut harus terisolasi antara satu dengan lainnya. Suplai tegangan terisolasi dimaksudkan agar tidak terjadi kerusakan. Jika suplai tegangan driver tidak terisolasi, maka akan terjadi hubung singkat pada rangkaian konverter *buck-boost* dan LC seri. Oleh karena itu desain suplai tegangan menggunakan baterai 9 volt sebanyak empat buah sehingga terisolasi satu sama lain.

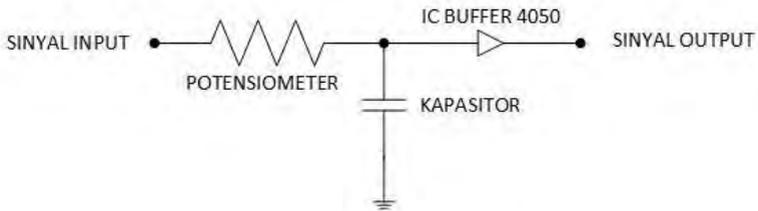
Gambar 3.17 merupakan rangkaian driver yang terisolasi. Rangkaian ini sebenarnya adalah rangkain 3.16 yang gabungan menjadi empat buah untuk mentrigger empat buah mosfet. Dapat dilihat bahwa tiap driver memiliki baterai 9 volt sebagai catu dayanya. Sehingga jika dihubungkan dengan mosfet tidak terjadi hubung singkat antara satu mosfet dengan mosfet lainnya.



**Gambar 3.18.** Rangkaian *Driver* Mosfet Terisolasi

### 3.3.7. Desain *Synchronous Phase Shift*

Sinyal PWM dapat digeser fasanya dengan memanfaatkan IC time delay yakni CD4050. Default penggeseran fasa pada ic tersebut hanya berkisar puluhan nano oleh karena itu dikarenakan dibutuhkan penggeseran sebesar 240 ns maka rangkaian pada gambar 3.18 digunakan. Selain penggeser juga dua dari empat gelombang perlu dibalik dengan memanfaatkan ic NOT yakni 7404 untuk membalik sinyal PWM dua dari empat keluaran gelombang.



**Gambar 3.19.** Rangkaian Penggeser Fasa Sinyal PWM

## **BAB 4**

### **PENGUJIAN DAN ANALISIS SISTEM**

Pada Bab ini akan dibahas mengenai pengujian implementasi dari sistem keseluruhan. Tujuan dari pengujian dan analisis ini adalah untuk mengetahui keberhasilan dari implementasi yang telah dirancang.

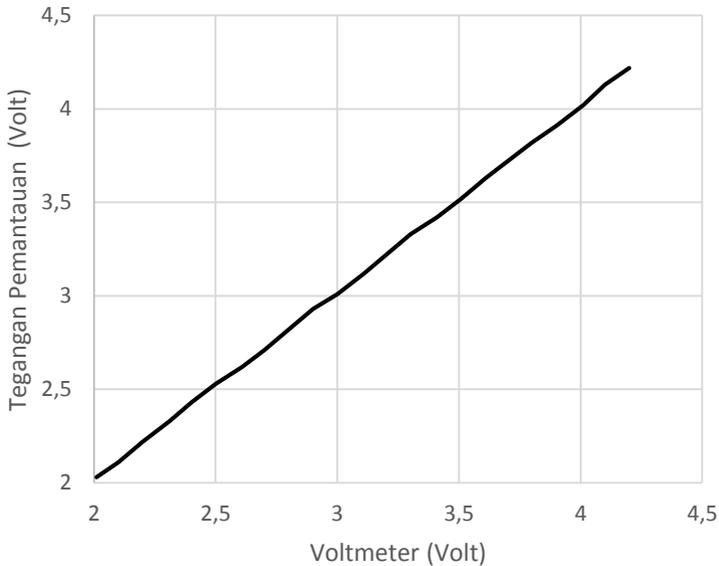
Pengujian dilakukan secara bertahap dari sistem pemantauan, sistem proteksi lalu sistem ekualisasi. Hasil pengujian yang didapatkan akan dianalisis sehingga dapat diambil kesimpulan keberhasilan dari implementasi yang telah dirancang. Pada pengujian ini digunakan objek baterai Lithium-Ion Panasonic NCR18650PF sebanyak 4 sel.

Adapun pengujian yang dilakukan ialah :

1. Pengujian error pemantuan tegangan
2. Pengujian error pemantauan suhu
3. Estimasi *state of charge*
4. Pengujian proteksi *overvoltage & undervoltage*
5. Pengujian *overheat*
6. Pengujian arus induktor L1 dan L2
7. Pengujian arus LC seri
8. Pengujian tegangan LC seri
9. Pengujian tegangan baterai

#### **4.1. Pengujian Error Pemantauan Tegangan**

Pengujian bertujuan untuk melihat seberapa besar error yang dihasilkan oleh proses pemantauan menggunakan *battery IC monitoring* yakni BQ76925. Hasil pemantauan tegangan akan dibandingkan dengan voltmeter yang memiliki akurasi yang tinggi. Pengujian ini dibandingkan dengan voltmeter GW INSTEK GDM 8245 (akurasi :  $\pm 0,003\% +4$ ). Gambar 4.1. menunjukkan grafik korelasi pengukuran dengan menggunakan *IC Monitoring* BQ76925 dan voltmeter. Grafik korelasi ini menunjukkan bahwa semakin linear garis yang dibentuk antara pemantauan dan voltmeter maka semakin kuat korelasi antara pemantauan dan voltmeter.



**Gambar 4.1** Grafik Korelasi Pengukuran Voltmeter dengan Pemantauan Tegangan

Error yang didapat dari pengujian pemantauan tegangan mencapai titik tertinggi pada 1,25% .Perbedaan yang terjadi antara hasil pemantauan dan voltmeter sangat kecil, walaupun begitu tetap ada perbedaan sebesar 0,01 ~ 0,03 volt dari voltmeter, hal ini dikarenakan akurasi dari BQ76925 sendiri dan rangkain yang tidak ideal.

