

**SISTEM MANAJEMEN BATERAI (BMS) DENGAN *ACTIVE
BALANCING* MENGGUNAKAN TOPOLOGI *FLYBACK
CONVERTER* UNTUK BATERAI LITHIUM ION**

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat
Untuk memperoleh gelar
Sarjana Teknik



Oleh:

BINTANG SUJATMIKO
NIM. I0716011

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS SEBELAS MARET
SURAKARTA
2020**



KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN
UNIVERSITAS SEBELAS MARET
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
Jalan. Ir. Sutami nomor 36 A Ketingan Surakarta 57126
Telepon. 0271 647069 psw 438, faksimili: 0271 662118

SURAT TUGAS

Nomor : 047/TA/TE/2020

Kepala Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Sebelas Maret memberikan tugas kepada:

Nama Mahasiswa	: Bintang Sujatmiko
NIM	: I0716011
Bidang peminatan	: Sistem Energi Listrik (SEL)
Pembimbing Utama	: Prof. Muhammad Nizam S.T,M.T,Ph.D. NIP. 197007201999031001
Pembimbing Pendamping	: Harl Maghfiroh M.Eng. NIP. 199104132018031001
Mata kuliah pendukung	: 1. Sistem Penyimpanan Energi 2. Elektronika Daya 3. Instrumentasi

untuk mengerjakan dan menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul :

Sistem Manajemen Baterai (BMS) dengan Active Balancing Menggunakan Topologi Flyback Converter untuk Baterai Lithium Ion

Surat tugas ini dibuat untuk dilaksanakan dengan sebaik-baiknya.

Surakarta, 16 Maret 2020
Kepala Program Studi

Feri-Adriyanto, Ph.D.
NIP. 196801161999031001

**SURAT PERNYATAAN
ORISINALITAS KARYA ILMIAH**

Saya mahasiswa Program Studi Sarjana Teknik Elektro Universitas Sebelas Maret yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Bintang Sujatmiko
NIM : I0716011
Judul Tugas Akhir : Sistem Manajemen Baterai (BMS) dengan *Active Balancing* Menggunakan Topologi *Flyback Converter* Untuk Baterai Lithium Ion

Dengan ini menyatakan bahwa tugas akhir yang saya susun tidak mencontoh atau melakukan plagiat dari karya tulis orang lain. Jika terbukti tugas akhir yang saya susun tersebut merupakan hasil plagiat dari karya orang lain maka tugas akhir yang saya susun tersebut dinyatakan batal dan gelar sarjana yang saya peroleh dengan sendirinya dibatalkan atau dicabut.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya dan apabila di kemudian hari terbukti melakukan kebohongan maka saya sanggup menanggung segala konsekuensinya.

Surakarta, 27 Juli 2020

Bintang Sujatmiko

NIM. I0716011

**SISTEM MANAJEMEN BATERAI (BMS) DENGAN *ACTIVE*
BALANCING MENGGUNAKAN TOPOLOGI *FLYBACK*
CONVERTER UNTUK BATERAI LITHIUM ION**

Disusun oleh:

BINTANG SUJATMIKO
NIM. I0716011

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Prof. Muhammad Nizam, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 197007201999031001

Hari Maghfiroh, S.T., M.Eng.
NIP. 199104132018031001

Telah dipertahankan di hadapan Tim Dosen Penguji pada hari Senin tanggal 27 Juli 2020

1. **Prof. Muhammad Nizam, S.T., M.T., Ph.D.**
NIP. 197007201999031001
2. **Hari Maghfiroh, S.T., M.Eng.**
NIP. 199104132018031001
3. **Chico Hermanu B. A., S.T., M.Eng.**
NIP. 198804162015041002
4. **Dr. Miftahul Anwar, S.Si., M.Eng.**
NIP. 1983032420130201

Kepala Program Studi Teknik Elektro

Mengetahui,
Koordinator Tugas Akhir

Feri Adriyanto, Ph.D.
NIP. 196801161999031001

M. Hamka Ibrahim, S.T., M.Eng
NIP. 1988122920161001

SISTEM MANAJEMEN BATERAI (BMS) DENGAN *ACTIVE BALANCING* MENGGUNAKAN TOPOLOGI *FLYBACK CONVERTER* UNTUK BATERAI LITHIUM ION

Bintang Sujatmiko

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret

E-mail: bintang795@gmail.com

Abstrak

Di antara perangkat penyimpanan energi, baterai lithium ion memenuhi syarat spesifik dan memiliki fitur yang baik, antara lain densitas energi yang tinggi, kapabilitas daya yang baik, umur yang panjang, dan keramahan lingkungan. Akan tetapi, terdapat banyak masalah, seperti keamanan, daya tahan, dan terjadi perbedaan antar baterai karena proses fabrikasi. Untuk memiliki sistem baterai berkinerja tinggi, sel baterai harus diseimbangkan secara kontinu untuk menjaga perbedaan antar baterai sekecil mungkin. Pada penelitian ini dibuat penyeimbang tegangan baterai dengan topologi *flyback converter* menggunakan arsitektur *cell-to-pack*, di mana energi pada sel yang memiliki tegangan lebih tinggi akan ditransfer ke *pack* untuk menyeimbangkan tegangan sel. *Battery pack* memiliki konfigurasi 4S1P. BMS yang dirancang memiliki fitur *monitoring*, *balancing* dan proteksi. Hasil pengujian menunjukkan performa BMS untuk *monitoring* nilai tegangan memiliki *root mean square error* (RMSE) sebesar 0,1650 atau tingkat akurasi sebesar 99,8349 % dan nilai *mean relative standard deviation* (MRSD) sebesar 0,2301 atau tingkat presisi sebesar 99,7699 %. Fitur *balancing* mampu melakukan penyeimbangan hingga perbedaan tegangan antar baterai sebesar 0,08 V dan lama waktu yang dibutuhkan untuk menyeimbangkan tergantung pada besarnya perbedaan tegangan dan banyaknya baterai yang memiliki tegangan berbeda. Adapun fitur proteksi dapat bekerja dengan baik untuk mengatasi permasalahan seperti *over-charge*, *over-discharge*, *over-current* dan *over-temperature*.

Kata Kunci: *Flyback Converter*, *Monitoring*, *Balancing*, *Proteksi*

AN ACTIVE BALANCING BATTERY MANAGEMENT SYSTEM (BMS) WITH FLYBACK CONVERTER TOPOLOGY FOR LITHIUM ION BATTERY

Bintang Sujatmiko

Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Sebelas Maret

E-mail: bintang795@gmail.com

Abstract

Among energy storage devices, lithium ion batteries meet specific requirements and have good features, including high energy density, good power capability, long life, and environmental friendliness. However, there are many problems, such as safety, durability, and differences between batteries due to the fabrication process. To have a high-performance battery system, battery cells must be balanced continuously to keep the difference between batteries as small as possible. In this research, a battery voltage balancer with a flyback converter topology uses cell-to-pack architecture, where energy in cells with higher voltage is transferred to the pack to balance the cell voltage. Battery pack has a 4S1P configuration. The BMS is designed to have monitoring, balancing and protection features. The test results show the performance of BMS for monitoring voltage values has a root mean square error (RMSE) of 0.1650 or an accuracy rate of 99.8349% and a mean relative standard deviation (MRSD) of 0.2301 or a precision level of 99.7699%. The balancing feature is capable of balancing up to a voltage difference between batteries of 0.08 V and the length of time needed to balance depends on the magnitude of the voltage difference and the number of batteries that have different voltages. The protection features can work well to overcome problems such as over-charge, over-discharge, over-current and over-temperature.

Keywords : *Flyback Converter, Monitoring, Balancing, Protection*

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT atas segala karunia-Nya sehingga skripsi dengan judul “Sistem Manajemen Baterai (BMS) dengan *Active Balancing* Menggunakan Topologi *Flyback Converter* Untuk Baterai Lithium Ion” ini berhasil diselesaikan.

Laporan skripsi ini dapat terselesaikan dengan menerapkan ilmu studi di perkuliahan program studi teknik elektro serta bimbingan dan dukungan dari berbagai pihak sebagai syarat kelulusan mata kuliah Skripsi/Tugas Akhir guna memperoleh gelar sarjana strata 1 pada Fakultas Teknik Universitas Sebelas Maret.

Penulis menyadari bahwa penyusunan laporan tugas akhir ini tidak lepas dari bantuan dan dukungan banyak pihak. Penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih kepada:

1. Segenap keluarga yang telah memberikan doa, dukungan dan kasih sayang kepada penulis.
2. Bapak Prof. Muhammad Nizam, S.T., M.T., Ph.D. dan Bapak Hari Maghfiroh, S.T., M.Eng. selaku dosen pembimbing atas bimbingan, bantuan dan waktu yang telah diberikan.
3. Bapak Chico Hermanu Brillianto Apribowo, S.T., M.Eng. dan Bapak Dr. Miftahul Anwar, S.Si., M.Eng. selaku dosen penguji atas kritik dan sarannya yang membangun.
4. Bapak Feri Adriyanto, Ph.D. selaku kepala program studi teknik elektro dan segenap dosen dan karyawan Program Studi Teknik Elektro UNS yang telah memberikan ilmu yang bermanfaat, motivasi, dan inspirasi yang luar biasa selama menjalani masa perkuliahan.
5. Bapak M. Hamka Ibrahim, S.T., M.Eng. dan Bapak Jaka Sulistya Budi, S.T. selaku koordinator tugas akhir yang membantu jalannya tugas akhir ini.
6. Sylendra Power yang telah menyediakan ruang dan waktu, serta telah memberikan pengalaman dan pengetahuan secara teknis dalam membantu menyelesaikan tugas akhir ini.
7. Seluruh teman-teman teknik elektro angkatan 2016 yang telah bersama-sama berjuang selama masa perkuliahan.

8. Fitra Arifanda.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih belum sempurna, hal itu didasari karena keterbatasan kemampuan dan pengetahuan yang dimiliki penulis, sehingga kritik dan saran yang membangun sangat diharapkan. Penulis juga memohon maaf apabila terdapat kesalahan dalam penulisan skripsi ini. Akhir kata, Semoga skripsi ini dapat menghasilkan laporan yang bermanfaat bagi banyak pihak.

Surakarta, 02 Juli 2020

Bintang Sujatmiko

NIM. I0716011

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN SURAT TUGAS.....	ii
SURAT PERNYATAAN ORISINALITAS KARYA ILMIAH	iii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iv
ABSTRAK.....	v
ABSTRACT.....	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR SINGKATAN DAN SIMBOL.....	xiii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang Masalah.....	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Manfaat Penelitian.....	4
1.5 Sistematika Penulisan.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Penelitian Sebelumnya	6
2.2 <i>Battery Management System</i> (BMS)	6
2.3 Baterai Lithium Ion	11
2.4 <i>Flyback Converter</i>	12
2.5 Arduino Nano	13
2.6 Pembaca Tegangan.....	14
2.7 Sensor Arus ACS712.....	14
2.8 Sensor Temperatur DS18B20.....	16
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	17
3.1 Pengumpulan Data Spesifikasi Baterai	18
3.2 Perancangan Alat.....	18
3.3 Alat dan Bahan	19
3.4 Perancangan Perangkat Keras	19
3.4.1 Perancangan Sistem <i>Balancing</i>	20
3.4.2 Perancangan <i>Driver</i> MOSFET.....	22
3.4.3 Perancangan Sensor Pembacaan Tegangan	22
3.4.4 Perancangan Sensor Arus.....	23
3.4.5 Perancangan Sensor Temperatur.....	24
3.4.6 Perancangan Sistem Proteksi	24
3.5 Perancangan Perangkat Lunak	25
3.6 Pengujian Performa Rancang Bangun.....	27
3.6.1 Pengujian Sensor.....	27
3.6.2 Pengujian <i>Balancing</i> dengan Tegangan Bervariasi.....	28
3.6.3 Pengujian Proteksi.....	29
3.7 Pengambilan Data.....	29
3.8 Analisis Data dan Penutup	29
BAB IV HASIL DAN ANALISIS.....	31
4.1 Respon Pulsa <i>Driver</i> TLP250.....	31

4.2	Pembuatan Alat	32
4.3	Kalibrasi Pembaca Tegangan	34
4.4	Pengujian Sensor	35
4.4.1	Pengujian Akurasi	36
4.4.2	Pengujian Presisi	37
4.5	Pengujian Sistem <i>Balancing</i>	38
4.5.1	Kasus 1	38
4.5.2	Kasus 2	39
4.5.3	Kasus 3	39
4.6	Pengujian Sistem Proteksi	40
4.6.1	Proteksi <i>Over-Charge</i>	40
4.6.2	Proteksi <i>Over-Discharge</i>	42
4.6.3	Proteksi <i>Over-Current</i>	43
4.6.4	Proteksi <i>Over-Temperature</i>	45
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		47
5.1	Kesimpulan	47
5.2	Saran	48
DAFTAR PUSTAKA		49

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Teknik Balancing [7].....	9
Gambar 2.2 Rangkaian Flyback Converter.....	12
Gambar 2.3 Arduino Nano.....	13
Gambar 2.4 Diagram Pinout Arduino Nano	13
Gambar 2.5 Pembagi Tegangan	14
Gambar 2.6 Rangkaian Sensor Arus [34]	15
Gambar 2.7 Skematik Diagram Sensor DS18B20	16
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	17
Gambar 3.2 Baterai Lithium Ion Samsung SDI INR18650-25R	18
Gambar 3.3 Blok Diagram Rancangan Alat	18
Gambar 3.4 Diagram Alir Cara Kerja Perangkat Keras.....	20
Gambar 3.5 Topologi Rangkaian Sistem Balancing	21
Gambar 3.6 Perancangan Rangkaian Driver TLP250.....	22
Gambar 3.7 Perancangan Rangkaian Sensor Pembacaan Tegangan	23
Gambar 3.8 Perancangan Rangkaian Sensor Arus (a) Arus Balancing (b) Arus Charging dan Discharging.....	24
Gambar 3.9 Perancangan Rangkaian Sensor Temperatur.....	24
Gambar 3.10 Perancangan Rangkaian Sistem Proteksi	25
Gambar 3.11 Diagram Alir Sistem Balancing	26
Gambar 3.12 Diagram Alir Sistem Proteksi	27
Gambar 3.13 Instrumen Pengujian <i>Monitoring</i> Catu Daya Rigol DP831	28
Gambar 3.14 Rangkaian Kalibrasi Pembaca Tegangan	28
Gambar 3.16 Instrumen Pengujian Balancing (a) Catu Daya Rigol DP831 (b) DC Load Rigol DL3031	29
Gambar 4.1 Gelombang Keluaran dari Driver TLP250 (a) Pemicu MOSFET Balancing dan Cut-off (b) Pemicu MOSFET Driver Flyback	31
Gambar 4.2 Skematik Rangkaian.....	32
Gambar 4.3 Desain PCB (a) BMS (b) Battery Pack (c) Sensor Arus	33
Gambar 4.4 Hasil Rancang Bangun	33
Gambar 4.5 Grafik Kalibrasi (a) Pembaca Tegangan 1 (b) Pembaca Tegangan 2 (c) Pembaca Tegangan 3 (d) Pembaca Tegangan 4	35
Gambar 4.6 Hasil Pengujian Sistem Monitoring	36
Gambar 4.9 Pengujian Sistem Balancing Kasus 1	38
Gambar 4.10 Pengujian Sistem Balancing Kasus 2	39
Gambar 4.11 Pengujian Sistem Balancing Kasus 3	40
Gambar 4.12 Grafik Proteksi Over-Charge	41
Gambar 4.13 Grafik Proteksi Over-Discharge.....	43
Gambar 4.14 Grafik Proteksi Over-Current.....	44
Gambar 4.15 Grafik Proteksi Over-Temperature.....	46

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Penelitian Sebelumnya	7
Tabel 2.2 Perbandingan Teknik Balancing [18]	10
Tabel 2.3 Perbandingan Baterai Lithium Ion dengan Jenis Lain [19]	11
Tabel 2.4 Spesifikasi Sensor Arus ACS712 [21]	15
Tabel 3.1 Spesifikasi Baterai.....	18
Tabel 3.2 Bahan-bahan.....	19
Tabel 4.1 Data Kalibrasi Pembaca Tegangan	34
Tabel 4.2 Uji Akurasi Sistem Monitoring.....	36
Tabel 4.3 Uji Akurasi Sistem Monitoring (lanjutan)	37
Tabel 4.4 Uji Tingkat Presisi Sistem Monitoring	37
Tabel 4.5 Uji Tingkat Presisi Sistem Monitoring (lanjutan).....	38
Tabel 4.6 Data Pengujian Proteksi Over-Charge	40
Tabel 4.7 Data Pengujian Proteksi Over-Charge (lanjutan).....	41
Tabel 4.8 Data Pengujian Proteksi Over-Discharge	42
Tabel 4.9 Data Pengujian Proteksi Over-Current	43
Tabel 4.10 Data Pengujian Proteksi Over-Current (lanjutan).....	44
Tabel 4.11 Data Pengujian Proteksi Over-Temperature	45

DAFTAR SINGKATAN DAN SIMBOL

SINGKATAN

ADC	: <i>Analog to Digital Converter</i>
BMS	: <i>Battery Management System</i>
IDE	: <i>Integrated Development Environment</i>
MOSFET	: <i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>
NCA	: <i>Nickel Cobalt Aluminum</i>
PCB	: <i>Printed Circuit Board</i>
PWM	: <i>Pulse Width Modulation</i>
SOC	: <i>State of Charge</i>

SIMBOL

V	: Volt
A	: Ampere
Ω	: Ohm

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Emisi gas yang dikeluarkan oleh kendaraan bermotor merupakan kontribusi yang besar dalam peningkatan efek rumah kaca. Selain itu, banyak gas dan partikel yang dipancarkan oleh transportasi darat akan berdampak langsung pada komposisi atmosfer dan kualitas udara [1]. Akan tetapi, sistem mobilitas penting untuk terus berkelanjutan. Untuk mencapai sistem mobilitas yang berkelanjutan, kendaraan listrik dapat menjadi alternatif yang baik [2]. Kendaraan listrik menjadi topik yang menarik dan menjadi perkembangan yang berkelanjutan sebagai teknologi yang dapat mengurangi emisi gas rumah kaca dan konsumsi bahan bakar minyak [3]. Tingginya harga bahan bakar minyak membuat para peneliti untuk menemukan teknologi baterai terbaru yang dapat digunakan dalam aplikasi kendaraan listrik sebagai pengganti minyak. Sehingga didapat solusi baterai lithium sebagai penggantinya. Baterai lithium itu sendiri dibagi menjadi tiga kategori, yaitu lithium metal, *lithium polymer*, dan lithium ion [4].

