



TUGAS AKHIR - EE 184801

**Desain dan Implementasi *Constant Current Control DC Electronic Load* dengan Topologi *Bidirectional Buck-Boost Converter* untuk Pengujian Karakteristik Baterai *Lead Acid***

Aprilia Dini Rosani  
NRP 0711154000031

Dosen Pembimbing  
Dedet Candra Riawan, S.T., M.Eng., Ph.D.  
Prof. Dr. Imam Robandi, MT.  
Dr. Muhammad Rivai, ST., MT.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO  
Fakultas Teknologi Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2019





FINAL PROJECT - EE 184801

Design and Implementation of Constant Current Control DC Electronic Load Based on Bidirectional Buck Boost Converter Topology for Lead Acid Battery Characteristics Testing

Aprilia Dini Rosani  
NRP 0711144000027

Advisors  
Dedet Candra Riawan, S.T.,M.Eng., Ph.D.  
Prof. Dr. Imam Robandi, MT.  
Dr. Muhammad Rivai, ST., MT.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING  
Faculty of Electrical Technology  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2019



## PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tugas akhir saya dengan judul "**DESAIN DAN IMPLEMENTASI *CONSTANT CURRENT CONTROL DC ELECTRONIC LOAD DENGAN TOPOLOGI BIDIRECTIONAL BUCK-BOOST CONVERTER UNTUK PENGUJIAN KARAKTERISTIK BATERAI LEAD ACID***" adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

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

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

Surabaya, 27 Mei 2019



APRIILIA DINI ROSANI  
0711154000031



**DESAIN DAN IMPLEMENTASI CONSTANT  
CURRENT CONTROL DC ELECTRONIC LOAD  
DENGAN TOPOLOGI BIDIRECTIONAL BUCK-  
BOOST CONVERTER UNTUK PENGUJIAN  
KARAKTERISTIK BATERAI LEAD ACID**

**TUGAS AKHIR**  
Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan Untuk Memperoleh  
Gelar Sarjana Teknik  
Pada  
Bidang Studi Sistem Tenaga  
Departemen Teknik Elektro  
Fakultas Teknologi Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

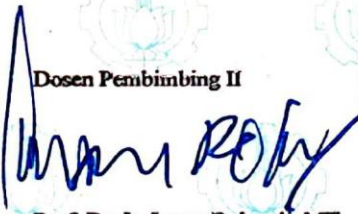
Menyetujui :

Dosen Pembimbing I



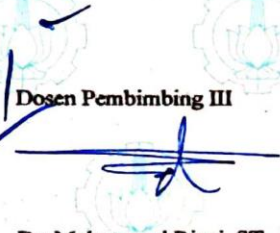
Candra Riawan, ST., M.Eng., Ph.D.  
NIP. 197311192000031001

Dosen Pembimbing II



Prof. Dr. Ir. Imam Robandi, MT.  
NIP. 196308171990031001

Dosen Pembimbing III



Dr. Muhammed Rivai, ST., MT.  
NIP. 196904261994031003







# DESAIN DAN IMPLEMENTASI CONSTANT CURRENT CONTROL DC ELECTRONIC LOAD DENGAN TOPOLOGI BIDIRECTIONAL BUCK-BOOST CONVERTER UNTUK PENGUJIAN KARAKTERISTIK BATERAI LEAD ACID

Aprilia Dini Rosani  
0711154000031

Pembimbing I: Dedet Candra Riawan, S.T.,M.Eng., Ph.D.  
Pembimbing II: Prof. Dr. Imam Robandi, MT.  
. Pembimbing III: Dr. Muhammad Rivai, ST., MT.

## ABSTRAK

Kebutuhan baterai akan terus meningkat seiring dengan perkembangan teknologi. Untuk mengevaluasi kinerja dari suatu baterai, baik pihak produsen maupun konsumen perlu melakukan pengujian. Metode yang paling umum adalah metode pembebanan konstan, yaitu baterai di *charge* dan *discharge* pada *C-rating* tertentu kemudian dievaluasi karakteristiknya. Akan tetapi penggunaan resistor sebagai alat pengujian tidak fleksibel dan menimbulkan rugi daya yang tinggi sehingga perlu digantikan dengan rangkaian *DC electronic load*. Salah satu parameter yang harus diketahui dalam pengoperasian baterai adalah *state of charge* (SoC) yaitu perbandingan energi yang tersisa dengan energi maksimumnya. Metode yang paling umum digunakan untuk mengestimasi SoC adalah *coulomb counting* dan *open circuit voltage*. Pada tugas akhir ini dirancang sebuah alat pengujian baterai menggunakan metode *constant current* untuk mendapat kurva karakteristik *discharge* baterai dan perhitungan estimasi SoC menggunakan metode *coulomb counting* dan OCV. Pada implementasinya digunakan topologi konverter *bidirectional buck-boost* yang memiliki efisiensi sebesar 82,98% pada mode operasi boost dan 83,21% pada mode operasi buck.

**Kata Kunci:** Baterai, *coulomb counting*, *electronic load*, Konverter *bidirectional buck-boost*, *state of charge*



# **DESIGN AND IMPLEMENTATION OF CONSTANT CURRENT CONTROL DC ELECTRONIC LOAD BASED ON BIDIRECTIONAL BUCK BOOST CONVERTER TOPOLOGY FOR LEAD ACID BATTERY CHARACTERISTICS TESTING**

Aprilia Dini Rosani  
0711154000031

Supervisor I: Dedet Candra Riawan, S.T.,M.Eng., Ph.D.  
Supervisor II: Prof. Dr. Imam Robandi, MT.  
Supervisor III: Dr. Muhammad Rivai, ST., MT.

## **ABSTRACT**

Battery demand increases along with technological developments. Both the manufacturers and the consumers need to do the testing if they want to evaluate the battery performance. The most common method for testing the batteries is by constant loading. Using this method means that the battery is charged and discharged on a certain C-rating and then evaluated its characteristics. However, the use of resistor banks as a testing procedus is not flexible and suffer from high power losses. This conventional method needs to be replaced by a DC electronic loads. One of the parameters that must be known in battery management is State of Charge (SoC). SoC is the ratio of the remaining energy with its maximum energy. The most commonly used method for estimating SoC is coulomb counting and open circuit voltage. This paper presents a battery testing using the constant current method using bidirectional buck-boost converter topology to obtain the battery characteristic curve and calculation of the SoC using the coulomb counting method and OCV. The experimental results show that bidirectional buck-boost converter topology has efficiency of 82.98% in boost operating mode and 83.21% in buck operation mode.

**Keywords:** Battery, coulomb counting, electronic load, bidirectional buck-boost converter, State of Charge



## KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, puji syukur tiada terkira penulis panjatkan kepada Allah. atas bantuan dan rahmat-Nya, maka saya dapat menyelesaikan buku penelitian ini dengan judul “desain dan implementasi *constant current control dc electronic load* dengan topologi *bidirectional buck-boost converter* untuk pengujian karakteristik baterai *lead acid*”.

Selama pengerjaan Tugas Akhir ini banyak pihak-pihak yang membantu baik berupa doa, bimbingan dan jasa dalam menyelesaikan Penelitian ini dan tidak lupa penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada :

1. Kedua orang tua penulis yang senantiasa memberi doa, semangat dan dukungan moral dan materiil sehingga penelitian ini dapat terselesaikan dengan tepat waktu.
2. Bapak Dedet Candra Riawan, S.T.,M.Eng., Ph.D, Prof. Dr. Imam Robandi, MT., dan Bapak Dr. Muhammad Rivai, ST., MT. selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan masukan serta arahan sehingga buku penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.
3. Keluarga Asisten Laboratorium Konversi Energi Listrik yang menemani dalam suka dan duka: Wahyu, Sebas, Itang, Rachman, Dwi Sigit, Sigit Army, Furqon, Devi, Nina, Rana, Danis, Iwe, serta asisten Asisten Laboratorium Konversi Energi Listrik angkatan 2016 dan 2014.
4. Dan semua pihak yang tak bisa disebutkan satu-persatu.

Penulis mengucapkan terima kasih atas segala doa dan dukungan yang telah diberikan selama ini. Penulis pun memohon maaf atas segala kekurangan pada penelitian ini. Semoga penelitian ini dapat memberikan informasi dan manfaat bagi mahasiswa Teknik Elektro ITS pada khususnya dan seluruh pembaca pada umumnya.

Surabaya, Juli 2019

Aprilia Dini Rosani



# DAFTAR ISI

<b>PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR .....</b>	<b>v</b>
<b>ABSTRAK.....</b>	<b>ix</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>xi</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>xv</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>xvii</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xix</b>
<b>BAB 1</b>	
<b>PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Perumusan Masalah.....	2
1.3. Tujuan .....	2
1.4. Batasan Masalah.....	3
1.5. Metodologi.....	3
1.6. Sistematika Penulisan .....	4
1.7. Relevansi.....	5
<b>BAB 2</b>	
<b>BATERAI ASAM TIMBAL DAN KONVERTER</b>	
<b><i>BIDIRECTIONAL BUCK-BOOST</i>.....</b>	<b>7</b>
2.1. Baterai Asam Timbal.....	7
2.1.1 Konstruksi baterai asam timbal.....	8
2.1.2 Reaksi Kimia .....	9
2.2. Parameter Baterai Asam Timbal .....	10
2.2.1 Tegangan Baterai .....	10
2.2.2 Kapasitas Baterai .....	10
2.2.3 <i>C-Rating</i> .....	11
2.3. Penentuan nilai <i>State of Charge (SoC)</i> Baterai .....	12
2.3.1 Metode <i>Coulomb Counting</i> .....	13
2.3.2 Metode <i>Open Circuit Voltage (OCV)</i> .....	14
2.4. <i>DC Electronic Load</i> .....	15
2.5. Konverter <i>Bidirectional Buck-Boost</i> .....	16
2.5.1 Analisa Ketika Mode <i>Boost</i> .....	17
2.5.2 Analisa Ketika Mode <i>Buck</i> .....	20
2.5.3 Penurunan Parameter Komponen .....	24
2.5.4 <i>Current Mode Control</i> .....	24
2.5.5 Filter <i>Moving Average</i> .....	26

<b>BAB 3 DESAIN, SIMULASI, DAN IMPLEMENTASI.....</b>	<b>27</b>
3.1 Perancangan Sistem .....	27
3.2 Prosedur Pengujian .....	28
3.2.1 Prosedur Pengosongan Baterai.....	29
3.2.2 Prosedur Pengisian Baterai .....	30
3.3 Parameter Baterai VRLA .....	30
3.4 Desain Konverter <i>Bidirectional Buck-Boost</i> .....	31
3.4.1 Penentuan Nilai Resistansi Beban.....	32
3.4.2 Penentuan Nilai Induktor $L_m$ .....	32
3.4.3 Penentuan Nilai Kapasitor $C_L$ dan $C_H$ .....	34
3.4.4 Penentuan MOSFET.....	35
3.5 Simulasi Konverter pada Mode Tunak .....	35
3.6 Simulasi Konverter pada Mode Dinamis .....	39
3.7 Implementasi Konverter.....	40
<b>BAB 4 HASIL PENGUJIAN DAN ANALISA DATA .....</b>	<b>43</b>
4.1 Pengujian Sensor .....	43
4.1.1 Pengujian Sensor Arus.....	43
4.1.2 Pengujian Pembagi Tegangan.....	44
4.2 Pengujian Konverter <i>Bidirectional Buck-Boost</i> .....	45
4.2.1 Pengujian Pensakelaran .....	46
4.2.2 Pengujian Arus Induktor $L_m$ .....	47
4.2.3 Pengujian Tegangan Kapasitor .....	48
4.2.4 Pengujian Tegangan Masukan dan Keluaran ....	49
4.3 Pengujian Efisiensi.....	50
4.4 Pengujian Kontrol Arus Konverter .....	52
4.5 Pengujian Baterai.....	54
4.5.1 Pengujian Karakteristik Discharge Baterai.....	54
4.5.2 Pengujian <i>Charge-Discharge</i> Baterai.....	63
<b>BAB 5 PENUTUP .....</b>	<b>81</b>
5.1 Kesimpulan.....	81
5.2 Saran.....	81
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>83</b>
<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>77</b>
<b>RIWAYAT HIDUP .....</b>	<b>97</b>



## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2. 1</b>	Konstruksi baterai asam timbal .....	8
<b>Gambar 2. 2</b>	Pengisian dan pengosongan baterai asam timbal .....	9
<b>Gambar 2. 3</b>	Grafik hubungan <i>discharge rate</i> dan <i>discharge time</i> ....	12
<b>Gambar 2. 4</b>	Grafik kapasitas baterai dengan arus <i>discharge</i> .....	12
<b>Gambar 2. 5</b>	Open circuit voltage vs residual capacity .....	14
<b>Gambar 2. 6</b>	Topologi Konverter <i>Bidirectional Buck -Boost</i> .....	16
<b>Gambar 2. 7</b>	Analisa mode operasi <i>boost</i> .....	17
<b>Gambar 2. 8</b>	<i>Switch S1 On</i> dan <i>Switch S2 Off</i> .....	18
<b>Gambar 2. 9</b>	<i>Switch S1 Off</i> dan <i>Switch S2 On</i> .....	19
<b>Gambar 2. 10</b>	Analisa mode operasi <i>buck</i> .....	21
<b>Gambar 2. 11</b>	<i>Switch S2 On</i> dan <i>Switch S1 Off</i> .....	22
<b>Gambar 2. 12</b>	<i>Switch S2 Off</i> dan <i>Switch S1 On</i> .....	23
<b>Gambar 2. 13</b>	Skema <i>average current control</i> .....	23
<b>Gambar 3. 1</b>	Skema pengujian sistem .....	27
<b>Gambar 3. 2</b>	Prosedur pengosongan baterai .....	29
<b>Gambar 3. 3</b>	Prosedur pengosongan baterai .....	30
<b>Gambar 3. 4</b>	Rangkaian simulasi konverter pada kondisi tunak.....	36
<b>Gambar 3. 5</b>	Bentuk gelombang tegangan $V_{gs}$ dan $V_{ds}$ .....	36
<b>Gambar 3. 6</b>	Bentuk gelombang tegangan $V_{gs}$ dan arus induktor $L_m$ .....	37
<b>Gambar 3. 7</b>	Bentuk gelombang kapasitor $C_L$ dan $C_H$ .....	38
<b>Gambar 3. 8</b>	Bentuk gelombang tegangan input dan tegangan output.....	38
<b>Gambar 3. 9</b>	Rangkaian simulasi konverter pada kondisi dinamis .....	39
<b>Gambar 3. 10</b>	Bentuk gelombang pada kondisi dinamis .....	40
<b>Gambar 3. 11</b>	Nilai <i>Ripple</i> arus <i>sensing</i> pada kondisi dinamis.....	40
<b>Gambar 3. 12</b>	Implementasi rangkaian konverter .....	42
<b>Gambar 3. 13</b>	Implementasi ketika proses pengujian baterai .....	42
<b>Gambar 4. 1</b>	Grafik pengujian sensor arus .....	44
<b>Gambar 4. 2</b>	Grafik pengujian pembagi tegangan.....	45
<b>Gambar 4. 3</b>	Grafik pengujian MOSFET 1.....	46
<b>Gambar 4. 4</b>	Grafik pengujian MOSFET 2.....	47
<b>Gambar 4. 5</b>	Grafik arus induktor $L_m$ saat konverter bekerja .....	48
<b>Gambar 4. 6</b>	Grafik Sinyal $V_{GS}$ , $V_{CS1}$ dan $V_{CS2}$ .....	49
<b>Gambar 4. 7</b>	Grafik Sinyal <i>Input</i> dan <i>Output</i> .....	49
<b>Gambar 4. 8</b>	Grafik Pengujian Efisiensi Konverter <i>Boost</i> .....	51
<b>Gambar 4. 9</b>	Grafik Pengujian Efisiensi Konverter <i>Buck</i> .....	52
<b>Gambar 4. 10</b>	Grafik pengujian arus saat mode operasi <i>boost</i> .....	53

<b>Gambar 4. 11</b>	Grafik pengujian arus saat mode operasi <i>buck</i> .....	53
<b>Gambar 4. 12</b>	Grafik pengujian 2C.....	55
<b>Gambar 4. 13</b>	Grafik pengujian 1C.....	56
<b>Gambar 4. 14</b>	Data pengujian C/3 .....	58
<b>Gambar 4. 15</b>	Grafik pengujian C/10.....	59
<b>Gambar 4. 16</b>	Grafik pengujian C/20.....	61
<b>Gambar 4. 17</b>	Grafik karakteristik <i>discharge</i> .....	62
<b>Gambar 4. 18</b>	Grafik pengujian C/3 siklus pertama .....	64
<b>Gambar 4. 19</b>	Grafik pengujian C/3 siklus kedua .....	66
<b>Gambar 4. 20</b>	Grafik pengujian C/3 siklus ketiga .....	68
<b>Gambar 4. 21</b>	Grafik pengujian C/10.....	70
<b>Gambar 4. 22</b>	Grafik pengujian C/20.....	72
<b>Gambar 4. 23</b>	Grafik pengujian 2C.....	74
<b>Gambar 4. 24</b>	Grafik pengujian 1C.....	76
<b>Gambar 4. 25</b>	Grafik estimasi SoC .....	78

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 3. 1</b> Parameter Baterai 1.....	31
<b>Tabel 3. 2</b> Parameter Baterai 2.....	31
<b>Tabel 3. 3</b> Spesifikasi awal desain konverter.....	32
<b>Tabel 3. 4</b> Spesifikasi kawat email.....	34
<b>Tabel 3. 5</b> Nilai komponen yang digunakan pada implementasi .....	41
<b>Tabel 4. 1</b> Pengujian Sensor Arus .....	43
<b>Tabel 4. 2</b> Pengujian pembagi tegangan.....	45
<b>Tabel 4. 3</b> Efisiensi konverter pada mode operasi <i>boost</i> .....	50
<b>Tabel 4. 4</b> Efisiensi konverter pada mode operasi <i>buck</i> .....	51
<b>Tabel 4. 5</b> Data pengujian 2C .....	55
<b>Tabel 4. 6</b> Data pengujian 1C .....	56
<b>Tabel 4. 7</b> Data pengujian C/3 .....	58
<b>Tabel 4. 8</b> Data Pengujian C/10 .....	59
<b>Tabel 4. 9</b> Data Pengujian C/20 .....	61
<b>Tabel 4. 10</b> Data pengujian C/3 siklus pertama .....	64
<b>Tabel 4. 11</b> Data pengujian C/3 siklus kedua .....	66
<b>Tabel 4. 12</b> Data pengujian C/3 siklus ketiga .....	68
<b>Tabel 4. 13</b> Data pengujian C/10 .....	72
<b>Tabel 4. 14</b> Data pengujian C/20 .....	72
<b>Tabel 4.15</b> Data pengujian 2C .....	74
<b>Tabel 4. 16</b> Data pengujian 1C .....	76



# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Kebutuhan baterai akan terus meningkat seiring dengan perkembangan energi baru dan terbarukan. Peningkatan terhadap kebutuhan baterai ini tentunya juga menuntut pengembangan teknologi untuk meningkatkan keandalan baterai itu sendiri. Untuk mengevaluasi kinerja dari suatu baterai, baik pihak produsen maupun konsumen perlu melakukan pengujian. Metode yang paling umum adalah metode pembebanan konstan, yaitu baterai di *charge* dan *discharge* pada *C-rating* tertentu kemudian dievaluasi karakteristiknya. Namun pengujian baterai seperti ini yang masih menggunakan *resistor bank* tidak efektif karena menimbulkan rugi daya yang tinggi dan membutuhkan ukuran komponen yang besar, sehingga pengoperasiannya menjadi kaku dan berat [1],[2]. Sehingga penggunaan resistor untuk pengujian baterai digantikan oleh rangkaian *electronic load*. Untuk mendapatkan kemampuan daya yang bervariasi dan kontrol yang akurat, *DC electronic load* sering diimplementasikan menggunakan topologi *PWM switching circuit*. *PWM switching circuit* yang biasa digunakan adalah *DC-DC Converter*, dimana konverter ini dapat dikontrol secara digital agar menghasilkan arus pembebanan yang bernilai konstan. Selain itu karena sirkuit bekerja dalam keadaan *switching* maka panas yang dihasilkan rendah dan memiliki efisiensi daya yang tinggi [2] .

Kapasitas baterai dapat didefinisikan sebagai nilai maksimum *ampere-hour* (Ah) yang bisa dikeluarkan oleh sebuah baterai pada kondisi tertentu. Kapasitas *rating* sebuah baterai dapat dilihat pada *datasheet*. Akan tetapi, kapasitas baterai tidaklah selalu bernilai konstan. Kapasitas baterai dapat berubah-ubah bergantung pada kondisi bagaimana baterai tersebut dioperasikan [3]. Hal yang harus diperhatikan saat melakukan pengujian baterai adalah tegangan *cut-off*, dimana baterai sangat tidak dianjurkan untuk dioperasikan dibawah tegangan *cut-off*nya. Parameter lain yang juga harus diketahui adalah *State of Charge* (SoC) baterai, yaitu perbandingan energi yang tersisa dengan energi maksimumnya. Nilai SoC memiliki rentang antara 0%-100% dimana 0% menandakan baterai habis, dan 100% menandakan terisi penuh .

Pada tugas akhir ini, diusulkan pengujian baterai jenis *Valve Regulated Lead Acid* (VRLA) yang biasa digunakan sebagai penyimpan energi cadangan. Pengujian dilakukan dengan menggunakan metode *constant current*. Metode ini dipilih untuk mendapatkan kurva karakteristik *discharge* baterai dan perhitungan estimasi SoC dengan metode *coulomb counting*. Estimasi nilai SoC juga dilakukan menggunakan metode *open circuit voltage* (OCV) sebagai pembanding.

Pada penelitian ini juga diusulkan penggunaan konverter *bidirectional buck-boost* agar pengujian lebih efisien daya yaitu dengan menggunakan baterai *dummy load* di sisi *output* untuk menampung daya baterai uji saat sedang *discharge*. Daya yang tersimpan pada baterai *dummy load* di sisi *output* konverter akan digunakan untuk mengisi kembali daya baterai yang diujikan. Topologi ini memiliki keunggulan yaitu arus *ripple* yang kecil pada sisi masukan dan keluaran, serta topologi dan kontrol yang sederhana, sehingga konverter ini sesuai untuk aplikasi seperti *battery equalization* dan *battery charger* [4]. Maka dari itu, pada penelitian ini akan dilakukan perancangan dan implementasi *DC electronic load* dengan topologi *bidirectional buck boost converter* yang memiliki fleksibilitas tinggi dan *ripple* arus yang rendah dengan *constant current control* untuk merepresentasikan beban statis yang akan digunakan untuk pengujian karakteristik *charge* dan *discharge* baterai.

## 1.2. Perumusan Masalah

Permasalahan yang dibahas dalam Tugas Akhir ini adalah :

1. Bagaimana merancang konverter *bidirectional buck-boost* untuk pengujian baterai VRLA.
2. Bagaimana hubungan kapasitas baterai dengan *rating* arus *discharge*.
3. Bagaimana mengestimasi nilai *state of charge* (SoC) baterai dari pengujian yang dilakukan.

## 1.3. Tujuan

Tujuan dari Tugas Akhir ini diharapkan sebagai berikut :

1. Mendesain dan mengimplementasikan konverter *bidirectional buck-boost* dengan *constant current control* untuk pengujian karakteristik baterai.
2. Melakukan analisis hasil pengujian karakteristik baterai untuk mendapat nilai kapasitas yang bergantung pada *rating* arus *discharge* yang digunakan.

3. Melakukan estimasi nilai SoC dengan metode *coulomb counting* dan *open circuit voltage*.

#### **1.4. Batasan Masalah**

Batasan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Implementasi dan pengujian alat disesuaikan dengan komponen-komponen yang terdapat di pasaran dan peralatan uji di Laboratorium Konversi Energi Listrik.
2. Semua analisis dan perhitungan dilakukan dalam mode tunak (*steady state*).
3. Pengambilan data pengujian karakteristik baterai tidak mempertimbangkan parameter *State Of Health* (SoH), *Depth of Discharge* (DoD), dan menganggap baterai masih baru.
4. Tidak mempertimbangkan faktor akurasi sensor arus dan temperatur baterai analisis estimasi nilai SoC baterai.

#### **1.5. Metodologi**

Metodologi yang digunakan dalam menyusun penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Studi pustaka

Memahami latar belakang masalah bagaimana cara melakukan pengujian karakteristik baterai *lead acid*. Mempelajari konsep kerja *DC electronic load* agar dapat bekerja secara *constant current* untuk pengujian karakteristik baterai asam timbal. Memahami bagaimana karakteristik dari MOSFET sebagai saklar penyalan konverter. Serta memahami bagaimana prinsip kerja dan penurunan parameter-parameter rangkaian konverter *bidirectional buck-boost*.

2. Simulasi

Mensimulasikan rangkaian *constant current dc electronic load* pada *software Power Simulator*. Dengan simulasi dapat dimengerti konsep kerja dari rangkaian konverter *bidirectional buck-boost*. Simulasi juga membantu memahami kinerja kontrol PI untuk mendapatkan *constant current control* yang dapat bekerja sesuai dengan desain awal. Hasil dari kontrol PI ini digunakan sebagai input komparator PWM yang ada pada arduino. PWM digunakan untuk mengatur waktu penyalan MOSFET. Selain itu dengan simulasi pula dapat menentukan nilai dan jenis komponen yang akan digunakan.