Selain pengujian error, pengujian *kolerasi pearson* juga harus diperhitungkan dalam menentukan korelasi antara voltmeter dengan hasil pemantauan tegangan. Berikut uji korelasi pearson:

$$r = \frac{\sum xy - \frac{\sum x \sum y}{n}}{\sqrt{\left[ \sum x^2 - \frac{(\sum x)^2}{n} \right] \left[ \sum y^2 - \frac{(\sum y)^2}{n} \right]}} \quad (4.1)$$

Dimana  $r$  = nilai korelasi pearson,  $x$  adalah nilai tegangan voltmeter, sedangkan  $y$  adalah nilai tegangan pemantauan oleh sensor.

Setelah melakukan proses perhitungan, didapat bahwa nilai korelasi pearson dari pengujian pemantauan tegangan adalah :

$$r = 0,9999$$

dengan nilai mendekati 1 maka membuktikan ada korelasi yang kuat antara pengukuran voltmeter dan pemantauan.

#### 4.2. Pengujian Error Pemantauan Suhu

Pengujian ini dimaksudkan untuk melihat seberapa besar error yang dihasilkan jika dibandingkan dengan termometer infrared yang memiliki akurasi yang tinggi. Pengujian ini dibandingkan dengan termometer *infrared* merk KRISBOW KW06-559 (akurasi :  $\pm 1,5\%$  ). Gambar 4.2. menunjukkan grafik korelasi pengukuran dengan menggunakan LM35 dan termometer infrared.

Dapat dari hasil perbandingan bahwa selisih tertinggi mencapai 1,2 dan error tertinggi 4,9%. Jika dibandingkan dengan grafik korelasi pemantauan tegangan, grafik korelasi pemantauan suhu memiliki error yang lebih besar dilihat dari grafik yang tidak selurus grafik korelasi pemantauan tegangan.

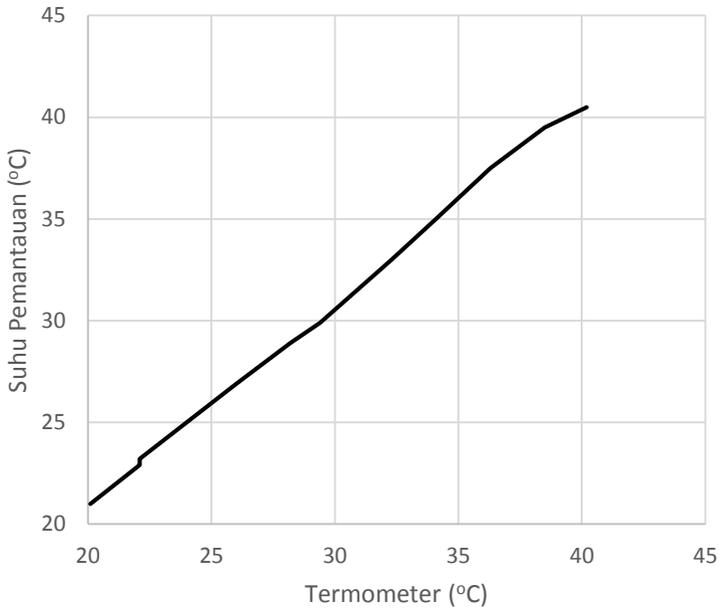
Error yang berada pada rentang 1 ~ 5% terjadi dikarenakan beberapa faktor, diantaranya sensor LM35 yang tidak menempel seutuhnya pada baterai dan pemasangan sensor yang tidak ideal. Selain itu jenis sensor LM35 memiliki prinsip kerja berdasarkan konduksi panas. Proses konduksi panas yang lebih lama dari proses radiasi memerlukan waktu respon yang lebih lama sehingga respon sensor terhadap suhu cenderung lebih lambat.

Selain pengujian error, pengujian *korelasi pearson* juga harus diperhitungkan dalam menentukan korelasi antara termometer dengan hasil pemantauan suhu menggunakan persamaan (4.1).

Setelah melakukan proses perhitungan, didapat bahwa nilai *korelasi pearson* dari pengujian pemantauan suhu adalah

$$r = 0,9993$$

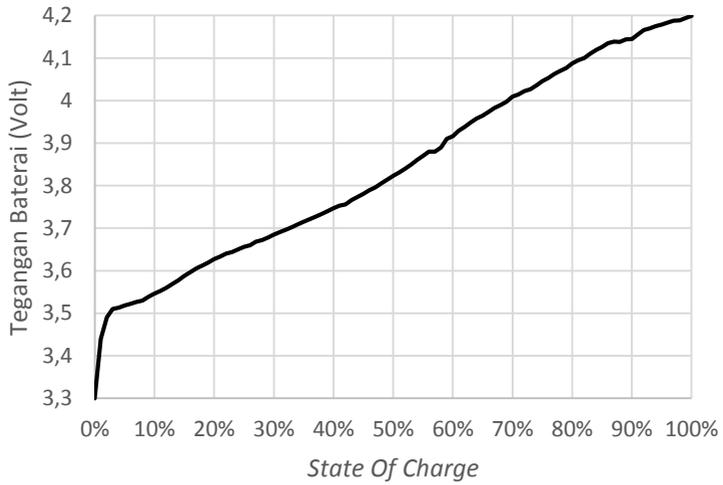
dengan nilai mendekati 1 maka membuktikan ada korelasi yang kuat antara pengukuran voltmeter dan pemantauan.