Di antara perangkat penyimpanan energi, baterai lithium ion memenuhi syarat spesifik dan memiliki fitur yang baik, antara lain densitas energi yang tinggi, kapabilitas daya yang baik, umur yang panjang, dan keramahan lingkungan [5]. Pada penerapan di kendaraan listrik, baterai lithium ion memiliki kapasitas yang besar dengan jumlah susunan seri-paralel yang sesuai. Akan tetapi, terdapat banyak masalah, seperti keamanan, daya tahan, dan terjadi perbedaan antar sel baterai karena proses fabrikasi yang menjadi kendala dalam penerapannya [6]. Untuk memiliki sistem baterai berkinerja tinggi, sel baterai harus diseimbangkan secara kontinu untuk menjaga perbedaan antar sel sekecil mungkin [7]. Tanpa sistem *balancing*, tegangan tiap sel baterai akan terpisah seiring waktu. Kapasitas total baterai juga akan berkurang dengan lebih cepat selama operasi, kemudian akan terjadi kegagalan sistem [8].

Pada pengisian energi baterai, terdapat keadaan yang tidak seimbang antar sel yang dapat mengurangi umur baterai dan juga merusak baterai. Ketidakseimbangan sel pada sistem baterai sangat mempengaruhi kapasitas baterai tersebut. Ketidakse-

imbangan antar sel baterai dapat dipengaruhi oleh faktor internal maupun eksternal. Faktor internal antara lain karena proses fabrikasi dalam volume fisik material, perbedaan impedansi internal, dan perbedaan tingkat *self-discharge*. Adapun faktor eksternal bisa disebabkan oleh IC proteksi pada *multi-pack* baterai [9]. Selain itu, perbedaan temperatur pada *pack* baterai menyebabkan perbedaan *rating self discharge* yang berbeda [10].

Penggunaan baterai sebagai sistem penyimpanan energi, membutuhkan perangkat sistem manajemen baterai dengan algoritme yang paling memadai dan dapat menyesuaikan instalasi kelistrikan pada kendaraan. *Battery management system* (BMS) menjadi bagian penting dalam melakukan peningkatan performa dan optimalisasi operasi kendaraan listrik dalam keadaan aman dan andal. BMS melindungi baterai dari risiko kerusakan, memprediksi serta meningkatkan umur baterai, dan memelihara sistem baterai dalam kondisi operasional [7]. BMS juga sebagai pengatur dan pemantau kinerja baterai harus memiliki kemampuan untuk melakukan penyeimbangan sel-sel baterai. Oleh karena itu diperlukan suatu teknik dalam menjaga keseimbangan sel baterai dalam kondisi *charging* maupun *discharging*.

Teknik untuk menjaga keseimbangan sel dalam baterai adalah *balancing*. *Balancing* terbagi menjadi dua, yaitu *passive balancing* dan *active balancing*. Penelitian tentang *passive balancing* telah dilakukan oleh Kirana Dyah Utari Kusumaputri [11] dalam skripsi yang berjudul “Rancang Bangun Sistem Manajemen Baterai (BMS) Untuk Baterai Lithium Ion”. Pada penelitian ini, penulis menggunakan *dummyload* resistor 22R untuk membuang energi pada baterai yang nilai tegangannya lebih tinggi. Akan tetapi, hal tersebut dapat mengurangi efisiensi pada baterai.

Untuk mengurangi tingkat pembuangan energi tersebut digunakan sebuah metode untuk menyeimbangkan dengan mengurangi pembuangan energi, metode tersebut adalah *active balancing*. Penelitian tentang *active balancing* dilakukan oleh Tegar Subekti dkk. [12] yang berjudul “Rancang Bangun *Equalizer* Tegangan Sel Menggunakan *Flyback Converter* Untuk Baterai Li-Ion Terhubung Seri”. Sistem manajemen baterai yang dirancang menggunakan arsitektur *cell-to-string*,

di mana energi pada sel yang memiliki tegangan lebih tinggi akan ditransfer ke *string*.

Pada penelitian ini juga akan membahas tentang sistem manajemen baterai yang dapat meningkatkan efisiensi dalam operasi pengisian dan pemakaian baterai yaitu dengan membuat sistem manajemen baterai dengan metode *active balancing*. Dalam melakukan penyeimbangan, harus merumuskan permodelan baterai untuk mendekati sifat dan karakteristik penyeimbang yang sebenarnya. Permodelan tersebut akan menjadi jembatan antara rekayasa dengan proses yang sesungguhnya, sehingga dilakukan simulasi untuk menentukan prototipe yang akan dibuat agar dapat bekerja dengan baik atau tidak. Penelitian ini akan menggunakan skema *flyback converter*. Penelitian ini dilakukan untuk membuat pengisian dan pemakaian baterai secara aman, sehingga umur baterai dapat dipertahankan.

1.2 Rumusan Masalah

Pada penelitian ini dirumuskan masalah untuk melakukan sebuah penyeimbang sel-sel baterai dalam sebuah *pack* untuk membuat kinerja baterai menjadi lebih tinggi.

1. Bagaimana rancangan BMS dengan fitur *monitoring*, *active balancing* dan proteksi?
2. Bagaimana BMS diimplementasi dan diuji pada 4 buah baterai lithium ion?
3. Bagaimana performa BMS pada baterai lithium ion?

Dalam penelitian ini, permasalahan akan dibatasi pada:

1. Jenis baterai yang diuji adalah lithium ion (NCA)
2. *Battery pack* disusun secara seri sebanyak 4 buah baterai dengan tegangan masing-masing berkisar 3,0-4,2 V
3. Fitur BMS yang dirancang meliputi fitur *monitoring*, *active balancing* dan proteksi

1.3 Tujuan Penelitian

Dengan mempertimbangkan hal-hal yang sudah dipaparkan sebelumnya, penelitian ini menitikberatkan pada aspek analisis dan algoritme di dalam metode *active balancing*. Adapun tujuan dari penelitian ini adalah untuk:

1. Membuat BMS dengan fitur *monitoring*, *active balancing* dan proteksi pada baterai lithium ion untuk mengetahui apakah BMS dengan topologi *flyback converter* dapat dilakukan.
2. Melakukan pengujian BMS yang telah dirancang untuk 4 buah baterai lithium ion yang tersusun seri dengan melakukan pengujian *monitoring* melalui uji tingkat akurasi dan presisi, pengujian *balancing* yang berbagi beberapa kasus, dan pengujian proteksi melalui kondisi *over-charge*, *over-discharge*, *over-current* dan *over-temperature*.
3. Melakukan analisis dan evaluasi performa BMS pada baterai lithium ion untuk mengetahui apakah fitur *monitoring*, *balancing* dan proteksi sudah dapat bekerja dengan baik atau tidak.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini antara lain sebagai berikut.

1. Dapat membuat sistem manajemen baterai yang aman. Dengan demikian baterai dapat terhindar dari pengisian berlebih, pengosongan berlebih dan temperatur tinggi sehingga baterai tidak mudah rusak.
2. Dapat mempertahankan kapasitas baterai karena pengisian baterai dilakukan dengan cara yang aman.

1.5 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yang digunakan dalam tugas akhir ini agar mudah untuk dipahami dengan rangkaian sebagai berikut.

BAB I : Pendahuluan

Bab I menguraikan tentang latar belakang masalah, perumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat dan luaran penelitian, dan sistematika penulisan.

BAB II : Tinjauan Pustaka

Bab II menguraikan tinjauan pustaka dan masalah mengenai BMS, baterai lithium ion, mikrokontroler arduino dan juga menjelaskan tentang landasan teori yang berhubungan dengan penelitian.

BAB III : Metode Penelitian

Bab III menguraikan tahap-tahap dan prosedur penelitian yang dilakukan. Tahapan yang dilakukan mulai dari studi pustaka, perancangan alat, persiapan alat dan bahan, simulasi, pembuatan perangkat keras dan lunak, pengujian performa alat, pengambilan data, serta analisis data.

BAB IV : Hasil dan analisis

Bab IV menjelaskan tentang hasil dan analisis dari pembuatan BMS yang terdiri dari pengujian fitur *monitoring*, *active balancing*, dan proteksi.

BAB V : Penutup

Bab V terdapat kesimpulan dan saran, sebagai hasil dan analisis pembuatan BMS dengan *active balancing* menggunakan topologi *flyback converter*.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Dalam bab ini akan menguraikan mengenai *battery management system* (BMS). *Battery management system* diharuskan memiliki beberapa fitur sehingga dapat melakukan pengisian dan pemakaian baterai secara aman. Fitur yang dimaksud adalah sistem *monitoring*, sistem *balancing*, dan sistem proteksi.

Setelah itu akan dibahas kajian pustaka mengenai baterai lithium ion, mikrokontroler arduino nano, beserta sensor-sensor yang digunakan. Pembahasan mengenai arduino nano dimulai dari uraian umum, spesifikasi *port* yang dimiliki. Pada bagian sensor akan dibahas mengenai uraian umum tentang sensor tegangan menggunakan pembagi tegangan, sensor arus, dan sensor temperatur. Setelah itu akan dibahas mengenai pembuatan dan penggunaan sensor-sensor tersebut. Sensor-sensor tersebut nantinya digunakan sebagai masukan pada sistem *monitoring*.

2.1 Penelitian Sebelumnya

Penelitian yang telah dilakukan sebelumnya dalam topik BMS telah dirangkum dalam tabel 2.1. Adapun perbedaan penelitian ini telah dimuat pula dalam tabel yang sama. Pada penelitian ini, penulis merancang sistem manajemen baterai (BMS) menggunakan topologi *flyback converter* dengan arsitektur *cell-to-pack*. BMS yang dirancang meliputi tiga fitur, yaitu *monitoring*, *balancing* dan proteksi.

2.2 Battery Management System (BMS)

Pengertian dari *battery management system* (BMS) dapat berbeda tergantung pada aplikasinya. Adapun tugas utama dari sebuah BMS dapat didefinisikan berikut ini, seperti yang telah dijelaskan pada [13].

- Memastikan energi pada baterai dioptimalkan untuk memberi daya pada beban
- Memastikan risiko bahaya pada baterai kecil
- Memantau dan mengontrol proses pengisian dan pemakaian baterai

Tabel 2.1 Penelitian Sebelumnya

No.	Penulis	Judul	Permasalahan	Solusi	Metode	Hasil
1.	Kirana Dyah Utari Kusumaputri [11]	Rancang Bangun Sistem Manajemen Baterai (BMS) Untuk Baterai Lithium Ion	Membuat alat sistem manajemen baterai yang dapat mengoptimalkan dan mengamankan penggunaan baterai	Membuang muatan pada tegangan sel baterai tertinggi melalui <i>dummy load</i>	Penyeimbang pasif	Performa BMS dalam memonitor nilai tegangan memiliki RMSE sebesar 0,00706 atau akurasi sebesar 99,29%, adapun nilai MRSD sebesar 0,258% atau tingkat presisi sebesar 99,74%.
2.	Tegar Subekti, Heri Suryoatmojo, Sjamsjul Anam [12]	Rancang Bangun <i>Equalizer</i> Tegangan Sel Menggunakan <i>Flyback Converter</i> Untuk Baterai Li-Ion Terhubung Seri	Ketidakseimbangan tegangan di antara sel	Menggunakan arsitektur <i>cell-to-string</i> , di mana energi pada sel yang memiliki tegangan lebih tinggi akan ditransfer ke <i>string</i>	Penyeimbang aktif dengan topologi <i>Flyback converter</i>	Perbedaan tegangan tiap sel setelah proses ekualisasi maksimal sebesar 0,01 volt
3.	Manuel Rico-Secades, Pablo Quintana-Barcia, Emilio L. Corominas, Antonio J. Calleja, Javier Ribas [14]	<i>Active Battery Cell Equalization Using a Flyback Converter with Current Mode Control</i>	Membuat penyeimbang sel baterai dengan topologi yang lebih sederhana dan waktu yang lebih cepat	Memprogram perbedaan nilai arus <i>equalizer</i> berdasarkan ketidakseimbangan tegangan pada sel	<i>Flyback converter</i> dengan <i>current mode control</i>	Didapatkan waktu penyeimbang yang cepat dengan kebutuhan daya yang kecil

4.	Charnyut Karjanapiboon, Kamon Jirasereeamornkul, Veerapol Monyakul [15]	<i>The High Efficiency Charge Equalized System for Serially Connected VRLA Battery String using Synchronous Flyback Converter</i>	Meningkatkan efisiensi penyeimbang untuk paket baterai yang tersusun seri	<i>Secondary switch</i> diaktifkan ketika energi pada transformator <i>flyback</i> ditransfer di beban	<i>Synchronous Flyback Converter</i>	<i>Synchronous flyback converter</i> memiliki efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan <i>conventional flyback converter</i>
5.	Yunlong Shang, Bing Xia, Chenghui Zhang, Naxin Cui, Jufeng Yang, Chunting Chris Mi [16]	<i>An Automatic Equalizer Based on Forward-Flyback Converter for Series-Connected Battery Strings</i>	Dibutuhkan penyeimbang untuk rangkaian baterai yang terhubung seri banyak yang memiliki kebocoran induktansi yang kecil	Penyeimbang dengan menggunakan transformator <i>multiwinding</i> tanpa membutuhkan rangkaian demagnetisasi tambahan dan sel <i>monitoring</i>	<i>Forward-Flyback Converter</i> dan <i>multiwinding transformer</i>	Didapatkan penyeimbang yang memiliki efisiensi 89,4% dan <i>voltage stress</i> yang rendah pada semua sakelar MOSFET, sehingga memastikan memiliki keandalan yang tinggi
6.	Mohamed Daowd, Mailier Antonie, Noshin Omar, Philippe Lataire, Peter Van Den Bossche [7]	<i>Balancing Modularization Based on a Single Switched Capacitor and Bi-Directional DC/DC Converter with the Auxiliary Battery</i>	BMS yang dituntut untuk memiliki kinerja yang tinggi, di mana mampu menyeimbangkan sel-sel baterai dengan perbedaan yang sekecil mungkin secara kontinu	Menggunakan metode SSC yang bertujuan untuk menyeimbangkan sel baterai pada modul, dan <i>isolated bidirectional DC/DC converter</i> untuk menyeimbangkan antar modul baterai dengan baterai tambahan	<i>Single Switched Capacitor</i> dan <i>Isolated Bidirectional DC/DC Converter</i>	Didapatkan penyeimbang yang mampu menyeimbangkan dengan perbedaan tegangan 1 mV pada modul sel baterai

Berdasarkan dengan definisi, tugas utama dari BMS identik dengan tujuannya. Meskipun perbedaan jenis BMS memiliki perbedaan tujuannya, tetapi tujuan utama BMS seperti berikut

- Melindungi sel-sel baterai dari penyalahgunaan dan bahaya
- Menjaga kapasitas baterai sebanyak mungkin
- Memastikan baterai selalu siap untuk digunakan

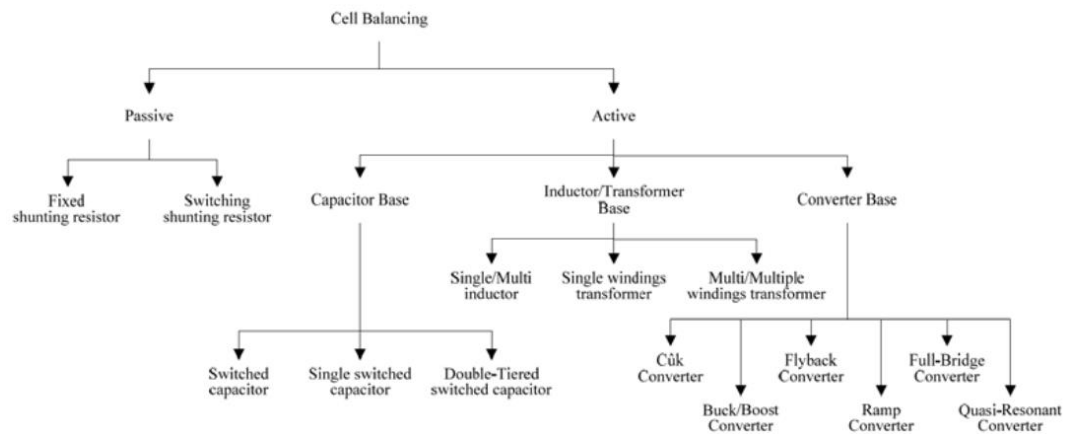
Untuk melengkapi kebutuhan monitor dan kontrol baterai pada kendaraan listrik, BMS biasanya dilengkapi dengan beberapa fitur, antara lain:

- *Cell monitoring*

Dasar pemikiran untuk menyelesaikan tugas dari BMS adalah mendapatkan nilai perolehan arus, tegangan dan temperatur pada masing-masing sel baterai. Ketentuan pengukuran tegangan dan arus bervariasi tergantung pada tipe baterai yang digunakan [17].