3. Implementasi Alat

Mengimplementasikan rangkaian yang telah disimulasikan. Tahap pertama adalah membuat rangkaian yang menghubungkan sumber ke beban baterai. Dari

rangkaian ini kita dapat mengetahui berapa besar arus, tegangan baterai, waktu pengisian dan pengosongan baterai.

#### 4. Pengujian Alat

Pada tahap ini dilakukan pengujian terhadap setiap bagian. Pengujian dilakukan secara bertahap, dimulai dari pengujian sensor arus ACS 712, pengujian pembagi tegangan dengan *multiturn*, pengujian sinyal pensakelaran, pengujian tegangan kapasitor, pengujian tegangan masukan dan keluaran, pengujian efisiensi konverter, dan pengujian respon dinamis konverter. Dengan menggunakan osiloskop dapat diamati sinyal digital PWM yang terbentuk dari kontrol arus konstan dengan PI apakah sudah bekerja dengan benar. Dengan *probe clamp* pada osiloskop pula dapat diamati *ripple* arus induktor apakah sudah sesuai dengan desain. Selanjutnya mengamati tegangan pada baterai ketika *charge* dan *discharge*.

#### 5. Analisis Data

Setelah dilakukan pengujian dan diperoleh data uji, maka tahap selanjutnya adalah melakukan analisis data. Analisis dilakukan pada kinerja konverter pada keadaan tunak. Dan juga dilakukan pada data hasil pengujian baterai asam timbal.

#### 6. Kesimpulan

Tahap terakhir adalah penarikan kesimpulan berdasarkan hasil analisis data yang diperoleh dari simulasi, perhitungan dan pengujian implementasi konverter *bidirectional buck-boost*.

### 1.6. Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan laporan penelitian ini terbagi atas lima bab dengan uraian sebagai berikut :

#### BAB 1: Pendahuluan

Bab ini berisi penjelasan tentang latar belakang, perumusan masalah, tujuan, batasan masalah, metodologi, sistematika penulisan, dan relevansi penelitian ini.

#### BAB 2: Baterai asam timbal dan konverter *bidirectional buck-boost*

Bab ini berisi teori penunjang yang membahas tentang analisis parameter-parameter baterai asam timbal, *dc electronic load*, dan analisis mode tunak konverter *bidirectional buck-boost*. Di dalam analisis mode tunak terdapat penjelasan cara kerja konverter dan penurunan rumus parameter komponen.

#### BAB 3: Desain, Simulasi, dan Implementasi

Bab ini berisi mengenai perancangan sistem, prosedur pengujian baterai, perancangan desain dan parameter komponen sistem,



simulasi konverter saat kondisi tunak dan dinamis, serta implementasi.

#### BAB 4: Pengujian dan Analisis Data

Bab ini berisi pengujian dan analisis data terhadap konverter *bidirectional buck-boost*, pengujian baterai, dan penentuan *State of Charge* (SoC) baterai.

#### BAB 5: Kesimpulan dan Saran

Bab ini berisi kesimpulan dari analisis yang dilakukan dan berisi tentang saran untuk perkembangan selanjutnya.

### **1.7. Relevansi**

Penelitian diharapkan dapat memberikan manfaat, yaitu:

1. Menjadi referensi untuk penelitian dan pengembangan pengembangan konverter *bidirectional buck-boost*.
2. Menjadi referensi untuk penelitian dan pengembangan pengujian karakteristik baterai dengan metode *constant current*.
3. Menjadi referensi bagi mahasiswa yang hendak mengambil masalah serupa untuk penelitian.

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

## BAB 2

### BATERAI ASAM TIMBAL DAN KONVERTER *BIDIRECTIONAL BUCK-BOOST*

#### 2.1. Baterai Asam Timbal

Baterai adalah sebuah peralatan elektronika yang dapat menyimpan energi listrik arus searah (dc) dalam bentuk senyawa kimia dari sel elektrokimia yang terkandung di dalamnya. Secara umum, baterai terdiri dari dua jenis yaitu baterai primer yaitu jenis baterai yang dapat menyimpan dan menyalurkan energi listrik namun hanya dapat digunakan sekali dan tidak bisa diisi ulang (*single use battery*) dan baterai sekunder yaitu jenis baterai yang dapat menyimpan dan menyalurkan energi listrik dan dapat diisi ulang (*rechargeable battery*) [5]. Baik baterai primer dan sekunder sering kita temui dalam kehidupan sehari-hari. Baterai primer contohnya adalah baterai jenis alkalin, baterai *fuel cell* dan lain sebagainya. Baterai sekunder contohnya adalah *Nickel Cadmium* (NiCd), *Nickel Metal Hydride* (NiMH), *Li-Ion* dan asam timbal (*Lead Acid*) atau yang biasa disebut dengan aki.

Menurut penggunaannya baterai asam timbal terdiri dari dua jenis yaitu *starting battery* dan *deep cycle battery* [6]. *Starting battery* merupakan jenis aki yang dirancang mampu menghasikan arus listrik dalam waktu singkat sehingga dapat menyalakan mesin seperti mesin kendaraan bermotor. Konstruksinya menggunakan banyak plat tipis yang disusun secara paralel agar resistansinya rendah dengan penampang permukaan yang lebih luas agar dapat melepas arus listrik yang tinggi saat dibutuhkan. Baterai jenis ini biasa digunakan pada kendaraan bermotor untuk menyalakan mesin. *Deep cycle battery* dirancang untuk menghasilkan arus listrik yang stabil dalam waktu lama. Baterai jenis ini tahan terhadap siklus pengisian-pengosongan aki yang berulang-ulang. Baterai jenis ini biasa digunakan pada peralatan yang ada di pembangkitan listrik, gardu induk, sumber cadangan listrik pada tower BTS, hingga untuk kendaraan listrik.

Terlepas dari dua jenis baterai di atas, baterai asam timbal juga digolongkan sebagai aki basah dan aki kering. Aki basah atau aki konvensional menandakan bahwa sel-sel dalam baterai harus terendam dalam cairan elektrolit asam sulfat ( $H_2SO_4$ ), dengan komposisi campuran adalah 63%  $H_2O$  dan 37%  $SO_4$  [7]. Aki basah juga biasa dikenal dengan *flooded lead acid battery* (FLA). Aki basah memiliki katup untuk

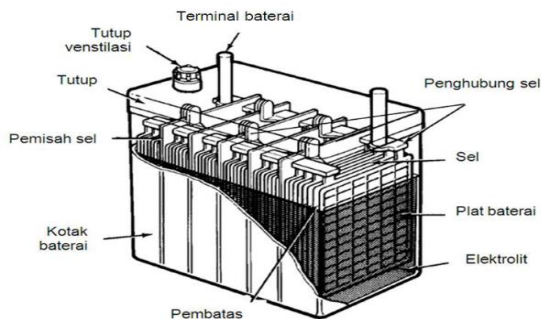
pengisian ulang cairan aki yang dapat dilakukan dalam waktu 6 bulan hingga satu tahun. Sedangkan pada aki kering, penampangnya tidak memiliki katup pengisian, elektrolit baterai berupa asam sulfat ( $H_2SO_4$ ) dalam bentuk gel. Gel pada aki kering tidak mudah menguap seperti cairan elektrolit pada aki basah. Aki kering juga biasa dikenal sebagai *Valve-Regulated Lead Acid Battery* (VRLA), *sealed lead acid*, atau *sealed maintenance free battery*. Hanya saja harga aki kering cenderung lebih mahal jika dibandingkan dengan aki basah.

### 2.1.1 Konstruksi baterai asam timbal

Sebuah baterai asam timbal dibentuk dari dua atau lebih sel elektrokimia yang mengubah energi kimia yang tersimpan menjadi listrik. Tiap sel dan tiap sel terdiri dari larutan elektrolit dan memiliki kutub positif (katoda) dan negatif (anoda). Terdapat tiga struktur utama baterai asam timbal [8], yaitu:

1. Kutub positif elektroda (anoda) yang terbuat dari timbal dioksida ( $PbO_2$ ).
2. Kutub negatif elektroda (katoda) yang terbuat dari timbal murni (Pb).
3. Kedua elektroda direndam di dalam larutan elektrolit yang terbuat dari asam sulfat ( $H_2SO_4$ ) biasanya komposisinya sekitar 37% asam sulfat terlarut dalam air (berdasarkan massa), dengan densitas 1.28 g/mL.

Struktur lainnya diantaranya adalah kotak baterai sebagai tempat menampung seluruh komponen baterai yang ada di dalamnya, separator sel baterai, terminal baterai dan penutup baterai. Bagian-bagian dari baterai asam timbal ditunjukkan pada Gambar 2.1 sebagai berikut.

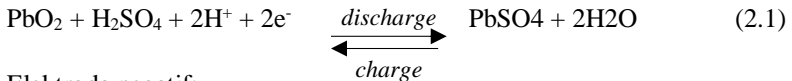


**Gambar 2. 1** Konstruksi baterai asam timbal [9]

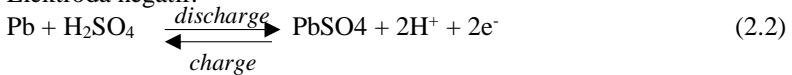
### 2.1.2 Reaksi Kimia

Semua baterai asam timbal mengalami proses pengisian dan pengosongan muatan didalamnya. Saat proses pengisian, terbentuk timbal oksida ( $\text{PbO}_2$ ) pada anoda, terbentuk timbal murni ( $\text{Pb}$ ) pada katoda, dan ion  $\text{SO}_4^{2-}$  bereaksi membentuk larutan elektrolit asam sulfat ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), sehingga konsentrasi asam sulfat akan terus meningkat dan mencapai puncaknya saat baterai terisi penuh. Pada saat proses pengosongan, material aktif pada elektroda bereaksi dengan elektrolit sehingga terbentuk timbal sulfat ( $\text{PbSO}_4$ ) pada kedua elektroda dan larutan elektrolit asam sulfat terurai menjadi ion-ion dan air ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Konsentrasi asam sulfat berkurang dan paling encer ketika sepenuhnya kosong. Kedua reaksi ini akan terus berjalan selama baterai asam timbal beroperasi. Reaksi kimia yang terjadi selama proses pengisian dan pengosongan baterai asam timbal ditunjukkan pada Gambar 2.2 dan persamaan sebagai berikut [10] :

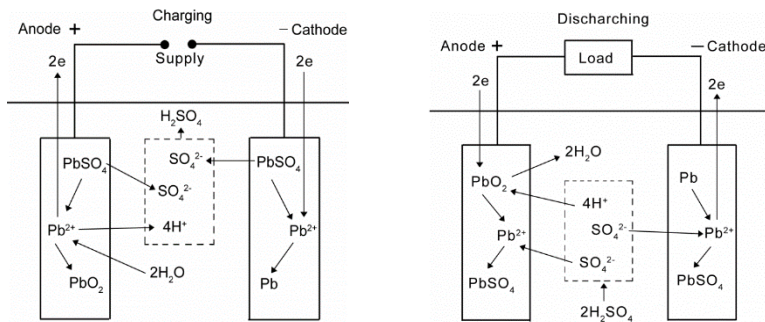
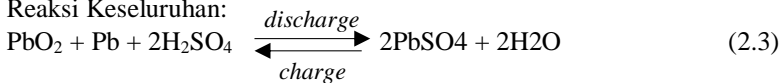
Elektroda positif:



Elektroda negatif:



Reaksi Keseluruhan:



**Gambar 2. 2** Pengisian dan pengosongan baterai asam timbal [10]

## 2.2. Parameter Baterai Asam Timbal

Berikut adalah beberapa parameter penting dari sebuah baterai asam timbal :

### 2.2.1 Tegangan Baterai

Pada umumnya, baterai asam timbal memiliki dua rating tegangan yaitu tegangan *open circuit* dan tegangan nominal [10]. Tegangan *open circuit* mengindikasikan tegangan terminal baterai saat tidak terhubung ke beban. Tegangan *open circuit* bergantung pada kapasitas yang dimiliki sebuah baterai. Oleh sebab itu, salah satu metode pengukuran *State of Charge* (SoC) baterai dapat dilakukan melalui tegangan *open circuit*-nya [11]. Semakin tinggi kapasitasnya, semakin besar pula tegangan *open circuit*-nya. Sedangkan tegangan nominal adalah tegangan rating atau tegangan normal baterai. Tegangan rating merupakan jumlah keseluruhan tegangan nominal tiap sel-sel baterai yang tersusun secara seri, misalnya baterai asam timbal 12V memiliki 6 sel baterai yang masing-masing bertegangan 2V yang disusun secara seri [10].

### 2.2.2 Kapasitas Baterai

Kapasitas yang dimiliki dari sebuah baterai tidaklah selalu bernilai konstan. Kapasitas baterai dapat didefinisikan sebagai nilai maksimum *ampere-hour* (Ah) yang bisa dikeluarkan oleh sebuah baterai pada kondisi tertentu. Kondisi yang dimaksud diantaranya adalah tegangan akhir baterai setelah di discharge (tegangan *cut-off*), nilai arus yang digunakan saat discharge, dan temperatur baterai.

Nilai rating arus yang digunakan sangat mempengaruhi nilai kapasitas yang dimiliki dari baterai. Sebagai contoh baterai dengan kapasitas 100Ah akan mampu dikuras selama 10jam pada rating arus 10A, namun dalam keadaan riil nya jika baterai tersebut dikuras dengan arus 100A maka proses pengosongan hanya berlangsung kurang dari satu jam, dan proses pengosongan juga dapat berjalan lebih dari 100jam pada rating 1A. Hal yang menjadi perhatian utama disini adalah nilai kapasitas baterai akan meningkat pada rating arus discharge yang kecil (waktu pengosongan lebih lama) dan akan berkurang pada rating arus discharge yang besar (waktu pengosongan lebih cepat).

Nilai kapasitas baterai akan berkurang pada temperatur yang rendah dan meningkat pada temperatur tinggi. Hal yang sama berlaku pada tegangan akhir baterai setelah discharge, dimana nilai kapasitas akan

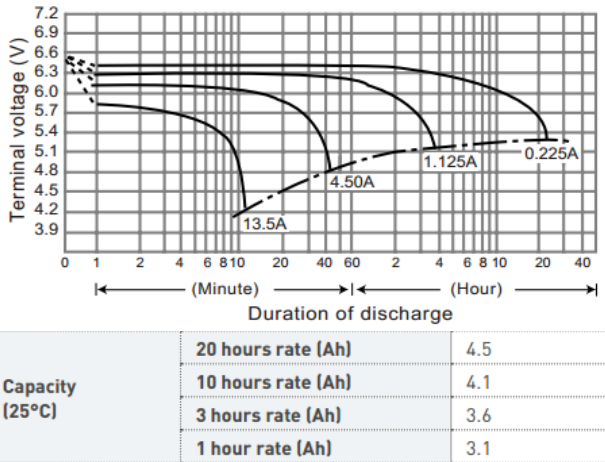
meningkat jika baterai didischarge sampai tegangan yang lebih rendah [3]. Kapasitas baterai dapat juga dituliskan dalam satuan kilowatt-hours (kWh) yang dapat dihitung menggunakan rumus sebagai berikut [11].

$$\text{kWh} = \frac{\text{Ah} \times \text{tegangan baterai}}{1000} \quad (2.4)$$

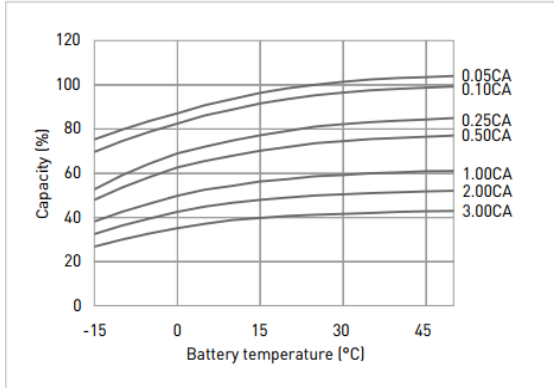
### 2.2.3 C-Rating

*C-rating* adalah nilai yang didapat dari perhitungan kapasitas baterai dibagi dengan lama baterai tersebut dikosongkan atau diisi. *C-rating* ditunjukkan dengan persamaan  $C/t$ , dimana  $C$  adalah kapasitas baterai, dan  $t$  adalah waktu *discharge* atau *charge* dalam jam. Sebagai contoh baterai dengan kapasitas 100Ah C/20 maka baterai tersebut dapat diisi ataupun dikosongkan dengan arus 5A dalam waktu 20 jam. Semakin lama waktu yang dibutuhkan untuk men-*discharge* baterai, semakin besar pula kapasitasnya, sebagai contoh baterai dengan rating 300Ah hanya akan memiliki kapasitas 250Ah ketika di discharge selama 5jam dengan arus 50A [12]. Gambar 2.3 menunjukkan grafik hubungan *discharge rate* dengan waktu *discharge* nya baterai panasonic LC-R064R5P.

Kapasitas baterai juga sangat bergantung pada suhu pengoperasiannya. Normalnya kapasitas baterai dinyatakan pada suhu 25°C, dengan pengoperasian pada *c-rating* yang sama kapasitas baterai dapat berkurang hingga 50% jika dioperasikan pada -25°C dan dapat meningkat hingga 10% jika dioperasikan pada 45°C. Kenaikan suhu pada baterai dapat terjadi akibat dari kenaikan suhu lingkungan, proses *charge* ataupun *discharge*. Akan tetapi, kenaikan suhu bukan berarti baik pada baterai karena dapat mengakibatkan terjadinya korosi pada plat elektroda, sulfasi, *self discharge*, pelepasan gas, dan bahkan dapat mengurangi umur baterai. Oleh karena itu perlindungan terhadap suhu lingkungan sangat diperlukan agar baterai dapat berkerja pada suhu optimalnya [10]. Gambar 2.4 menunjukkan grafik hubungan kapasitas baterai terhadap *discharge rate* dan suhu operasi.



**Gambar 2. 3** Grafik hubungan *discharge rate* dan *discharge time* LC-R064R5P [13]



**Gambar 2. 4** Grafik hubungan kapasitas baterai dengan arus *discharge* dan suhu operasi LC-R064R5P [13]

### 2.3. Penentuan nilai State of Charge (SoC) Baterai

SoC adalah nilai persentase kapasitas yang tersedia di baterai dibanding kapasitas ketika dalam keadaan terisi penuh. Nilai SoC



memiliki rentan nilai 0-100 % dengan 0% adalah keadaan baterai ketika benar-benar kosong, dan 100% merupakan keadaan baterai ketika penuh. Penentuan nilai SoC merupakan hal yang penting dalam pengoperasian baterai. Penentuan nilai SoC yang akurat sangat diperlukan untuk menghindari baterai dari keadaan *overcharge* dan *overdischarged* yang dapat merusak baterai secara permanen [12].

Cara mengukur SoC dapat dilakukan melalui tiga cara, yaitu [9] :

1. Pengukuran secara langsung, dapat dilakukan jika baterai dapat di-*discharge* pada nilai yang konstan.
2. Pengukuran *Specific Gravity (SG)*, cara ini bergantung pada perubahan pengukuran dari berat bahan kimia aktif.
3. Perkiraan SoC berdasarkan tegangan, dengan mengukur tegangan *cell* baterai sebagai dasar perhitungan SoC sebagai dasar perhitungan SoC atau sisa kapasitas. Hasil dapat berubah tergantung pada level tegangan nyata, suhu, nilai *discharge*, dan umur *cell*.

### 2.3.1 Metode *Coulomb Counting*

Penggunaan metode *coulomb counting* untuk menentukan SoC sebuah baterai merupakan metode yang paling sederhana dan paling banyak digunakan sebagai dasar pengembangan teknologi penghitungan SoC pada *smart battery management system (BMS)*. Pada metode ini, estimasi nilai SoC dari suatu baterai dapat dihitung dengan mengintegalkan arus yang keluar atau masuk baterai dari waktu ke waktu sehingga dapat diperoleh jumlah total energi yang masuk atau keluar dari baterai. Keunggulan dari metode ini adalah dapat digunakan mengestimasi nilai SoC secara *real time*. Secara umum, metode *coulomb counting* dapat dihitung dengan persamaan seperti berikut [14].

$$SoC_t = SoC(t_0) - \frac{1}{C_n} \int_{t_0}^t I dt \quad (2.5)$$

Dimana

$SoC(t_0)$  = nilai SoC mula-mula sebelum proses pengisian atau pengosongan

$SoC_t$  = nilai SoC saat ini

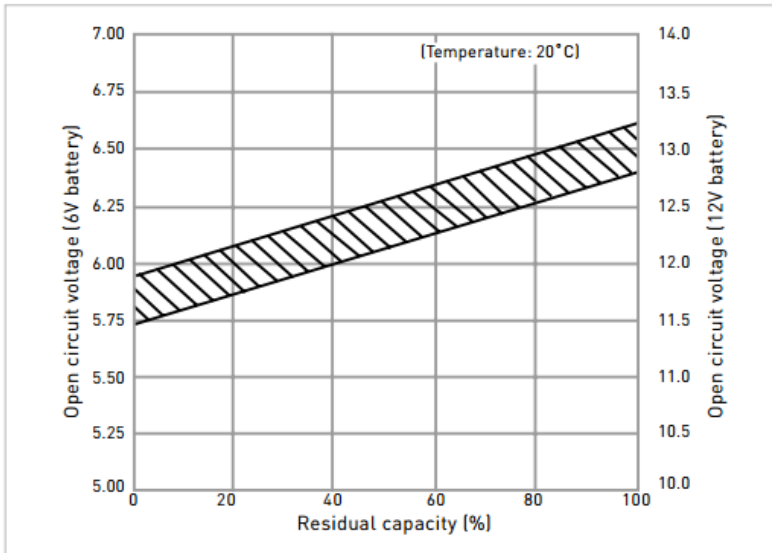
$C_n$  = kapasitas total baterai

$I$  = nilai arus yang masuk atau keluar dari baterai

Hal yang harus diperhatikan saat menggunakan metode ini adalah penentuan nilai SoC inisial dari baterai. Kesalahan dalam menentukan inisial SoC berakibat pada salah mengestimasi SoC baterai sesungguhnya. Idealnya penentuan SoC inisial secara tepat dapat dilakukan pada kondisi baterai terisi penuh atau terkuras habis, namun pada implementasi di industri kedua kondisi ini sering tidak terpenuhi. Hal yang kedua adalah diperlukan tingkat akurasi yang tinggi dalam pengukuran arus. Sedikit *error* pada pengukuran arus dapat mengaburkan nilai SoC baterai yang sesungguhnya.

### 2.3.2 Metode Open Circuit Voltage (OCV)

Metode lain yang juga umum digunakan dalam menentukan nilai SoC baterai adalah dengan tegangan *open circuit* baterai. SoC dari baterai didapat dari pembacaan kurva OCV vs SoC yang dimiliki pada masing-masing baterai. Gambar 2.5 menunjukkan kurva tegangan OCV dan nilai SoC pada baterai Panasonic yang digunakan pada tugas akhir ini.



**Gambar 2. 5** Open circuit voltage vs residual capacity pada suhu 20°C LC-R064R5P [13]

Menentukan nilai SoC dengan OCV adalah hal yang sederhana, namun bisa menjadi tidak akurat ketika baterai dioperasikan karena bahan komposisi dari *cell* baterai dan temperatur dapat mempengaruhi pembacaan tegangannya. Sehingga untuk mendapatkan nilai SoC yang akurat, perlu dipertimbangkan rentang waktu *rest period*. *Rest period* artinya rentang waktu dimana baterai dibiarkan tidak menerima ataupun memberikan arus ke rangkaian. Lama *rest period* ini bergantung pada jenis baterai yang digunakan, umumnya untuk baterai lead acid membutuhkan waktu 30menit - 2jam, namun banyak *manufacture* baterai yang juga menyarankan *rest period* selama 24 jam sampai larutan elektrokimia di dalam baterai mencapai titik ekuilibrium. Oleh karena itu metode OCV menjadi tidak praktis ketika digunakan dalam mengestimasi SoC secara *real time* [15].

#### **2.4. DC Electronic Load**

Sebuah *electronic load* juga dikenal sebagai *programmable load* adalah sebuah peralatan listrik yang dirancang untuk memberikan beban pada sisi keluaran catu daya, biasanya digunakan untuk pembebanan dinamis, dan seringkali diprogram atau dikendalikan oleh komputer. Penggunaan beban nyata statis atau *real loads* sangat kompleks, dan nilainya menyimpang dari beban murni baik resistif, induktif, maupun kapasitif. *Electronic load* meniru perilaku beban statis dalam pengaplikasiannya, tetapi tidak seperti beban statis yang bisa saja tidak dapat diprediksi dan acak nilainya, *electronic load* mampu menyediakan beban yang terorganisir, akurat, dan dapat dikontrol. Terdapat dua macam *electronic load*, yaitu AC dan DC [16].