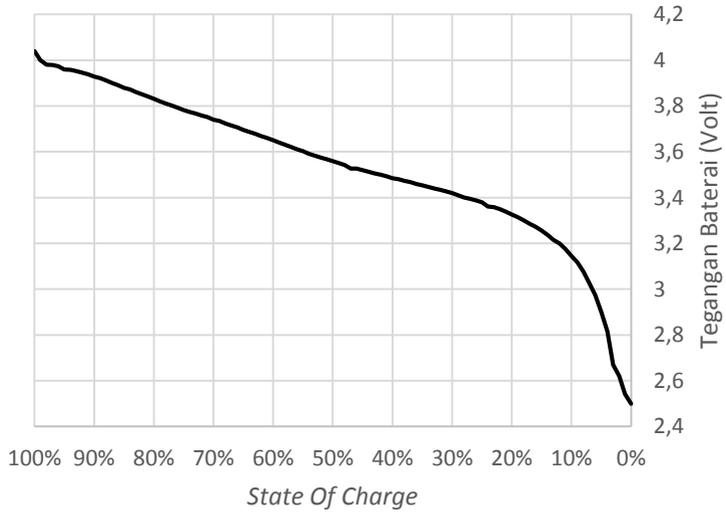
**Gambar 4.2** Grafik Korelasi Pengukuran Termometer dengan Pemantauan Suhu

### 4.3. Estimasi *State Of Charge*

Estimasi *state of charge* dimaksudkan untuk mencari padanan yang akan digunakan saat translasi dari tegangan ke bentuk *state of charge*. Pengujian dilakukan dengan proses *charging* baterai dan *discharging* baterai dengan arus konstan serta dikorelasikan dengan datasheet baterai. Perhitungan *state of charge* dihitung berdasarkan banyaknya arus yang masuk/keluar dari dan ke baterai dengan rentang waktu tertentu. Jikasadah didapat rentang waktu dalam interval yang dicari maka akan di padangkan dengan tegangan saat waktu itu.



**Gambar 4.3** Grafik Tegangan dan SOC saat *charging*



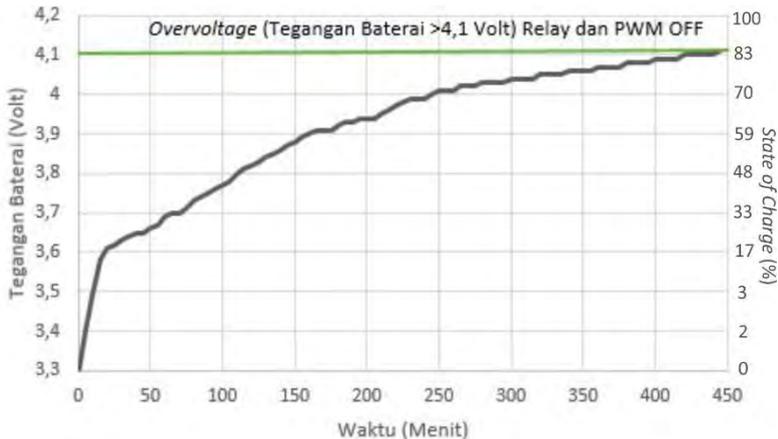
**Gambar 4.4** Grafik Tegangan dan SOC saat *discharging*

Gambar 4.3. merupakan grafik pengujian SOC *charging* menggunakan arus konstan 1,45 A (0,5C, kapasitas 2,9 Ah). Saat pengujian baterai penuh pada 4,2 V, sedangkan baterai memiliki titik nol pada 3,3 volt. Jika dibandingkan dengan *datasheet* terjadi perbedaan karena ada penurunan arus saat *charging*, proses *charging* yang kurang sempurna serta kondisi baterai yang tidak ideal.

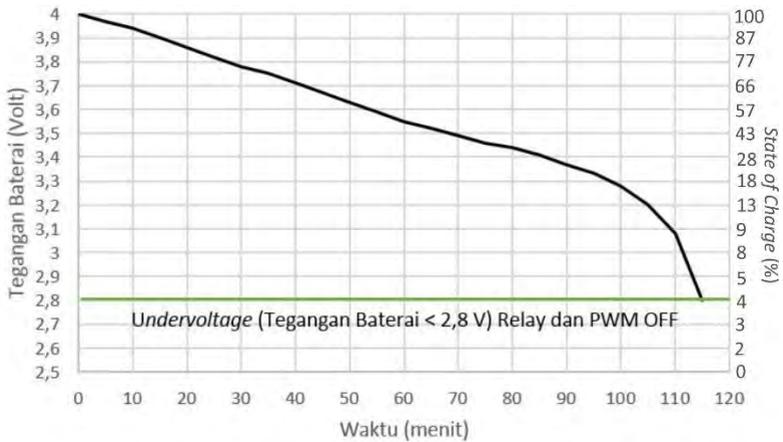
Gambar 4.4 merupakan grafik pengujian *discharging* dengan arus discharge 1,45 A (0,5C, kapasitas 2,9 Ah). Pada pengujian *discharging* baterai memiliki titik nol saat 2,5 V sedangkan baterai didischarge dari 4 Volt saat baterai penuh. Jika dibandingkan dengan *datasheet*, titik awal dan akhir memiliki kesamaan namun terjadi sedikit perbedaan dari beberapa lekuk grafik, hal ini disebabkan kondisi baterai yang tidak ideal serta proses *discharge* yang kurang sempurna.

#### 4.4. Pengujian Proteksi *Overvoltage* dan *Undervoltage*

Pengujian bertujuan menguji sistem proteksi dapat bekerja sesuai desain yang telah dibuat. Pengujian *overvoltage* dilakukan dengan *charging* baterai dan mengamati sampai batas toleransi *overvoltage*. Begitu pula *undervoltage*, baterai didischarge sampai menyentuh batas toleransi Gambar 4.5. merupakan hasil uji sistem proteksi *overvoltage* dan gambar 4.6 merupakan hasil uji sistem proteksi *undervoltage*.