- *Cell balancing*

Terdapat perbedaan teknik manajemen baterai yang di dalamnya terdapat perbedaan secara komponen, biaya dan kelebihanannya. Gambar 2.1 menjabarkan teknik *balancing* dalam manajemen baterai, sedangkan tabel 2.2 menunjukkan perbandingan kualitatif antar teknik manajemen baterai.



Gambar 2.1 Teknik *Balancing* [7]

Tabel 2.2 Perbandingan Teknik *Balancing* [18]

	<i>Technique</i>		<i>Pros</i>	<i>Cons</i>
<i>Passive</i>	<i>Cell-to-heat</i> (One bleeding resistor and switch per cell)		<ul style="list-style-type: none"> • Very simple • Very cheap 	<ul style="list-style-type: none"> • 0% efficiency • Slow
<i>Active</i>	<i>Module-to-cell</i> (Charge transfer from a battery module to a single cell by means of a galvanic isolated DC/DC converter)		<ul style="list-style-type: none"> • Relatively simple • Good efficiency • Fast 	<ul style="list-style-type: none"> • Switch network • High isolation voltage of the DC/DC
	<i>Cell-to-cell</i>	<i>Distributed</i> (Charge transfer from adjacent cells)	<ul style="list-style-type: none"> • Moderate efficiency • Moderate fast 	<ul style="list-style-type: none"> • Bulky • Complex control
		<i>Shared</i> (Charge transfer from cell A to tank, then from tank to cell B)	<ul style="list-style-type: none"> • High efficiency • Fast 	<ul style="list-style-type: none"> • Switch network
	<i>Cell/module bypass</i> (A cell/module disconnection from the current path)		<ul style="list-style-type: none"> • High balancing efficiency • Very fast and flexible 	<ul style="list-style-type: none"> • High current switches • Complex to implement • Decrease battery efficiency during normal operation

- *Battery safety and protection*

Salah satu fungsi utama BMS adalah untuk memastikan keamanan baterai dan melindunginya dari operasi pada kondisi yang berbahaya bagi baterai dan pengguna. Kondisi berbahaya sebagian besar disebabkan oleh karakteristik kimiawi baterai. Misalnya, situasi berbahaya dapat terjadi sebagai akibat dari pengisian baterai yang dalam ketika SOC di bawah persentase tertentu, pengisian baterai yang berlebihan saat diisi penuh, pengisian atau pemakaian baterai dengan laju pengisian daya (*C-rate*) yang lebih tinggi dari tingkat aman untuk kimia baterai, dan melampaui tegangan *cut off* baterai. Temperatur pengoperasian, yang ditentukan oleh reaksi elektro-kimia di dalam baterai dan kondisi lingkungan, merupakan elemen yang sama pentingnya dalam keamanan baterai, terutama dalam hal baterai Li-ion. BMS menetapkan batas keselamatan untuk melindungi baterai dari bekerja di luar kisaran temperatur yang aman [17].

- *Estimasi State of Charge (SOC)*

State of Charge (SOC) adalah indikator yang mewakili muatan yang tersedia dalam baterai dibandingkan dengan kapasitas penuh baterai. Estimasi SOC yang akurat dibutuhkan tidak hanya untuk mengoptimalkan manajemen energi pada kendaraan listrik, tetapi juga untuk melindungi baterai dari *deep discharge* atau kondisi *overcharge* yang dapat mengurangi umur baterai dan dapat mengakibatkan

situasi yang berbahaya. Meskipun fitur ini sangat penting, SOC tidak dapat diukur langsung dari terminal baterai [17].

2.3 Baterai Lithium Ion

Baterai lithium ion merupakan salah satu jenis baterai yang banyak digunakan ada kendaraan listrik maupun perangkat elektronik di masa kini. Elektrode aktif pada baterai lithium ion merupakan *lithium metal oxide* untuk elektrode positif sedangkan karbon pada elektrode negatif. Baterai lithium ion memiliki kelebihan dibandingkan jenis lain yang dapat dilihat pada tabel berikut [19].

Tabel 2.3 Perbandingan Baterai Lithium Ion dengan Jenis Lain [19]

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

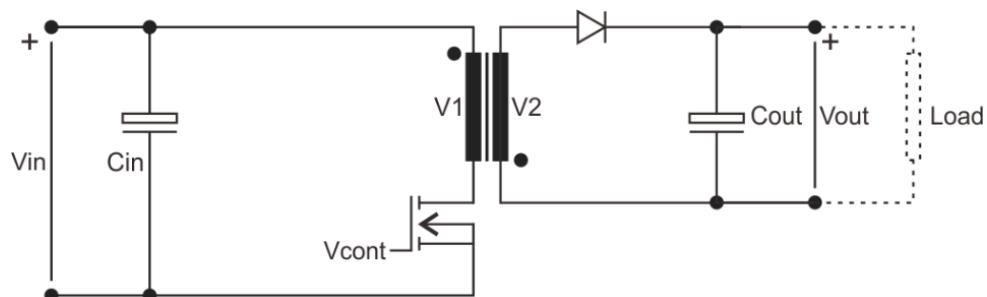
Baterai lithium-ion harus dioperasikan pada area aman dan handal, yang di mana akan berefek pada *charge rate*, temperatur, dan rentang tegangan. Jika melebihi dari rentang tersebut akan mengarah pada melemahnya kinerja baterai dan akan menghasilkan masalah pada keamanan. Untuk memastikan operasi yang handal dari baterai lithium, sangat penting untuk mengevaluasi kapasitas baterai lithium ion dan memprediksikan usia baterai yang tersisa selama masa pemakaian [20].

Tipe baterai Li-Ion mempunyai beberapa komponen utama, yaitu elektrode negatif dari sel Li-Ion dikoneksikan ke terminal negatif dari sel tersebut. Elektrode ini biasanya mengandung grafit, yang di mana adalah interkalasi material. Komponen kedua adalah elektrode positif dikoneksikan ke terminal positif dari sel Li-Ion. Elektrode positif dapat memiliki beberapa unsur kimia, tetapi biasanya metal oksida atau campuran dari beberapa metal oksida. Komponen utama ketiga adalah separator. Separator adalah lapisan medium tipis yang memisahkan negatif dari elektrode positif. Separator adalah insulator elektrik yang tidak memperbolehkan elektron untuk mengalir di antara elektrode positif dan negatif.

2.4 Flyback Converter

Flyback converter adalah tipe yang paling serbaguna dari semua tipe *switching converter*, hal ini dikarenakan memungkinkan bagi *engineer* untuk membuat tegangan output satu atau lebih, dengan beberapa output yang mungkin berlawanan polaritasnya. *Flyback converter* telah mendapatkan popularitas dalam sistem bertenaga baterai, di mana tegangan tunggal harus dikonversikan ke dalam sistem tegangan yang diperlukan dengan efisiensi daya konversi yang tinggi. Dalam *flyback converter* digunakan transformator yang berguna untuk (isolasi) menghilangkan koneksi elektrik secara langsung antara input dan output dari pengubah tegangan [21].

Bagian yang paling penting dari *flyback converter* adalah transformator *phasing*, seperti yang ditunjukkan oleh titik pada gulungan primer dan sekunder. Ketika sakelar dihidupkan, tegangan input masuk ke bagian lilitan primer tersebut. Yang perlu diperhatikan bahwa polaritas tegangan pada lilitan primer adalah dot negatif (lebih negatif pada akhir titik), menyebabkan tegangan dengan polaritas yang sama untuk muncul di sekunder transformator (besarnya tegangan sekunder ditentukan oleh perbandingan lilitan antara lilitan primer dan sekunder) [21].



Gambar 2.2 Rangkaian *Flyback Converter*

Gambar 2.2 menunjukkan rangkaian dasar dari sebuah *flyback converter*. MOSFET bekerja sebagai sebuah *switch*, *on* dan *off*-nya dikendalikan dengan pengendali pulsa tegangan/*pulse width modulated* (V_{cont}). Selama *on*, MOSFET untuk tegangan utama dari trafo (V_1) adalah sama dengan tegangan masukan (V_{in}) yang menghasilkan arus I_1 meningkat secara linier. Pada fase ini, energi tersimpan pada inti trafo. Selama fase *on*, arus pada sisi sekunder akan bernilai nol, karena dioda terbuka. Ketika MOSFET *off*, arus pada sisi primer I_1 dipotong dan tegangan

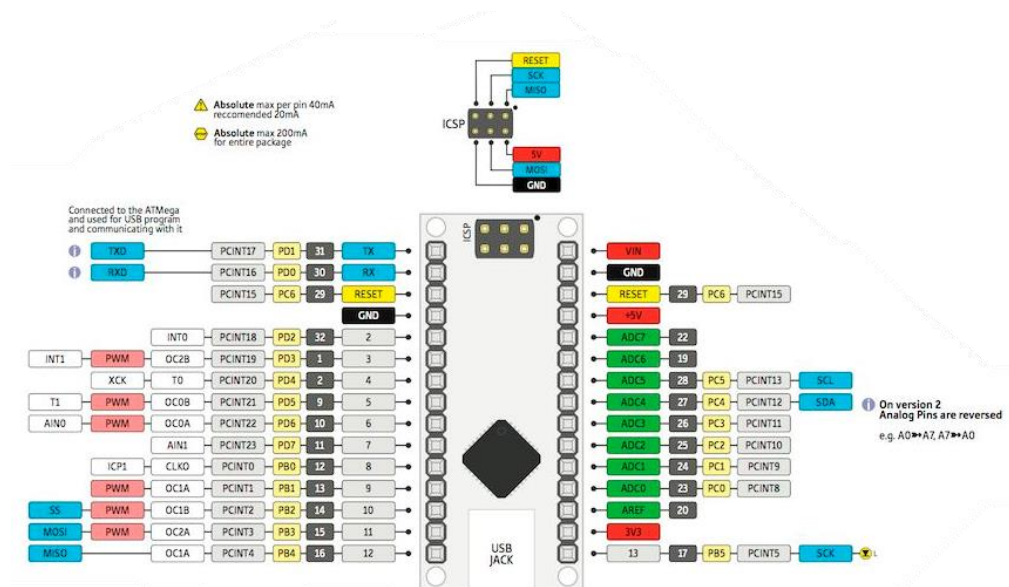
pada trafo akan sesuai dengan hukum faraday ($v = L \frac{di}{dt}$), dioda tertutup dan inti trafo yang bermuatan akan pindah melalui dioda ke keluaran kapasitor Cout [21].

2.5 Arduino Nano

Arduino nano adalah sebuah *board* mikrokontroler yang didasarkan pada ATmega328. Arduino nano mempunyai 14 pin digital input/output (6 di antaranya dapat digunakan sebagai keluaran PWM), 8 pin analog, sebuah osilator kristal 16 MHz, sebuah koneksi USB, sebuah *power jack*, sebuah ICSP *header*, dan sebuah tombol reset. Arduino nano memuat semua yang dibutuhkan untuk menunjang mikrokontroler, mudah menghubungkannya ke sebuah komputer dengan sebuah kabel USB atau mensuplainya dengan sebuah adaptor AC ke DC atau menggunakan baterai untuk memulainya [22].



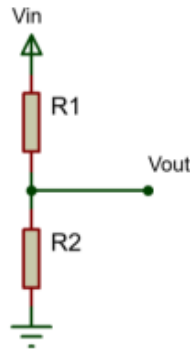
Gambar 2.3 Arduino Nano



Gambar 2.4 Diagram Pinout Arduino Nano

2.6 Pembaca Tegangan

Pembaca tegangan dapat dibuat dengan menggunakan rangkaian pembagi tegangan. Rangkaian pembagi tegangan digunakan untuk membuat suatu tegangan referensi dari sumber tegangan yang lebih besar untuk titik tegangan referensi pada sensor [23].



Gambar 2.5 Pembagi Tegangan

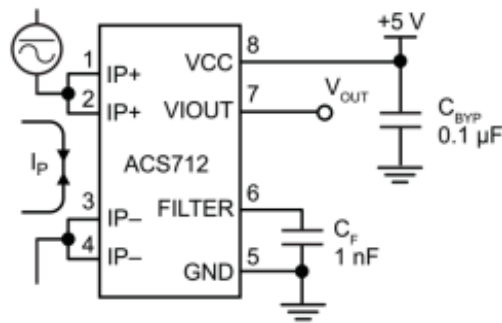
Pada pin ADC Arduino memiliki batasan pembacaan tegangan sebesar 5 V. Oleh karena itu, rangkaian pembagi tegangan digunakan untuk memperkecil tegangan sesuai dengan perbandingan yang telah dihitung dengan persamaan berikut ini [23].

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (2.1)$$

2.7 Sensor Arus ACS712

ACS712 merupakan suatu IC terpaket yang berguna sebagai sensor arus menggantikan transformator arus yang relatif besar dalam hal ukuran. Pada prinsipnya ACS712 sama dengan sensor *hall effect* lainnya yaitu dengan memanfaatkan medan magnetik di sekitar arus kemudian dikonversi menjadi tegangan yang linear dengan perubahan arus [24].

Istilah *hall effect* dikenal setelah Edwin H. Hall (1855-1938) menemukan bahwa jika arus listrik mengalir melalui penghantar yang ditempatkan pada garis lintang medan magnet yang kuat akan menghasilkan beda potensial yang melewati penghantar pada kedua sudut penghantar itu [25].



Gambar 2.6 Rangkaian Sensor Arus [34]

Gambar 2.6 menunjukkan rangkaian konfigurasi pin pada IC ACS. Pin 1 dan 2 merupakan bagian yang dihubungkan dengan sumber sedangkan pin 3 dan 4 dihubungkan dengan beban yang ingin dihitung arusnya. Pin V_{out} merupakan pin yang nantinya dibaca oleh ADC.

Spesifikasi dari sensor arus di atas dapat dilihat pada tabel 2.4 berikut.

Tabel 2.4 Spesifikasi Sensor Arus ACS712 [21]

Karakteristik	Simbol	Rating Maksimal
Tegangan Suplai	Vcc	8 V
Tegangan Keluaran	Vout	8 V
Toleransi Arus Lebih	Ip	100 A
Sensitivitas		Tipe 5 T = 185 mV/A Tipe 20 T = 100 mV/A Tipe 30 T = 66 mV/A

Sensor arus ACS712 dapat mengukur arus positif dan negatif. Hal ini dikarenakan sensor mengeluarkan tegangan sebesar setengah dari tegangan referensi ketika tidak ada arus yang melewatinya. Dalam perhitungan arus juga dipengaruhi oleh tegangan referensi ADC dan juga berdasarkan resolusi dari ADC. Selanjutnya dapat dirumuskan sebagai berikut.

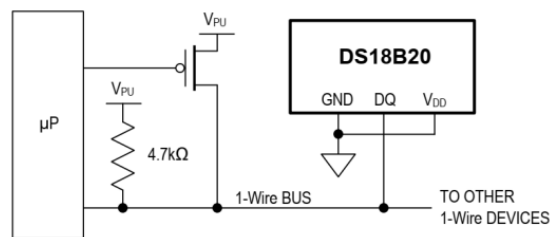
$$I = \frac{\left(\frac{V_{ref}}{ADC_{maks}}\right) \times ADC - \left(\frac{1}{2} \times V_{ref}\right)}{S} \quad (2.2)$$

Di mana:

- I = Arus (A)
- V_{ref} = Tegangan referensi (V)
- ADC Maks = Nilai ADC maksimal
- ADC = Pembacaan nilai ADC
- S = Sensitivitas sensor ACS712 (V/A)

2.8 Sensor Temperatur DS18B20

Sensor DS18B20 merupakan sensor temperatur yang memiliki keluaran digital. Sensor DS18B20 memiliki tingkat akurasi yang cukup tinggi, yaitu $0,5^{\circ}\text{C}$ pada rentang temperatur -10°C sampai $+85^{\circ}\text{C}$. Sensor temperatur pada umumnya membutuhkan ADC dan beberapa *pin port* pada mikrokontroler, namun DS18B20 ini tidak membutuhkan ADC agar dapat berkomunikasi dengan mikrokontroler dan hanya membutuhkan 1 kabel saja [26].



Gambar 2.7 Skematik Diagram Sensor DS18B20

Gambar 2.7 menunjukkan skematik diagram sensor DS18B20. Di mana pin *ground* dan V_{DD} dihubungkan dengan V_{CC} , sedangkan pin DQ dihubungkan dengan pin I/O pada mikrokontroler. Data yang dikeluarkan berupa data digital dengan nilai ketelitian $0,5^{\circ}\text{C}$ [26].