Sebuah *DC electronic load* yang tersedia di pasaran biasanya terdiri dari satu atau beberapa kumpulan transistor daya atau *Field Effect Transistor (FET)*, umumnya menggunakan *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (MOSFET)* yang bertindak sebagai resistor variabel. Prinsip kerja dari rangkaianannya adalah memonitor arus yang mengalir pada transistor/FET, membandingkannya dengan arus yang diinginkan pengguna (referensi), sehingga melalui penguatan *error* dapat mengubah tegangan *drive* transistor/FET untuk mendapatkan nilai resistansi yang diinginkan [1].

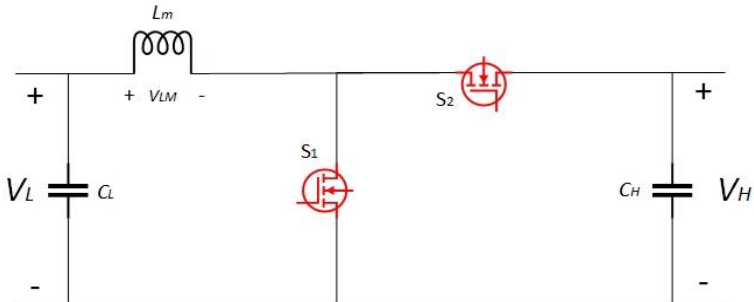
*DC electronic load* pada umumnya memiliki empat mode operasi yaitu : *constant current mode (CC)*, *constant voltage mode (CV)*, *constant resistance mode (CR)*, dan *constant power mode (CP)* [17].

Metode pensaklaran transistor menggunakan PWM (biasanya pada konverter) diterapkan agar rangkaian konverter tersebut mendapatkan nilai beban static DC yang sebenarnya pada arus atau tegangan yang diinginkan pengguna [1].

### 2.5. Konverter *Bidirectional Buck-Boost*

Konverter *bidirectional* merupakan suatu perangkat pengonversi level tegangan DC yang dapat menyalurkan daya baik dari sumber DC ke beban maupun sebaliknya. Konverter *Bidirectional* sering digunakan pada peralatan yang meliputi *Uninterruptable Power Supplies (UPS)*, perangkat isi ulang baterai cerdas, *Hybrid Energy Storage System (HESS)* pada *Hybrid Electric Vehicles (HEVs)* dan *Electric Vehicles (EVs)*, *Fuel Cell*, dan sistem *Renewable Energy* [18].

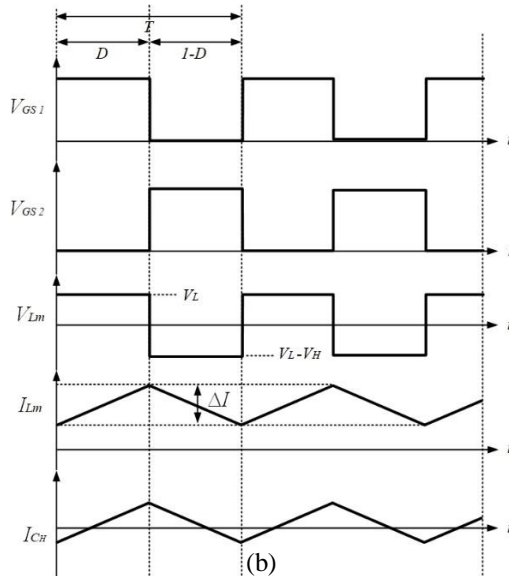
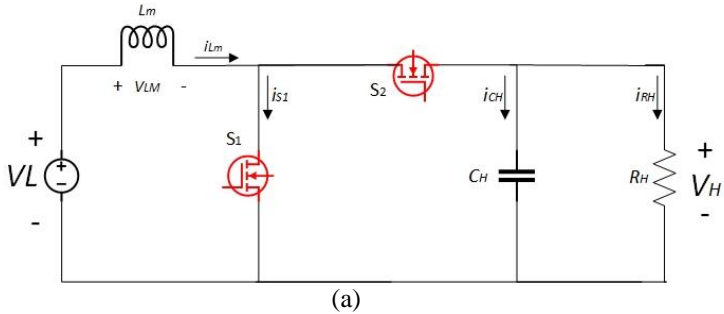
Konverter *bidirectional* dapat diklasifikasikan menjadi dua tipe, yaitu tipe *non-isolated* dan tipe *isolated*. Rangkaian *Non-isolated* memiliki rangkaian yang lebih sederhana dibanding *isolated*, dan dapat memiliki efisiensi yang lebih baik. Konverter *Bidirectional Buck-Boost* merupakan salah satu jenis konverter yang sering diaplikasikan untuk sistem *charge/discharge* baterai karena memiliki topologi rangkaian sederhana dan *ripple* arus rendah sehingga dapat digunakan agar mendapatkan efisiensi yang tinggi dan memperpanjang *lifetime* baterai [19]. Gambar Berikut ini menunjukkan topologi *Bidirectional Buck-Boost* yang digunakan pada pengerjaan tugas akhir ini.



**Gambar 2. 6** Topologi Konverter *Bidirectional Buck -Boost*

### 2.5.1 Analisa Ketika Mode *Boost*

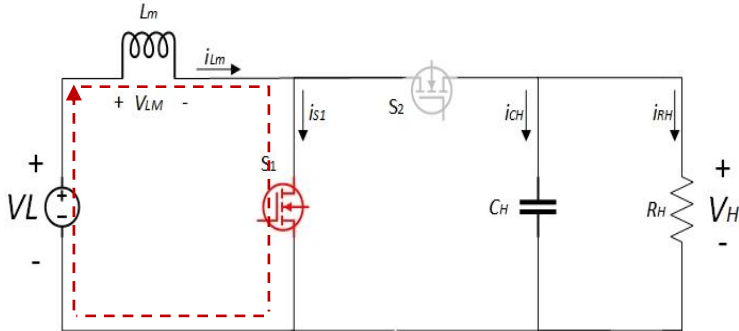
Rangkaian ekivalen dan bentuk gelombang ketika dioperasikan dalam mode *boost* ditunjukkan pada Gambar 2.7 berikut ini. Pada mode ini, sisi tegangan rendah ( $V_L$ ) menjadi *input*, dan sisi tegangan tinggi ( $V_H$ ) menjadi *output*. Sehingga aliran daya berasal dari sisi tegangan rendah ke tegangan tinggi



**Gambar 2. 7** Analisa mode operasi *boost* (a) topologi konverter *bidirectional buck -boost* (b) bentuk gelombang pesakelaran

### Analisa Setengah Periode Pertama

Ketika S1 *switch on* dan S2 *switch off*, maka rangkaian ekivalen yang diperoleh ditunjukkan pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 *Switch S1 On dan Switch S2 Off*

Pada kondisi ini, induktor  $L_m$  dan sumber  $V_L$  terhubung paralel, sehingga tegangan induktor  $V_{Lm}$  dan  $V_L$  bernilai sama. Maka dengan menggunakan hukum Kirchoff tegangan (KVL) diperoleh persamaan tegangan pada induktor sebagai berikut:

$$-V_L + V_{Lm} = 0$$

$$V_L = V_{Lm} = L \frac{di_{Lm}}{dt} \quad (2.6)$$

Energi akan mengisi (*charging*) induktor, sehingga laju perubahan arus pada induktor bernilai konstan dan meningkat secara linier (bernilai positif). Sehingga perubahan arus pada induktor dapat dituliskan sebagai berikut:

$$D = \frac{t_{on}}{T} = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} \quad (2.7)$$

Dengan mensubstitusi persamaan (2.6) dan (2.7) diperoleh persamaan:

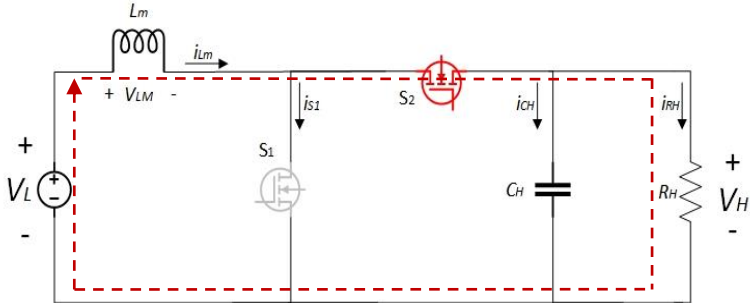
$$\frac{\Delta i_{Lm}}{\Delta t} = \frac{\Delta i_{Lm}}{DT} = \frac{V_L}{Lm} \quad (2.8)$$

Sehingga persamaan matematis laju perubahan arus induktor ketika setengah siklus pertama dapat dituliskan menjadi

$$\Delta i_{Lm(on)} = \frac{V_L}{L_m} DT \quad (2.9)$$

### Analisa Setengah Periode Kedua

Pada setengah periode selanjutnya, saat S1 *switch off* dan S2 *switch on*, maka rangkaian ekivalen yang diperoleh ditunjukkan pada Gambar 2.9.



**Gambar 2. 9** Switch S1 Off dan Switch S2 On

Dengan menggunakan hukum Kirchoff tegangan (KVL) diperoleh persamaan tegangan pada induktor sebagai berikut:

$$V_{Lm} = V_L - V_H = L \frac{di_{Lm}}{dt} \quad (2.10)$$

Pada kondisi ini, induktor akan mengalami pengosongan energi (*discharging*). Sehingga laju perubahan arus pada induktor akan turun secara linier (bernilai negatif) dan dapat dituliskan pada persamaan sebagai berikut:

$$\frac{\Delta i_{Lm}}{\Delta t} = \frac{\Delta i_{Lm}}{(1-D)T} = \frac{V_L - V_H}{L_m} \quad (2.11)$$

Sehingga persamaan matematis laju perubahan arus induktor ketika setengah siklus kedua dapat dituliskan menjadi

$$\Delta i_{Lm(off)} = \frac{V_L - V_H}{L_m} (1 - D)T \quad (2.12)$$

Dengan mengasumsikan konverter beroperasi dalam keadaan *steady state*, maka laju perubahan arus pada induktor dalam satu siklus penuh

adalah bernilai sama dengan nol. Sehingga persamaan dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\Delta i_{Lm(on)} + \Delta i_{Lm(off)} = 0 \quad (2.13)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (2.9) dan (2.12) pada persamaan (2.13) dan disederhanakan maka didapatkan

$$\frac{V_L}{Lm} DT + \frac{V_L - V_H}{Lm} (1 - D)T = 0$$

$$V_H = \frac{1}{1-D} V_L \quad (2.14)$$

Dari persamaan 2.14, dapat diketahui bahwa rasio tegangan pada mode operasi *boost* semakin besar bila nilai *duty cycle* pada *switch* S1 semakin besar.

Penentuan nilai kapasitor saat mode boost, dapat ditentukan dari perubahan muatan kapasitor saat proses pengisian dan pengosongan. Penentuan nilai kapasitor ketika mode boost didapat saat saklar S1 padam. Sehingga didapat persamaan *ripple* tegangan pada kapasitor  $C_H$  sebagai berikut :

$$\Delta V_H = \frac{V_H \times D}{R_H \times f \times C_H} \quad (2.15)$$

Dengan menyederhanakan persamaan 2.14 maka didapat

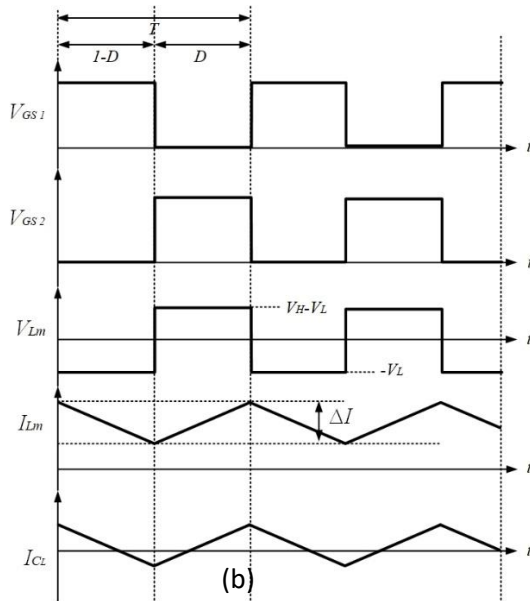
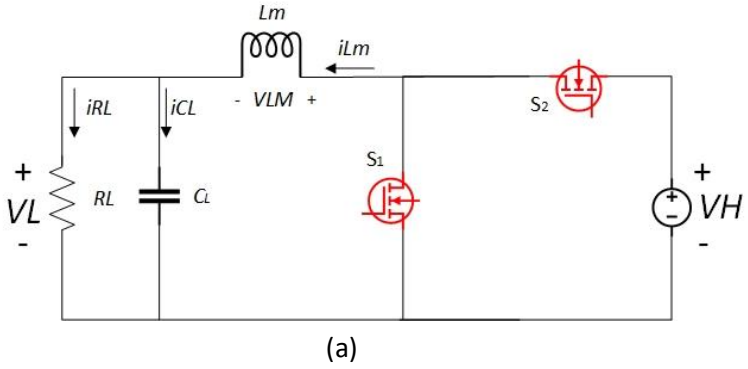
$$C_H = \frac{D}{R_H \times f \times x(\Delta V_H / V_H)} \quad (2.16)$$

### 2.5.2 Analisa Ketika Mode *Buck*

Rangkaian ekivalen ketika dioperasikan dalam mode *buck* ditunjukkan pada Gambar 2.10 berikut ini. Pada mode ini, sisi tegangan rendah ( $V_L$ ) menjadi *output*, dan sisi tegangan tinggi ( $V_H$ ) menjadi *input*.



Sehingga aliran daya berasal dari sisi tegangan rendah ke tegangan tinggi.

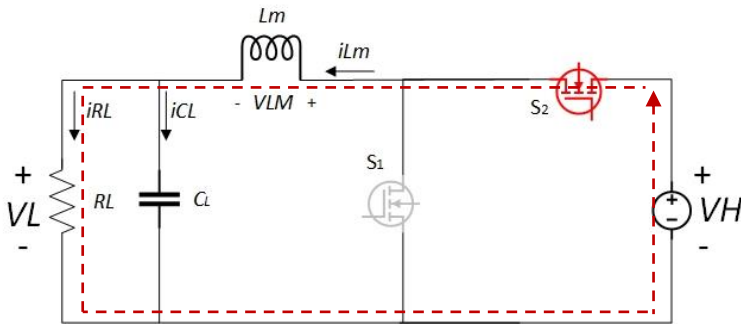


**Gambar 2. 10** Analisa mode operasi *buck* (a) topologi konverter bidirectional buck -boost (b) bentuk gelombang pesakelaran

### Analisa Setengah Periode Pertama

Saat S2 *switch on* dan S1 *switch off*, maka rangkaian ekivalen yang diperoleh ditunjukkan pada Gambar 2.11. Tegangan pada induktor dapat dituliskan sebagai berikut:

$$V_{Lm} = V_H - V_L = L \frac{di_{Lm}}{dt} \quad (2.17)$$



**Gambar 2. 11** Switch S2 On dan Switch S1 Off

Pada kondisi ini, induktor akan mengalami pengisian energi (*charging*). Sehingga laju perubahan arus pada induktor akan meningkat secara linier (bernilai positif) dan dapat dituliskan pada persamaan sebagai berikut

$$\frac{\Delta i_{Lm}}{\Delta t} = \frac{\Delta i_{Lm}}{DT} = \frac{V_H - V_L}{L_m} \quad (2.18)$$

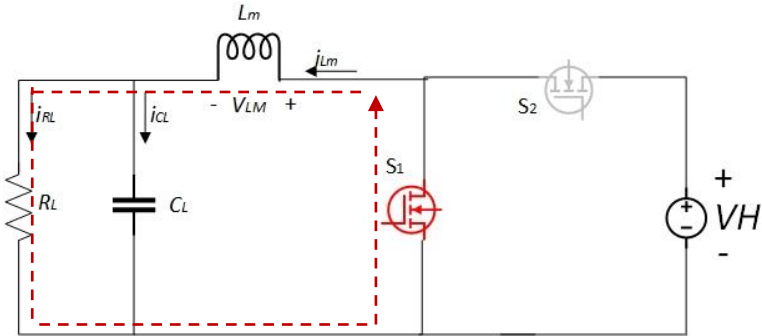
Sehingga persamaan matematis laju perubahan arus induktor ketika setengah siklus pertama dapat dituliskan menjadi

$$\Delta i_{Lm(on)} = \frac{V_H - V_L}{L_m} DT \quad (2.19)$$

### Analisa Setengah Periode Kedua

Pada setengah periode selanjutnya, saat S2 *switch off* dan S1 *switch on*, maka rangkaian ekivalen yang diperoleh ditunjukkan pada Gambar 2.12. Dengan menggunakan hukum kirchoff tegangan (KVL) diperoleh persamaan tegangan pada induktor sebagai berikut:

$$V_{Lm} = -V_L = L_m \frac{di_{Lm}}{dt} \quad (2.20)$$



**Gambar 2. 12** Switch S2 Off dan Switch S1 On

Pada kondisi ini, induktor akan mengalami pengosongan energi (*discharging*). Sehingga laju perubahan arus pada induktor akan turun secara linier (bernilai negatif) dan dapat dituliskan pada persamaan sebagai berikut:

$$\frac{\Delta i_{Lm}}{\Delta t} = \frac{\Delta i_{Lm}}{(1-D)T} = -\frac{V_L}{L_m} \quad (2.21)$$

Sehingga persamaan matematis laju perubahan arus induktor ketika setengah siklus kedua dapat dituliskan menjadi

$$\Delta i_{Lm(off)} = \frac{-V_L}{L_m} (1 - D)T \quad (2.22)$$

Dengan mengasumsikan konverter beroperasi dalam keadaan *steady state*, maka laju perubahan arus pada induktor dalam satu siklus penuh adalah bernilai sama dengan nol. Sehingga persamaan dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\Delta i_{Lm(on)} + \Delta i_{Lm(off)} = 0 \quad (2.23)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (2.19) dan (2.22) pada persamaan (2.23) dan disederhanakan maka didapatkan

$$\frac{V_H - V_L}{L_m} DT - \frac{V_L}{L_m} (1 - D)T = 0$$

$$V_L = V_H D \quad (2.24)$$

Dari persamaan 2.24, dapat diketahui bahwa rasio tegangan pada mode operasi *buck* berbanding lurus dengan nilai *duty cycle* pada *switch* S2.

Penentuan nilai kapasitor saat mode *buck*, dapat ditentukan dari perubahan muatan kapasitor saat proses pengisian dan pengosongan. Arus kapasitor  $i_{CL}$  akan bernilai positif saat kapasitor sedang ada pada proses *charging*. Sehingga didapat persamaan *ripple* tegangan pada kapasitor  $C_L$  sebagai berikut :

$$i_{CL} = i_{Lm} - i_{RL} \quad (2.25)$$

$$\Delta V_L = \frac{\Delta i_{Lm}}{8 \times f \times C_L} \quad (2.26)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan 2.26 pada persamaan 2.22, didapatkan nilai kapasitor  $C_L$  sebagai berikut

$$\Delta V_L = \frac{V_L(1 - D)}{8 \times f^2 \times Lm \times C_L} \quad (2.27)$$

$$C_L = \frac{(1 - D)}{8 \times f^2 \times Lm \times (\Delta V_L / V_L)} \quad (2.28)$$

### 2.5.3 Penurunan Parameter Komponen

Konverter *bidirectional buck-boost* memerlukan beberapa parameter yang harus ditentukan nilainya. Parameter tersebut meliputi nilai induktor  $L_M$ , kapasitor  $C_L$  dan kapasitor  $C_H$ .

Nilai pada induktor didapatkan dari ripple arus pada induktor  $Lm$  adalah sebagai berikut.

$$\Delta i_{Lm} = \frac{V_H - V_L}{Lm} DT \quad (2.29)$$

$$Lm = \frac{V_H - V_L}{\Delta i_{Lm}} DT \quad (2.30)$$

Dengan menggunakan persamaan 2.15 dan 2.26 maka nilai parameter semua kapasitor dapat ditentukan. Maka kapasitor pada sisi tegangan rendah tegangan tinggi konverter adalah sebagai berikut.

$$C_H = \frac{D}{R_H x f x (\Delta V_H / V_H)} \quad (2.31)$$

$$C_L = \frac{(1 - D)}{8 x f^2 x L_m x (\Delta V_L / V_L)} \quad (2.32)$$

Untuk menentukan nilai beban  $R_o$  saat steady state, dapat menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$R_o = \frac{V_o^2}{P_o} \quad (2.33)$$

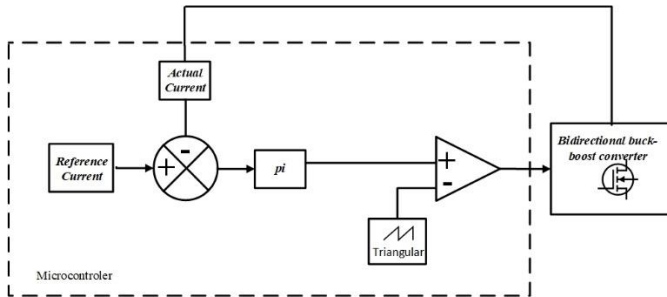
Dimana  $V_o$  adalah tegangan output konverter, dan  $P_o$  adalah daya output maksimal konverter.

#### 2.5.4 Current Mode Control

*Current Mode Control* (CMC) bertujuan untuk mengatur arus *steady-state* rata-rata pada induktor. Terdapat dua metode yang biasa digunakan pada CMC, yaitu *Peak CMC* dan *Average CMC*. Prinsip kerja dari metode *peak CMC* adalah dengan membandingkan secara langsung gelombang arus induktor dengan arus referensi yang ditetapkan pengguna. Metode ini menyebabkan timbulnya *noise* dengan *ripple* yang sangat besar dan *gain* yang rendah. Sedangkan *average CMC* bekerja dengan cara memberi penguatan pada *error* yang terjadi antara gelombang arus induktor dengan arus referensi yang kemudian dibandingkan dengan gelombang segitiga pada inputan PWM. Metode ini berhasil mengurangi harmonisa yang ditimbulkan *peak cmc* menjadi 3%, *noise* menjadi lebih sedikit, dan dapat diterapkan pada berbagai topologi konverter contohnya *boost* atau *flyback* [20] .

Gambar 2.13 menunjukkan skema *average CMC* sederhana yang sering digunakan pada berbagai pengaturan konverter seperti *bidirectional buck-boost*. Prinsip kerjanya adalah dengan membandingkan nilai arus induktor aktual konverter dengan arus referensi yang diinginkan. Perbedaan atau *error* yang didapat kemudian

dijadikan penguatan oleh kontroler pi dan kemudian dibandingkan dengan gelombang segitiga pada input PWM. PWM yang didapat akan mengatur nilai *duty cycle* konverter agar mendapat nilai arus hingga sama dengan referensi. Keseluruhan proses ini dapat diimplementasikan pada rangkaian komparator analog maupun mikrokontroler seperti arduino uno.



**Gambar 2. 13** Skema *average current control*

### 2.5.5 Filter *Moving Average*

Filter *moving average* sering digunakan untuk meredam *noise* acak dalam pembacaan sensor-sensor digital. Filter ini memiliki keunggulan yaitu merupakan filter yang paling umum, sederhana, dan paling mudah untuk dipahami dibanding filter yang lainnya. Terlepas dari kesederhanaannya, filter ini dapat bekerja optimal pada domain waktu untuk mengurangi derau acak (*noise*) sambil mempertahankan bentuk respon step signal yang asli. [21]. Filter *moving average* bekerja dengan merata-rata sejumlah titik tertentu dari sinyal input untuk menghasilkan setiap titik dari sinyal output. Filter *moving average* ditunjukkan pada persamaan sebagai berikut dengan  $s[ ]$  input,  $r [ ]$  output, dan  $M$  adalah interval filter .

$$r[n] = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} s[n - m] \quad (2.34)$$

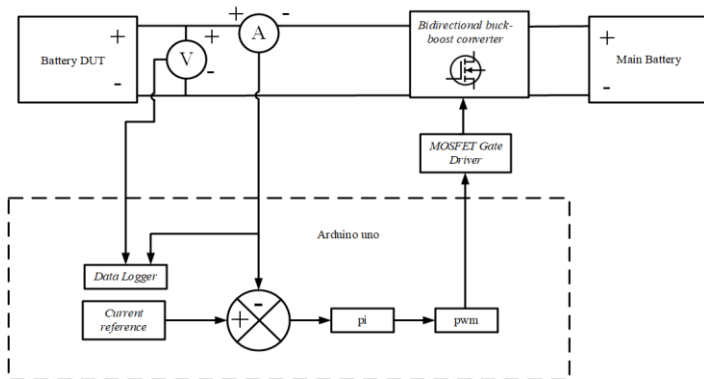
## BAB 3

### DESAIN, SIMULASI, DAN IMPLEMENTASI

Pada bab 3 akan dibahas mengenai perancangan sistem secara keseluruhan yang dibagi menjadi subbab perangkat keras dan perangkat lunak. Subbab perangkat keras meliputi perancangan desain yang akan dipakai pada sistem ini. Sedangkan perangkat lunak dibahas tentang simulasi menggunakan PSim untuk mengetahui apakah konverter *bidirectional buck-boost* dapat berkerja dengan baik dan sesuai dengan desain yang telah dibuat.