**Gambar 4.5.** Pengujian Proteksi *Overvoltage* saat *Charging*

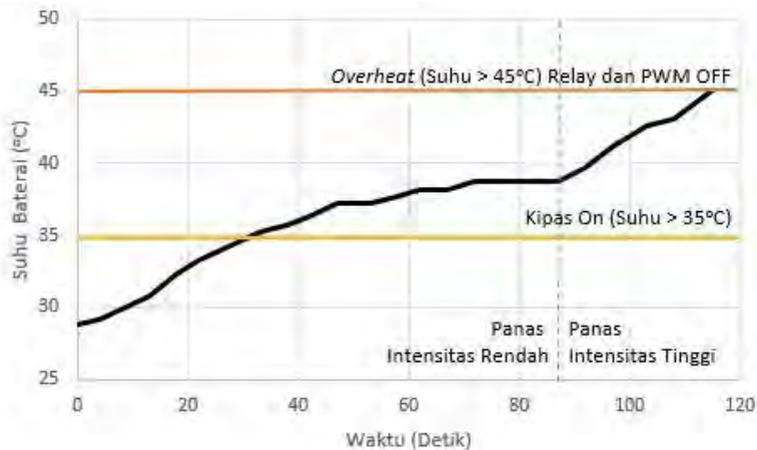


**Gambar 4.6** Pengujian Proteksi *Undervoltage* saat *Discharging*

Dapat dilihat dari gambar 4.5. proteksi bekerja sesuai dengan desain sistem, ketika tegangan baterai menyentuh 4,1 volt , sistem proteksi akan memutus semua switch dengan menonaktifkan sinyal PWM sehingga keadaan rangkain akan terbuka (proses *charging* berhenti).. Sedangkan saat *undervoltage* pada gambar 4.6 tegangan baterai turun menyentuh 2,8 volt sistem proteksi akan memutus semua switch dengan menonaktifkan sinyal PWM sehingga keadaan rangkaian akan terbuka (proses *discharge* berhenti).

#### 4.5. Pengujian Proteksi Overheat

Pengujian ini dimaksudkan untuk menguji apakah sistem proteksi dengan parameter suhu dapat bekerja sesuai desain yang telah dibuat. Pengujian dilakukan dengan memanaskan baterai dengan pemanas *hairdryer* dalam dua tahap (dua tingkat pemanasan) sehingga suhu baterai meningkat. Gambar 4.7. merupakan hasil uji sistem proteksi *overheat*.



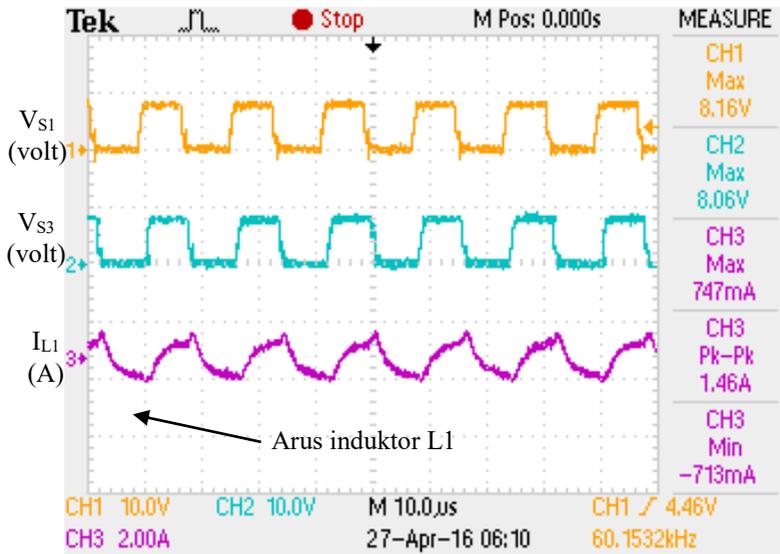
**Gambar 4.7** Pengujian Proteksi *Overheat*

Gambar 4.7 membuktikan bahwa proteksi *overheat* bekerja sesuai dengan desain sistem. Mula-mula ketika suhu baterai naik menyentuh 35°C kipas akan menyala untuk menurunkan suhu. Bekerjanya kipas membuat kenaikan suhu baterai tidak signifikan dibandingkan sebelum kipas bekerja yang membuat suhu baterai stagnan di suhu 37°C. Ketika suhu baterai stagnan dikarenakan bekerjanya kipas untuk mendinginkan, pemanas dinaikan tingkat panasnya menjadi intensitas tinggi sehingga suhu baterai meningkat sampai menyentuh 45°C. Pada saat baterai menyentuh 45°C sistem proteksi memutus semua relay dan menonaktifkan sinyal PWM sehingga keadaan rangkaian baterai akan terbuka.

## 4.6. Pengujian Arus Induktor L1 dan L2

### 4.6.1. Pengujian Arus Induktor L1

Pengujian ini bertujuan membandingkan bentuk gelombang arus induktor L1 pada saat kondisi pengujian pada *oscilloscope* dengan bentuk gelombang arus induktor L1 pada simulasi pada SIMULINK. Gambar 4.7. merupakan bentuk gelombang arus induktor L1 hasil pengujian.



**Gambar 4.8** Gelombang Arus Induktor L1

Dari hasil pengujian, dapat dilihat bahwa nilai arus maksimum ( $I_{maks}$ ) induktor L1 adalah 0,9 A, sedangkan arus minimum ( $I_{min}$ ) induktor L1 adalah -0,8 A. Arus induktor L1 memiliki  $\Delta i$  sebesar 1,7 A.

Jika dibandingkan dengan hasil simulasi, maka akan terlihat perbedaannya. Hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai arus maksimum ( $I_{maks}$ ) induktor L1 adalah 0,5 A. Sedangkan arus minimum ( $I_{min}$ ) induktor L1 adalah -0,5 A. Tabel 4.3 merupakan perbandingan nilai arus induktor L1 antara hasil simulasi dengan pengujian.

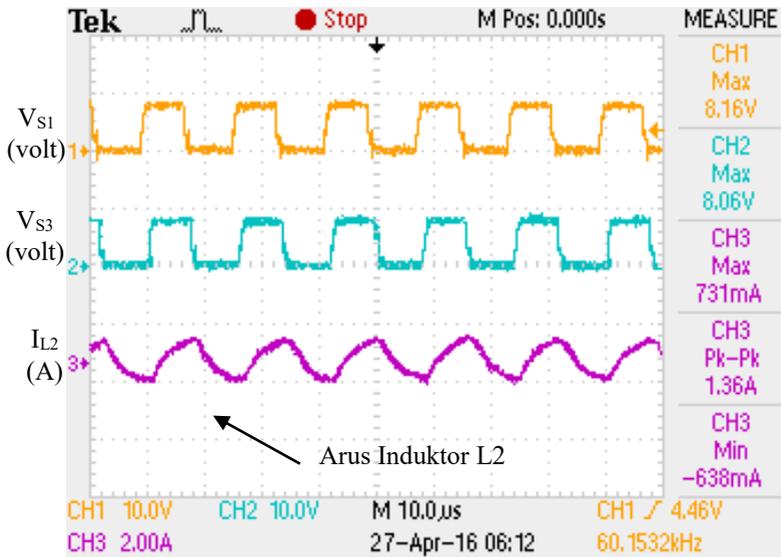
**Tabel 4.1.** Perbandingan Simulasi dan Pengujian Arus Induktor L1