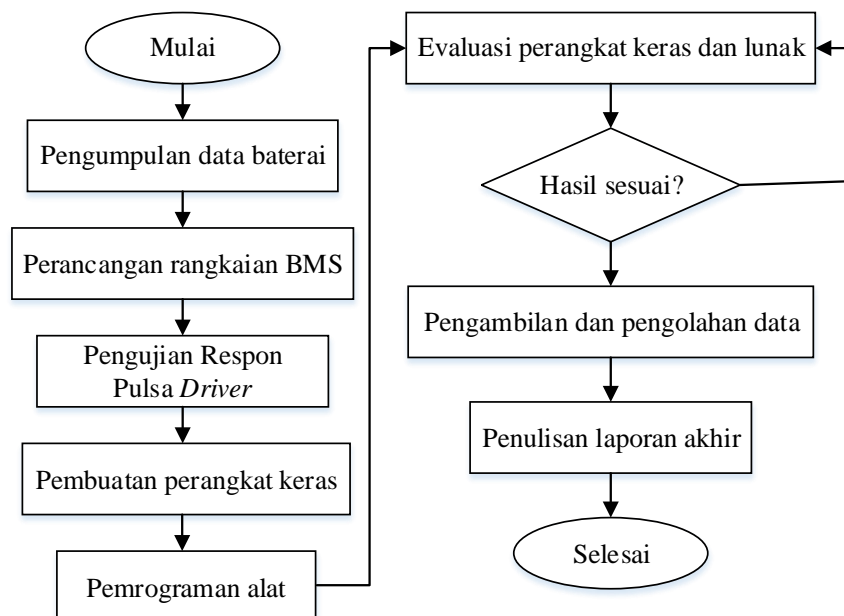
BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini terdiri dari beberapa tahapan yang dilakukan dimulai dengan studi pustaka untuk memahami prinsip kerja dari sistem manajemen baterai. Referensi yang digunakan berupa jurnal, skripsi, buku, *datasheet* serta sumber lainnya. Setelah itu, dilanjutkan dengan mengumpulkan data baterai yang digunakan dalam penelitian. Kemudian melakukan perancangan BMS baik dari sisi perangkat keras maupun lunak dari hasil studi pustaka. Pembuatan perangkat keras meliputi perancangan sistem *monitoring*, *balancing*, dan proteksi.

Pada bab ini juga akan dijelaskan mengenai tata cara pengujian. Serangkaian pengujian dilakukan untuk mengetahui kinerja rangkaian secara keseluruhan. Evaluasi pun dilakukan hingga rangkaian dapat beroperasi secara optimal. Setelah itu penelitian diakhiri dengan penulisan laporan penelitian sesuai data yang diperoleh.

Dari semua tahapan tersebut dilakukan secara urut dengan mengikuti diagram alir tahapan-tahapan penelitian. Berikut ini merupakan bagan diagram alir tahapan penelitian ini.



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.1 Pengumpulan Data Spesifikasi Baterai

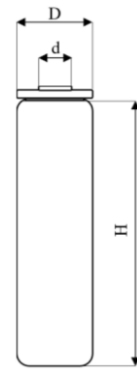
Penelitian dimulai dengan pengumpulan data spesifikasi baterai yang akan digunakan. Hal ini bertujuan untuk mempermudah dalam perancangan sistem. Jenis baterai yang digunakan adalah NCA. Pada penelitian ini digunakan baterai Lithium Ion Samsung SDI INR18650-25R.



Gambar 3.2 Baterai Lithium Ion Samsung SDI INR18650-25R

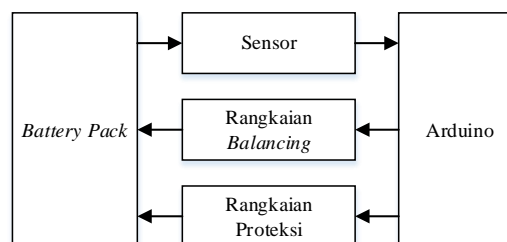
Tabel 3.1 Spesifikasi Baterai

Datasheet Samsung SDI INR18650-25R		
Specification		
Nominal discharge capacity	2,500mAh	
Nominal voltage	3.6 V	
Standard charge	CCCV, 1.25A, 4.20 ± 0.05 V	
Rapid charge	CCCV, 4A, 4.20 ± 0.05 V	
Charging time	Standard charge : 180min	
	Rapid charge : 60min	
Max. continuous discharge	20A (at 25°C)	
Discharge cut-off voltage	2.5V	
Weight (max.)	45.0g	
Dimension (max.)	(D)	18.33 ± 0.15 mm
	(H)	64.85 ± 0.07 mm
Operating temperature	Charge : 0 to 50°C	
	Discharge : -20 to 75°C	



3.2 Perancangan Alat

Setelah mendapatkan data spesifikasi baterai, kemudian dilakukan perancangan sistem BMS. BMS yang diusulkan, dirancang untuk dapat memenuhi tiga fitur sistem, yaitu fitur *monitoring*, *balancing* dan proteksi. Oleh karena itu, BMS yang dirancang harus melewati serangkaian tahap.



Gambar 3.3 Blok Diagram Rancangan Alat

3.3 Alat dan Bahan

Alat-alat yang digunakan dalam merancang, membuat dan menguji sistem manajemen baterai ini adalah sebagai berikut.

1. Instrumen: Multimeter SANWA CD800a, *oscilloscope*, catu daya Rigol DP831, DC load Rigol DL3031
2. Perangkat lunak: Arduino IDE, Proteus 8.8 Professional, OriginLab
3. Perkakas: Bor, tang potong, tang jepit, obeng, solder, *stand* solder

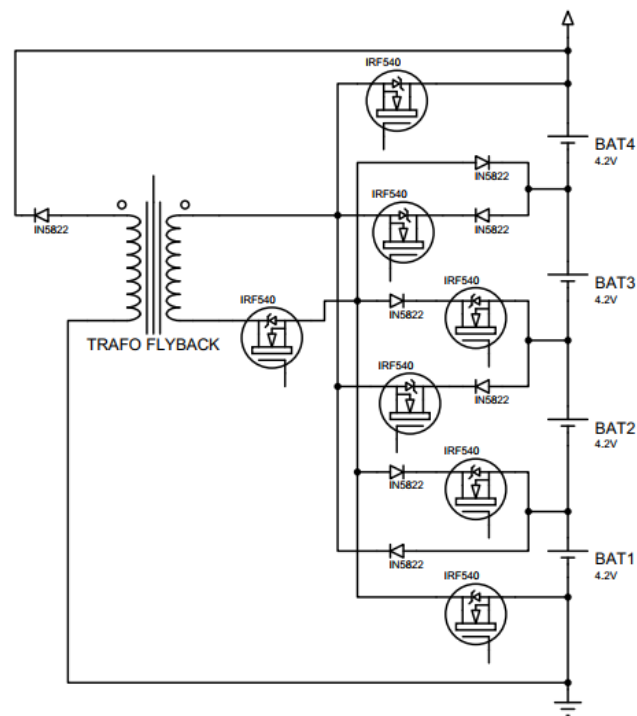
Bahan-bahan yang digunakan untuk membuat dan menguji sistem manajemen baterai ini adalah sebagai berikut.

Tabel 3.2 Bahan-bahan

No.	Nama Bahan	Kuantitas
1	Baterai Samsung SDI INR18650-25R	4
2	<i>Battery holder</i>	4
3	Arduino nano	1
4	Sensor arus ACS712 – 5A	2
5	Sensor temperatur DS18B20	1
6	Dioda 1N5822	7
7	<i>Optocoupler</i> TLP250	8
8	MOSFET IRF540	8
9	Hi-Link 12 V	8
10	<i>Flyback transformer</i>	1
11	<i>Resistor</i> 1 Ω	8
12	<i>Resistor</i> 330 Ω	9
13	<i>Resistor</i> 560 Ω	1
14	<i>Resistor</i> 670 Ω	1
15	<i>Resistor</i> 10k Ω	7
16	<i>Resistor</i> 47k Ω	1
17	<i>Resistor</i> 120k Ω	2
18	<i>Resistor</i> 200k Ω	1
19	Kapasitor 1nF	8
20	<i>Socket</i> IC kaki 8	8
21	<i>Terminal block</i> KF301 – 5 pin	2
22	<i>Terminal block</i> KF45 – 2 pin	1
23	<i>Printed Circuit Board</i> (PCB)	3
24	<i>Spacer</i>	18

3.4 Perancangan Perangkat Keras

Perancangan perangkat keras dimulai dengan pembuatan sistem *balancing*, pembuatan *driver* MOSFET, pembuatan sistem *monitoring* berupa sensor pembacaan tegangan, arus dan temperatur, pembuatan sistem proteksi kemudian



Gambar 3.5 Topologi Rangkaian Sistem *Balancing*

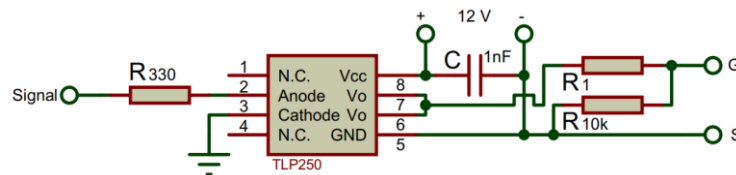
Prinsip kerja dari ekualisasi dimulai pemasangan *battery pack* pada BMS. BMS kemudian akan mendeteksi dan membaca nilai tegangan pada tiap sel baterai. Pengisian *battery pack* akan dimulai apabila nilai tegangan pada sel-sel baterai di bawah batas acuan. Pengisian akan dihentikan ketika sensor tegangan mendeteksi dan membaca salah satu sel baterai yang mencapai 4,2 V.

Sensor juga akan membaca nilai tegangan tertinggi dan terendah. Nilai tegangan terendah akan menjadi nilai acuan *balancing* tegangan. Sel dengan nilai tegangan tertinggi akan di-*discharge* hingga mendekati nilai acuan. Kemudian sensor tegangan akan terus membaca nilai tegangan tiap sel untuk melakukan pengisian dan balancing.

Baterai yang digunakan pada sistem manajemen baterai kali ini adalah Panasonic 18650BE Li-ion dengan kombinasi 4S1P (4 seri 1 paralel). Paket baterai akan memberikan suplai tegangan (V) dan arus (I). Pada sistem manajemen baterai terdapat sensor arus dan sensor temperatur yang akan menerima nilai arus dan nilai temperatur yang terdapat pada paket baterai. Arduino akan memproses hasil input yang diberikan sensor dan akan memproses data sehingga dapat menampilkan nilai arus, tegangan serta temperatur dari paket baterai.

3.4.2 Perancangan *Driver* MOSFET

Fungsi dari sistem *driver* adalah untuk melakukan *interfacing* antara sistem kontrol yang bekerja pada tegangan dan arus yang lebih dengan sistem daya yang beroperasi pada *rating* tegangan dan arus yang lebih besar. Dengan kata lain, rangkaian *driver* digunakan untuk mengisolasi dan menguatkan sinyal PWM. Pada sistem *driver*, kontrol dan daya memiliki *grounding* yang berbeda sebagai fungsi isolasi antar keduanya. *Driver* yang dipakai pada penulisan ini adalah TLP250. Berikut ini merupakan perancangan rangkaian *driver* untuk pengoperasian MOSFET.



Gambar 3.6 Perancangan Rangkaian Driver TLP250

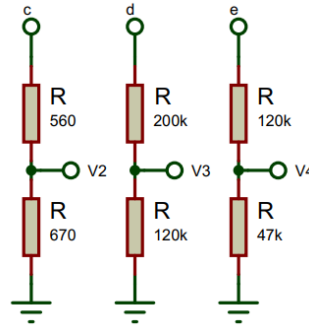
Setelah mendapat masukan berupa sinyal PWM keluaran dari mikrokontroler, rangkaian *driver* MOSFET langsung meneruskan gelombang pemicuan tersebut ke rangkaian daya.

3.4.3 Perancangan Sensor Pembacaan Tegangan

Sensor tegangan digunakan untuk mengukur tegangan dari masing sel baterai. Sensor tegangan dirancang untuk bisa mendeteksi tegangan masukan hingga 16,8 V dan tegangan keluaran maksimal 5 V untuk dibaca oleh Arduino. Untuk pembacaan nilai tegangan sel baterai pertama langsung menggunakan ADC Arduino, karena nilai tegangan sel baterai tersebut masih dalam range pembacaan ADC. Sensor tegangan dibuat dengan menggunakan prinsip pembagi tegangan menggunakan resistor. Perhitungan nilai resistor yang digunakan menggunakan persamaan 2.1. Berikut perhitungan perbandingan nilai resistor yang digunakan.

Pembagi tegangan 1	Pembagi tegangan 2	Pembagi tegangan 3
$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$	$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$	$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$
$\frac{5}{8,4} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$	$\frac{5}{12,6} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$	$\frac{5}{16,8} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$
$5 R_1 = 8,4 R_2 - 5 R_2$	$5 R_1 = 12,6 R_2 - 5 R_2$	$5 R_1 = 16,8 R_2 - 5 R_2$
$R_1 = 0,68 R_2$	$R_1 = 1,52 R_2$	$R_1 = 2,36 R_2$

Dari perhitungan didapatkan perbandingan nilai resistor di mana pada pembagi tegangan 1, R_1 memiliki nilai 0,68 kali dari R_2 , pada pembagi tegangan 2, R_1 memiliki nilai 1,52 kali dari R_2 , dan pada pembagi tegangan 3, R_1 memiliki nilai 2,36 kali dari R_2 . Dalam pembuatannya nilai resistor dipilih berdasarkan pada gambar rangkaian berikut ini.



Gambar 3.7 Perancangan Rangkaian Sensor Pembacaan Tegangan

3.4.4 Perancangan Sensor Arus

Perancangan sensor arus menggunakan ACS712 dengan *range* 5 A. Sensor ini memiliki ketepatan yang tinggi, karena di dalamnya terdapat low-offset linier hall dengan satu lintasan yang terbuat dari tembaga. Pembacaan sensor dilakukan dengan menggunakan ADC Arduino yang memiliki tegangan referensi 5 V dan resolusi 10 bit atau dalam desimal 0 sampai dengan 1023. Sensitivitas pembacaan arus ACS712-5A sebesar 185 mV/A, sehingga perhitungannya sebagai berikut.

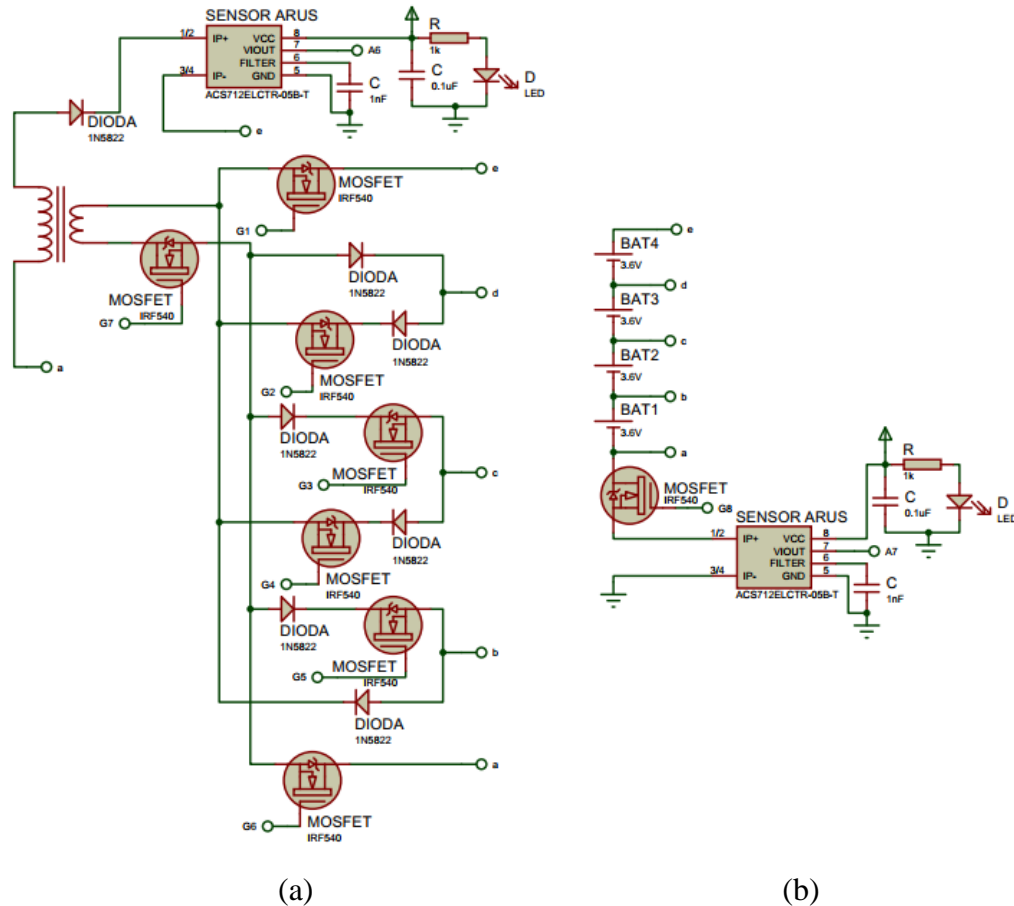
$$I = \frac{\left(\frac{V_{ref}}{ADC_{maks}}\right) \times ADC - \left(\frac{1}{2} \times V_{ref}\right)}{S}$$

$$I = \frac{\left(\frac{5}{1023}\right) \times ADC - \left(\frac{1}{2} \times 5\right)}{0,185}$$

$$I = \frac{0,0049 \times ADC - 2,5}{0,185}$$

$$I = 0,026 \times ADC - 13,51$$

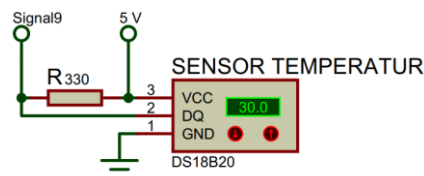
ACS712 dipasang pada sistem BMS untuk mengetahui besaran arus *balancing* dan arus *charging* atau *discharging*. Berikut merupakan gambar rangkaian sensor arus.



Gambar 3.8 Perancangan Rangkaian Sensor Arus (a) Arus *Balancing* (b) Arus *Charging dan Discharging*

3.4.5 Perancangan Sensor Temperatur

Temperatur merupakan salah satu parameter yang penting dalam pengoperasian baterai. Sensor temperatur yang digunakan adalah DS18B20. Sensor ini digunakan untuk mengetahui besaran temperatur pada *battery pack*. Berikut merupakan gambar rangkaian sensor temperatur.