#### 3.1 Perancangan Sistem

Skema rangkaian pengujian sistem secara keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 3.1. Pada penelitian ini menggunakan dua buah baterai dengan kapasitas yang berbeda, yaitu Battery DUT (*Device Under Test*) sebagai baterai yang akan diuji karakteristiknya dan *Main Battery* yang dikondisikan agar dapat *discharge* atau *didischarge* berdasarkan kebutuhan pengujian. Keseluruhan simulasi dilakukan menggunakan *software* PSim. Simulasi yang dibuat meliputi prinsip kerja konverter *bidirectional buck-boost* dan rangkaian kontrol arus konstan menggunakan kontroler *proportional-integral*. Hasil dari simulasi ini kemudian akan digunakan sebagai dasar pengujian karakteristik *charge* dan *discharge* baterai.



**Gambar 3. 1** Skema pengujian sistem

Untuk pengujian karakteristik gelombang masing-masing komponen pada konverter, digunakan *variable DC Supply* yang terdapat di laboratorium konversi energi. Sinyal *switching* PWM dihasilkan menggunakan program Arduino uno, yang juga merupakan outputan dari kontroler pi. *Driver* MOSFET berfungsi sebagai peningkat tegangan masukan pada *gate* MOSFET karena tegangan minimum untuk *trigger* MOSFET  $\pm 10$  Volt. Arus keluaran ataupun masukan dari baterai uji dijaga konstan sebagai metode pengujian karakteristik *charge* dan *discharge* baterai. Pada pengujiannya, akan diambil data karakteristik *charge* dan *discharge* baterai dalam 3 nilai *C-rating* yang berbeda. Hasil pengujian yang didapat juga dijadikan sebagai dasar penentuan nilai SoC dengan metode *coulomb counting* pada Baterai 1 yang akan dibahas pada bab selanjutnya.

### 3.2 Prosedur Pengujian

Prosedur pengujian pada tugas akhir ini dibagi menjadi dua yaitu prosedur saat pengosongan *Battery DUT* dan prosedur saat pengisian *Battery DUT*. Kedua proses tersebut menggunakan metode *constant current* agar dapat dianalisa bentuk kurvanya saat dioperasikan pada *C-rating* yang sama.

Prosedur pengosongan *Battery DUT* ditetapkan saat konverter beroperasi pada mode *boost* sehingga arah aliran dayanya berasal dari *Battery DUT* ke beban yang dalam hal ini adalah *Main Battery* dengan tegangan nominal 12V. Proses pengosongan *Battery DUT* akan dimulai ketika tegangannya lebih besar dari tegangan *cut-off* sesuai dengan *datasheet* dan terus berlanjut hingga mencapai tegangan *cut-off* yang ditetapkan berdasar *C-ratingnya*.

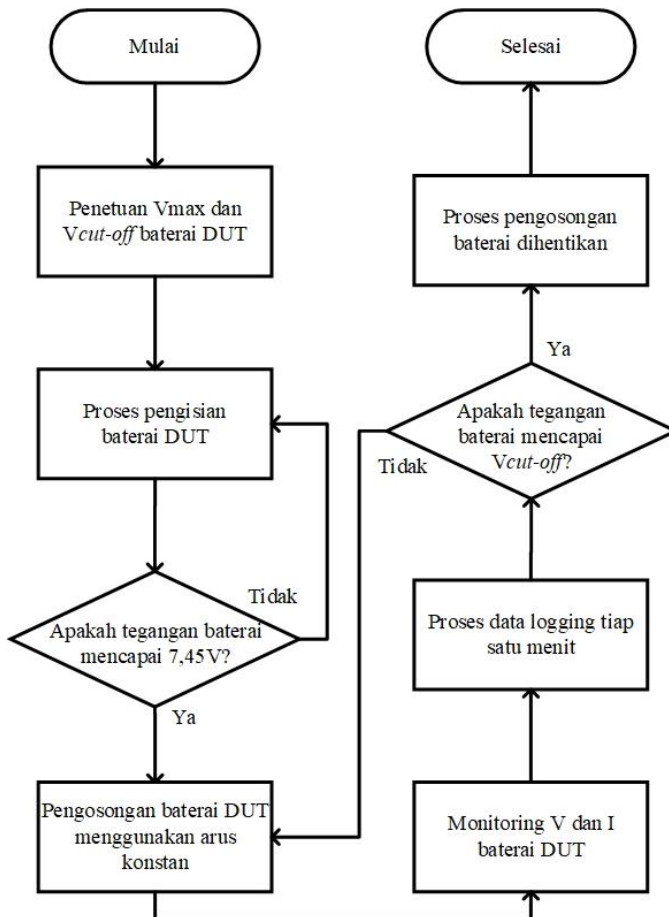
Sedangkan prosedur pengisian *Battery DUT* ditetapkan saat konverter beroperasi pada mode *buck* sehingga arah aliran dayanya berasal dari *Main Battery* ke *Battery DUT*. Proses pengisian dimulai saat tegangan *Battery DUT* bernilai lebih besar atau sama dengan tegangan *cut-offnya* dan terus berlanjut hingga tegangannya mencapai tegangan maksimum sesuai dengan yang ditetapkan *datasheet*.

Data yang direkam dari kedua prosedur pengujian tersebut berupa tegangan dan arus yang kemudian digunakan untuk diplot kurva *charge* dan *discharge* nya. Data yang didapat dari kedua pengujian diambil setiap satu menit. Diagram alir dari kedua prosedur pengujian digambarkan pada sub bab 3.2.1 dan 3.2.2 sebagai berikut.



### 3.2.1 Prosedur Pengosongan Baterai

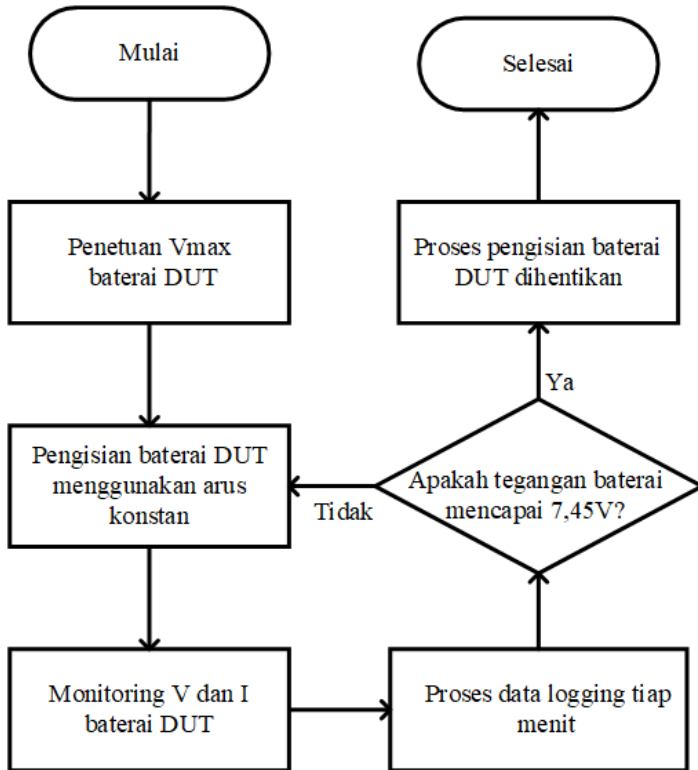
Diagram alir saat proses pengosongan baterai dengan metode *constant current* ditunjukkan pada Gambar 3.2 sebagai berikut.



**Gambar 3. 2** Prosedur pengosongan baterai

### 3.2.2 Prosedur Pengisian Baterai

Diagram alir saat proses pengisian baterai dengan metode *constant current* ditunjukkan pada Gambar 3.3 sebagai berikut.



**Gambar 3. 3** Prosedur pengosongan baterai

### 3.3 Parameter Baterai VRLA

Pengujian karakteristik charge dan discharge pada tugas akhir ini menggunakan dua buah baterai yang masing-masing sebagai baterai uji dan beban dengan spesifikasi sebagai berikut :

**Tabel 3. 1** Parameter *Battery DUT*

<i>Battery DUT</i>		
Parameter	Nilai	
Nomor Seri	VRLA Panasonic LC-R064R5P	
Kapasitas Nominal	4,5Ah (rating dalam 20 jam)	
Tegangan Nominal	6V	
Dimensi	Panjang	70mm
	Lebar	48mm
	Tinggi	102mm
	Tinggi Total	108mm
	Massa	720 g
Resistansi Internal ( <i>Fully Charge</i> (25 <sup>0</sup> C))	$\pm 20 \text{ m}\Omega$	

**Tabel 3. 2** Parameter *Main Battery*

<i>Main Battery</i>		
Parameter	Nilai	
Nomor Seri	VRLA Panasonic LC-P127R2P	
Kapasitas Nominal	7.2Ah (rating dalam 20 jam)	
Tegangan Nominal	12V	
Dimensi	Panjang	151mm
	Lebar	64,5mm
	Tinggi	94mm
	Tinggi Total	100mm
	Massa	2,5Kg
Resistansi Internal ( <i>Fully Charge</i> (25 <sup>0</sup> C))	$\pm 21 \text{ m}\Omega$	

### 3.4 Desain Konverter *Bidirectional Buck-Boost*

Dalam mendesain atau menentukan parameter komponen dari sebuah konverter, terdapat beberapa hal yang perlu diperhatikan diantaranya adalah ketersediaan komponen yang ada di pasaran dan kesesuaian dengan *rating* peralatan uji yang terdapat di laboratorium konversi energi elektro ITS agar dapat menunjang pengujian implementasi konverter. Penentuan parameter komponen juga harus memperhatikan kapasitas tegangan, arus dan daya dari komponen itu sendiri agar dapat berfungsi dengan baik sesuai dengan desain yang diinginkan. Berikut adalah Tabel 3.1 yang berisi parameter awal dalam

mendesain rangkaian konverter *bidirectional buck-boost* pada pengerjaan tugas akhir ini.

**Tabel 3. 3** Spesifikasi awal desain konverter

Parameter	Nilai
$P_{out}$	30 W
$V_{out}$	12 V
$V_{in}$	6 V
<i>Switching Frequency</i>	20 kHz
<i>Ripple</i> $V_{CL}$	0,12 V (2%)
<i>Ripple</i> $V_{CH}$	0,12 V (1%)
<i>Ripple</i> $I_L$	136mA

Untuk mempermudah analisis dan penentuan nilai parameter-parameter konverter, nilai tegangan masukan ditentukan dari tegangan *rating* dari baterai uji yaitu 6 Volt. Tegangan keluaran ditentukan dari tegangan *rating* baterai beban yaitu 12V. Frekuensi *switching* ditentukan 20 kHz untuk memperkecil nilai induktor  $L_m$ . Daya keluaran ditentukan sebesar 30 Watt. Nilai *ripple*  $V_C$  ditentukan berdasarkan pertimbangan ketersediaan kapasitor di pasaran. *Ripple*  $I_L$  ditentukan sebesar 2,6% dengan pertimbangan semakin besar nilai *ripple* maka akan memperkecil nilai induktansi.

### 3.4.1 Penentuan Nilai Resistansi Beban

Nilai resistansi digunakan untuk memodelkan beban pada simulasi. Penentuan nilai resistansi beban pada konverter dilakukan saat keadaan *steady state* dengan mempertimbangkan nilai daya maksimal yang dapat dioperasikan oleh konverter, yakni sebesar 30 Watt pada tegangan 12Volt. Berdasarkan persamaan 2.31, maka nilai resistansi beban ditentukan sebagai berikut:

$$R_o = \frac{V_o^2}{P_o} = \frac{12^2}{30} = 4,8 \Omega$$

### 3.4.2 Penentuan Nilai Induktor $L_m$

Penentuan nilai induktor  $L_m$  dapat ditentukan menggunakan persamaan 2.28 saat konverter sedang bekerja dalam operasi *Continuous Conduction Mode* (CCM, dimana arus yang mengalir pada induktor tidak pernah bernilai nol. Penentuan nilai induktor  $L_m$  sebagai berikut.

$$L_m = \frac{V_H - V_L}{\Delta i_{Lm}} DT = \frac{(12 - 6) \times 0.5}{0.136 \times 20000} = 1.1 \text{mH}$$

Dalam proses perancangan induktor dimulai dengan penentuan jenis kawat yang akan digunakan sebagai belitan induktor. Penentuan jenis kawat ini bergantung pada dua parameter yaitu arus maksimal yang melewati induktor dan frekuensi switching konverter. Frekuensi *switching* yang digunakan bernilai 20kHz sedangkan penentuan arus yang mengalir pada induktor  $L_m$  dapat dicari dari arus input konverter pada beban sesuai desain yaitu 30 Watt. Dengan menganggap konverter dalam keadaan yang ideal, maka dapat dianggap daya input bernilai sama dengan daya output. Sehingga perhitungan arus maksimal induktor  $L_m$  sebagai berikut :

$$I_{Lm} = \frac{P_{in}}{V_{in}} = \frac{30}{6} = 5 \text{ A}$$

Penentuan jenis kawat induktor bergantung pada parameter frekuensi *switching*. Kawat induktor  $L_m$  harus mampu bekerja pada frekuensi 20kHz, sehingga dipilih kawat email jenis AWG 21 yang memiliki diameter 0.7239 mm dengan resistansi 0.041,984 ( $\Omega/m$ ), daya hantar arus 1,2A dan frekuensi maksimal 33kHz. Berdasarkan parameter arus dan mempertimbangan *ripple* arus pada induktor  $L_m$ , kawat email induktor  $L_m$  harus mampu menahan arus sebesar 5,136A. Untuk meningkatkan keamanan, maka dipilih kawat tembaga yang memiliki kapasitas arus lebih besar yaitu AWG jenis 10 dengan resistansi 0,03276392 ( $\Omega /m$ ), daya hantar arus sebesar 15A, dan frekuensi maksimal sebesar 2,6kHz.

Agar mendapatkan induktor dengan parameter sesuai desain, yaitu frekuensi maksimal 33kHz, dan arus maksimal 5,136A maka dilakukan pemilihan kawat email AWG 21. Pemilihan kawat tembaga juga dapat mengurangi skin effect, mengurangi resistansi, dan meningkatkan elastisitas konduktor yang digunakan. Penentuan jumlah pilinan didapatkan dari hasil pembagian diameter kawat kapasitas arus besar dengan kapasitas arus kecil. Perhitungan jumlah pilinan pada masing-masing induktor sebagai berikut.

$$n_{kawat} = \frac{d_{AWG_{10}}}{d_{AWG_{21}}} = \frac{2,58826}{0,7239} = 3,575 \approx 4$$

Sehingga jumlah pilinan pada induktor  $L_m$  berjumlah 4 kawat tembaga jenis AWG 21. Selanjutnya jenis inti induktor dipilih dari kapasitas frekuensi dari inti. Maka dipilih inti *ferrite* dengan nomor seri 0077548A7 yang diproduksi oleh Magnetics inc. yang memiliki karakteristik sebagai berikut:

**Tabel 3. 4** Spesifikasi kawat tembaga

Parameter	Nilai
$A_L$	127 nH
$A_e$	65,6 mm <sup>2</sup>
$L_e$	81,4 mm
$\mu_e$	125
$B_s$	10500 gauss

Tabel 3.4 menunjukkan parameter yang dapat digunakan untuk mendesain induktor meliputi  $A_L$  (faktor induktansi),  $A_e$  (luas penampang efektif inti),  $L_e$  (panjang jalur efektif inti),  $\mu_e$  (permeabilitas efektif relative), dan  $B_s$  (kerapatan flux maksimal).

Sehingga untuk mendapatkan nilai induktansi yang diperlukan diperlukan jumlah belitan pada inti induktor  $L_m$  sebagai berikut:

$$N = \sqrt{\frac{L}{A_L}} = \sqrt{\frac{1,1 \text{ mH}}{127 \text{ nH}}} = 93,066 \approx 94$$

### 3.4.3 Penentuan Nilai Kapasitor $C_L$ dan $C_H$

Nilai kapasitor  $C_L$  dan  $C_H$  dihitung berdasarkan persamaan (2.31) dan (2.32). Dalam Tugas akhir ini, nilai  $C_L$  sama dengan  $C_H$ . Nilai *ripple* tegangan  $C_L$  dan  $C_H$  sesuai desain ditentukan sebesar 0.12 Volt. Sehingga nilai kapasitor  $C_L$  dan  $C_H$  dapat dihitung sebagai berikut:

$$C_H = \frac{0,5}{\frac{12 \times 12}{30} \times 20000 \times \frac{0,12}{12}}$$

$$C_H = 520,8 \mu F$$

$$C_L = \frac{(1 - 0,5)}{8 \times 20000^2 \times 1,1 \text{ mH} \times \frac{0,12}{6}}$$

$$C_L = 426,13 \mu F$$

Dalam implementasinya, dipilih nilai kapasitor jenis *Electrolytic condenser* (Elco) dan nilainya menyesuaikan dengan ketersediaan pasar. Kemudian dipilih nilai kapasitor  $C_L$  dan  $C_H$  masing-masing  $680\mu\text{F}$   $480\text{V}$ . Pemilihan *rating* tegangan Volt didasarkan pada faktor keamanan dan pada nilai ESR (*Equivalent Series Resistance*) dari kapasitor yang nilainya berbanding terbalik dengan tegangan kerja dari kapasitor. Sehingga, untuk memperkecil losses pada kapasitor, dipilih nilai ESR yang kecil.

### 3.4.4 Penentuan MOSFET

Pada subbab ini analisa dilakukan saat konverter sedang beroperasi dalam mode *boost*. Pemilihan MOSFET ditentukan oleh tiga parameter yaitu frekuensi *switching*, tegangan *drain-source* maksimal, dan arus *drain-source* maksimal yang mengalir pada MOSFET. Berdasarkan parameter pertama, karena konverter beroperasi dengan frekuensi *switching* 20 kHz, maka pemilihan MOSFET harus dipastikan dapat beroperasi pada frekuensi *switching* tersebut. Pada parameter kedua yaitu MOSFET yang dipilih harus dapat menahan tegangan *drain-source* menurut perhitungan sebagai berikut:

$$V_{DS(max)} = \frac{V_{in}}{1 - D} = \frac{6}{1 - 0,5} = 12\text{V}$$

Untuk parameter ketiga, perhitungan arus yang melewati mosfet dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut

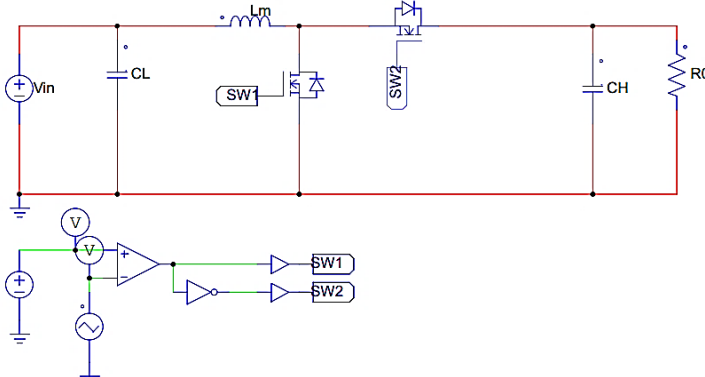
$$I_{DS} = I_{LM} \times D = 5 \times 0,5 = 2,5\text{ A}$$

Berdasarkan ketiga parameter di atas, maka dapat dipilih MOSFET jenis IRFP4332 yang memiliki spesifikasi tegangan *gate-source*  $\pm 30\text{ V}$ . Mampu menahan tegangan *drain-source*  $\pm 300\text{ V}$ ,  $R_{DS(on)}$  29 m $\Omega$ , dan arus *drain-source* 40 A saat berada pada temperatur 100°C. Waktu *reverse recovery* IRFP4332 bernilai 290 ns, sehingga nilai frekuensi maksimumnya adalah 3,4 MHz.

### 3.5 Simulasi Konverter pada Mode Tunak

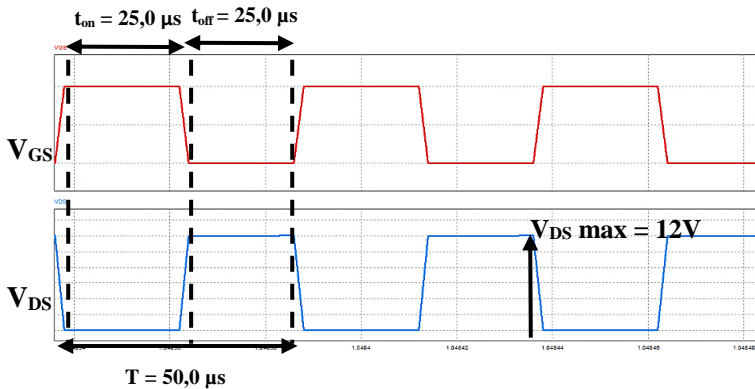
Simulasi pada keadaan tunak atau *steady state* dilakukan untuk melihat respon sistem secara keseluruhan dan memastikan bahwa desain konverter yang telah dibuat dapat bekerja sesuai dengan teori. Simulasi dilakukan pada mode *steady state* pada *software* PSIM agar dapat

dipastikan kinerja konverter saat sudah mencapai kondisi stabil. Rangkaian simulasi dapat dilihat pada Gambar 3.4.



**Gambar 3. 4** Rangkaian simulasi konverter pada kondisi tunak

Hasil simulasi berupa sinyal tegangan *gate-source* dan tegangan *drain-source* ketika konverter bekerja ditunjukkan pada Gambar 3.5 dibawah ini. Parameter yang digunakan pada simulasi ini adalah tegangan input simulasi bernilai konstan yaitu sebesar 6 Volt dan tegangan output konstan sebesar 12 Volt dengan daya 30 Watt. Nilai *duty cycle* PWM sebesar 50% dengan frekuensi 20 kHz.

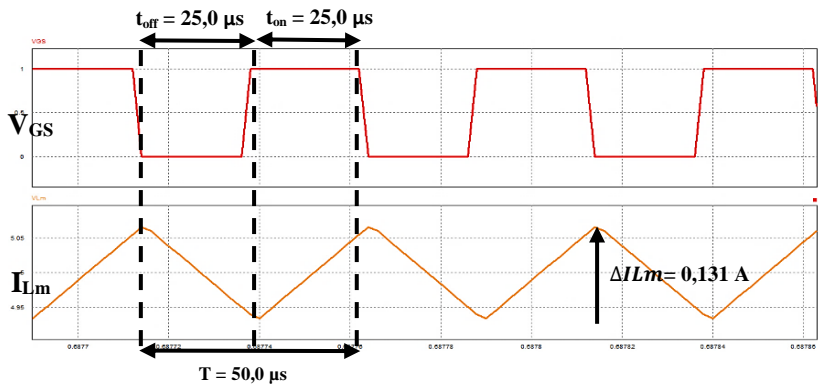


**Gambar 3. 5** Bentuk gelombang tegangan  $V_{gs}$  dan  $V_{ds}$



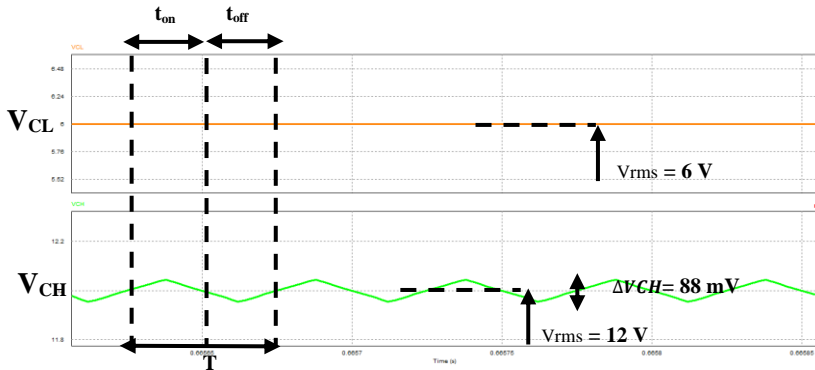
Sinyal PWM berupa logika “high” and “low” pada *duty cycle* tertentu. Ketika sinyal PWM yang diberikan pada *gate-source* berlogika *high*, maka MOSFET akan merespon dengan berubahnya tegangan pada sisi *drain-source* menjadi logika “low” sehingga akan ada arus yang mengalir dari *drain-source*. MOSFET berkonduksi selama 50  $\mu\text{s}$  dan akan mati selama 50  $\mu\text{s}$ , nilai tersebut telah memenuhi desain yang diinginkan yakni *duty cycle* 50% dengan frekuensi *switching* 20kHz. . Nilai  $V_{DS\text{max}}$  bernilai 12,39 V.

Gambar 3.6 dibawah ini menunjukkan hasil simulasi konverter yaitu gelombang  $I_{Lm}$  konduksi dan terbuka yang ditunjukkan oleh gelombang  $V_{GS}$ . Saat sakelar konduksi, terjadi proses *charging* pada  $L_m$ , dan saat sakelar terbuka, terjadi proses *discharging* pada  $L_m$ . Dapat dilihat *ripple* arus pada induktor  $L_m$  sedikit berbeda dari desain yang telah ditetapkan, akan tetapi nilai *error* tersebut masih bisa ditoleransi. Nilai *ripple* arus induktor  $L_m$  sebesar 0,131 A.