Parameter	Simulasi	Pengujian
$I_{maks}$ (A)	0,5	0,7
$I_{min}$ (A)	-0,5	-0,7
$\Delta i$ (A)	1	1,4

Dapat dilihat dari tabel perbandingan, hasil pengujian tidak jauh berbeda dengan simulasi. Perbedaan ini dapat terjadi dikarenakan induktor yang tidak ideal (memiliki resistansi) serta nilainya yang tidak ideal seperti hasil perhitungan.

#### 4.6.2. Pengujian Arus Induktor L2

Pengujian ini bertujuan membandingkan bentuk gelombang arus induktor L2 pada saat kondisi pengujian pada *oscilloscope* dengan bentuk gelombang arus induktor L2 pada simulasi pada SIMULINK. Gambar 4.9. merupakan bentuk gelombang arus induktor L2 .



Gambar 4.9 Gelombang Arus Induktor L2

Dari hasil pengujian, dapat dilihat bahwa nilai arus maksimum ( $I_{maks}$ ) induktor L2 adalah 0,7 A, sedangkan arus minimum ( $I_{min}$ ) induktor L1 adalah -0,6 A. Arus induktor L2 memiliki  $\Delta i$  sebesar 1,3 A.

Sedangkan hasil simulasi menunjukkan nilai arus maksimum ( $I_{maks}$ ) induktor L2 adalah 0,5 A. Sedangkan arus minimum ( $I_{min}$ ) induktor L2 adalah -0,5 A. Jika dibandingkan perbedaan antara simulasi dan pengujian tidak menunjukkan hasil yang signifikan. Tabel 4.4 merupakan perbandingan nilai arus induktor L2 antara hasil simulasi dengan pengujian

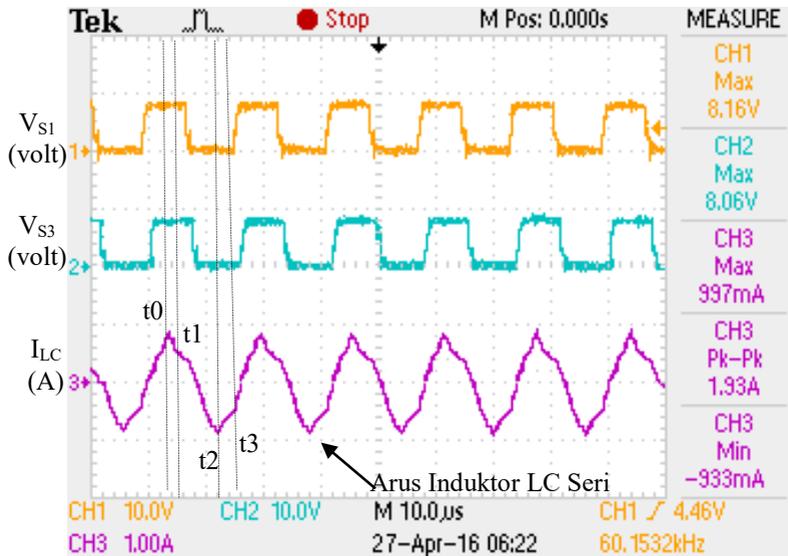
**Tabel 4.2.** Perbandingan Simulasi dan Pengujian Arus Induktor L2

Parameter	Simulasi	Pengujian
$I_{maks}$ (A)	0,5	0,7
$I_{min}$ (A)	-0,5	-0,6
$\Delta i$ (A)	1	1,3

Data dari tabel perbandingan menunjukkan hasil pengujian mengalami perbedaan namun tidak jauh berbeda dengan simulasi. Perbedaan ini dapat terjadi dikarenakan induktor yang tidak ideal (memiliki resistansi) serta nilainya yang tidak ideal seperti hasil perhitungan.

#### 4.7. Pengujian Arus LC Seri

Pengujian ini bertujuan membandingkan bentuk gelombang arus induktor LC seri pada kondisi pengujian dengan *oscilloscope* dengan bentuk gelombang arus induktor LC seri simulasi dengan SIMULINK. Gambar 4.9. merupakan bentuk gelombang arus induktor LC seri



**Gambar 4.10** Gelombang Arus LC Seri

Gambar 4.10 menunjukkan karakteristik gelombang arus induktor LC seri hasil dari pengujian. Dari hasil pengujian, dapat dilihat bahwapada saat  $t_0$  nilai arus LC seri adalah 0,6 A, sedangkan pada saat  $t_1$  nilai arus LC seri adalah 0,2 A. Pada saat  $t_2$ , nilai arus LC seri adalah -0,9 A, sedangkan pada saat  $t_3$  arus LC seri adalah -0,8 A. Dari gambar 4.9 pula dapat dilihat nilai arus maksimum LC seri ( $I_{maks}$ ) adalah 0,9 A. Sedangkan nilai arus minimum LC seri ( $I_{min}$ ) adalah -0,9 A.

Jika dibandingkan dengan hasil simulasi, maka akan terlihat perbedaanya. Dari hasil simulasi, didapatkan nilai arus LC seri pada saat  $t_0$  adalah 0,3 A, sedangkan pada saat  $t_1$ , nilai arus LC seri adalah 0,1 A. Pada saat  $t_2$  nilai arus LC seri adalah -0,3 A, sedangkan pada saat  $t_3$  nilai arus LC seri adalah -0,1A. Nilai arus maksimum LC seri ( $I_{maks}$ ) dari hasil simulasi adalah 0,5 A, sedangkan arus minimumnya ( $I_{min}$ ) adalah -0,5 A. Tabel 4.5 menunjukkan perbandingan antara hasil simulasi dengan hasil pengujian.