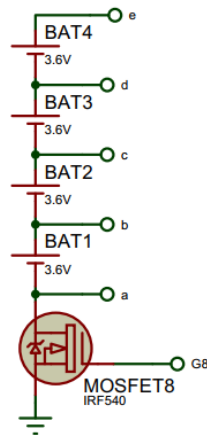


Gambar 3.9 Perancangan Rangkaian Sensor Temperatur

3.4.6 Perancangan Sistem Proteksi

Perancangan sistem proteksi ditandai dengan pemasangan MOSFET *cut off* berada pada sisi negatif rangkaian dikarenakan tipe MOSFET yang digunakan merupakan MOSFET tipe *N-channel*. Fungsi dari sistem proteksi ini adalah untuk

membatasi hal-hal yang tidak sesuai dengan pengoperasian yang aman, yaitu terdiri dari *over-charge*, *over-discharge*, dan *over-temperature*.



Gambar 3.10 Perancangan Rangkaian Sistem Proteksi

3.5 Perancangan Perangkat Lunak

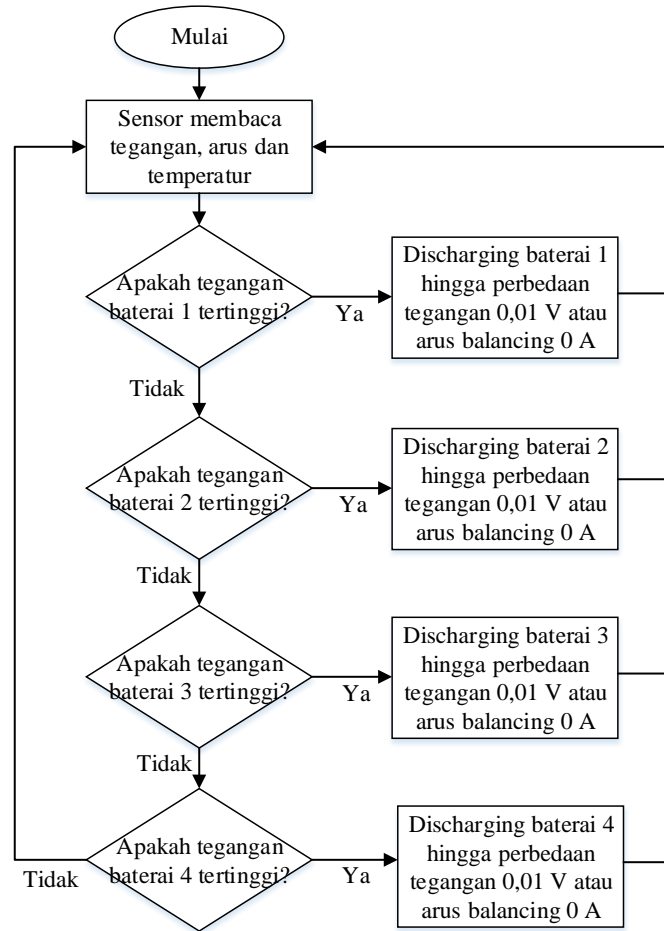
Perancangan perangkat lunak atau algoritma meliputi semua proses yang dilakukan mikrokontroler dalam menjalankan proses pengolahan data *monitoring*, *balancing* dan proteksi. Berikut merupakan bagian dari perancangan perangkat lunak.

3.5.1 Perancangan Algoritma *Monitoring*

Perancangan algoritma *monitoring* dimulai dengan pembaca tegangan. Pembacaan tegangan dimulai dengan melakukan kalibrasi pembagi tegangan. Kalibrasi pembagi tegangan dilakukan karena rangkaian bukan dalam bentuk modul sensor, sehingga masih perlu dikalibrasi. Kalibrasi pembagi tegangan bertujuan untuk mendapatkan persamaan regresi yang didapat dari membandingkan variasi tegangan masukan dengan pembacaan nilai ADC pada mikrokontroler. Persamaan regresi ini digunakan dalam pemrograman. Sensor arus dan temperatur tidak perlu melakukan kalibrasi karena sudah dalam bentuk modul sensor.

3.5.2 Perancangan Algoritma *Balancing*

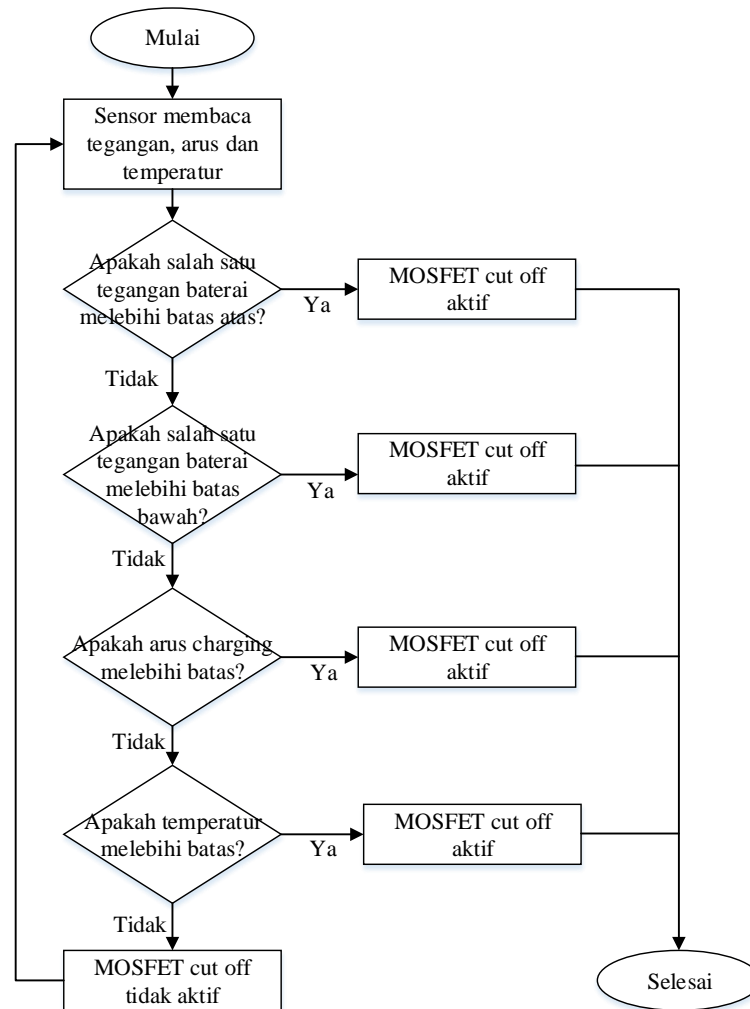
Sensor juga akan membaca nilai tegangan tertinggi dan terendah. Nilai tegangan terendah akan menjadi nilai acuan *balancing* tegangan. Sel dengan nilai tegangan tertinggi akan di-*discharge* hingga mendekati nilai acuan. Kemudian pembaca tegangan akan terus membaca nilai tegangan tiap sel untuk melakukan pengisian dan balancing. Berikut merupakan bagan diagram alir sistem *balancing*.



Gambar 3.11 Diagram Alir Sistem *Balancing*

3.5.3 Perancangan Algoritma Proteksi

Algoritma proteksi dimulai dengan mengatur nilai batasan dari tegangan maksimal, tegangan minimal, arus maksimal dan temperatur maksimal. Kemudian mikrokontroler akan membaca dan membandingkan dengan nilai pembacaan dari pembaca tegangan, sensor arus dan sensor temperatur, yang kemudian menjadi dasar keputusan untuk mengaktifkan MOSFET *cut-off*. Berikut merupakan bagan diagram alir sistem proteksi.



Gambar 3.12 Diagram Alir Sistem Proteksi

3.6 Pengujian Performa Rancang Bangun

Setelah melakukan rancang bangun kemudian dilakukan pengujian untuk mengetahui respons dari variabel yang terkait sehingga didapatkan hasil yang optimal. Pengujian pada sistem pengisian dan pengosongan baterai ini terdiri dari beberapa pengujian, yaitu mulai dari pengujian respon pulsa *driver* TLP250, pengujian sensor, pengujian ekualisasi baterai dengan tegangan bervariasi, dan pengujian proteksi.

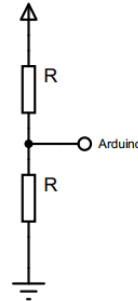
3.6.1 Pengujian Sistem Monitoring

Pengujian sistem monitoring dilakukan untuk mengetahui tingkat akurasi dan presisi pembaca tegangan yang dirancang menggunakan prinsip pembagi tegangan. Dalam pengujian ini menggunakan instrumen catu daya Rigol DP831.



Gambar 3.13 Instrumen Pengujian *Monitoring* Catu Daya Rigol DP831

Pengujian ini diawali dengan melakukan kalibrasi pembaca tegangan yang digunakan. Kalibrasi pembaca tegangan dilakukan dengan cara merangkai dua resistor yang terhubung seri dan kemudian dihubungkan dengan catu daya variabel. Kalibrasi dilakukan dengan memberi tegangan masukan dari 2 V hingga 16.8 V berdasarkan dengan *rating* pembaca tegangan yang sudah dirancang pada gambar 3.7. Hasil pengukuran pembaca tegangan dicatat besaran nilai ADC yang terbaca oleh Arduino setiap kenaikan 0.2 V. Hasil pembacaan nilai ADC akan dibandingkan dengan besaran tegangan masukan, kemudian dibuat grafik dan persamaan regresi untuk digunakan dalam proses pemrograman sistem monitoring. Berikut ini merupakan rangkaian pengujian sensor tegangan.



Gambar 3.14 Rangkaian Kalibrasi Pembaca Tegangan

Setelah melakukan kalibrasi pembaca tegangan, dilakukan pengujian tingkat akurasi dan presisi. Tingkat akurasi diwakili oleh *root mean square error* (RMSE). Semakin kecil nilai MSE, maka semakin bagus tingkat akurasi. Uji tingkat presisi diwakili oleh *mean relative standard deviation* (MRSD) dari *repeability*. Semakin kecil nilai koefisien variasi setelah *repeability*, maka semakin bagus tingkat presisinya.

3.6.2 Pengujian *Balancing* dengan Tegangan Bervariasi

Pengujian ini dimaksudkan untuk mengetahui kinerja BMS saat digunakan untuk menyeimbangkan tegangan sel dengan rentang tegangan yang bervariasi.

Dalam pengujian ini menggunakan instrumen catu daya Rigol DP831 dan DC load Rigol DL3031.



(a)



(b)

Gambar 3.15 Instrumen Pengujian *Balancing* (a) Catu Daya Rigol DP831 (b) DC Load Rigol DL3031

Pengujian *balancing* dibuat menjadi beberapa kasus. Kasus 1 dihadapkan pada tegangan salah satu sel mendekati nilai tertinggi dan tiga sel yang lain memiliki nilai tegangan yang lebih rendah. Kasus 2 dihadapkan pada tegangan 2 sel berada mendekati nilai maksimal dan 2 sel lainnya dengan tegangan yang lebih rendah. Dan kasus 3 dihadapkan pada tegangan 3 sel baterai dibuat mendekati nilai maksimal dan 1 sel lainnya memiliki tegangan yang lebih rendah.

3.6.3 Pengujian Proteksi

Pengujian ini dimaksudkan untuk mengetahui kinerja BMS pada saat terjadi pengoperasian yang tidak sesuai dengan keamanan dari *battery pack*. Proteksi BMS yang diuji berupa pengujian *over-charge*, *over-discharge*, *over-current*, dan *over-temperature*.

3.7 Pengambilan Data

Pengambilan data dilakukan dengan cara merekam data-data pada saat pengujian performa alat. Pengambilan data dilakukan setiap 1 detik sekali melalui *serial monitor* arduino. Data-data yang akan diambil berupa tegangan tiap sel, arus dan temperatur *battery pack*. Selain itu, dicatat juga waktu yang dibutuhkan dalam melakukan pengujian.

3.8 Analisis Data dan Penutup

Analisis yang dilakukan adalah analisis teknik yang meliputi perancangan sistem. Serta tahap terakhir penelitian ini adalah pengambilan kesimpulan dan

saran. Kesimpulan disusun berdasarkan tujuan dari penelitian ini. Kesimpulan didapatkan berdasarkan analisis data eksperimen yang telah dilakukan. Saran dibuat berdasarkan beberapa kendala yang dialami selama penelitian.

BAB IV

HASIL DAN ANALISIS

Setelah dilakukan perancangan, pembuatan dan uji coba kemudian didapatkan beberapa hasil. Hasil yang didapat berupa respon pulsa pada *driver* TLP250, pengujian sistem *monitoring*, pengujian sistem *balancing* atau proses ekualisasi baterai, dan pengujian proteksi. Hasil respon pulsa pada *driver* pada TLP250 berupa pulsa input sinyal dari mikrokontroler dan output sinyal menuju ke MOSFET. Hasil pengujian sistem *monitoring* berupa data kalibrasi dan pengujian tingkat akurasi dan presisi. Hasil pengujian *balancing* berupa proses *balancing* yang terdiri dari beberapa kasus. Hasil pengujian proteksi berupa pengujian untuk masalah *over-charge*, *over-discharge*, *over-current* dan *over-temperature*.

4.1 Respon Pulsa Driver TLP250

Pengujian pada rangkaian ini dilakukan untuk mengetahui dan memastikan gelombang keluaran dari *driver* TLP250 telah sesuai dengan perancangan dan dapat digunakan untuk pemicuan MOSFET. Berikut merupakan gambar bentuk gelombang keluaran dari *driver* TLP250 berdasarkan pada gambar 3.6.



(a)

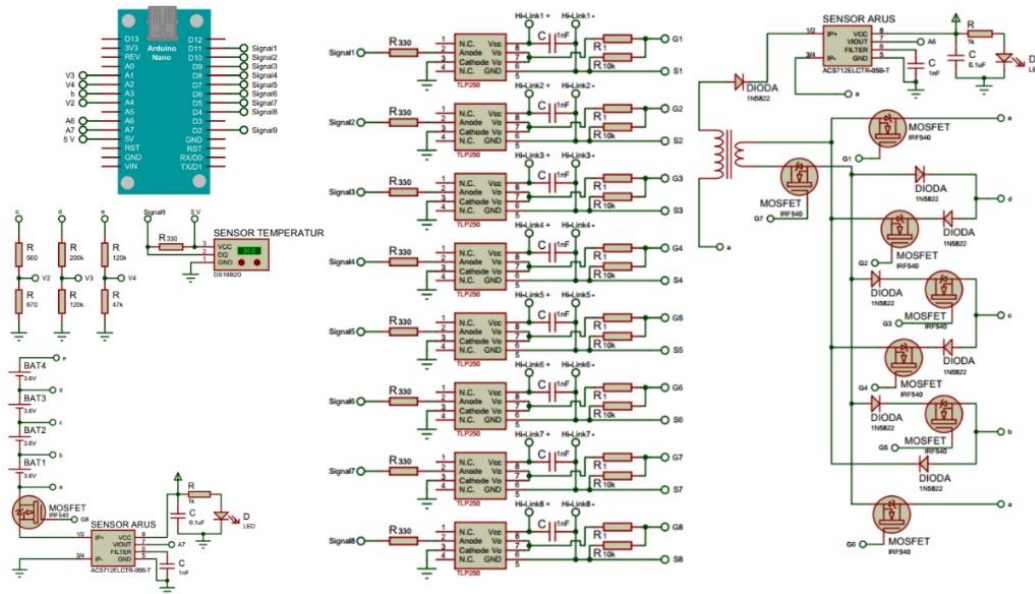
(b)

Gambar 4.1 Gelombang Keluaran dari *Driver* TLP250 (a) Pemicu MOSFET *Balancing* dan *Cut-off* (b) Pemicu MOSFET *Driver Flyback*

Berdasarkan gambar 4.1 diketahui hasil pengujian gelombang keluaran dari *driver* TLP250 telah sesuai dengan perancangan dan dapat digunakan untuk memicu MOSFET. Pemicu MOSFET *driver flyback* dapat melakukan *switching* pada frekuensi 3,92kHz. Frekuensi sebesar 3,92kHz diatur karena output trafo sudah mengeluarkan tegangan lebih besar dari tegangan *battery pack*.

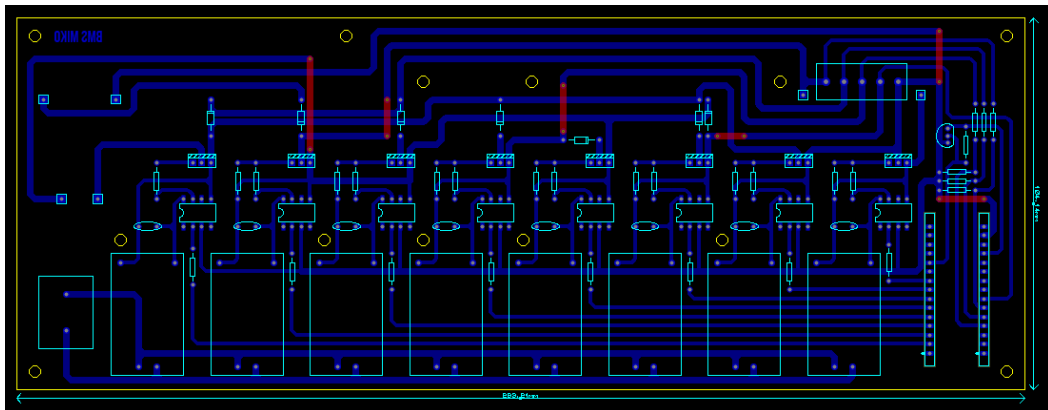
4.2 Pembuatan Alat

Pembuatan alat dilakukan setelah melakukan pengamatan respon pulsa *driver* TLP250. Pembuatan alat dimulai dengan pembuatan skematik rangkaian dan papan rangkaian seperti yang dapat dilihat pada gambar 4.2 dan 4.3. Setelah itu proses *manufacturing* berupa pencetakan PCB, pengeboran PCB, pemasangan komponen dan penyolderan komponen pada PCB. Hasil alat dapat dilihat seperti pada gambar 4.4.