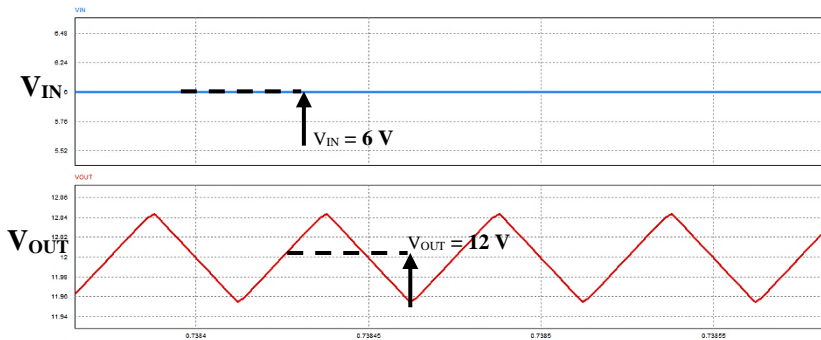
**Gambar 3. 6** Bentuk gelombang tegangan  $V_{GS}$  dan arus induktor  $L_m$

Gambar 3.7 dibawah ini menunjukkan bentuk gelombang  $V_{CL}$  dan  $V_{CH}$  saat sakelar mode konduksi dan terbuka. Pada gambar terlihat bahwa saat sakelar konduksi,  $C_L$  dan  $C_H$  mengalami pengisian muatan (*charging*) dan ketika sakelar terbuka kedua kapasitor mengalami pengosongan muatan (*discharging*). Kapasitor  $C_H$  memiliki nilai arus Nilai  $V_{rms}$  dari kapasitor  $C_L$  dan  $C_H$  berturut-turut adalah 6V dan 12V. Nilai *ripple*  $C_H$  adalah 88mV



**Gambar 3. 7** Bentuk gelombang tegangan kapasitor  $C_L$  dan  $C_H$

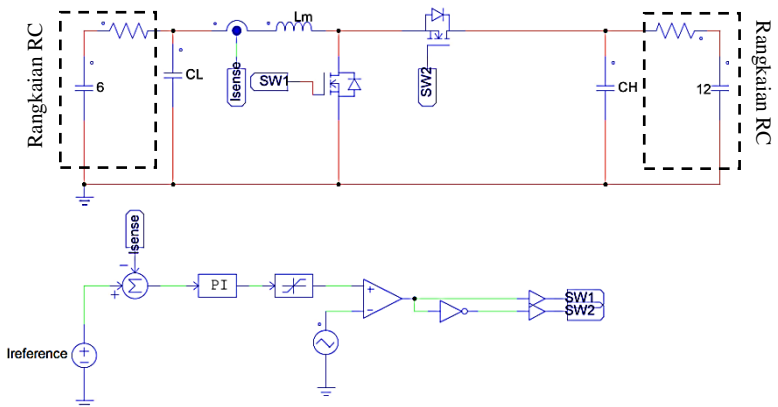
Bentuk gelombang tegangan input dan output digambarkan pada Gambar 3.8 dibawah ini. Besar tegangan input konverter adalah 6V dan tegangan output rms konverter adalah 12V sehingga didapat rasio konversi konverter sebesar 2 kali. Besar ripple sebesar 88mV.



**Gambar 3. 8** Bentuk gelombang tegangan input dan tegangan output

### 3.6 Simulasi Konverter pada Mode Dinamis

Respon baterai ditunjukkan dengan rangkaian RC sederhana yang diatur pada tegangan *initial* sebesar 6V dan 12V ditunjukkan pada skema rangkaian simulasi pada Gambar 3.9. Sehingga didapat respon pada keadaan tegangan input atau output yang berubah-ubah, konverter harus bisa mengontrol arus agar tetap konstan baik ketika beroperasi *buck* maupun *boost*. Untuk mempertahankan arus agar tetap konstan maka nilai *duty cycle* harus diubah-ubah. Pengaturan *duty cycle* pada konverter ini dilakukan secara otomatis oleh rangkaian controller *Proportional-Integral* (PI). Penentuan nilai penguatan kontroler yaitu  $K_p$  dan  $K_i$  dilakukan dengan metode *trial and error*.

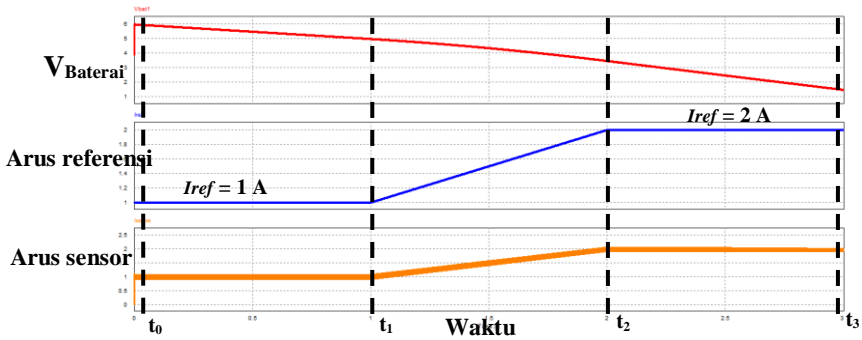


**Gambar 3. 9** Rangkaian simulasi konverter pada kondisi dinamis

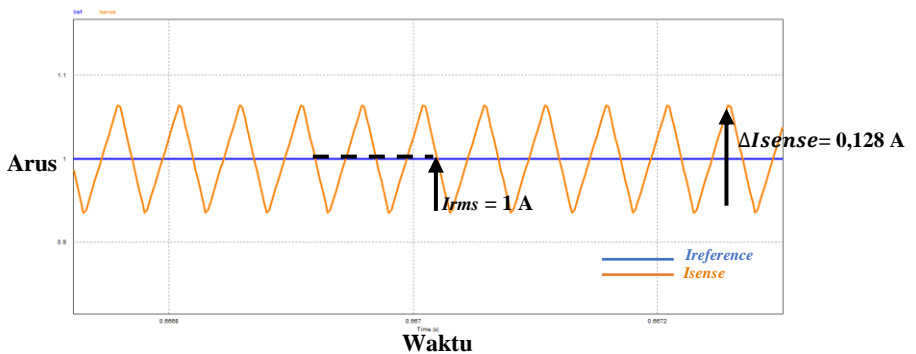
Cara kerja dari rangkaian tersebut adalah sensor arus (*Isense*) akan mensensing arus keluaran dari rangkaian baterai 6V kemudian dibandingkan dengan nilai arus referensi. Selisih atau *error* dari arus *sensing* dan referensi akan digunakan oleh rangkaian controller PI untuk mengatur *duty cycle* PWM *switch 1* dan *switch 2* hingga *error* bernilai mendekati nol dan arus yang *disensing* akan bernilai sama dengan referensi.

Gambar 3.10 dibawah ini menunjukkan bentuk gelombang arus sensor sebagai hasil dari respon controller PI dapat mengikuti nilai

referensi pada keadaan tegangan baterai 6V yang berubah. Dan Gambar 3.11 menunjukkan nilai ripple arus pada referensi 1A sebesar 128mA.



**Gambar 3. 10** Bentuk gelombang simulasi konverter pada kondisi dinamis



**Gambar 3. 11** Nilai *Ripple* arus sensing pada kondisi dinamis

### 3.7 Implementasi Konverter

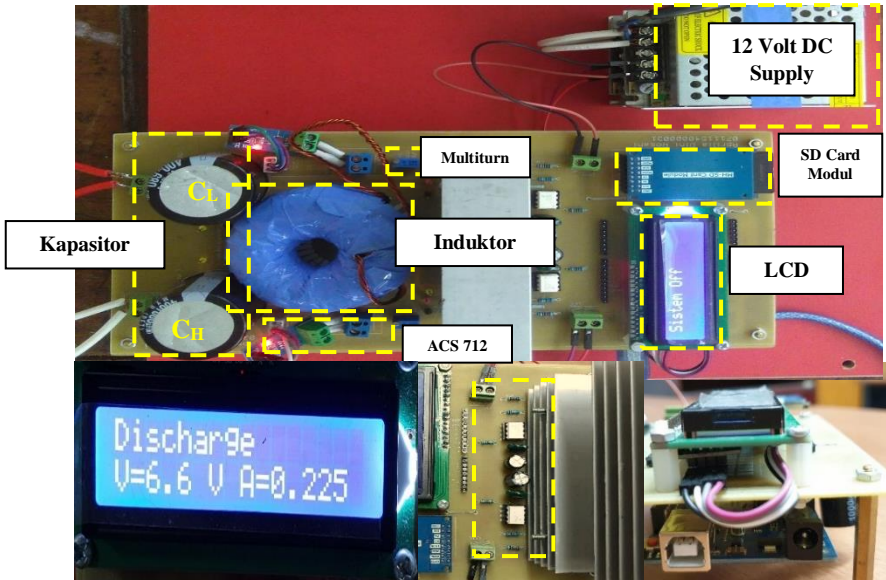
Pada bab ini dibahas mengenai implementasi konverter dengan parameter sesuai desain yang telah ditentukan. Parameter komponen dibuat semirip mungkin dengan desain yang telah ditentukan agar konverter dapat bekerja secara maksimal. Komponen yang diperlukan dituliskan pada tabel 3.5 sebagai berikut.

Tabel 3. 5 Nilai komponen yang digunakan pada implementasi

Parameter Baterai	Nilai
Baterai Uji	Panasonic LC-R064R5P
Baterai Beban	Panasonic LC-P127R2P
Parameter Konverter	Nilai
Induktor $L_m$	1,1 mH
Kapasitor $C_L$ dan $C_H$	680 $\mu$ F
MOSFET	IRFP 4332
<i>Microcontroller</i>	Arduino Uno
<i>Optocoupler</i>	FOD 3182
<i>Gate Supply</i>	12 V
Inti Induktor	0077548A7
Frekuensi Switching	20kHz
Daya	30W
Parameter Sensor	Nilai
Sensor Arus	ACS 712
Sensor Tegangan	Multiturn 100K $\Omega$

Seluruh komponen yang digunakan pada implementasi ini menyesuaikan dengan nilai komponen yang tersedia di pasaran. Nilai komponen dipilih lebih tinggi dari perhitungan desain untuk mengantisipasi hal yang tidak diinginkan saat pengimplementasian.

Hasil implementasi konverter terlihat pada Gambar 3.12 dan Gambar 3.13. Pada pengimplementasiannya, sistem dibagi menjadi empat bagian utama. Bagian pertama adalah rangkaian konverter *bidirectional buck boost* yang didalamnya terdapat induktor, kapasitor, sensor tegangan, sensor arus, dan mosfet. Bagian kedua adalah *display* LCD yang diprogram untuk menampilkan informasi ketika konverter sedang bekerja yaitu berupa nilai tegangan dan arus ketika baterai uji sedang *dicharge* dan di *discharge*. Bagian ketiga adalah mosfet driver yang berfungsi sebagai penghubung kontroler PWM dengan mosfet pada konverter. Bagian keempat adalah mikrokontroler dimana seluruh program yang digunakan pada sistem akan ditanamkan pada mikrokontroler arduino uno.

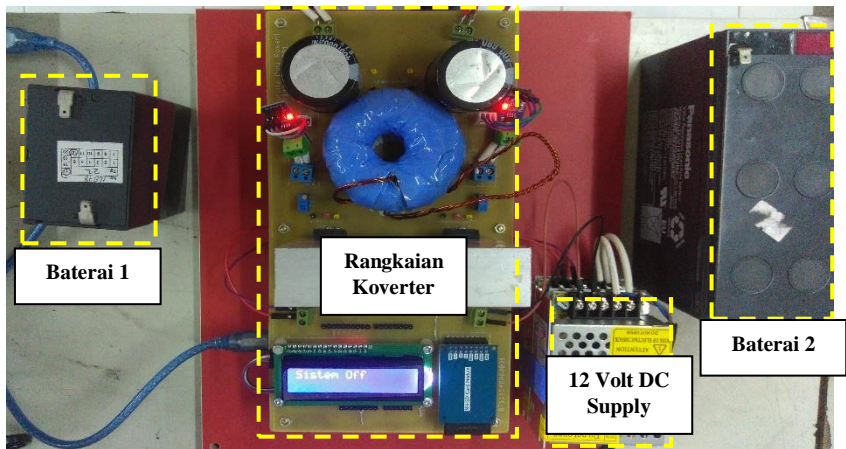


*LCD Display*

*MOSFET Driver*

*Arduino uno*

Gambar 3. 12 Implementasi rangkaian konverter



Gambar 3. 13 Implementasi ketika proses pengujian baterai

## BAB 4

### HASIL PENGUJIAN DAN ANALISA DATA

Pada bab 4 akan dibahas mengenai pengujian implementasi konverter *Bidirectional buck boost* dan analisis data hasil pengujian karakteristik baterai. Pengujian dilakukan untuk mengetahui apakah konverter telah bekerja sesuai desain yang telah dibuat. Pengujian yang dilakukan diantaranya adalah pengujian sinyal pensakelaran, pengujian tegangan kapasitor, pengujian tegangan keluaran konverter, pengujian efisiensi, pengujian respon dinamik konverter, dan pengujian karakteristik baterai. Hasil dari pengujian selanjutnya akan dianalisis dan dibandingkan dengan hasil simulasi konverter menggunakan PSIM dan hasil perhitungan sesuai teori.

#### 4.1 Pengujian Sensor

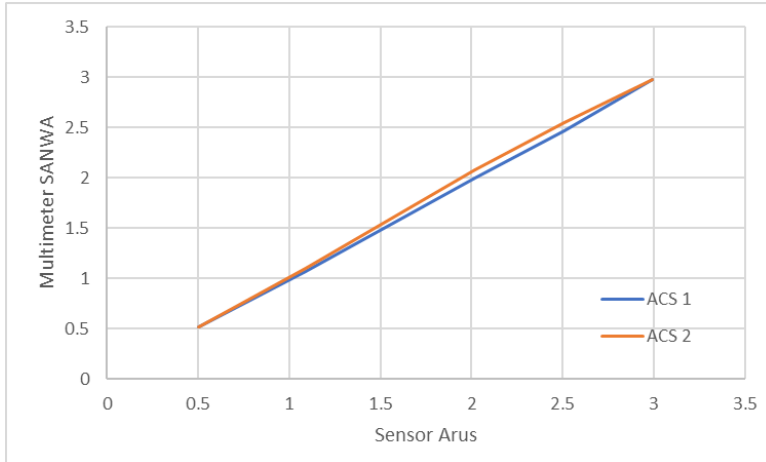
Perangkat sensor yang digunakan pada pengerjaan tugas akhir ini yaitu sensor arus berupa ACS712 5A dan pembagi tegangan yang berupa *multiturn* trimpot 100k $\Omega$ .

##### 4.1.1 Pengujian Sensor Arus

Sensor arus memiliki peranan yang penting dalam pengoperasian sistem, karena metode *constant current control* sangat bergantung pada keakuratan nilai arus yang diukur. Pengujian sensor arus dilakukan dengan cara membandingkan nilai yang ditunjukkan oleh sensor dengan nilai yang ditunjukkan oleh alat ukur yang sudah terkalibrasi. Alat ukur yang digunakan adalah multimeter SANWA CD771. Data hasil pembacaan sensor arus ditunjukkan pada Tabel 4.1 dan Gambar 4.1 dibawah ini.

**Tabel 4. 1** Pengujian Sensor Arus

No	Amperemeter (A)	ACS 1 (A)	ACS 2 (A)	Error 1 (A)	Error 2 (A)
1	0,5	0,515	0,515	0,015	0,015
2	1,09	1,07	1,096	0,02	0006
3	2,02	1,995	2,074	0,025	0,054
4	2,51	2,470	2,547	0,04	0,037
5	2,99	2,972	2,972	0,018	0,018



**Gambar 4. 1** Grafik pengujian sensor arus

Berdasarkan data pengujian pada Tabel 4.1 dapat disimpulkan bahwa sensor arus dapat membaca arus input dan output dengan baik dan mempunyai nilai *error* rata-rata kedua sensor sebesar 1,6%.

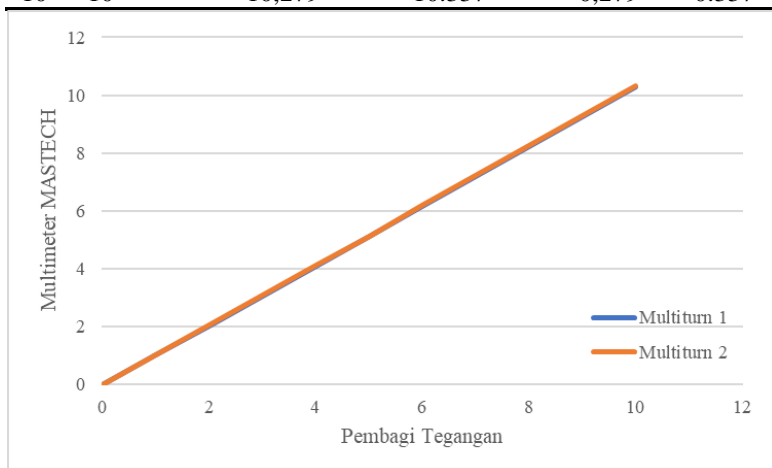
#### 4.1.2 Pengujian Pembagi Tegangan

Sensor tegangan memiliki peranan penting dalam mendeteksi tegangan baterai, mengingat baterai sangat tidak dianjurkan dioperasikan di bawah tegangan *cut-off* baterai. Pada pengujian sensor tegangan, digunakan sumber tegangan DC yang terdapat pada laboratorium. Nilai yang terbaca oleh sensor kemudian dibandingkan dengan alat ukur konvensional sebagai referensi. Alat ukur yang digunakan adalah multimeter MASTECH MS8268. Data hasil pembacaan sensor tegangan ditunjukkan pada Tabel 4.2 dan Gambar 4.2 berikut ini.



**Tabel 4. 2 Pengujian pembagi tegangan**

No	Multimeter (V)	Multiturn 1 (V)	Multiturn 2 (V)	Error 1 (V)	Error 2 (V)
1	1	1,012	1	0,012	0.012
2	2	2,023	2.067	0,023	0.067
3	3	3,065	3.094	0,065	0.094
4	4	4,076	4.106	0,076	0.106
5	5	5,117	5.132	0,117	0.132
6	6	6,144	6.188	0,144	0.188
7	7	7,17	7.214	0,17	0.214
8	8	8,211	8.27	0,211	0.27
9	9	9,238	9.296	0,238	0.296
10	10	10,279	10.337	0,279	0.337



**Gambar 4. 2** Grafik pengujian pembagi tegangan

Berdasarkan data pengujian pada tabel 4.2 dapat disimpulkan bahwa sensor tegangan dapat membaca tegangan dengan baik dan mempunyai nilai *error* rata-rata 2% - 2,9%.

#### **4.2 Pengujian Konverter *Bidirectional Buck-Boost***

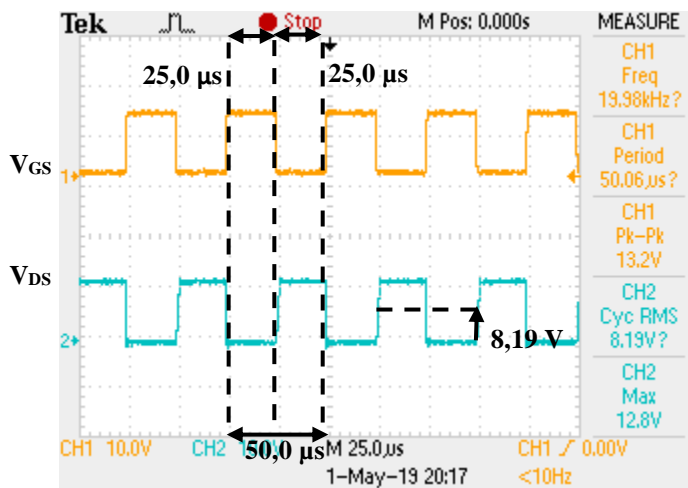
Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kinerja konverter apakah sudah sesuai dengan desain atau tidak. Pengujian dilakukan dengan menggunakan peralatan yang terdapat di Laboratorium Konversi Energi

yang meliputi *Variable DC Supply* yang diparalel memiliki *rating* maksimal 30 Volt dan arus maksimal 10 Ampere, *Rheostat* LANGLOIS, multimeter MASTECH MS8286, *clamp* meter SANWA DCM-22AD, LCR meter SANWA LCR700, dan seluruh gelombang tegangan dan arus pada masing-masing komponen diamati menggunakan osiloskop TENTRONIX TPS 2014B.

#### 4.2.1 Pengujian Pensakelaran

Pengujian pensakelaran dilakukan pada dua mode operasi konverter yaitu saat mode *boost*, dan *buck*. Pada pengujian pensakelaran mode *boost*, yaitu kondisi MOSFET 1 *on* dan MOSFET 2 *off*. Sedangkan saat *buck*, kondisi MOSFET 1 *off* dan MOSFET 2 *on*. Kedua pengujian ini dilakukan dengan mengamati bentuk gelombang pada MOSFET yaitu tegangan *gate-source* dan tegangan *drain-source*.

Gambar 4.3 dibawah ini menunjukkan bentuk gelombang hasil pengujian pensakelaran MOSFET 1.

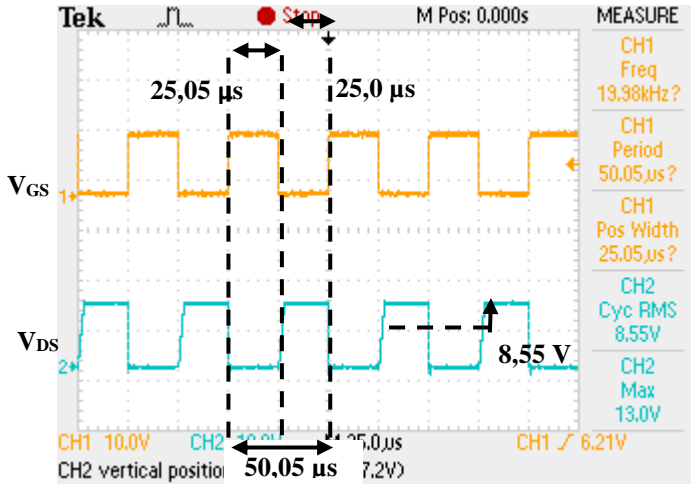


**Gambar 4. 3** Grafik pengujian MOSFET 1

Dapat diamati frekuensi *switching* bernilai 19,98 kHz, Periode pensakelaran sebesar 50,06 μs, dengan waktu konduksi ( $t_{on}$ ) sebesar 25,0 μs dan waktu sakelar terbuka ( $t_{off}$ ) sebesar 25,0 μs. Nilai tegangan pada sisi drain-source hanya mencapai 8,19V yang mana lebih kecil dari hasil simulasi yang bernilai 8,45V. Dan tegangan drain-source yang terbentuk

memiliki nilai maksimal 12,8 V. Hal tersebut disebabkan MOSFET yang digunakan saat implementasi nilainya tidak ideal.

Bentuk gelombang pengujian pesakelaran MOSFET 2 dapat diamati pada Gambar 4.4 dibawah ini.



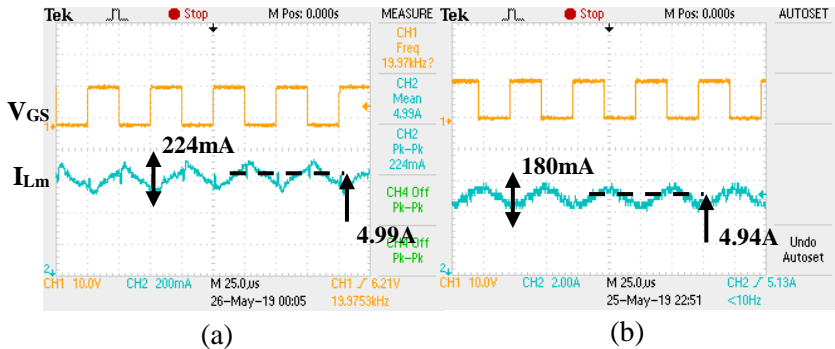
**Gambar 4. 4** Grafik pengujian MOSFET 2

Dapat diamati frekuensi *switching* bernilai 19,97 kHz, Periode pensakelaran sebesar 50,08  $\mu$ s, dengan waktu konduksi ( $t_{on}$ ) sebesar 25,06  $\mu$ s dan waktu sakelar terbuka ( $t_{off}$ ) sebesar 25,02  $\mu$ s. Nilai tegangan pada sisi drain-source hanya mencapai 7,85V yang mana lebih kecil dari hasil simulasi yang bernilai 8,45V. Dan tegangan *drain-source* yang terbentuk memiliki nilai maksimal 13,2 V. Hal tersebut disebabkan MOSFET yang digunakan saat implementasi nilainya tidak ideal.

#### 4.2.2 Pengujian Arus Induktor $L_m$

Pengujian tegangan kapasitor bertujuan untuk mengetahui kesesuaian bentuk gelombang antara hasil simulasi dan implementasi

terutama bentuk gelombang dan nilai arus induktor serta nilai *ripple*. Hasil pengujian arus induktor ditunjukkan pada gambar 4.5 dibawah ini.