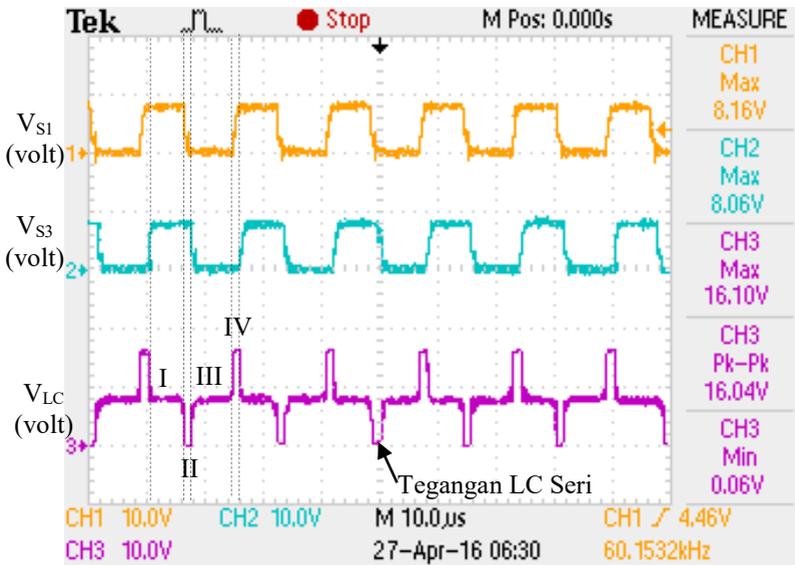
**Tabel 4.3.** Perbandingan Simulasi dan Pengujian Arus LC Seri

Waktu	Simulasi			Pengujian		
	$i(t)$ (A)	$I_{maks}$ (A)	$I_{min}$ (A)	$i(t)$ (A)	$I_{maks}$ (A)	$I_{min}$ (A)
$t_0$	0,3	0,4	-0,4	0,6	0,9	-0,9
$t_1$	0,1			0,2		
$t_2$	-0,3			-0,6		
$t_3$	-0,1			-0,0		

Perbedaan hasil pengujian dan simulasi dapat disebabkan beberapa faktor, komponen L dan C yang tidak ideal (memiliki resistansi) serta proses pensaklaran (switching) yang tidak ideal.

#### 4.8. Pengujian Tegangan LC Seri

Pengujian ini bertujuan membandingkan bentuk gelombang tegangan LC seri pada saat kondisi pengujian dengan *oscilloscope* dengan bentuk gelombang tegangan LC seri pada simulasi dengan SIMULINK. Gambar 4.9. merupakan bentuk gelombang tegangan LC Seri .



**Gambar 4.11.** Gelombang Tegangan LC Seri

Gambar 4.11 menunjukkan gelombang tegangan LC seri. Pada pengujian ini, terdapat 4 kondisi yang dilihat tegangannya yaitu saat kondisi I, II, III dan IV. Pada kondisi I nilai tegangan LC seri adalah sebesar 7,9 V. Pada kondisi II nilai tegangan LC seri adalah sebesar 0,6 V. Pada kondisi III nilai tegangan LC seri adalah sebesar 7,8 volt. Pada kondisi IV nilai tegangan LC seri adalah sebesar 16,1 V.

Jika dibandingkan dengan hasil simulasi, maka akan terdapat sedikit perbedaan. Namun perbedaan tersebut tidak terlalu signifikan. Hasil simulasi menunjukkan pada saat kondisi I nilai tegangan LC seri adalah sebesar 8,1 V. Pada saat kondisi II nilai tegangan LC seri adalah sebesar 0 V. Pada saat kondisi III nilai tegangan LC seri adalah sebesar 7,9 V. Pada saat kondisi IV nilai tegangan LC seri adalah sebesar 16,5 Volt. Tabel 4.6 merupakan perbandingan nilai tegangan LC seri antara hasil simulasi dengan hasil pengujian.

**Tabel 4.4.** Perbandingan Simulasi dan Pengujian Tegangan LC Seri

Kondisi	Simulasi	Pengujian
	Tegangan (V)	Tegangan (V)
I	8,1	7,9
II	0	0,6
III	7,9	7,8
IV	16,5	16,1

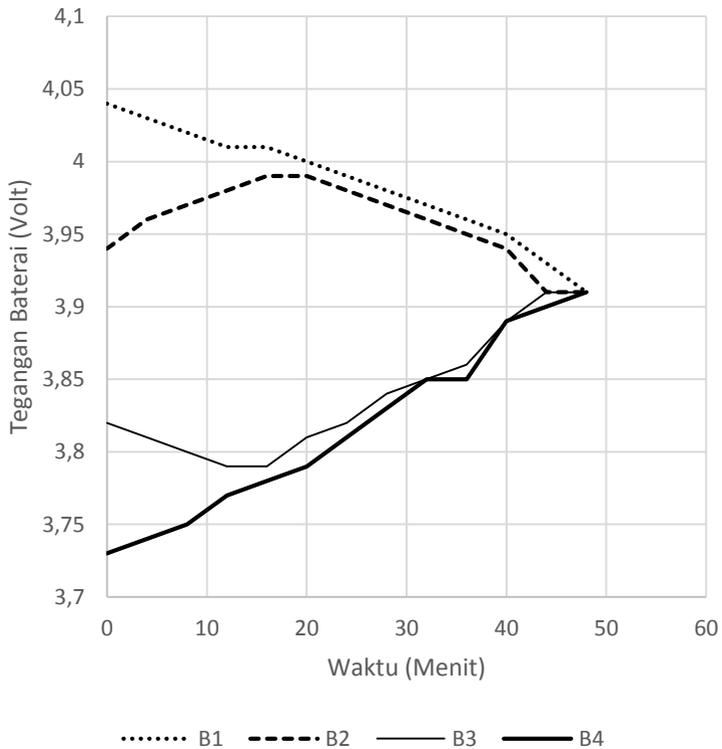
Dari tabel 4.6 dapat dilihat ada drop tegangan pada pengujian. Hal ini disebabkan komponen penyusun konverter sehingga terjadi drop tegangan pada hasil pengujian.