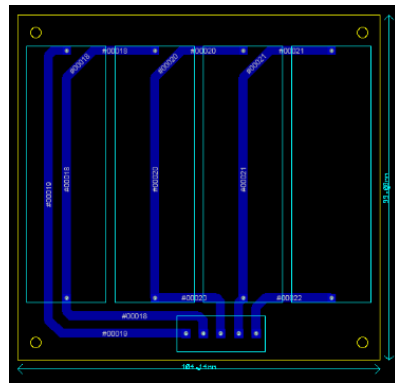


Gambar 4.2 Skematik Rangkaian

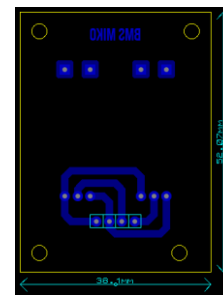
Skematik rangkaian terdiri dari beberapa fitur yang telah dirancang pada bab 3 seperti *driver* TLP250, pembagi tegangan sebagai sensor tegangan, sensor arus, sensor temperatur, sistem *balancing*, dan sistem proteksi.



(a)



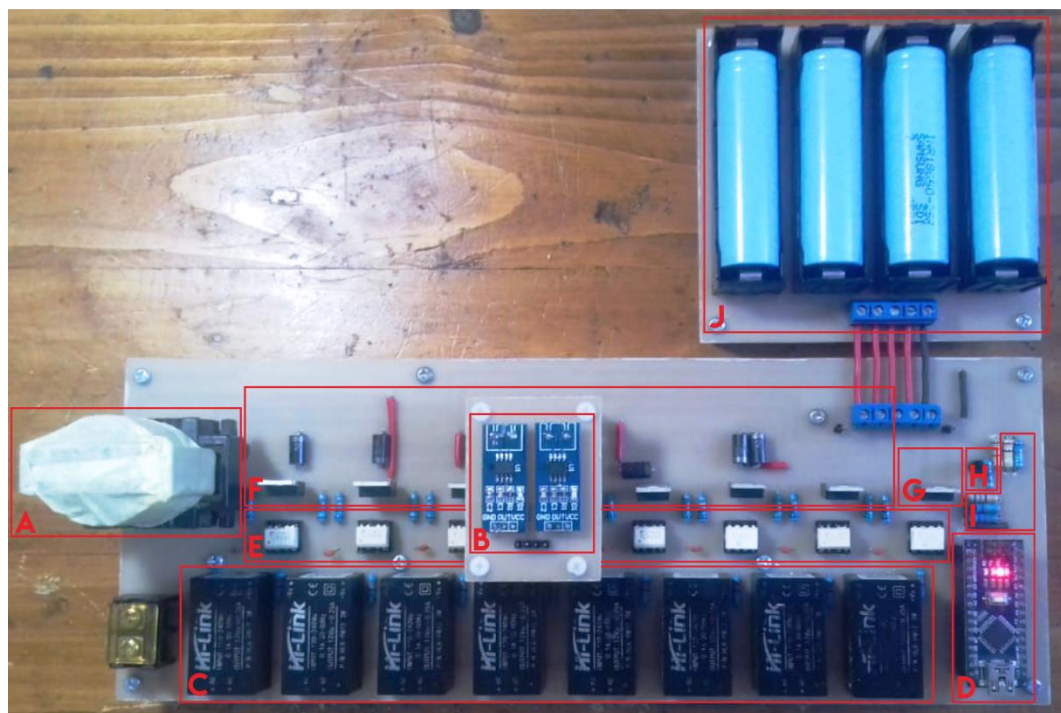
(b)



(c)

Gambar 4.3 Desain PCB (a) BMS (b) *Battery Pack* (c) Sensor Arus

Desain papan PCB berukuran 283,21 x 104,14 mm, 04,14 x 99,06 mm dan 38,1 x 52,07 mm di mana komponen yang digunakan yaitu komponen DIP. Adapun komponen SMD sudah dalam bentuk modul komponen.



Gambar 4.4 Hasil Rancang Bangun

Gambar 4.4 merupakan gambar hasil rancang bangun alat BMS dan *battery pack*, di mana hasil pemasangan komponen sesuai dengan desain PCB yang telah dirancang. Berikut keterangan tiap sistem yang telah digabungkan menjadi sistem BMS.

A: Trafo *flyback*

B: Sensor arus

F: Rangkaian *balancing*

G: MOSFET *cut-off*

C: Hi-Link 12 V

H: Sensor temperatur

D: Arduino nano

I: Pembagi tegangan

E: *Driver* TLP250J: *Battery pack*

4.3 Kalibrasi Pembaca Tegangan

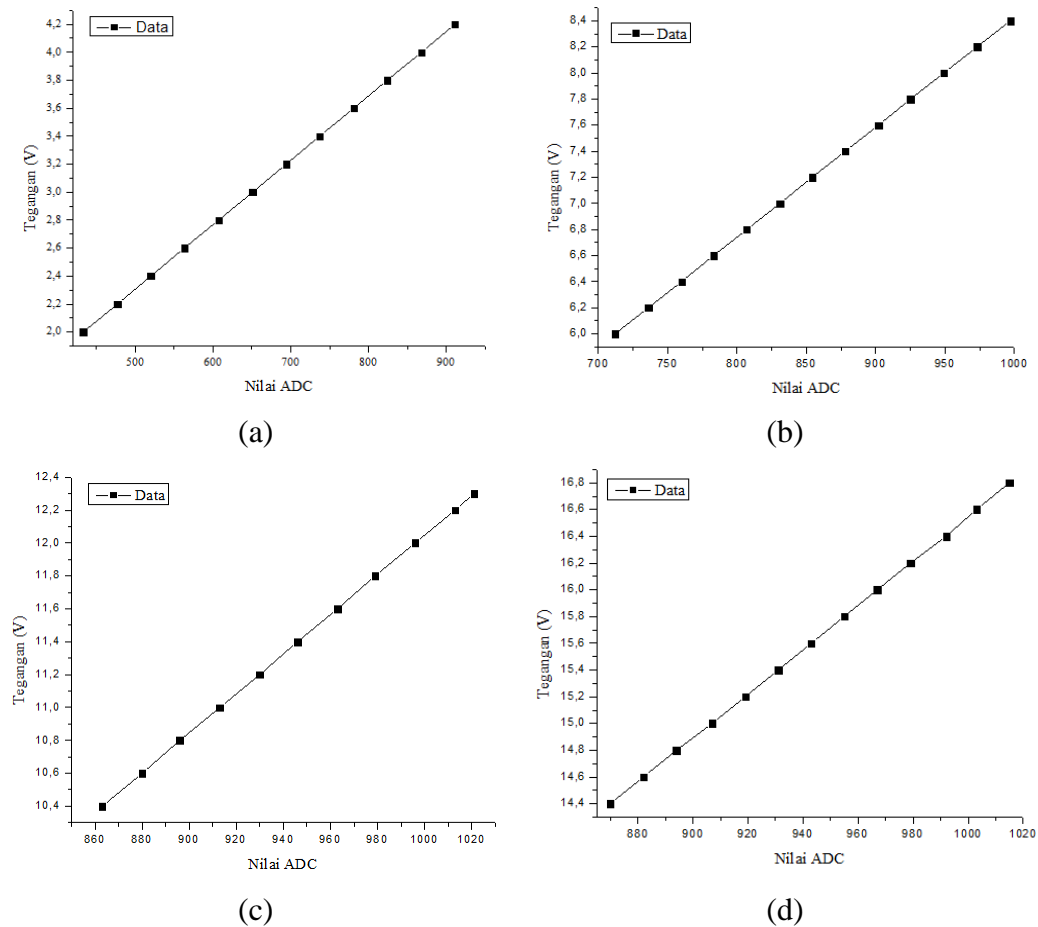
Pada BMS yang dibuat, terdiri dari empat buah pembaca tegangan untuk memonitor tegangan setiap sel baterai. Untuk memonitor tegangan sel baterai pertama tidak perlu menggunakan pembagi tegangan, karena besar tegangan maksimal baterai masih dalam *range* pembacaan tegangan oleh arduino. Akan tetapi, untuk sel kedua, ketiga dan keempat yang tersusun seri diperlukan pembagi tegangan untuk membatasi tegangan yang akan dibaca oleh arduino.

Kalibrasi pembaca tegangan harus dilakukan karena pembaca tegangan terdiri dari rangkaian resistor, bukan dalam bentuk modul sensor. Sehingga masih perlu dikalibrasi. Pengujian dilakukan dengan menggunakan rangkaian seperti pada gambar 3.13. Kalibrasi pembaca tegangan dilakukan dengan memberi tegangan masukan sebesar 2 V hingga 16.8 V berdasarkan dengan rating pembaca tegangan yang sudah dirancang pada gambar 3.7. Hasil pengukuran pembaca tegangan dicatat setiap kenaikan 0.2 V. Instrumen yang digunakan pada kalibrasi ini berupa catu daya RIGOL DP831. Berdasarkan pengujian tersebut didapat data kalibrasi tegangan berikut ini.

Tabel 4.1 Data Kalibrasi Pembaca Tegangan

Tegangan (V)	ADC	Tegangan (V)	ADC	Tegangan (V)	ADC	Tegangan (V)	ADC
2	433	6	712	10,4	868	14,4	874
2,2	477	6,2	736	10,6	885	14,6	886
2,4	520	6,4	760	10,8	902	14,8	899
2,6	563	6,6	783	11	918	15	910
2,8	607	6,8	807	11,2	935	15,2	923
3	650	7	831	11,4	951	15,4	935
3,2	694	7,2	854	11,6	968	15,6	948
3,4	737	7,4	878	11,8	985	15,8	960
3,6	781	7,6	902	12	1001	16	972
3,8	824	7,8	925	12,2	1018	16,2	984
4	868	8	949			16,4	997
4,2	911	8,2	973			16,6	1008
		8,4	997			16,8	1020

Dari hasil kalibrasi, dibuat grafik seperti sebagai berikut.



Gambar 4.5 Grafik Kalibrasi (a) Pembaca Tegangan 1 (b) Pembaca Tegangan 2
(c) Pembaca Tegangan 3 (d) Pembaca Tegangan 4

Dari grafik kalibrasi, didapatkan persamaan regresi yang nantinya digunakan dalam pemrograman alat. Berikut merupakan persamaan untuk pembaca tegangan 1 hingga 4.

$$Y1 = 0,00460249134965183 \times \text{ADC} + 0,00635873114236407$$

$$Y2 = 0,0084375578293622 \times \text{ADC} - 0,00891960082506937$$

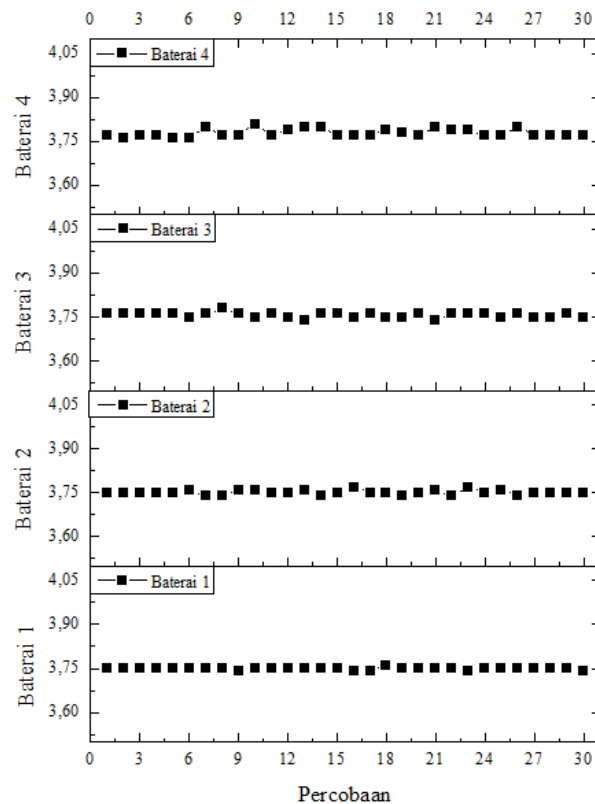
$$Y3 = 0,0120302268770092 \times \text{ADC} - 0,0457069677074138$$

$$Y4 = 0,0163726290026514 \times \text{ADC} + 0,0888231694880677$$

4.4 Pengujian Sistem *Monitoring*

Tujuan utama dari pengujian sistem *monitoring* adalah untuk mengetahui kinerja sensor. Pengujian sistem *monitoring* merupakan pengujian sensor pembaca tegangan tiap sel baterai yang menggunakan prinsip pembagi tegangan. Pengujian dilakukan tanpa menggunakan beban selama 30 menit untuk mengetahui tingkat

akurasi dan presisi pembacaan sensor. Berikut merupakan hasil pengujian sensor tanpa beban.



Gambar 4.6 Hasil Pengujian Sistem *Monitoring*

4.4.1 Pengujian Akurasi

Tingkat akurasi diwakili oleh *root mean square error* (RMSE). Semakin kecil nilai MSE, maka semakin bagus tingkat akurasinya. Berikut data yang didapat untuk uji akurasi.

Tabel 4.2 Uji Akurasi Sistem *Monitoring*

Perco- baan	Baterai 1			Baterai 2			Baterai 3			Baterai 4		
	V	V'	Error (%)	V	V'	Error (%)	V	V'	Error (%)	V	V'	Error (%)
1	3,75	3,73	0,0668	3,75	3,751	0,1812	3,76	3,76	0,2214	3,77	3,774	0,4348
2	3,75	3,73	0,0667	3,75	3,751	0,1811	3,76	3,76	0,2210	3,76	3,774	0,4313
3	3,75	3,73	0,0665	3,75	3,751	0,1811	3,76	3,76	0,2206	3,77	3,774	0,4134
4	3,75	3,73	0,0663	3,75	3,751	0,1810	3,76	3,76	0,2201	3,77	3,774	0,4098
5	3,75	3,73	0,0662	3,75	3,751	0,1810	3,76	3,76	0,2197	3,76	3,774	0,4061
6	3,75	3,73	0,0660	3,76	3,751	0,1809	3,75	3,76	0,2193	3,76	3,774	0,3870
7	3,75	3,73	0,0659	3,74	3,751	0,1691	3,76	3,76	0,2123	3,8	3,774	0,3668
8	3,75	3,73	0,0657	3,74	3,751	0,1524	3,78	3,76	0,2118	3,77	3,774	0,3346
9	3,74	3,73	0,0655	3,76	3,751	0,1335	3,76	3,76	0,1485	3,77	3,774	0,3300
10	3,75	3,73	0,0113	3,76	3,751	0,1170	3,75	3,76	0,1479	3,81	3,774	0,3255
11	3,75	3,73	0,0103	3,75	3,751	0,0978	3,76	3,76	0,1373	3,77	3,774	0,2409
12	3,75	3,73	0,0092	3,75	3,751	0,0977	3,75	3,76	0,1366	3,79	3,774	0,2346
13	3,75	3,73	0,0079	3,76	3,751	0,0976	3,74	3,76	0,1251	3,8	3,774	0,2197

Tabel 4.3 Uji Akurasi Sistem *Monitoring* (lanjutan)

14	3,75	3,73	0,0065	3,74	3,751	0,0735	3,76	3,76	0,0194	3,8	3,774	0,1601
15	3,75	3,73	0,0046	3,75	3,751	0,0045	3,76	3,76	0,0137	3,77	3,774	0,0547
Rata-rata	3,7493	3,73	0,0430	3,7506	3,751	0,1353	3,758	3,76	0,1650	3,778	3,774	0,3166
RMSE	0,165028215											

Pada pengujian akurasi pembaca tegangan, dilakukan pengambilan data sebanyak 15 kali dan dapat diamati bahwa nilai rata-rata error pada pembaca tegangan pada baterai 1 hingga 4 berturut-turut adalah 0,043 %, 0,135 %, 0,165 %, 0,316 %. dengan nilai RMSE dari keempat pembaca tegangan yaitu 0,1650 % sehingga dari pengujian ini pembaca tegangan memiliki akurasi sebesar 99,8349 %.

4.4.2 Pengujian Presisi

Uji tingkat presisi diwakili oleh *mean relative standard deviation* (MRSD) dari *repeability*. Semakin kecil nilai koefisien variasi setelah *repeability*, maka semakin bagus tingkat presisinya. Berikut data yang didapat untuk uji presisi.