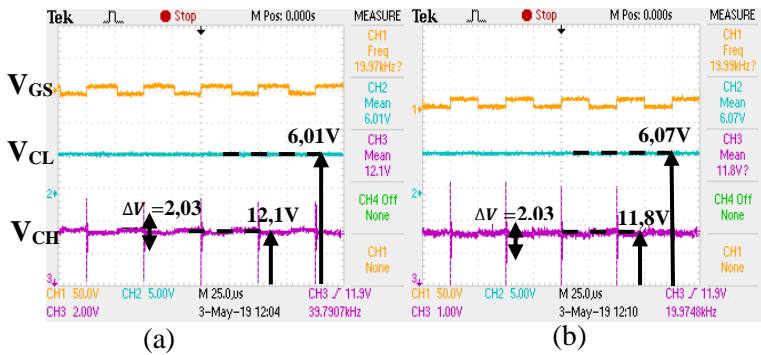


**Gambar 4. 5** Grafik arus induktor  $I_m$  saat konverter bekerja (a) Mode Operasi *Boost* (b) Mode Operasi *Buck*

Gambar 4.5 menunjukkan bahwa induktor telah bekerja pada kondisi *Continuous Conduction Mode* (CCM). Arus induktor  $I_m$  bernilai hampir sama yaitu ketika mode boost memiliki nilai 4,99A dan pada mode buck bernilai 4,94A. Nilai ripple induktor saat implementasi lebih tinggi dibanding simulasi, hal tersebut karena ketidakidealan komponen seperti rugi-rugi belitan, rugi-rugi inti, dan flux bocor. Akan tetapi nilai tersebut masih dapat ditoleransi dan induktor masih bekerja sesuai dengan yang diinginkan.

### 4.2.3 Pengujian Tegangan Kapasitor

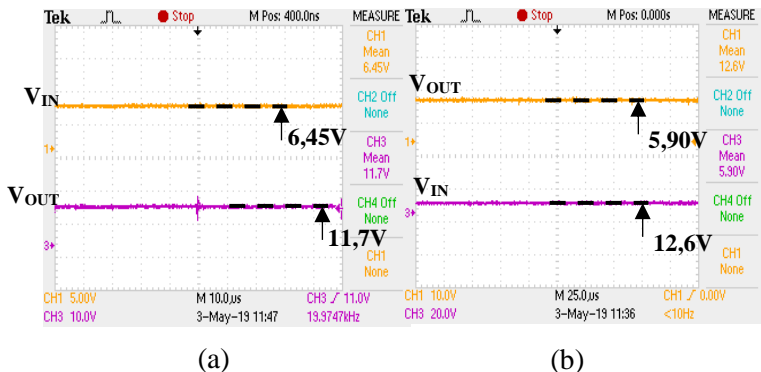
Pengujian kapasitor berfungsi untuk mengetahui nilai tegangan dan ripple tegangan pada kapasitor. Pengujian dilakukan pada dua mode operasi konverter, yaitu ketika boost dan buck pada *duty cycle* yang sama. Hasil pengujian tegangan kapasitor  $C_L$  dan  $C_H$  ditunjukkan pada Gambar 4.6 dibawah ini.



**Gambar 4. 6** Grafik Sinyal  $V_{GS}$  ,  $V_{CS1}$  dan  $V_{CS2}$  saat konverter bekerja (a) Mode Operasi *Boost* (b) Mode Operasi *Buck*

#### 4.2.4 Pengujian Tegangan Masukan dan Keluaran Konverter

Pengujian tegangan masukan dan keluaran konverter bertujuan untuk mengetahui apakah konverter mampu menaikkan nilai tegangan dari 6V ke 12V saat mode *boost*, dan menurunkan nilai tegangan dari 12V ke 6V saat mode *buck*. Bentuk gelombang ditunjukkan pada Gambar 4.7 dibawah ini.



**Gambar 4. 7** Grafik Sinyal *Input* dan *Output* saat konverter bekerja Mode Operasi *Boost* (b) Mode Operasi *Buck*

Dari pengujian didapatkan nilai tegangan *output* saat mode *boost* adalah 11,7V dan saat mode *buck* adalah 5,90V. Nilai *ripple* yang terukur pada tegangan *output* kedua mode operasi adalah 2,40V yang mana nilai tersebut lebih besar dibanding nilai simulasi dan desain awal. Perbedaan nilai tersebut disebabkan karena drop tegangan pada rangkaian dan ketidakidealan komponen yang digunakan.

### 4.3 Pengujian Efisiensi

Berikut adalah hasil pengujian efisiensi konverter *bidirectional buck-boost*. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui apakah karakteristik dan kinerja dari rangkaian konverter sudah baik atau belum. Pengujian ini dilakukan dengan menjaga tegangan *input* dan *output* agar konstan yaitu sebesar 6V dan 12V pada daya beban yang diubah-ubah dengan daya maksimum sebesar 30 Watt. Perubahan beban dilakukan mulai dari 10%-100% dari desain yang telah ditentukan. Pengujian efisiensi konverter dilakukan tanpa memperhatikan rangkaian kontrol. Perhitungan efisiensi konverter dilakukan dengan cara membandingkan daya *output* dengan daya *input* konverter. Hasil pengujian efisiensi konverter saat mode *boost* dituliskan pada tabel 4.3 sedangkan saat mode *buck* dituliskan pada tabel 4.4 sebagai berikut.

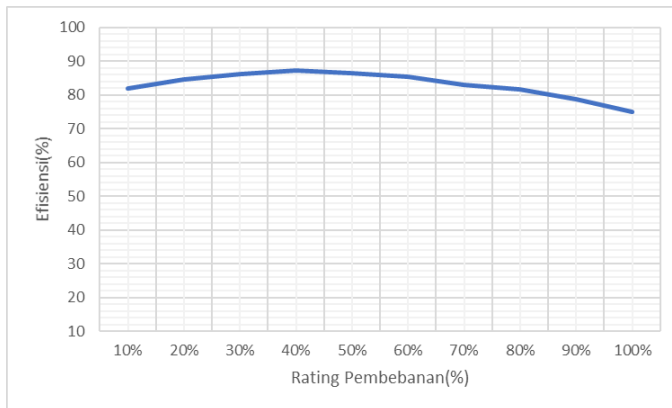
**Tabel 4. 3** Efisiensi konverter *bidirectional buck-boost* pada mode operasi *boost*

No	Pin (W)	Pout (W)	Efisiensi (%)
1	3.72	3.05	81.98925
2	7.575	6.4077	84.5901
3	10.6128	9.15	86.21664
4	13.8774	12.1	87.19213
5	17.7	15.3125	86.5113
6	21.36	18.2106	85.25562
7	25.92	21.4725	82.84144
8	29.58	24.1401	81.60953
9	34.44	27.0675	78.59321
10	40.56	30.4416	75.05325

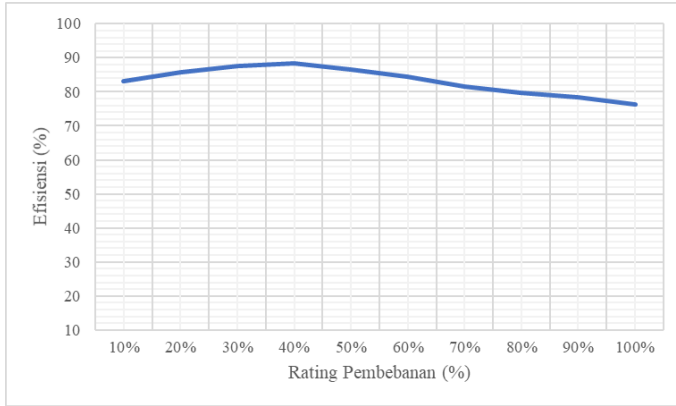
**Tabel 4. 4** Efisiensi konverter *bidirectional buck boost* pada mode operasi *buck*

No	Pin (W)	Pout (W)	Efisiensi (%)
1	3.388	2.82	83.23495
2	7.26	6.222	85.70248
3	10.406	9.1168	87.61099
4	12.705	11.2295	88.38646
5	17.787	15.4077	86.62338
6	21.175	17.908	84.57143
7	25.652	20.9051	81.49501
8	29.282	23.34	79.70767
9	34.485	27.06	78.4689
10	40.535	30.9472	76.34686

Grafik efisiensi konverter ketika beroperasi pada mode *boost* dan mode *buck* ditunjukkan pada gambar 4.8 dan 4.9 sebagai berikut.



**Gambar 4. 8** Grafik Pengujian Efisiensi Konverter Saat Mode Operasi *Boost*



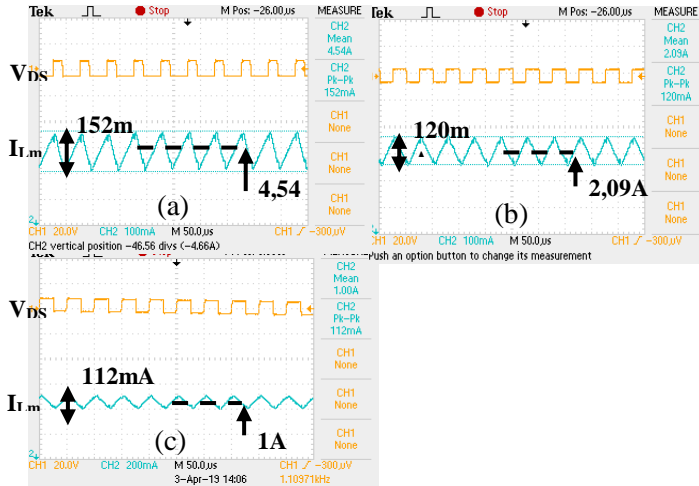
**Gambar 4. 9** Grafik Pengujian Efisiensi Konverter Saat Mode Operasi *Buck*

Dari kedua grafik tersebut, dapat diamati bahwa efisiensi semakin turun seiring dengan meningkatnya *rating* pembebanan konverter. Hal tersebut terjadi karena dengan semakin meningkatnya nilai beban, maka semakin meningkat arus pula arus yang mengalir pada rangkaian. Sehingga rugi-rugi yang ada pada rangkaian menjadi semakin besar juga. Berdasarkan hasil pengujian, dapat diambil kesimpulan nilai efisiensi rata-rata pada saat mode operasi *boost* sebesar 82,98% sedangkan saat operasi *buck* 83,21%.

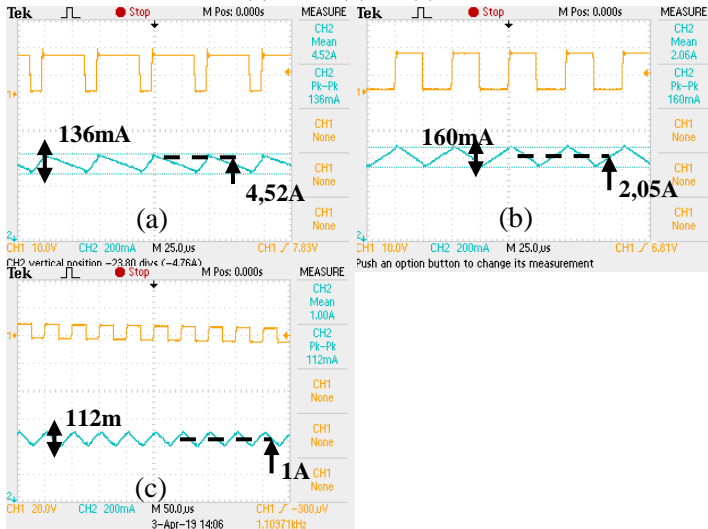
#### 4.4 Pengujian Kontrol Arus Konverter

Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mengetahui apakah kerja dari pengontrol sudah berhasil atau belum. Pengontrol harus dapat mempertahankan arus induktor agar bernilai konstan sesuai dengan set point yang ditetapkan. Set point yang digunakan dalam percobaan bernilai 4,5A , 2A, dan 1A. Gambar 4.10 merupakan hasil pengujian respon dinamis konverter saat mode operasi boost, dan gambar 4.11 ketika mode operasi buck.





**Gambar 4. 10** Grafik pengujian arus saat mode operasi *boost* dengan arus referensi sebesar (a) 4,5A (b)2A (c)1A



**Gambar 4. 111** Grafik pengujian arus saat mode operasi *buck* dengan arus referensi sebesar (a) 4,5A (b)2A (c)1A

Berdasarkan gambar diatas, dapat disimpulkan bahwa rangkaian kontrol sudah bekerja dengan baik. Dari grafik tersebut juga dapat diamati bahwa skema *average current control* yang diusulkan sudah bekerja dengan baik, bentuk gelombang arus pada saat *boost* dan *buck* adalah sama namun nilai *ripple* yang didapat ketika implementasi berbeda dengan hasil simulasi dikarenakan ketidakidealan komponen.

## 4.5 Pengujian Baterai

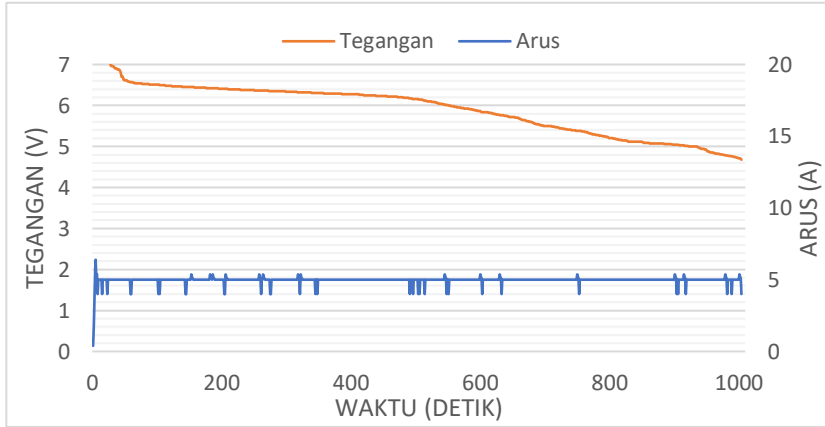
Sesuai dengan penjelasan pada bab 3, maka pengujian karakteristik baterai dilakukan pengujian pengosongan dan pengisian baterai. Hal tersebut bertujuan untuk mendapatkan kurva karakteristik *dischargenya* dan untuk menentukan nilai *State of Charge* (SoC) dari siklus *charge-discharge* berulang kali menggunakan metode *Coulomb Counting* (CC). Selanjutnya hasil pengujian SoC baterai akan dibandingkan dengan metode *Open Circuit Voltage* (OCV). Pengambilan data saat pengujian menggunakan tiga jenis *C-rating* yang berbeda yaitu C/3, C/10, dan C/20. Seluruh hasil pengujian baterai akan dibahas pada subbab sebagai berikut.

### 4.5.1 Pengujian Karakteristik Discharge Baterai

Pengujian karakteristik *discharge* baterai menggunakan arus konstan secara kontinyu berdasarkan tiga jenis *c-rating* yang berbeda. Analisa perhitungan SoC dilakukan pada kondisi yang sama dengan cara mengkondisikan agar tegangan internal baterai sebelum dikuras bernilai sama. Selanjutnya data hasil pengujian akan dianalisa dan ditentukan nilai kapasitasnya menggunakan metode *Coulomb Counting* (CC) dan hasilnya akan dibandingkan dengan metode *open circuit voltage* (OCV). Ketiga data hasil pengujian dituliskan pada subbab berikut.

#### 4.5.1.1 Pengujian 2C

Pengambilan data pada pengujian 2C dilakukan setiap satu detik. Grafik kurva dan data pengujian 1C ditunjukkan pada Gambar 4.12 dan tabel 4.5 sebagai berikut.



**Gambar 4. 12** Grafik pengujian 2C

**Tabel 4. 5** Data pengujian 2C

Parameter	Nilai
Tegangan Awal <i>Open Circuit</i>	6,21V
Arus Discharge	5A
Tegangan <i>cut-off</i>	4,65V
Waktu Pengujian	16,73 menit
Tegangan akhir <i>Open Circuit</i>	5,74V

Dari hasil pengujian yang sudah dilakukan, diketahui tegangan awal baterai saat OCV bernilai 6,21V, dan dari analisa *look-up* tabel kurva tegangan *open circuit*nya didapat SoC baterai sekitar 55%. Arus *discharge* dan tegangan *cut-off* ditetapkan sesuai dengan *rating* 30 menit. Akan tetapi pada keadaan *real* nya baterai mencapai tegangan *cut-off* dalam waktu 16,73 menit yang mana tidak sesuai waktu *rating* yang bernilai 30jam. Dari data yang ada, didapat kapasitas baterai dengan mengalikan arus *discharge*(i) dengan lama waktu *discharge* (t). Sehingga didapatkan nilai kapasitas baterai adalah sebesar 1,39Ah.

Penentuan SoC dapat dilakukan dari data SoC akhir yang didapat. Berdasarkan data yang didapat, nilai tegangan akhir baterai saat OCV sebesar 5,74V. Berdasarkan kurva OCV, maka SoC

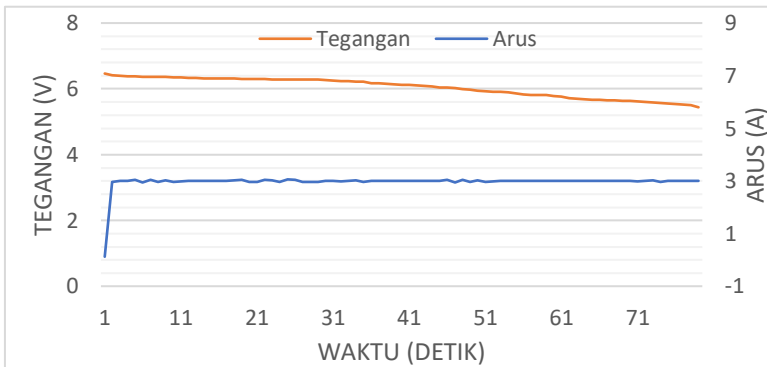
akhir baterai bernilai 0%. Sehingga SoC awal dapat dihitung melalui persamaan (2.5) sebagai berikut:

$$SoC(t_0) = 0\% + \frac{1,39}{2,7}\% = 51,6\%$$

Kapasitas penuh baterai (Cn) ditentukan berdasarkan rating pada datasheet yaitu 2,7Ah pada rating 2C. Dari perhitungan yang diatas, SoC awal baterai sebesar 51,6% dan bila dibandingkan dengan metode OCV, SoC baterai berada pada range 40%-70% yaitu sebesar 55%. Sehingga dapat diambil kesimpulan bahwa metode *coulomb counting* dapat mengestimasi nilai SoC dengan benar.

#### 4.5.1.2 Pengujian 1C

Pengambilan data pada pengujian 1C dilakukan setiap 30 detik. Grafik kurva dan data pengujian 1C ditunjukkan pada Gambar 4.13 dan tabel 4.6 sebagai berikut.



**Gambar 4.13** Grafik pengujian 1C

**Tabel 4.6** Data pengujian 1C

Parameter	Nilai
Tegangan Awal <i>Open Circuit</i>	6,27V
Arus Discharge	3A
Tegangan <i>cut-off</i>	5,40V
Waktu Pengujian	39 menit
Tegangan akhir <i>Open Circuit</i>	5,74V

Dari hasil pengujian yang sudah dilakukan, diketahui tegangan awal baterai saat OCV bernilai 6,27V, dan dari analisa *look-up* tabel kurva tegangan *open circuit*nya didapat SoC baterai berada pada *range* 67,5%. Arus *discharge* dan tegangan *cut-off* ditetapkan sesuai dengan *rating* 1 jam. Akan tetapi pada keadaan *real* nya baterai mencapai tegangan *cut-off* dalam waktu 39 menit yang mana tidak sesuai waktu *rating* yang bernilai 1jam. Dari data yang ada, didapat kapasitas baterai dengan mengalikan arus *discharge*(*i*) dengan lama waktu *discharge* (*t*). Sehingga didapatkan nilai kapasitas baterai adalah sebesar 1,975Ah.

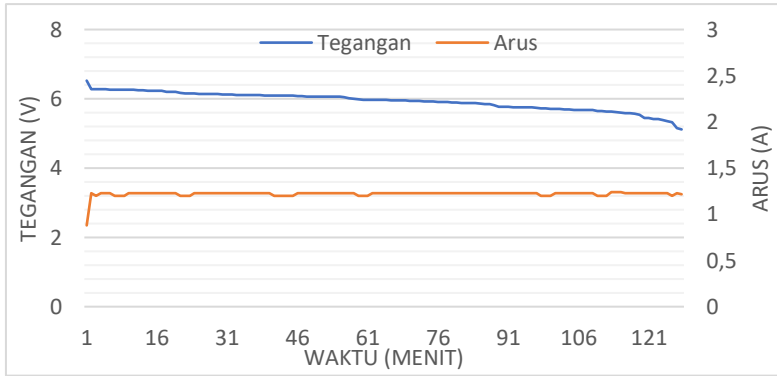
Penentuan SoC dapat dilakukan dari data SoC akhir yang didapat. Berdasarkan data yang didapat, nilai tegangan tegangan akhir baterai saat OCV sebesar 5,74V. Berdasarkan kurva OCV, maka SoC akhir baterai bernilai 0%. Sehingga SoC awal dapat dihitung melalui persamaan (2.5) sebagai berikut:

$$SoC(t_0) = 0\% + \frac{1,975}{3,1}\% = 63,7\%$$

Kapasitas penuh baterai (Cn) ditentukan berdasarkan *rating* pada datasheet yaitu 3,1Ah pada *rating* 1C. Dari perhitungan yang diatas, SoC awal baterai sebesar 63,7% dan bila dibandingkan dengan metode OCV, SoC baterai berada pada *range* 50%-85% yaitu sebesar 67,5%. Sehingga dapat diambil kesimpulan bahwa metode *coulomb counting* dapat mengestimasi nilai SoC dengan benar.

#### 4.5.1.3 Pengujian C/3

Pengambilan data pada *rating* C/3 dilakukan setiap menit. Hasil pengujian arus dan tegangan *rating* C/3 ditunjukkan pada gambar 4.14. Hasil pengujian kemudian dirangkumkan pada tabel 4.7 sebagai berikut.



**Gambar 4.14** Grafik pengujian C/3

**Tabel 4.7** Data pengujian C/3

Parameter	Nilai
Tegangan Awal <i>Open Circuit</i>	6,33V
Arus Discharge	1,23A
Tegangan <i>cut-off</i>	5,10V
Waktu Pengujian	2 jam 8 menit
Tegangan akhir <i>Open Circuit</i>	5,74V

Dari hasil pengujian yang sudah dilakukan, diketahui tegangan awal baterai saat OCV bernilai 6,33V, dan dari analisa *look-up* tabel kurva tegangan *open circuit*nya didapat SoC baterai berada pada *range* 75%. Arus *discharge* dan tegangan *cut-off* ditetapkan sesuai dengan *rating* 3 jam. Akan tetapi pada keadaan *real* nya baterai mencapai tegangan *cut-off* dalam waktu 2jam 8menit yang mana tidak sesuai waktu *rating* yang bernilai 3jam. Dari data yang ada, didapat kapasitas baterai dengan mengalikan arus *discharge*(*i*) dengan lama waktu *discharge* (*t*). Sehingga didapatkan nilai kapasitas baterai adalah sebesar 2,6Ah.

Penentuan SoC dapat dilakukan dari dari data SoC akhir yang didapat. Berdasarkan data yang didapat, nilai tegangan tegangan akhir baterai saat OCV sebesar 5,74V. Berdasarkan kurva OCV, maka SoC

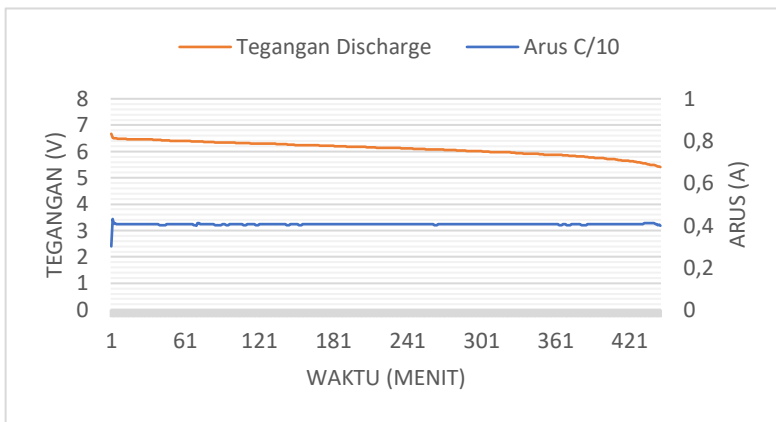
akhir baterai bernilai 0%. Sehingga SoC awal dapat dihitung melalui persamaan (2.5) sebagai berikut:

$$SoC(t_0) = 0\% + \frac{2,6}{3,6}\% = 72,22\%$$

Kapasitas penuh baterai (Cn) ditentukan berdasarkan rating pada datasheet yaitu 3,6Ah pada rating C/3. Dari perhitungan yang diatas, SoC awal baterai sebesar 72% dan bila dibandingkan dengan metode OCV, SoC baterai berada pada range 60%-90% yaitu sebesar 75%. Sehingga dapat diambil kesimpulan bahwa metode *coulomb counting* dapat mengestimasi nilai SoC dengan benar.

#### 4.5.1.4 Pengujian C/10

Grafik kurva dan data pengujian C/10 ditunjukkan pada gambar 4.15 dan tabel 4.8 sebagai berikut.