#### 4.9. Pengujian Tegangan Baterai

Pengujian ini merupakan pengujian terakhir pada sistem setelah sebelumnya dilakukan beberapa pengujian. Pengujian ini dimaksudkan untuk mengetahui kinerja dari sistem ekualisasi setelah ditambahkan sistem pemantauan dan sistem proteksi.

**Tabel 4.5.** Pengukuran Tegangan Baterai

Waktu (menit)	Tegangan Baterai (Volt)			
	B1	B2	B3	B4
0	4,04	3,94	3,82	3,73
4	4,03	3,96	3,81	3,74
8	4,02	3,97	3,8	3,75
12	4,01	3,98	3,79	3,77
16	4,01	3,99	3,79	3,78
20	4	3,99	3,81	3,79
24	3,99	3,98	3,82	3,81
28	3,98	3,97	3,84	3,83
32	3,97	3,96	3,85	3,85
36	3,96	3,95	3,86	3,85
40	3,95	3,94	3,89	3,89
44	3,93	3,91	3,91	3,9
48	3,91	3,91	3,91	3,91



**Gambar 4.12** Grafik Tegangan baterai Terhadap Waktu

Berdasarkan gambar 4.12 objek pengujian ekualisasi adalah 4 buah baterai lithium-ion NCR18650PF terusun seri. Pengukuran tegangan dilakukan dengan interval 4 menit dan menggunakan sistem pemantauan tegangan yang sudah tergabung dengan sistem ekualisasi. Gambar 4.12. menunjukkan waktu yang dibutuhkan untuk melakukan proses ekualisasi baterai adalah 48 menit. Walaupun terlihat ada anomali tegangan yang disebabkan error pemantauan tegangan. Namun ini membuktikan bahwa sistem ekualisasi berkerja sesuai yang diharapkan setelah ditambahkan sistem pemantauan dan proteksi.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## LAMPIRAN

### Lampiran 1 Program di Arduino

#### Pemantauan Tegangan

```
#include <Wire.h>
void setup() {
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  Wire.requestFrom(0x24,1);
  while(Wire.available()<1)
  {
    Serial.println("waiting");
    delay(1000);
  }
  Wire.requestFrom(0x24,1);
  Wire.beginTransmission(0x24);
  Wire.write(B00000001);
  Wire.endTransmission();
  Wire.beginTransmission(0x25);
  Wire.write(B00000100);
  Wire.endTransmission();
  Wire.requestFrom(0x24,1);
  //Serial.println (Wire.read());

  //B1
  Wire.beginTransmission(0x21);
  Wire.write(B00010000);
  Wire.endTransmission();
  int v11 = analogRead(A0);
  int v12 = analogRead(A0);
```

```

int v13 = analogRead(A0);
int v14 = analogRead(A0);
int v15 = analogRead(A0);
int v16 = analogRead(A0);
int v17 = analogRead(A0);
int v18 = analogRead(A0);
int v19 = analogRead(A0);
int v110 = analogRead(A0);
int v1 = (v11 + v12 + v13 + v14 + v15 + v16 + v17 + v18 + v19 + v110) * 0.1;
float vb1 = (v1 * 0.0081459);
}

```

## Pemantauan Suhu

```

void setup() {
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  digitalWrite(2,LOW); //y4
  digitalWrite(3,LOW);
  digitalWrite(4,HIGH);
  int t11 = analogRead(A2);
  int t12 = analogRead(A2);
  int t13 = analogRead(A2);
  int t14 = analogRead(A2);
  int t15 = analogRead(A2);
  int t16 = analogRead(A2);
  int t17 = analogRead(A2);
  int t18 = analogRead(A2);
  int t19 = analogRead(A2);
  int t110 = analogRead(A2);
  int t1 = (t11 + t12 + t13 + t14 + t15 + t16 + t17 + t18 + t19 + t110 ) * 0.1;
  float s1 = (t1*0.49) - 1 ;
}

```

## Proteksi Overheat

```
void loop() {  
  // PROTEKSI OVERHEAT  
  if ((s1 >= 35 )|| (s2 >= 35 )|| (s3 >= 35 )|| (s4 >= 35))  
  { digitalWrite(6,HIGH); //Kipas On  
  }  
  if ((s1 < 30 )|| (s2 < 30 )|| (s3 < 30 )|| (s4 < 30))  
  { digitalWrite(6,LOW); // Kipas Off  
  }  
  
  if ((s1 >= 45 )|| (s2 >= 45 )|| (s3 >= 45 )|| (s4 >= 45))  
  {int d = 0;  
    pwmWrite (PWM_PIN, d); // PWM OFF  
  }  
  digitalWrite(5,LOW); // Relay OFF }  
  
  // END CODING  
  while (d==0)  
  {  
    lcd.setBacklight(LOW);  
    digitalWrite(12, HIGH);  
    delay(1000);  
    lcd.setBacklight(HIGH); // Backlight on  
    digitalWrite(12, LOW);  
    delay(1000);  
  }  
}
```

## Proteksi *Overvoltage* & *Undervoltage*

```
void loop() {  
  //PROTEKSI OVERVOLTAGE  
  if (((vb1 <= 4 && vb2 <= 4 && vb3 <= 4 && vb4 && 4)) &&  
      (analogRead(A1) > 1000))  
  { digitalWrite(5,HIGH); // RELAY ON  
  }  
  
  if (((vb1 > 4 || vb2 > 4 || vb3 > 4 || vb4 > 4)) ||  
      (analogRead(A1) < 1000))  
  { digitalWrite(5,LOW); // RELAY OFF  
  }  
  
  //PROTEKSI UNDERVOLTAGE  
  if (((vb1 >= 2.8 && vb2 >= 2.8 && vb3 >= 2.8 ** vb4 >= 2.8 )) &&  
      (analogRead(A1) > 1000))  
  { digitalWrite(5,HIGH); // RELAY ON  
  }  
  
  if (((vb1 < 2.8 || vb2 < 2.8 || vb3 < 2.8 || vb4 < 2.8)) ||  
      (analogRead(A1) < 1000))  
  { digitalWrite(5,LOW); //RELAY OFF  
  }  
}
```