Tabel 4.4 Uji Tingkat Presisi Sistem *Monitoring*

Pengujian	Baterai 1 (V)	Baterai 2 (V)	Baterai 3 (V)	Baterai 4 (V)
1	3,75	3,75	3,76	3,77
2	3,75	3,75	3,76	3,76
3	3,75	3,75	3,76	3,77
4	3,75	3,75	3,76	3,77
5	3,75	3,75	3,76	3,76
6	3,75	3,76	3,75	3,76
7	3,75	3,74	3,76	3,8
8	3,75	3,74	3,78	3,77
9	3,74	3,76	3,76	3,77
10	3,75	3,76	3,75	3,81
11	3,75	3,75	3,76	3,77
12	3,75	3,75	3,75	3,79
13	3,75	3,76	3,74	3,8
14	3,75	3,74	3,76	3,8
15	3,75	3,75	3,76	3,77
16	3,74	3,77	3,75	3,77
17	3,74	3,75	3,76	3,77
18	3,76	3,75	3,75	3,79
19	3,75	3,74	3,75	3,78
20	3,75	3,75	3,76	3,77
21	3,75	3,76	3,74	3,8
22	3,75	3,74	3,76	3,79
23	3,74	3,77	3,76	3,79
24	3,75	3,75	3,76	3,77
25	3,75	3,76	3,75	3,77
26	3,75	3,74	3,76	3,8
27	3,75	3,75	3,75	3,77
28	3,75	3,75	3,75	3,77
29	3,75	3,75	3,76	3,77

Tabel 4.5 Uji Tingkat Presisi Sistem *Monitoring* (lanjutan)

30	3,74	3,75	3,75	3,77
SD	0,004341725	0,008193072	0,007701321	0,01440386
RSD	0,11582051	0,218404278	0,205040495	0,38122266
MRSD	0,230121986			

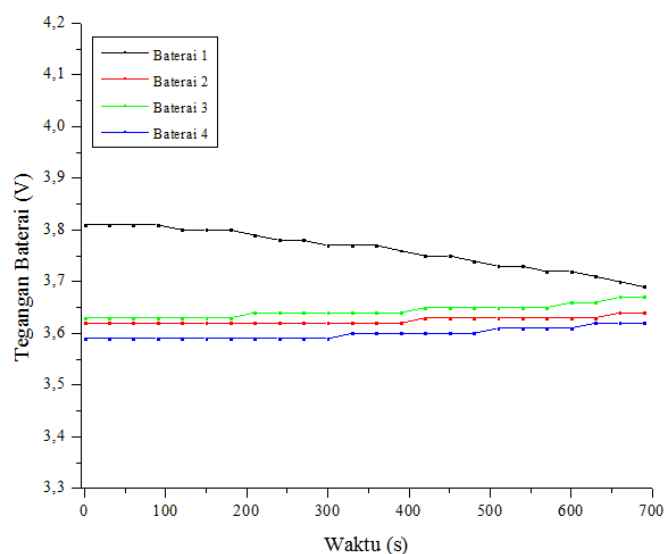
Dapat dilihat dari tabel 4.3, untuk 30 kali percobaan, dapat diamati bahwa nilai standar deviasi (SD) baterai 1, baterai 2, baterai 3 dan baterai 4 berturut-turut sebesar 0,0043 V, 0,0081 V, 0,0077 V dan 0,0144 V. Adapun nilai *relative standard deviation* (RSD) untuk keempat baterai berturut-turut adalah sebesar 0,1158 %, 0,2184 %, 0,2050 % dan 0,3812 %. Nilai *mean relative standard deviation* (MRSD) untuk keempat baterai adalah sebesar 0,2301 % atau dapat dikatakan nilai presisi sistem adalah sebesar 99,7699 %. Hasil ini menunjukkan bahwa alat ini memiliki tingkat presisi yang baik.

4.5 Pengujian Sistem *Balancing*

Pengujian sistem *balancing* dilakukan untuk mengetahui performa penyeimbang tegangan baterai pada BMS. Instrumen yang digunakan pada pengujian ini berupa catu daya RIGOL DP831 dan DC load Rigol DL3031, dan adapun pengujian dibagi menjadi 3 kasus. Berikut merupakan data hasil pengujian sistem *balancing*.

4.5.1 Kasus 1

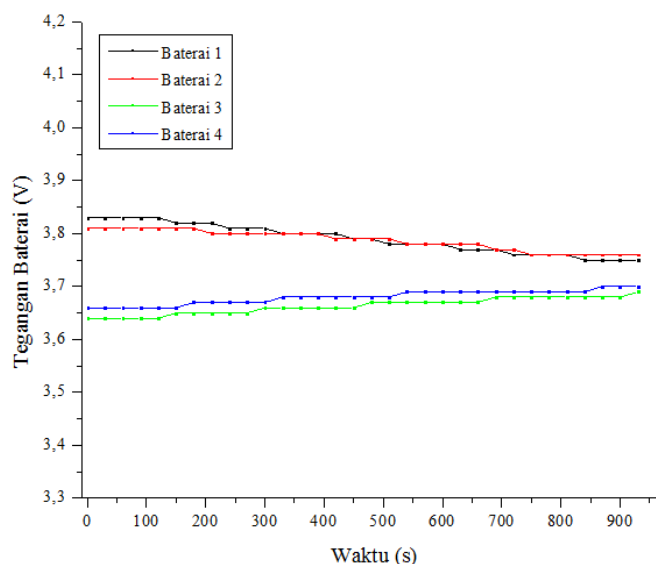
Kasus 1 dihadapkan pada tegangan salah satu sel mendekati nilai tertinggi dan tiga sel yang lain memiliki nilai tegangan yang lebih rendah. Berikut merupakan grafik hasil pengujian sistem *balancing* kasus 1.

Gambar 4.7 Pengujian Sistem *Balancing* Kasus 1

Nilai tegangan pada baterai 1 = 3,81 V, baterai 2 = 3,62 V, baterai 3 = 3,63 V dan baterai 4 = 3,59 V. Setelah proses *balancing* tegangan selama 700 detik, tegangan mengalami perubahan, yaitu baterai 1 = 3,69 V, baterai 2 = 3,64 V, baterai 3 = 3,67 V dan baterai 4 = 3,62 V. Tegangan total awal sebesar 14,65 V turun 0,03 V menjadi 14,62 V. Adapun nilai arus balancing sebesar 0,59 A dan menurun sejalan dengan waktu hingga tidak dapat melakukan balancing.

4.5.2 Kasus 2

Kasus 2 dihadapkan pada tegangan 2 sel berada mendekati nilai maksimal dan 2 sel lainnya dengan tegangan yang lebih rendah. Berikut merupakan grafik hasil pengujian sistem *balancing* kasus 2.

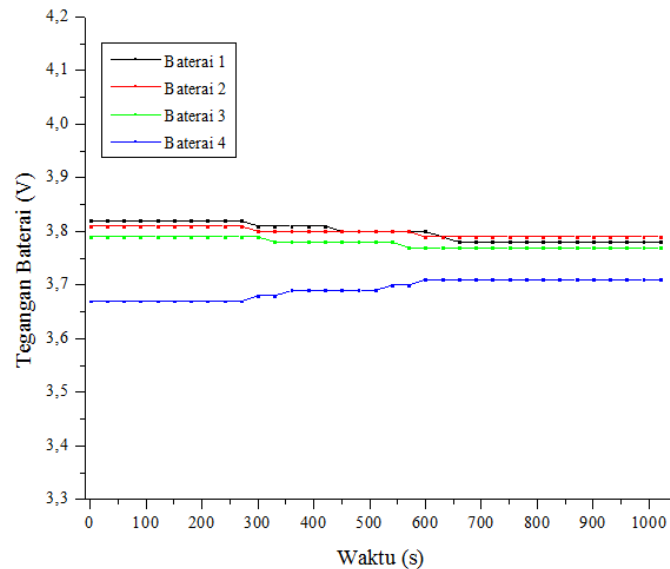


Gambar 4.8 Pengujian Sistem *Balancing* Kasus 2

Nilai tegangan pada baterai 1 = 3,83 V, baterai 2 = 3,81 V, baterai 3 = 3,64 V dan baterai 4 = 3,66 V. Setelah proses *balancing* tegangan selama 950 detik, tegangan mengalami perubahan, yaitu baterai 1 = 3,75 V, baterai 2 = 3,76 V, baterai 3 = 3,69 V dan baterai 4 = 3,70 V. Tegangan total awal sebesar 14,94 V turun 0,04 V menjadi 14,90 V. Adapun nilai arus balancing sebesar 0,59 A dan menurun sejalan dengan waktu hingga tidak dapat melakukan balancing.

4.5.3 Kasus 3

Dan kasus 3 dihadapkan pada tegangan 3 sel baterai dibuat mendekati nilai maksimal dan 1 sel lainnya memiliki tegangan yang lebih rendah. Berikut merupakan grafik hasil pengujian sistem *balancing* kasus 3.



Gambar 4.9 Pengujian Sistem *Balancing* Kasus 3

Nilai tegangan pada baterai 1 = 3,82 V, baterai 2 = 3,81 V, baterai 3 = 3,79 V dan baterai 4 = 3,67 V. Setelah proses *balancing* tegangan selama 1073 detik, tegangan mengalami perubahan, yaitu baterai 1 = 3,78 V, baterai 2 = 3,79 V, baterai 3 = 3,77 V dan baterai 4 = 3,71 V. Tegangan total awal sebesar 15,09 V turun 0,04 V menjadi 15,05 V. Adapun nilai arus *balancing* sebesar 0,59 A dan menurun sejalan dengan waktu hingga tidak dapat melakukan *balancing*.

4.6 Pengujian Sistem Proteksi

Pengujian sistem proteksi pada BMS dilakukan dengan tujuan untuk menguji *battery pack* dapat beroperasi dalam kondisi yang aman, sehingga terhindar dari kerusakan. MOSFET *cut-off* pada proteksi menggunakan MOSFET IRF540. Pengujian proteksi meliputi proteksi *over-charge*, *over-discharge*, *over-current*, dan *over-temperature*.

4.6.1 Proteksi *Over-Charge*

Proteksi *over-charge* dapat dilakukan seketika pemantauan tegangan mendeteksi adanya tegangan baterai yang melebihi batas tegangan lebih besar dari 4,20 V sehingga MOSFET *cut-off* menjadi ON.

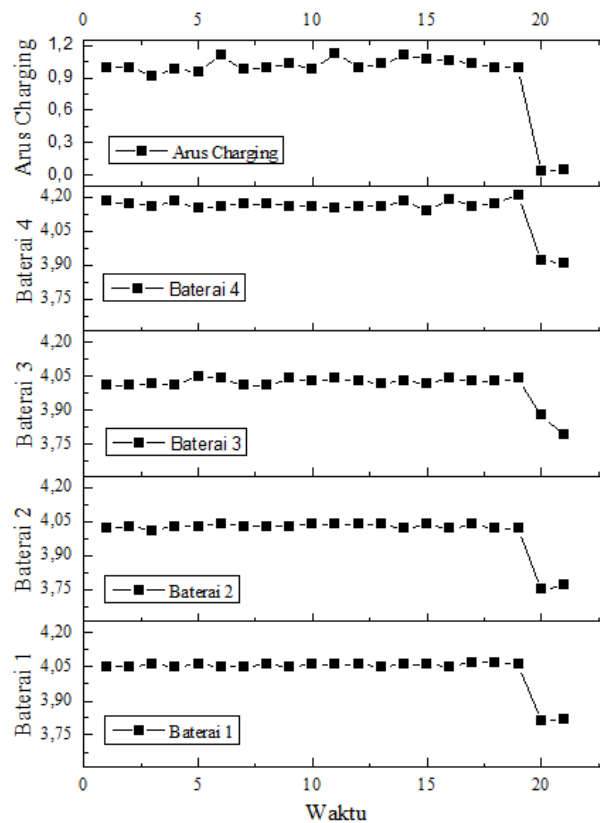
Tabel 4.6 Data Pengujian Proteksi *Over-Charge*

Baterai 1 (V)	Baterai 2 (V)	Baterai 3 (V)	Baterai 4 (V)	Arus Charging (I)
4.05	4.02	4.01	4.18	1.00

Tabel 4.7 Data Pengujian Proteksi *Over-Charge* (lanjutan)

4.05	4.03	4.01	4.17	1.00
4.06	4.01	4.02	4.16	0.92
4.05	4.03	4.01	4.18	0.98
4.06	4.03	4.05	4.15	0.95
4.05	4.04	4.04	4.16	1.11
4.05	4.03	4.01	4.17	0.98
4.06	4.03	4.01	4.17	1.00
4.05	4.03	4.04	4.16	1.03
4.06	4.04	4.03	4.16	0.98
4.06	4.04	4.04	4.15	1.13
4.06	4.04	4.03	4.16	1.00
4.05	4.04	4.02	4.16	1.03
4.06	4.02	4.03	4.18	1.11
4.06	4.04	4.02	4.14	1.08
4.05	4.02	4.04	4.19	1.06
4.07	4.04	4.03	4.16	1.03
4.07	4.02	4.03	4.17	1.00
4.06	4.02	4.04	4.21	1.00
3.81	3.75	3.88	3.92	0.03
3.82	3.77	3.79	3.91	0.05

Berdasarkan data pada tabel 4.6, kemudian dibuat grafik menggunakan aplikasi OriginLab sehingga dapat dianalisis. Berikut merupakan grafik yang didapatkan.

Gambar 4.10 Grafik Proteksi *Over-Charge*

Berdasarkan gambar 4.12 diketahui hasil pengujian proteksi *over-charge* telah sesuai dengan perancangan dan dapat melakukan pemutusan rangkaian. Sistem *monitoring* mendeteksi salah satu tegangan baterai yang melebihi batas atas 4,20 V, sehingga MOSFET *cut-off* akan aktif dengan indikator arus *charging* menjadi 0 A.

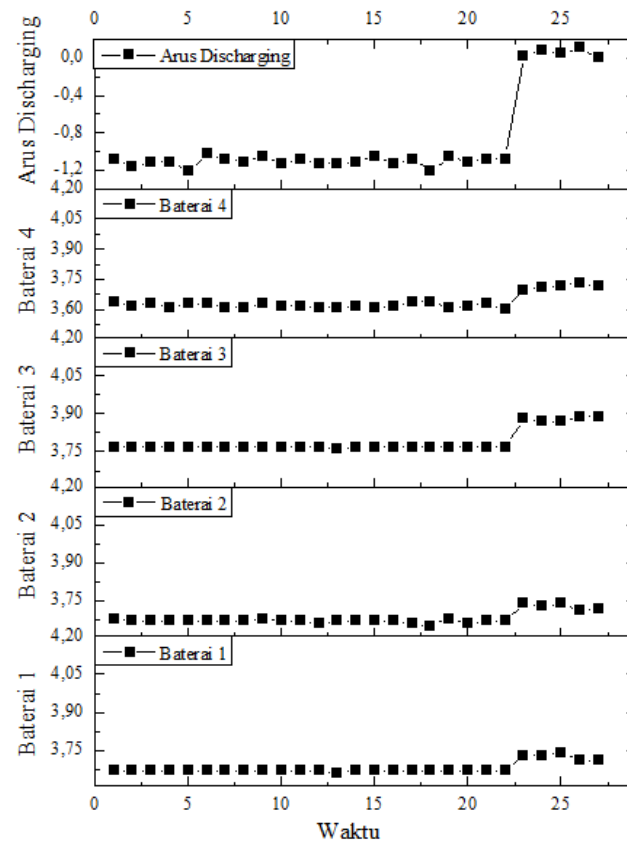
4.6.2 Proteksi *Over-Discharge*

Proteksi *over-discharge* dapat dilakukan seketika pemantauan tegangan mendeteksi adanya tegangan baterai yang melebihi batas kurang dari 3,60 V sehingga MOSFET *cut-off* menjadi ON.

Tabel 4.8 Data Pengujian Proteksi *Over-Discharge*

Baterai 1 (V)	Baterai 2 (V)	Baterai 3 (V)	Baterai 4 (V)	Arus <i>Discharging</i> (I)
3.67	3.68	3.77	3.64	-1.08
3.67	3.67	3.77	3.62	-1.16
3.67	3.67	3.77	3.63	-1.11
3.67	3.67	3.77	3.61	-1.11
3.67	3.67	3.77	3.63	-1.21
3.67	3.67	3.77	3.63	-1.03
3.67	3.67	3.77	3.61	-1.08
3.67	3.67	3.77	3.61	-1.11
3.67	3.68	3.77	3.63	-1.06
3.67	3.67	3.77	3.62	-1.13
3.67	3.67	3.77	3.62	-1.08
3.67	3.66	3.77	3.61	-1.13
3.66	3.67	3.76	3.61	-1.13
3.67	3.67	3.77	3.62	-1.11
3.67	3.67	3.77	3.61	-1.06
3.67	3.67	3.77	3.62	-1.13
3.67	3.66	3.77	3.64	-1.08
3.67	3.65	3.77	3.64	-1.21
3.67	3.68	3.77	3.61	-1.06
3.67	3.66	3.77	3.62	-1.11
3.67	3.67	3.77	3.63	-1.08
3.67	3.67	3.77	3.60	-1.08
3.73	3.74	3.88	3.70	0.03
3.73	3.73	3.87	3.71	0.08
3.74	3.74	3.87	3.72	0.05
3.71	3.71	3.89	3.73	0.11
3.71	3.72	3.89	3.72	0.00

Berdasarkan data pada tabel 4.7, kemudian dibuat grafik menggunakan aplikasi OriginLab sehingga dapat dianalisis. Berikut merupakan grafik yang didapatkan.

Gambar 4.11 Grafik Proteksi *Over-Discharge*

Berdasarkan gambar 4.13 diketahui hasil pengujian proteksi *over-discharge* telah sesuai dengan perancangan dan dapat melakukan pemutusan rangkaian. Sistem *monitoring* mendeteksi salah satu tegangan baterai yang melebihi batas bawah 3,60 V, sehingga MOSFET *cut-off* akan aktif dengan indikator arus *discharging* menjadi 0 A.

4.6.3 Proteksi *Over-Current*

Proteksi *over-current* dapat dilakukan seketika pemantauan arus mendeteksi adanya arus *charging* atau *discharging* baterai yang melebihi batas lebih dari 3,0 A sehingga MOSFET *cut-off* menjadi ON.