**Gambar 4.15** Grafik pengujian C/10

**Tabel 4.8** Data pengujian C/10

Parameter	Nilai	
	Charge	Discharge
Tegangan Awal <i>Open Circuit</i>	5,75V	6,33V
Arus Disccharge	406mA	406mA
Tegangan <i>cut-off</i>	7,45V	5,40V
Waktu Pengujian	7 jam 33 menit	7 jam 26 menit
Tegangan akhir <i>Open Circuit</i>	6,35V	5,75V

Dari hasil pengujian yang sudah dilakukan, diketahui tegangan awal baterai saat OCV bernilai 6,35V, dan dari analisa *look-up* tabel kurva tegangan *open circuit*nya didapat SoC baterai berada sekitar 75%. Arus *discharge* dan tegangan *cut-off* ditetapkan sesuai dengan *rating* 10 jam. Akan tetapi pada keadaan *real* nya baterai mencapai tegangan *cut-off* dalam waktu 7jam 26menit yang mana tidak sesuai waktu *rating* yang bernilai 10jam. Dari data yang ada, didapat kapasitas baterai dengan mengalikan arus *discharge*(*i*) dengan lama waktu *discharge* (*t*). Sehingga didapatkan nilai kapasitas baterai adalah sebesar 3,018Ah.

Penentuan SoC dapat dilakukan dari data SoC akhir yang didapat. Berdasarkan data yang didapat, nilai tegangan tegangan akhir baterai saat OCV sebesar 5,75V. Berdasarkan kurva OCV, maka SoC akhir baterai bernilai 0%. Sehingga SoC awal dapat dihitung melalui persamaan (2.5) sebagai berikut:

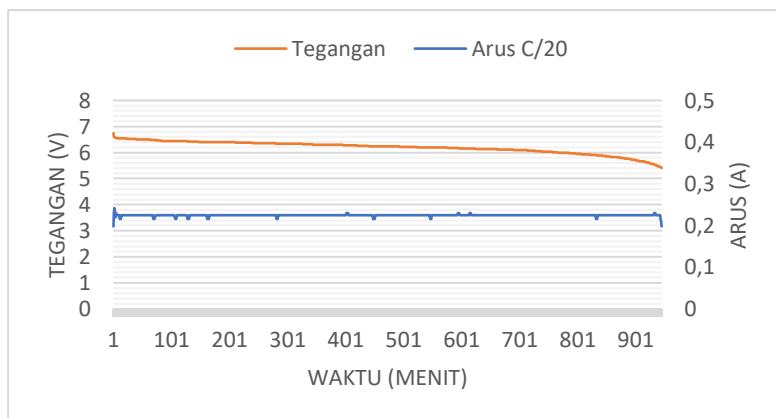
$$\text{SoC}_0 = 0\% + \frac{3,018}{4,1}\% = 73,61\%$$

Kapasitas penuh baterai (Cn) ditentukan berdasarkan *rating* pada datasheet yaitu 4,1Ah pada *rating* C/10. Dari perhitungan yang diatas, SoC awal baterai sebesar 73,61% dan bila dibandingkan dengan metode OCV, SoC baterai berada pada range 60%-90% yaitu sebesar 75%. Sehingga dapat diambil kesimpulan bahwa metode *coulomb counting* dapat mengestimasi nilai SoC dengan benar.

#### **4.5.1.5 Pengujian C/20**

Pengambilan data pada pengujian *rating* C/20 dilakukan swtiap satu menit. Grafik kurva arus dan tegangan pada *rating* C/20 ditunjukkan pada gambar 4. 16. Hasil pengujian kemudian dirangkumkan pada tabel 4.9 sebagai berikut.





**Gambar 4. 16** Grafik pengujian C/20

**Tabel 4.9** Data Pengujian C/20

Parameter	Nilai
Tegangan Awal <i>Open Circuit</i>	6,35V
Arus Discharge	225 mA
Tegangan <i>cut-off</i>	5,25V
Waktu Pengujian	15 jam 45 menit
Tegangan akhir <i>Open Circuit</i>	5,75V

Dari hasil pengujian yang sudah dilakukan, diketahui tegangan awal baterai saat OCV bernilai 6,35V, dan dari analisa *look-up* tabel kurva tegangan *open circuit*nya didapat SoC baterai berada pada *range* 75%. Arus *discharge* dan tegangan *cut-off* ditetapkan sesuai dengan *rating* 20 jam. Akan tetapi pada keadaan *real* nya baterai mencapai tegangan *cut-off* dalam waktu 15jam 45menit yang mana tidak sesuai waktu *rating* yang bernilai 20jam. Dari data yang ada, didapat kapasitas baterai dengan mengalikan arus *discharge*(i) dengan lama waktu *discharge* (t). Sehingga didapatkan nilai kapasitas baterai adalah sebesar 3,55Ah.

Penentuan SoC dapat dilakukan dari data SoC akhir yang didapat. Berdasarkan data yang didapat, nilai tegangan akhir baterai saat OCV sebesar 5,75V. Berdasarkan kurva OCV, maka SoC

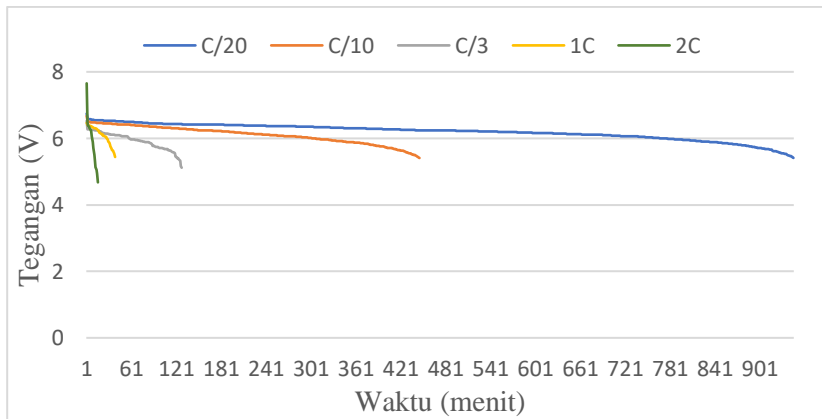
akhir baterai bernilai 0%. Sehingga SoC awal dapat dihitung melalui persamaan (2.5) sebagai berikut:

$$SoC(t_0) = 0\% + \frac{3,55}{4,5}\% = 78,83\%$$

Kapasitas penuh baterai (Cn) ditentukan berdasarkan rating pada datasheet yaitu 4,5Ah pada rating C/20. Dari perhitungan yang diatas, SoC awal baterai sebesar 78,83% dan bila dibandingkan dengan metode OCV, SoC baterai berada pada range 60%-90% yaitu sebesar 75%. Sehingga dapat diambil kesimpulan bahwa metode *coulomb counting* dapat mengestimasi nilai SoC dengan benar.

#### 4.5.1.6 Analisis Karakteristik Discharge Baterai

Grafik kurva pengujian karakteristik discharge dengan C-rating yang berbeda-beda ditunjukkan pada gambar 4.17 sebagai berikut.



**Gambar 4.157** Grafik karakteristik *discharge*

Dari gambar 4.18 dapat diamati bahwa kurva *discharge* baterai berbeda-beda berdasarkan *C-rating* yang digunakan. Dari grafik tersebut dapat diamati bahwa pada *rating* dengan arus *discharge* paling tinggi yaitu 5A mengalami *drop* tegangan paling cepat. Sedangkan *rating* C/20 dengan arus *discharge* paling rendah mengalami *drop* tegangan paling lama. Perhitungan SoC berdasarkan *coulomb counting* pada ketiga pengujian berturut-turut bernilai 51,6%, 63,7%, 72,22%, 74,51%, dan

78,83%. Perhitungan kapasitas baterai pada tiap pengujian berturut-turut bernilai 1,39Ah, 1,975Ah, 2,6Ah, 3,055Ah, dan 3,55Ah. Berdasarkan ketiga pengujian tersebut dapat ditarik kesimpulan bahwa semakin tinggi *C-rating* yang digunakan untuk mendischarge baterai, semakin kecil nilai kapasitas baterai yang didapat, begitu pula sebaliknya. Hal tersebut diakibatkan adanya rugi-rugi internal yang dapat mengakibatkan daya hilang menjadi panas yang timbul selama proses *discharge*. Sehingga, kapasitas baterai asli menjadi berkurang. Semakin besar nilai arus *discharge*, maka semakin besar pula rugi-ruginya, sehingga drop tegangan baterai menjadi semakin besar pula.

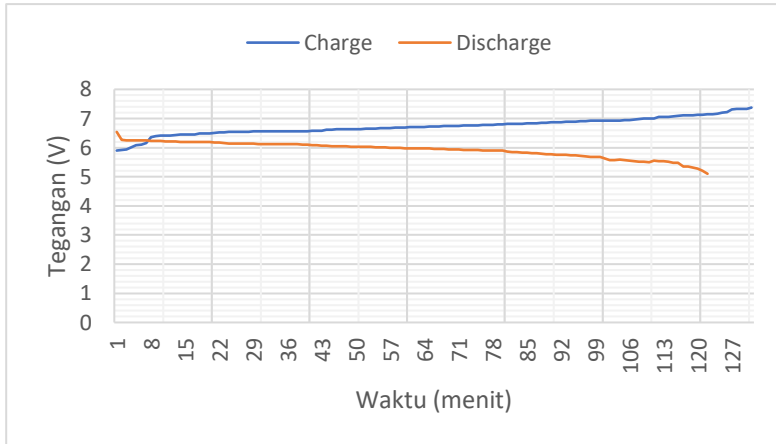
Hal lain yang dapat diamati dari pengujian diatas adalah pemilihan tegangan *cut-off* yang berbeda-beda tergantung pada *rating* yang digunakan. Tegangan *cut-off* memiliki peranan yang sangat penting untuk baterai agar dapat berumur panjang. Tegangan *cut-off* pada baterai mengindikasikan bahwa total muatannya bernilai nol atau habis. Penentuan tegangan *cut-off* memiliki peranan penting karena apabila baterai tetap dioperasikan pada tegangan dibawah *cut-off* sangat tidak dianjurkan karena dapat menyebabkan kecacatan dan bahkan memperpendek umur baterai.

#### **4.5.2 Pengujian Charge-Discharge Baterai**

Pengujian *charge-discharge* baterai bertujuan untuk mengetahui nilai SoC sesungguhnya pada batera. Pengujian dilakukan dengan menggunakan arus konstan secara kontinyu baik pada saat proses *discharge* dan saat *charge*, hal tersebut bertujuan untuk membandingkan grafik *charge-discharge* baterai pada *C-rating* yang sama. Proses *discharge* diatur sampai tegangan *cut-off* seperti yang sudah dijelaskan pada sub bab sebelumnya, sedangkan pada proses pengisian ditetapkan batas tegangan maksimalnya bernilai 7,45V sesuai dengan *datasheet*. Pengujian dilakukan berulang kali yaitu pada nilai *C-rating* C/3 sebanyak tiga kali, C/10 sebanyak satu kali, C/20 sebanyak satu kali, 1C sebanyak satu kali, dan 2C sebanyak satu kali. Seluruh hasil pengujian akan dibahas pada sub bab berikut ini.

##### **4.5.2.1 Analisa Charge-Discharge C/3 Siklus ke-1**

Grafik kurva dan data pengujian *charge-discharge* C/3 siklus pertama ditunjukkan pada gambar 4.18 dan tabel 4. 10 sebagai berikut.



**Gambar 4.18** Grafik pengujian C/3 siklus pertama

**Tabel 4.10** Data pengujian C/3 siklus pertama

Parameter	Nilai	
	<i>Charge</i>	<i>Discharge</i>
Tegangan Awal <i>Open Circuit</i>	5,74V	6,33V
Arus Disccharge	1,23 A	1,23A
Tegangan <i>cut-off</i>	7,45V	5,10V
Waktu Pengujian	2 jam 10 menit	2 jam 1 menit
Tegangan akhir <i>Open Circuit</i>	6,35V	5,74V

Dari hasil pengujian yang sudah dilakukan, diketahui tegangan OCV awal baterai sebelum diisi bernilai 5,74V dan dari analisa kurva tegangan *open circuit*nya didapat SoC baterai mula-mula bernilai 0%. Arus *charge* dan tegangan *cut-off* maksimal bernilai 1,23A dan 7,45V. Setelah proses *charging*, didapat tegangan baterai bernilai 6,35V dan berdasarkan kurva OCV maka SoC baterai berada pada range 60%-90% yaitu sebesar 75%. Dari data yang ada, didapat kapasitas baterai dengan mengalikan arus *discharge*(*i*) dengan lama waktu *discharge* (*t*). Sehingga didapatkan nilai kapasitas baterai adalah sebesar 2,665Ah. Dengan menganggap bahwa baterai diisi mulai dari keadaan kosong, maka untuk

memastikan nilai SoC sesungguhnya yang ada pada baterai, dilakukan perhitungan melalui persamaan (2.5) sebagai berikut:

$$SoC_t = 0\% + \frac{2,665}{3,6}\% = 74,03\%$$

Kapasitas penuh baterai (Cn) ditentukan berdasarkan *rating* pada *datasheet* yaitu 3,6Ah pada *rating* C/3. Dari perhitungan diatas, didapat SoC baterai sebesar 74,03% yang sudah sesuai juga dengan penentuan SoC baterai melalui metode OCV yaitu pada range 60%-90% yaitu sebesar 75%.

Selanjutnya baterai di *discharge* dengan arus yang sama seperti saat di *charge*. Proses *discharge* berlangsung selama 2jam 1menit. Dari data yang ada, didapat kapasitas baterai dengan mengalikan arus *discharge*(i) dengan lama waktu *discharge* (t). Sehingga didapatkan nilai kapasitas baterai adalah sebesar 2,4805Ah. Dengan menganggap SoC akhir baterai adalah 0%, maka SoC awal baterai saat sebelum dikuras dapat dihitung sebagai berikut.

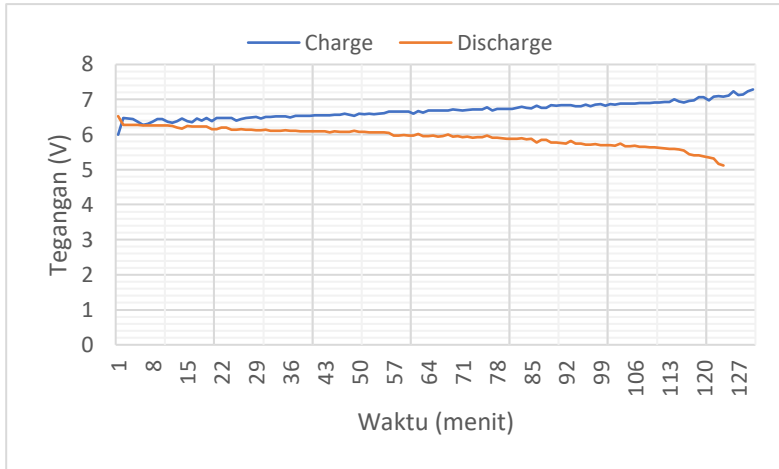
$$SoC(t_0) = 0\% - \frac{2,4805}{3,6}\% = 68,9\%$$

Dari perhitungan diatas, maka didapatkan nilai SoC awal sebelum *discharge* adalah sebesar 68,9% yang juga sudah sesuai dengan range OCV pada 60%-90% yaitu sebesar 75%.

Terdapat perbedaan nilai SoC baterai dan lama waktu proses dari kedua pengujian tersebut. Hal tersebut terjadi karena sesungguhnya baterai bukanlah media penyimpanan energi yang ideal sehingga terdapat faktor efisiensi *charge/discharge* baterai yang mempengaruhi perhitungan menggunakan metode *coulomb counting*. Faktor lain yang juga mempengaruhi adalah tingkat ketelitian sensor yang digunakan sehingga dapat mempengaruhi pembacaan program.

#### 4.5.2.2 Analisa Charge-Discharge C/3 Siklus ke-2

Grafik kurva dan data pengujian *charge-discharge* C/3 siklus kedua ditunjukkan pada gambar 4.19 dan tabel 4.11 sebagai berikut.



**Gambar 4.19** Grafik pengujian C/3 siklus kedua

**Tabel 4.11** Data pengujian C/3 siklus kedua

Parameter	Nilai	
	Charge	Discharge
Tegangan Awal <i>Open Circuit</i>	5,75V	6,32V
Arus Discharge	1,23 A	1,23A
Tegangan <i>cut-off</i>	7,45V	5,10V
Waktu Pengujian	2 jam 9 menit	2 jam 7 menit
Tegangan akhir <i>Open Circuit</i>	6,34V	5,74V

Dari hasil pengujian yang sudah dilakukan, diketahui tegangan OCV awal baterai sebelum diisi bernilai 5,75V dan dari analisa kurva tegangan *open circuit*nya didapat SoC baterai mula-mula bernilai 0%. Arus *charge* dan tegangan *cut-off* maksimal bernilai 1,23A dan 7,45V. Setelah proses charging, didapat tegangan baterai bernilai 6,34V dan berdasarkan kurva OCV maka SoC baterai berada pada range 60%-90% yaitu sebesar 75%. Dari data yang ada, didapat kapasitas baterai dengan mengalikan arus *discharge*(*i*) dengan lama waktu *discharge* (*t*). Sehingga didapatkan nilai kapasitas baterai adalah sebesar 2,6445Ah. Dengan menganggap bahwa baterai diisi mulai dari keadaan kosong, maka untuk

memastikan nilai SoC sesungguhnya yang ada pada baterai, dilakukan perhitungan melalui persamaan (2.5) sebagai berikut:

$$SoC_t = 0\% + \frac{2,6445}{3,6}\% = 73,46\%$$

Kapasitas penuh baterai (Cn) ditentukan berdasarkan rating pada datasheet yaitu 3,6Ah pada rating C/3. Dari perhitungan diatas, didapat SoC baterai sebesar 73,46% yang sudah sesuai juga dengan penentuan SoC baterai melalui metode OCV berada pada range 60%-90% yaitu sebesar 75%.

Selanjutnya baterai di *discharge* dengan arus yang sama seperti saat di *charge*. Proses *discharge* berlangsung selama 2jam 7menit. Dari data yang ada, didapat kapasitas baterai dengan mengalikan arus *discharge*(i) dengan lama waktu *discharge* (t). Sehingga didapatkan nilai kapasitas baterai adalah sebesar 2,6035Ah. Dengan menganggap SoC akhir baterai adalah 0%, maka SoC awal baterai saat sebelum dikuras dapat dihitung sebagai berikut.

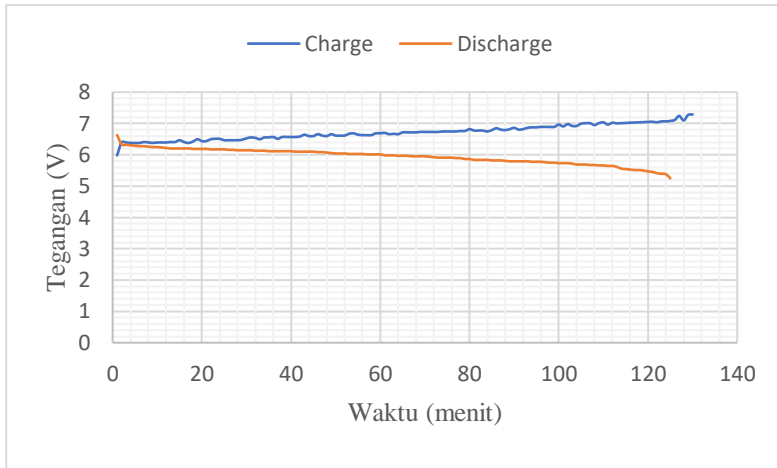
$$SoC_0 = 0\% - \frac{2,6035}{3,6}\% = 72,32\%$$

Dari perhitungan diatas, maka didapatkan nilai SoC awal sebelum discharge adalah sebesar 72,32% yang juga sudah sesuai dengan range OCV pada 60%-90% yaitu sebesar 75%.

Terdapat perbedaan nilai SoC baterai dan lama waktu proses dari kedua pengujian tersebut. Hal tersebut terjadi karena sesungguhnya baterai bukanlah media penyimpanan energi yang ideal sehingga terdapat faktor efisiensi *charge/discharge* baterai yang mempengaruhi perhitungan menggunakan metode *coulomb counting*. Faktor lain yang juga mempengaruhi adalah tingkat ketelitian sensor yang digunakan sehingga dapat mempengaruhi pembacaan program.

#### **4.5.2.3 Analisa Charge-Discharge C/3 Siklus ke-3**

Grafik kurva dan data pengujian *charge-discharge* C/3 siklus kedua ditunjukkan pada gambar 4.20 dan tabel 4.12 sebagai berikut.



**Gambar 4.20** Grafik pengujian C/3 siklus ketiga

**Tabel 4.12** Data pengujian C/3 siklus ketiga

Parameter	Nilai	
	Charge	Discharge
Tegangan Awal <i>Open Circuit</i>	5,75V	6,33V
Arus Discharge	1,23 A	1,23A
Tegangan <i>cut-off</i>	7,45V	5,10V
Waktu Pengujian	2 jam 9 menit	2 jam 5 menit
Tegangan akhir <i>Open Circuit</i>	6,34V	5,75V

Dari hasil pengujian yang sudah dilakukan, diketahui tegangan OCV awal baterai sebelum diisi bernilai 5,75V dan dari analisa kurva tegangan *open circuit*nya didapat SoC baterai mula-mula bernilai 0%. Arus *charge* dan tegangan *cut-off* maksimal bernilai 1,23A dan 7,45V. Setelah proses charging, didapat tegangan baterai bernilai 6,34V dan berdasarkan kurva OCV maka SoC baterai berada pada range 60%-90% yaitu sebesar 75%. Dari data yang ada, didapat kapasitas baterai dengan mengalikan arus *discharge*( $i$ ) dengan lama waktu *discharge* ( $t$ ). Sehingga didapatkan nilai kapasitas baterai adalah sebesar 2,6445Ah. Dengan menganggap bahwa baterai diisi mulai dari keadaan kosong, maka untuk



memastikan nilai SoC sesungguhnya yang ada pada baterai, dilakukan perhitungan melalui persamaan (2.5) sebagai berikut:

$$SoC_t = 0\% + \frac{2,6445}{3,6}\% = 73,46\%$$

Kapasitas penuh baterai (Cn) ditentukan berdasarkan rating pada datasheet yaitu 3,6Ah pada rating C/3. Dari perhitungan diatas, didapat SoC baterai sebesar 73,46% yang sudah sesuai juga dengan penentuan SoC baterai melalui metode OCV yaitu pada range 60%-90% yaitu sebesar 75%.

Selanjutnya baterai di *discharge* dengan arus yang sama seperti saat di *charge*. Proses *discharge* berlangsung selama 2jam 5menit. Dari data yang ada, didapat kapasitas baterai dengan mengalikan arus *discharge*(i) dengan lama waktu *discharge* (t). Sehingga didapatkan nilai kapasitas baterai adalah sebesar 2,5625Ah. Dengan menganggap SoC akhir baterai adalah 0%, maka SoC awal baterai saat sebelum dikuras dapat dihitung sebagai berikut.

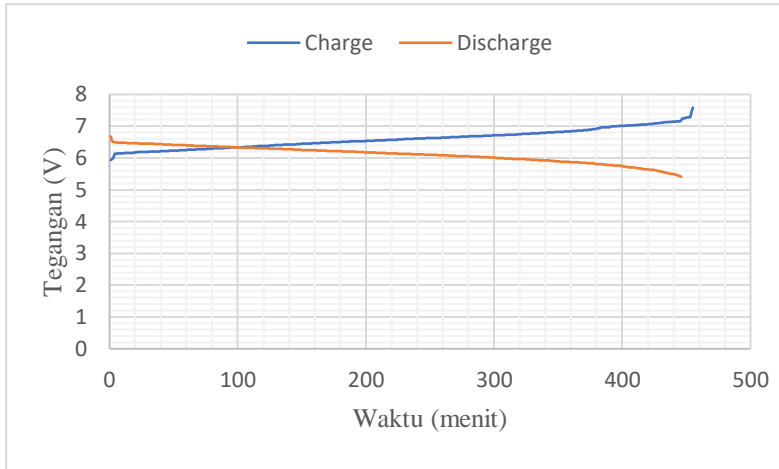
$$SoC(t_0) = 0\% - \frac{2,5625}{3,6}\% = 71,18\%$$

Dari perhitungan diatas, maka didapatkan nilai SoC awal sebelum discharge adalah sebesar 72,32% yang juga sudah sesuai dengan range OCV pada 60%-90% yaitu sebesar 75%.

Terdapat perbedaan nilai SoC baterai dan lama waktu proses dari kedua pengujian tersebut. Hal tersebut terjadi karena sesungguhnya baterai bukanlah media penyimpanan energi yang ideal sehingga terdapat faktor efisiensi *charge/discharge* baterai yang mempengaruhi perhitungan menggunakan metode *coulomb counting*. Faktor lain yang juga mempengaruhi adalah tingkat ketelitian sensor yang digunakan sehingga dapat mempengaruhi pembacaan program.

#### 4.5.2.4 Analisa Charge-Discharge C/10

Grafik kurva dan data pengujian *charge-discharge* C/10 ditunjukkan pada gambar 4.21 dan tabel 4.13 sebagai berikut.