## PWM

```
#include <PWM.h>
#define PWM_PIN 10
#define FREQUENCY 60000
int d=255*0.5;
int e = 0;
void setup() {
    Serial.begin(9600);
    InitTimersSafe();
}

void loop() {
    if ( analogRead (A3) >= 1000 )
    {
        pwmWrite(PWM_PIN, d);
    }

    if (( analogRead (A3) <= 1000) || (vb1 == vb2== vb3 == vb4))
    {
        pwmWrite(PWM_PIN,e );
    }
}
```

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## **BAB 5**

### **PENUTUP**

#### **5.1. Kesimpulan**

Pemantauan tegangan baterai tersusun seri menggunakan IC BQ76925 dapat dilakukan sesuai dengan disesain dengan error tertinggi 1,25%. Sedangkan, pemantauan suhu baterai dengan LM35 dapat dilakukan sesuai desain namun dengan error yang lebih tinggi menyentuh 4,97% untuk error tertinggi. Translasi tegangan ke bentuk state of charge dapat dilakukan namun rentan mengalami error karena pembacaan tegangan baterai yang masih memiliki error serta pengujian *state of charge* yang memiliki error.

Proteksi terhadap *overvoltage* dan *undervoltage* dapat dilakukan seketika pemantauan tegangan mendeteksi adanya tegangan baterai yang melebihi toleransi sehingga dapat memutus relay dan menonaktifkan PWM. Sedangkan, untuk proteksi terhadap *overheat* dapat dilakukan seketika pemantauan suhu mendeteksi adanya masalah suhu dengan proteksi preventif berupa proses pendinginan baterai ketika mencapai 35 °C dan pemutusan relay dan menonaktifkan PWM ketika mencapai 45 °C. Terakhir, proses ekualisasi 4 buah baterai lithium-ion terusun seri dapat dilakukan dengan waktu tempuh 48 menit.

#### **5.2. Saran**

Setelah melakukan uji pada sistem-sistem maka sistem yang memiliki kekurangan adalah pemantauan suhu. Penulis menyarankan untuk memilih piranti sensor suhu yang memiliki respon yang lebih cepat dan akurasi yang lebih tinggi sehingga proses pemantauan lebih akurat dan proses proteksi lebih cepat.

Estimasi state of charge dapat dibuat lebih akurat dengan menggunakan metode *modified voltage translation*, *kalman filter* atau *coluomb counting* untuk meningkatkan akurasi estimasi *state of charge*.

Pembuatan modul dalam satu modul besar dapat mengurangi jumlah kabel *jumper*. Selain itu dapat meningkatkan keandalan sistem sehingga meminimalisir kegagalan pada sub-sub sistem yang mempengaruhi sistem secara keseluruhan.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Xiaopeng Chen, Weixiang Shen, Thanks Tu VO, Zhenwei Caoi, Ajay Kapoor. “*An Overview of Lithium-ion Batteries for Eleectric Vehicles*”. International Power & Energy Conference. December 2012.
- [2] Amir Hossein Ranjbar. Anahita Banei. Amir Khoobroo. Babak Fahimi. “*Online Estimation of State of Charge in Li-Ion Batteries Using Implse Responce Concept*”. IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 3, No. 1. March 2012
- [3] Weigui Ji. Xi Lu. Yuan Ji. Yingbin Tang. Feng Ran. Fan Zheng Peng. “*Low Cost Battery Equalizer Using Buck-Boost and Series LC Converter with Synchronous Phase-Shift Control*”. Applied Power Electronic Conference and Exposition (APEC). March 2013.
- [4] Kim, Choll-Ho. Kim, Moon-Young. Moon, Gun-Woo. “*A Modularized Charge Equalizer Using a Battery Monitoring IC for Series-Connected Li-Ion Battery Strings in Electric Vehicles*”. IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 28, No. 8. August 2013.
- [5] Kyung-Min Lee. Yoo-Chae Chung. Chang-Hyeon Sung. Bongkoo Kang. “*Active Cell Balancing of Li-Ion Batteries Using LC Series Resonant Circuit*”. IEEE Transactions on Industrial Electronics. Vol. 2, No. 9. September 2015.
- [6] Priyana, Soni, “*Ekualisasi Baterai Tersusun Seri Menggunakan Konverter Buck-Boost dan LC Seri dengan Synchronous Phase Shift Control*”, Jurusan Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya, Surabaya, Juli, 2015.
- [7] Technical Datasheet, “NCR18650”, Panasonic ,2012.
- [8] John, Peter, “Lithium-Ion Battery Packs” <URL:<http://http://bestechpower.com/news/batterypack.html>>, November, 2011.
- [9] Technical Datasheet , “IC BQ76925”, Texas Instrument ,2015.
- [10] Technical Datasheet , “LM35”, Texas Instrument ,2016.

*Halaman ini sengaja dikosongkan*

## RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Indramayu, 12 September 1995 dari pasangan Ukar Usianto dan Yeyen Heriyani. Penulis yang bernama lengkap Diaz Ficry Arfianto merupakan anak bungsu dari tiga bersaudara dan menjalani masa kecil hingga sekolah menengah atas di Indramayu. Sejak masuk menjadi mahasiswa Teknik Elektro ITS penulis aktif dalam bidang jurnalistik, seperti PERS FTI (2013-2014) serta Pemimpin Redaksi Majalah SILIKON V (2014-2015) Himatektro ITS. Selain itu penulis aktif sebagai Kepala Departemen

Komunikasi dan Informasi Himatektro ITS (2014-2015). Penulis yang memiliki minat dalam keilmiahan juga bergabung dengan tim asisten Laboratorium Konversi Energi Listrik sejak tahun 2015 hingga saat ini. Penulis dapat dihubungi melalui email : [diaz.ficry@gmail.com](mailto:diaz.ficry@gmail.com)