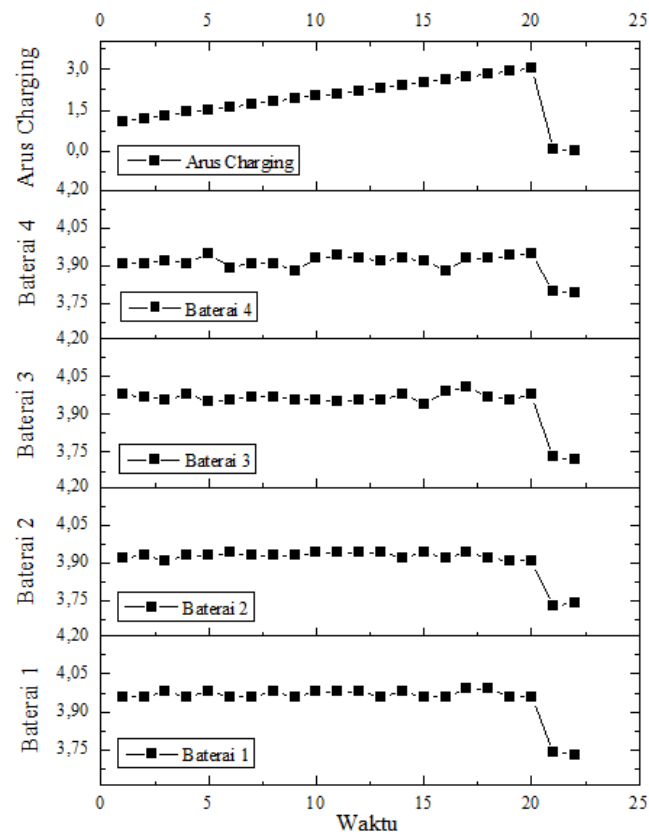
Tabel 4.9 Data Pengujian Proteksi *Over-Current*

Baterai 1 (V)	Baterai 2 (V)	Baterai 3 (V)	Baterai 4 (V)	Arus Charging (I)
3.96	3.92	3.98	3.91	1.10
3.96	3.93	3.97	3.91	1.21
3.98	3.91	3.96	3.92	1.32
3.96	3.93	3.98	3.91	1.45
3.98	3.93	3.95	3.95	1.53
3.96	3.94	3.96	3.89	1.61
3.96	3.93	3.97	3.91	1.74

Tabel 4.10 Data Pengujian Proteksi *Over-Current* (lanjutan)

3.98	3.93	3.97	3.91	1.82
3.96	3.93	3.96	3.88	1.95
3.98	3.94	3.96	3.93	2.03
3.98	3.94	3.95	3.94	2.11
3.98	3.94	3.96	3.93	2.21
3.96	3.94	3.96	3.92	2.32
3.98	3.92	3.98	3.93	2.42
3.96	3.94	3.94	3.92	2.53
3.96	3.92	3.99	3.88	2.61
3.99	3.94	4.01	3.93	2.71
3.99	3.92	3.97	3.93	2.82
3.96	3.91	3.96	3.94	2.93
3.96	3.91	3.98	3.95	3.03
3.74	3.73	3.73	3.80	0.08
3.73	3.74	3.72	3.79	0.03

Berdasarkan data pada tabel 4.8, kemudian dibuat grafik menggunakan aplikasi OriginLab sehingga dapat dianalisis. Berikut merupakan grafik yang didapatkan.

Gambar 4.12 Grafik Proteksi *Over-Current*

Berdasarkan gambar 4.14 diketahui hasil pengujian proteksi *over-current* telah sesuai dengan perancangan dan dapat melakukan pemutusan rangkaian. Sensor arus mendeteksi arus *charging* yang melebihi batas atas 3,00 A, sehingga MOSFET *cut-off* akan aktif dengan indikator arus *charging* menjadi 0 A.

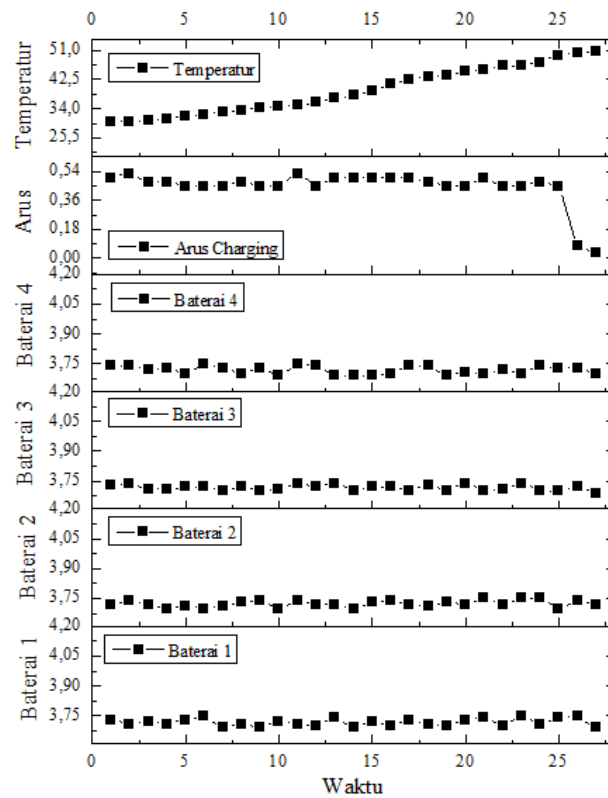
4.6.4 Proteksi *Over-Temperature*

Proteksi *over-temperature* dapat dilakukan seketika pemantauan temperatur mendeteksi adanya temperatur baterai yang melebihi batas 50°C sehingga MOSFET *cut-off* menjadi ON.

Tabel 4.11 Data Pengujian Proteksi *Over-Temperature*

Baterai 1 (V)	Baterai 2 (V)	Baterai 3 (V)	Baterai 4 (V)	Arus <i>Charging</i> (I)	Temperatur (°C)
3,73	3,72	3,73	3,74	0,501	30
3,71	3,74	3,74	3,74	0,528	30,37
3,72	3,72	3,71	3,72	0,475	30,75
3,71	3,7	3,71	3,73	0,475	31,19
3,73	3,71	3,72	3,7	0,449	31,75
3,75	3,7	3,72	3,75	0,449	32,38
3,69	3,71	3,7	3,73	0,449	32,88
3,71	3,73	3,72	3,7	0,475	33,63
3,69	3,74	3,7	3,73	0,449	34,19
3,72	3,7	3,71	3,69	0,449	34,63
3,71	3,74	3,74	3,75	0,528	34,88
3,7	3,72	3,72	3,74	0,449	35,88
3,74	3,72	3,74	3,69	0,501	36,94
3,69	3,7	3,7	3,69	0,501	37,75
3,72	3,73	3,72	3,69	0,501	39,06
3,7	3,74	3,72	3,7	0,501	41,06
3,73	3,72	3,7	3,74	0,501	42,5
3,71	3,71	3,73	3,74	0,475	43,25
3,7	3,73	3,7	3,69	0,449	43,81
3,73	3,72	3,74	3,71	0,449	44,69
3,74	3,75	3,7	3,7	0,501	45,38
3,7	3,72	3,71	3,72	0,449	46,38
3,75	3,75	3,74	3,7	0,449	46,44
3,71	3,75	3,7	3,74	0,475	47,38
3,74	3,7	3,7	3,73	0,449	49,5
3,75	3,74	3,72	3,73	0,08	50,06
3,69	3,72	3,69	3,7	0,03	50,69

Berdasarkan data pada tabel 4.9, kemudian dibuat grafik menggunakan aplikasi OriginLab sehingga dapat dianalisis. Berikut merupakan grafik yang didapatkan.



Gambar 4.13 Grafik Proteksi *Over-Temperature*

Berdasarkan gambar 4.15 diketahui hasil pengujian proteksi *over-temperature* telah sesuai dengan perancangan dan dapat melakukan pemutusan rangkaian. Sensor temperatur mendeteksi temperatur yang melebihi batas atas 50°C, sehingga MOSFET *cut-off* akan aktif dengan indikator arus *charging* menjadi 0 A.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini membahas mengenai kesimpulan dan saran, sebagai hasil dan analisis pembuatan BMS dengan *active balancing*. Kesimpulan disusun berdasarkan tujuan dari penelitian ini. Kesimpulan didapatkan berdasarkan analisis data eksperimen yang telah dilakukan. Saran dibuat berdasarkan beberapa kendala yang dialami selama penelitian.

5.1 Kesimpulan

Dalam penelitian yang telah dilakukan pembuatan BMS *active balancing* menggunakan topologi *flyback converter*. Setelah dilakukan pengujian dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. BMS yang dirancang memiliki tiga fitur, yaitu *monitoring*, *balancing* dan proteksi. Pada fitur *monitoring*, komponen yang digunakan antara lain pembaca tegangan yang menggunakan prinsip pembagi tegangan, sensor arus ACS712-5A, dan sensor temperatur DS18B20. Pada fitur *balancing*, topologi yang digunakan adalah *flyback converter*, di mana konversi tegangan baterai yang lebih tinggi menuju tegangan baterai yang lebih rendah melalui *switching* transformator. Dan pada fitur proteksi, pemutus rangkaian menggunakan MOSFET IRF540. Proteksi ini mampu melindungi *battery pack* dari operasi baterai yang tidak aman, seperti *over-charge*, *over-discharge*, *over-current* dan *over-temperature*.
2. BMS telah diimplementasikan dan diuji dalam kondisi sesuai dengan operasi *battery pack* yang aman, dengan memperhatikan variasi tegangan, arus dan temperatur.
3. Hasil pengujian menunjukkan performa BMS untuk *monitoring* tegangan memiliki akurasi sebesar 99,8349 % dan nilai presisi sebesar 99,7699 %. Dalam fitur *balancing*, mampu melakukan penyeimbangan tegangan hingga perbedaan tegangan antar baterai sebesar 0,08 V, dan lama waktu penyeimbangan tegangan dipengaruhi oleh besarnya perbedaan tegangan antar baterai dan banyaknya baterai yang memiliki tegangan berbeda. Adapun fitur proteksi da-

pat berfungsi dengan baik untuk mengatasi permasalahan seperti *over-charge*, *over-discharge*, *over-current* dan *over-temperature*.

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan dapat diambil beberapa saran sebagai berikut.

1. Sensor tegangan yang digunakan sebaiknya menggunakan Op-Amp sebagai *differential amplifier*, dikarenakan akurasi pengukuran dan tingkat kestabilan yang dihasilkan lebih tinggi dibandingkan dengan sensor tegangan yang menggunakan prinsip pembagi tegangan.
2. Pembuatan trafo *flyback* yang lebih rapi atau menggunakan mesin, sehingga meningkatkan efisiensi transfer energi.
3. Pada *flyback converter* seharusnya menggunakan rangkaian *snubber* sebagai *driver flyback* dengan tujuan untuk memodifikasi bentuk gelombang peralihan (*switching waveforms*) sehingga kerugian daya dapat dikurangi.
4. Pembuatan PCB bisa menggunakan komponen SMD sehingga ukuran dari PCB dapat diperkecil.
5. Perlu ditambahkan LCD display untuk menampilkan data.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] E. Uherek, T. Halenka, J. Borken-Kleefeld, Y. Balkanskid, T. Berntsen, C. Borrego, M. Gauss, P. Hoor, K. Juda-Rezler, J. Lelieveld, D. Melas, K. Rypdal dan S. Schmid, "Transport Impact on Atmosphere and Climate: Land Transport," *Astmospheric Environment*, vol. 44, no. 37, pp. 4772-4816, 2010.
- [2] A. Tukker, "Leapfrogging Into The Future: Developing for Sustainability," *Innovation and Sustainable Development*, vol. 1, no. 2, pp. 65-84, 2005.
- [3] J. Wesseling, J. Faber dan M. Hekkert, "How Competitive Forces Sustain Electric Vehicle Development," *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 81, no. 13, pp. 154-164, 2014.
- [4] Whittingham, "Electrical Energy Storage and Intercalation Chemistry," *Science*, vol. 192, no. 4244, pp. 1126-1127, 1976.
- [5] F. Yang, Y. Zing, D. Wang dan K.-L. Tsui, "A Comparative Study of Three Model Based Algorithms for Estimating State of Charge of Lithium Ion Batteries Under a New Combined Dynamic Loading Profile," *Applied Energy*, vol. 164, no. 37, pp. 387-399, 2016.
- [6] L. Lu, X. Han, J. Hua, J. Hua dan M. Ouyang, "A Review on the Key Issues for Lithium-Ion Battery Management in Electric Vehicles," *Journal of Power Source*, vol. 226, no. 39, pp. 272-288, 2013.
- [7] M. Daowd, M. Antoine, N. Omar, P. L. P. V. D. Bossche dan J. V. Mierlo, "Battery Management System-Balancing Modularization Based on a Single Switched Capacitor and Bi-Directional DC/DC Converter with the Auxiliary Battery," *Energies*, vol. 7, no. 5, pp. 2897-2937, 2014.
- [8] J. Cao, N. Schofield dan A. Emadi, "Battery Balancing Methods: A Comprehensive Methods," dalam *Vehicle Power and Propulsion Conference*, China, 2008.
- [9] W. F. Bentley, "Cell Balancing Considerations fo Lithium-Ion Battery Systems," dalam *12th Annual Battery Conference on Applications and Advances*, Long Beach, 1997.

- [10] M. Daowd, N. Omar, P. V. D. Bossche dan J. V. Mierlo, "Passive and Active Battery Balancing Comparison Based on MatLab Simulation," dalam *Vehicle Power and Propulsion Conference*, Chicago, 2011.
- [11] K. D. U. Kusumaputri, Rancang Bangun Sistem Manajemen Baterai (BMS) Untuk Baterai Lithium Ion, Surakarta: Universitas Sebelas Maret, 2019.
- [12] T. Subekti, H. Suryoatmojo dan S. Anam, "Rancang Bangun Equalizer Tegangan Sel Menggunakan Flyback Konverter Untuk Baterai Li-Ion Terhubung Seri," *Jurnal Teknik ITS*, vol. 5, no. 2, pp. 142-148, 2016.
- [13] H. J. Bergveld, Battery Management Systems Design by Modelling, New York: Springer, 2001.
- [14] M. Rico-Secades, P. Quintana-Barcia, E. L. Corominas, A. J. Calleja dan J. Ribas, "Active Battery Cell Equalization Using a Flyback Converter with Current Mode Control," dalam *14th International Conference on Power Electronics (CIEP)*, Puebla, 2018.
- [15] C. Karnjanapiboon, K. Jirasereeamornkul dan V. Monyakul, "The High Efficiency Charge Equalized System for Serially Connected VRLA Battery String using Synchronous Flyback Converter," dalam *International Power Electronics Conference (IPEC)*, Sapporo, 2010.
- [16] Y. Shang, B. Xia, C. Zhang, N. Cui, J. Yang dan C. C. Mi, "An Automatic Equalizer Based on Forward-Flyback Converter for Series-Connected Battery Strings," *IEEE Transactions On Industrial Electronics*, vol. 64, no. 7, pp. 5380-5391, 2017.
- [17] H. Rahimi-Eichi, U. Ojha, F. Baronti dan M. Y. Chow, "Battery Management System: An Overview of Its Application in the Smart Grid and Electric Vehicles," *IEEE Industrial Electronic Magazine*, vol. 7, no. 2, pp. 4-16, 2013.
- [18] M. Brandl, H. Gall, M. Wenger, V. Lorentz, M. Giegerich, F. Baronti, G. Fatenchi, L. Fanucci, R. Roncella, R. Saletti, S. Saponara, A. Thaler, M. Cifrain dan W. Prochazka, "Batteries and Battery Management Systems for Electric Vehicles," dalam *Design, Automation & Test in Europe Conference and Exhibition (DATE)*, Dresden, 2012.

- [19] X. Chen, W. Shen, T. T. Vo, Z. Cao dan A. Kapoor, "An Overview of Lithium Ion Batteries for Electric Vehicles," dalam *International Power and Energy Conference*, Ho Chi Minh, 2012.
- [20] W. Chen, J. Liang, Z. Yang dan G. Li, "A Review of Lithium-Ion Battery for Electric Vehicle Applications and Beyond," dalam *10th International Conference on Applied Energy (ICAE)*, Hong Kong, 2019.
- [21] E. Marulitua, Rancang Bangun Flyback Regulator Untuk Mencatu Sistem Penyaklaran IGBT pada Inverter, Depok: Universitas Indonesia, 2011.
- [22] H. Muchtar dan A. Hidayat, "Implementasi Wavecom Dalam Monitoring Beban Listrik Berbasis Mikrokontroler," *Jurnal Teknologi*, vol. 9, no. 1, pp. 1-5, 2017.
- [23] A. F. Farizy, D. A. Asfani dan Soedibjo, "Desain Sistem Monitoring State of Charge Baterai pada Charging Station Mobil Listrik Berbasis Fuzzy Logic dengan Mempertimbangkan Temperatur," *Jurnal Teknik ITS*, vol. 5, no. 2, pp. 278-282, 2016.
- [24] A. Fitriandi, E. Komalasari dan H. Gusmedi, "Rancang Bangun Alat Monitoring Arus dan Tegangan Berbasis Mikrokontroler dengan SMS Gateway," *Jurnal Rekayasa dan Teknologi Elektro*, vol. 10, no. 2, pp. 87-98, 2016.
- [25] B. G. Melipurbowo, "Pengukuran Daya Listrik Real Time dengan Menggunakan Sensor Arus ACS712," *Orbith*, vol. 12, no. 1, pp. 17-23, 2016.
- [26] E. Nurazizah, M. Ramdhani dan A. Rizal, "Rancang Bangun Termometer Digital Berbasis Sensor DS18B20 Untuk Penyandang Tunanetra," *e-Proceeding of Engineering*, vol. 4, no. 3, pp. 3294-3301, 2017.