**Gambar 4.22** Grafik pengujian C/10

**Tabel 4.13** Data pengujian C/10

Parameter	Nilai	
	Charge	Discharge
Tegangan Awal <i>Open Circuit</i>	5,75V	6,33V
Arus Discharge	406mA	406mA
Tegangan <i>cut-off</i>	7,45V	5,40V
Waktu Pengujian	7 jam 33 menit	7 jam 26 menit
Tegangan akhir <i>Open Circuit</i>	6,35V	5,75V

Dari hasil pengujian yang sudah dilakukan, diketahui tegangan OCV awal baterai sebelum diisi bernilai 5,75V dan dari analisa kurva tegangan *open circuit*nya didapat SoC baterai mula-mula bernilai 0%. Arus *charge* dan tegangan *cut-off* maksimal bernilai 406mA dan 7,45V. Setelah proses charging, didapat tegangan baterai bernilai 6,35V dan berdasarkan kurva OCV maka SoC baterai berada pada range 60%-90% yaitu sebesar 75%. Dari data yang ada, didapat kapasitas baterai dengan mengalikan arus *discharge*(i) dengan lama waktu *discharge* (t). Sehingga didapatkan nilai kapasitas baterai adalah sebesar 3,07883Ah. Dengan

menganggap bahwa baterai diisi mulai dari keadaan kosong, maka untuk memastikan nilai SoC sesungguhnya yang ada pada baterai, dilakukan perhitungan melalui persamaan (2.5) sebagai berikut:

$$SoC_t = 0\% + \frac{3,07883}{4,1}\% = 75,1\%$$

Kapasitas penuh baterai ( $C_n$ ) ditentukan berdasarkan rating pada datasheet yaitu 4,1Ah pada rating C/10. Dari perhitungan diatas, didapat SoC baterai sebesar 75,1% yang sudah sesuai juga dengan penentuan SoC baterai melalui metode OCV yaitu pada range 60%-90% yaitu sebesar 75%.

Selanjutnya baterai di *discharge* dengan arus yang sama seperti saat di *charge*. Proses *discharge* berlangsung selama 7jam 26menit. Dari data yang ada, didapat kapasitas baterai dengan mengalikan arus *discharge*( $i$ ) dengan lama waktu *discharge* ( $t$ ). Sehingga didapatkan nilai kapasitas baterai adalah sebesar 3,018Ah. Dengan menganggap SoC akhir baterai adalah 0%, maka SoC awal baterai saat sebelum dikuras dapat dihitung sebagai berikut.

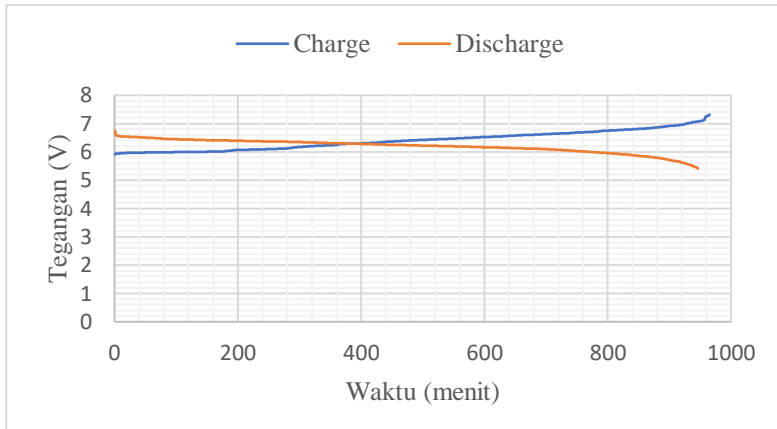
$$SoC(t_0) = 0\% + \frac{3,018}{4,1}\% = 73,61\%$$

Dari perhitungan diatas, maka didapatkan nilai SoC awal sebelum discharge adalah sebesar 73,61% yang juga sudah sesuai dengan range OCV pada 60%-90% yaitu sebesar 75%.

Terdapat perbedaan nilai SoC baterai dan lama waktu proses dari kedua pengujian tersebut. Hal tersebut terjadi karena sesungguhnya baterai bukanlah media penyimpanan energi yang ideal sehingga terdapat faktor efisiensi *charge/discharge* baterai yang mempengaruhi perhitungan menggunakan metode *coulomb counting*. Faktor lain yang juga mempengaruhi adalah tingkat ketelitian sensor yang digunakan sehingga dapat mempengaruhi pembacaan program.

#### 4.5.2.5 Analisa Charge-Discharge C/20

Grafik kurva dan data pengujian *charge-discharge* C/20 ditunjukkan pada gambar 4.22 dan tabel 4.14 sebagai berikut.



**Gambar 4.22** Grafik pengujian C/20

**Tabel 4.14** Data pengujian C/20

Parameter	Nilai	
	Charge	Discharge
Tegangan Awal <i>Open Circuit</i>	5,75V	6,33V
Arus Disccharge	225mA	225mA
Tegangan <i>cut-off</i>	7,45V	5,40V
Waktu Pengujian	16 jam 05 menit	15 jam 45 menit
Tegangan akhir <i>Open Circuit</i>	6,37V	5,75V

Dari hasil pengujian yang sudah dilakukan, diketahui tegangan OCV awal baterai sebelum diisi bernilai 5,75V dan dari analisa kurva tegangan *open circuit*nya didapat SoC baterai mula-mula bernilai 0%. Arus *charge* dan tegangan *cut-off* maksimal bernilai 225mA dan 7,45V. Setelah proses charging, didapat tegangan baterai bernilai 6,37V dan berdasarkan kurva OCV maka SoC baterai berada pada range 60%-90% yaitu sebesar 75%. Dari data yang ada, didapat kapasitas baterai dengan mengalikan arus *discharge*( $i$ ) dengan lama waktu *discharge* ( $t$ ). Sehingga didapatkan nilai kapasitas baterai adalah sebesar 3,62Ah. Dengan menganggap bahwa baterai diisi mulai dari keadaan kosong, maka untuk

memastikan nilai SoC sesungguhnya yang ada pada baterai, dilakukan perhitungan melalui persamaan (2.5) sebagai berikut:

$$SoC_i = 0\% + \frac{3,62}{4,5}\% = 80,44\%$$

Kapasitas penuh baterai ( $C_n$ ) ditentukan berdasarkan rating pada datasheet yaitu 4,5Ah pada rating C/20. Dari perhitungan diatas, didapat SoC baterai sebesar 80,44% yang sudah sesuai juga dengan penentuan SoC baterai melalui metode OCV berada pada range 60%-90% yaitu sebesar 75%.

Selanjutnya baterai di *discharge* dengan arus yang sama seperti saat di *charge*. Proses *discharge* berlangsung selama 15jam 45menit. Dari data yang ada, didapat kapasitas baterai dengan mengalikan arus *discharge* ( $i$ ) dengan lama waktu *discharge* ( $t$ ). Sehingga didapatkan nilai kapasitas baterai adalah sebesar 3,548Ah. Dengan menganggap SoC akhir baterai adalah 0%, maka SoC awal baterai saat sebelum dikuras dapat dihitung sebagai berikut.

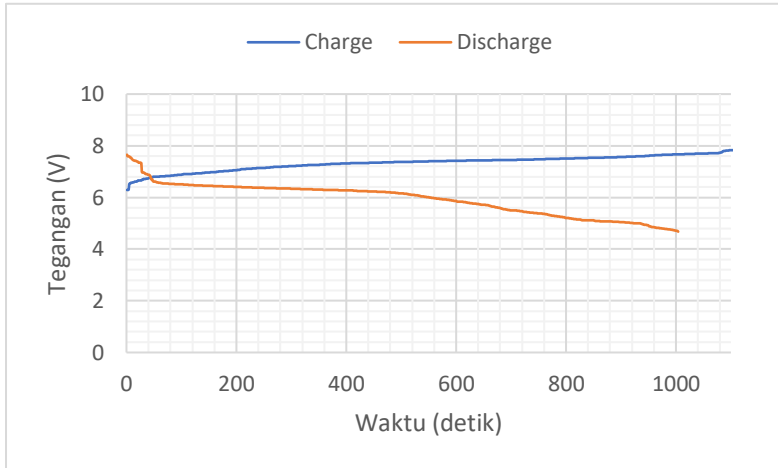
$$SoC(t_0) = 0\% + \frac{3,545}{4,5}\% = 78,83\%$$

Dari perhitungan diatas, maka didapatkan nilai SoC awal sebelum *discharge* adalah sebesar 73,61% yang juga sudah sesuai dengan range OCV pada 60%-90% yaitu sebesar 75%.

Terdapat perbedaan nilai SoC baterai dan lama waktu proses dari kedua pengujian tersebut. Hal tersebut terjadi karena sesungguhnya baterai bukanlah media penyimpanan energi yang ideal sehingga terdapat faktor efisiensi *charge/discharge* baterai yang mempengaruhi perhitungan menggunakan metode *coulomb counting*. Faktor lain yang juga mempengaruhi adalah tingkat ketelitian sensor yang digunakan sehingga dapat mempengaruhi pembacaan program.

#### **4.5.2.6 Analisa Charge-Discharge 2C**

Grafik kurva dan data pengujian *charge-discharge* 2C ditunjukkan pada gambar 4.23 dan tabel 4.16 sebagai berikut.



**Gambar 4. 23** Grafik pengujian 2C

**Tabel 4. 15** Data pengujian 2C

Parameter	Nilai	
	Charge	Discharge
Tegangan Awal <i>Open Circuit</i>	5,76V	6,21V
Arus Discharge	5A	5A
Tegangan <i>cut-off</i>	8V	4,65V
Waktu Pengujian	19,08 menit	16,73 menit
Tegangan akhir <i>Open Circuit</i>	6,21V	5,74V

Dari hasil pengujian yang sudah dilakukan, diketahui tegangan OCV awal baterai sebelum diisi bernilai 5,76V dan dari analisa kurva tegangan *open circuit*nya didapat SoC baterai mula-mula bernilai 0%. Arus *charge* dan tegangan *cut-off* maksimal bernilai 5A dan 8V. Setelah proses charging, didapat tegangan baterai bernilai 6,21V dan berdasarkan kurva OCV maka SoC baterai berada pada range 40%-70% yaitu sebesar 55%. Dari data yang ada, didapat kapasitas baterai dengan mengalikan arus *discharge(i)* dengan lama waktu *discharge (t)*. Sehingga didapatkan nilai kapasitas baterai adalah sebesar 1,59Ah. Dengan menganggap bahwa baterai diisi mulai dari keadaan kosong, maka untuk memastikan

nilai SoC sesungguhnya yang ada pada baterai, dilakukan perhitungan melalui persamaan (2.5) sebagai berikut:

$$SoC_t = 0\% + \frac{1,59}{2,7}\% = 58,9\%$$

Kapasitas penuh baterai ( $C_n$ ) ditentukan berdasarkan rating pada datasheet yaitu 2,7Ah pada rating 2C. Dari perhitungan diatas, didapat SoC baterai sebesar 58,9% yang sudah sesuai juga dengan penentuan SoC baterai melalui metode OCV berada pada range 40%-70% yaitu sebesar 55%.

Selanjutnya baterai di *discharge* dengan arus yang sama seperti saat di *charge*. Proses *discharge* berlangsung selama 16,73 menit. Dari data yang ada, didapat kapasitas baterai dengan mengalikan arus *discharge* ( $i$ ) dengan lama waktu *discharge* ( $t$ ). Sehingga didapatkan nilai kapasitas baterai adalah sebesar 1,39Ah. Dengan menganggap SoC akhir baterai adalah 0%, maka SoC awal baterai saat sebelum dikuras dapat dihitung sebagai berikut.

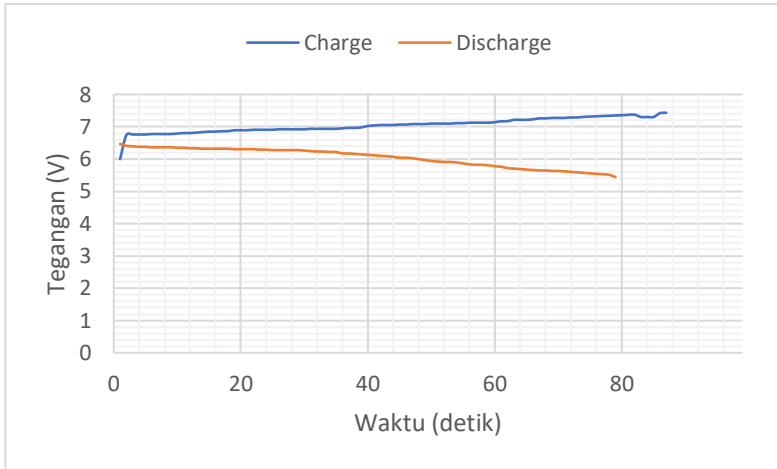
$$SoC(t_0) = 0\% + \frac{1,39}{2,7}\% = 51,6\%$$

Dari perhitungan diatas, maka didapatkan nilai SoC awal sebelum *discharge* adalah sebesar 51,6% yang juga sudah sesuai dengan range OCV pada 40%-70% yaitu sebesar 55%.

Terdapat perbedaan nilai SoC baterai dan lama waktu proses dari kedua pengujian tersebut. Hal tersebut terjadi karena sesungguhnya baterai bukanlah media penyimpanan energi yang ideal sehingga terdapat faktor efisiensi *charge/discharge* baterai yang mempengaruhi perhitungan menggunakan metode *coulomb counting*. Faktor lain yang juga mempengaruhi adalah tingkat ketelitian sensor yang digunakan sehingga dapat mempengaruhi pembacaan program.

#### **4.5.2.7 Analisa Charge-Discharge 1C**

Grafik kurva dan data pengujian *charge-discharge* 1C ditunjukkan pada gambar 4.24 dan tabel 4.16 sebagai berikut.



**Gambar 4. 24** Grafik pengujian 1C

**Tabel 4. 16** Data pengujian 1C

Parameter	Nilai	
	<i>Charge</i>	<i>Discharge</i>
Tegangan Awal <i>Open Circuit</i>	5,75V	6,27V
Arus Discharge	3A	3A
Tegangan <i>cut-off</i>	7,45V	5,40V
Waktu Pengujian	43 menit	39 menit
Tegangan akhir <i>Open Circuit</i>	6,27V	5,74V

Dari hasil pengujian yang sudah dilakukan, diketahui tegangan OCV awal baterai sebelum diisi bernilai 5,75V dan dari analisa kurva tegangan *open circuit*nya didapat SoC baterai mula-mula bernilai 0%. Arus *charge* dan tegangan *cut-off* maksimal bernilai 3A dan 7,45V. Setelah proses charging, didapat tegangan baterai bernilai 6,27V dan berdasarkan kurva OCV maka SoC baterai berada pada range 50%-85% yaitu sebesar 67,5%. Dari data yang ada, didapat kapasitas baterai dengan mengalikan arus *discharge(i)* dengan lama waktu *discharge (t)*. Sehingga didapatkan nilai kapasitas baterai adalah sebesar 2,175Ah. Dengan menganggap bahwa baterai diisi mulai dari keadaan kosong, maka untuk



memastikan nilai SoC sesungguhnya yang ada pada baterai, dilakukan perhitungan melalui persamaan (2.5) sebagai berikut:

$$SoC_t = 0\% + \frac{2,175}{3,1}\% = 70,16\%$$

Kapasitas penuh baterai ( $C_n$ ) ditentukan berdasarkan rating pada datasheet yaitu 3,1Ah pada rating 1C. Dari perhitungan diatas, didapat SoC baterai sebesar 70,16% yang sudah sesuai juga dengan penentuan SoC baterai melalui metode OCV berada pada range 50%-85% yaitu sebesar 67,5%.

Selanjutnya baterai di *discharge* dengan arus yang sama seperti saat di *charge*. Proses *discharge* berlangsung selama 39 menit. Dari data yang ada, didapat kapasitas baterai dengan mengalikan arus *discharge* ( $i$ ) dengan lama waktu *discharge* ( $t$ ). Sehingga didapatkan nilai kapasitas baterai adalah sebesar 1,975Ah. Dengan menganggap SoC akhir baterai adalah 0%, maka SoC awal baterai saat sebelum dikuras dapat dihitung sebagai berikut.

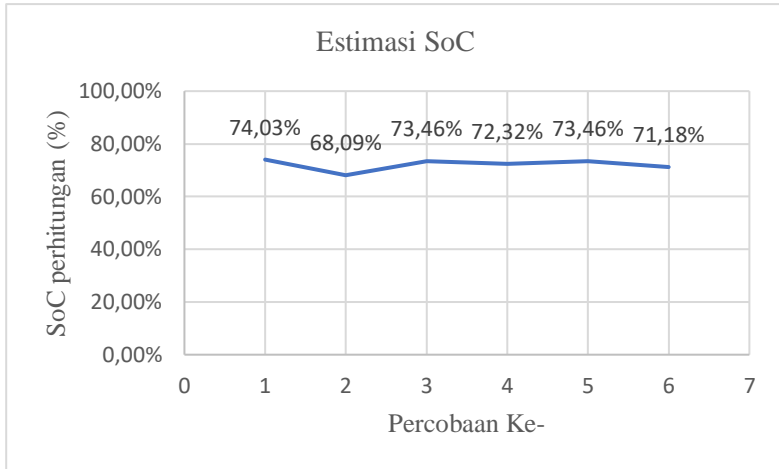
$$SoC(t_0) = 0\% + \frac{1,975}{3,1}\% = 63,7\%$$

Dari perhitungan diatas, maka didapatkan nilai SoC awal sebelum *discharge* adalah sebesar 63,7% yang juga sudah sesuai dengan range OCV pada 50%-85% yaitu sebesar 67,5%.

Terdapat perbedaan nilai SoC baterai dan lama waktu proses dari kedua pengujian tersebut. Hal tersebut terjadi karena sesungguhnya baterai bukanlah media penyimpanan energi yang ideal sehingga terdapat faktor efisiensi *charge/discharge* baterai yang mempengaruhi perhitungan menggunakan metode *coulomb counting*. Faktor lain yang juga mempengaruhi adalah tingkat ketelitian sensor yang digunakan sehingga dapat mempengaruhi pembacaan program

#### **4.5.2.8 Analisis Pengujian Charge-Discharge Baterai**

Grafik SoC yang didapat dari pengujian *charge-discharge* baterai ditunjukkan pada gambar 4.25 sebagai berikut.



**Gambar 4. 25** Grafik estimasi SoC

Dari data perhitungan SoC yang telah dilakukan pada sub bab sebelumnya. Dapat ditentukan bahwa nilai SoC rata-rata pada rating C/3 adalah sebesar 72,09%, sedangkan pada rating C/10 adalah sebesar 74,35%, dan rating C/20 adalah sebesar 79,6%. Ketiga nilai tersebut sudah sesuai dengan estimasi ketika menggunakan metode OCV yang meunjukkan bahwa SoC baterai berada pada *range* 60%-90% yaitu sebesar 75%. Sedangkan SoC pada rating 2C adalah sebesar 55,25% dan rating 1C sebesar 66,93% .

Dari seluruh percobaan yang telah dilakukan, juga didapatkan hasil analisis sebagai berikut. Penggunaan metode *coulomb counting* untuk menentukan SoC sebuah baterai memiliki tingkat akurasi yang cukup baik mengingat nilai SoC yang telah didapat memiliki nilai yang hampir sama. Selanjutnya, dapat diamati pula kurva *charge* pada tiap percobaan cenderung lebih lama dibanding kurva *discharge*. Hal tersebut diakibatkan adanya efisiensi proses *charge-discharge* pada baterai. Hal lain yang dapat diamati adalah pentingnya penggunaan sensor arus yang presisi, dapat dilihat bahwa pada percobaan C/3 siklus pertama memiliki perbedaan yang cukup signifikan jika dibanding kedua siklus selanjutnya. Hal lain yang dapat dilakukan untuk meningkatkan akurasi sensor arus adalah dengan mengkalibrasi sensor secara berkala sebelum digunakan.

Dari analisis ini, dapat ditarik kesimpulan yaitu penggunaan metode *coulomb counting* dan tegangan OCV dalam menentukan nilai SOC dapat dikatakan menjadi metode kombinasi dengan akurasi cukup baik, paling sederhana dan paling mudah untuk diimplementasikan. Namun penggunaan kombinasi kedua metode ini belum bisa dikatakan cukup pada kebutuhan tingkat akurasi tinggi seperti pada sistem *smart* BMS. Sehingga untuk mendapatkan hal tersebut maka diperlukan metode lain sebagai penunjang. Beberapa contoh metode yang sudah ada seperti Kalman *filters* atau algoritma *artificial neural network* [14].

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

## **BAB 5**

### **PENUTUP**

Pada bab ini akan diuraikan beberapa kesimpulan dan saran dari serangkaian kegiatan penelitian yang dilakukan.

#### **5.1 Kesimpulan**

Berdasarkan hasil simulasi dan pengujian implementasi dari konverter *bidirectional buck boost* untuk pengujian baterai VRLA dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Implementasi konverter *bidirectional buck boost* yang digunakan pada penelitian ini dapat bekerja sesuai desain dan simulasi yang diinginkan.
2. Konverter *bidirectional buck boost* yang digunakan pada penelitian ini memiliki nilai efisiensi rata-rata pada pembebanan 10%-100% sebesar 82,98% pada operasi *boost* dan 83,21% pada operasi *buck*.
3. Rangkaian kontrol PI pada pengaturan *duty cycle* konverter *bidirectional buck boost* dapat menghasilkan nilai arus *charge* dan *discharge* yang konstan.
4. Kapasitas baterai yang didapat pada pengujian *charge* atau *discharge* sangat bergantung pada nilai *c-rating* yang digunakan yang nilainya akan semakin tinggi pada *c-rating* yang lebih rendah.
5. Metode *coulomb counting* dapat digunakan untuk mengetahui kapasitas baterai secara *real time* sedangkan metode *open circuit voltage* tidak.
6. Kelemahan pada metode *coulomb counting* ada pada tingkat akurasi sensor dan penentuan nilai inisial SoC.
7. Kombinasi penggunaan metode *coulomb counting* dan tegangan OCV dalam menentukan nilai SoC memiliki akurasi yang cukup baik.

#### **5.2 Saran**

Saran yang diberikan untuk pengembangan penelitian selanjutnya adalah:

1. Pemilihan kawat email dengan resistansi belitan yang rendah pada induktor agar mendapat efisiensi yang lebih tinggi, karena induktor merupakan komponen yang memiliki rugi-rugi yang besar.

2. Pada setiap pemilihan komponen selalu dipertimbangkan *equivalent series resistance* (ESR) pada tiap komponen agar memperkecil rugi-rugi daya.
3. Penggunaan sensor arus dan tegangan yang lebih presisi dalam pengujian selanjutnya.
4. Selalu mengkalibrasi sensor arus dan tegangan sebelum melakukan pengujian baik *charge* maupun *discharge*.
5. Metode coulomb counting yang dipakai dapat dikembangkan lebih lanjut dengan algoritma tambahan untuk penghitungan SoC yang lebih akurat.
6. Rangkaian konverter *bidirectional buck-boost* dapat dikembangkan lebih lanjut sehingga dapat digunakan pada sistem on-grid.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. R. Sadarjoshi, "Design and Fabrication of Regulated DC Electronic Load for Testing Power Supplies and Batteries," 2016, pp. 0–5.
- [2] G. Hu, Y. Wie, H. Lei, and X. Ma, "Constant Current Control of DC Electronic Load based on Boost Topology," *Electron. Electr. Eng.*, vol. 20, no. 2, Feb. 2014.
- [3] D. Spiers, *Batteries in PV systems*. Elsevier Ltd, 2017.
- [4] K. Chao, M. Tseng, C. Huang, Y. Liu, and L. Huang, "Design and Implementation of a Bidirectional DC-DC Converter for Stand-Alone Photovoltaic Systems The Proposed Bidirectional Buck-Boost Converter," *Int. J. Comput. Consum. Control*, vol. 2, no. 3, p. 12, 2013.
- [5] M. T. Afif, I. Ayu, and P. Pratiwi, "Analisis Perbandingan Baterai Lithium-Ion, Lithium-Polymer, Lead Acid, dan Nickel Metal Hydride Pada Penggunaan Mobil Listrik - Review," vol. 6, no. 2, pp. 95–99, 2015.
- [6] G. Albright, "A Comparison of Lead Acid to Lithium-ion in Stationary Storage Applications Contributors :," no. March. AllCell Technologies LLC, p. 14, 2012.
- [7] U. Davis, "1 . 6 : Batteries : Producing Electricity Through Chemical Reactions," in *Chemistry 2C*, U. D. Library, Ed. UC Davis Library, 2019, pp. 1–7.
- [8] Iman Setiono, "Akumulator, pemakaian dan perawatannya," *METANA AKUMULATOR, PEMAKAIAN DAN PERAWATANNYA*, vol. 11, no. 01, p. 8, 2015.
- [9] A. F. Farizy and D. A. Asfani, "Desain Sistem Monitoring State of Charge Baterai pada Charging Station Mobil Listrik Berbasis Fuzzy Logic Dengan Mempertimbangkan Temperature," vol. 5, no. 2, p. 5, 2016.
- [10] D. G. Vutetakis, "10.1 Introduction," in *The Avionics*

- Handbook*, D. B. Co., Ed. CRC Press LLC, 2001, p. 30.
- [11] V. Batteries, *Maintenance-free Sealed Lead Acid Batteries- Technical handbook*, 2004/12. Vabo Batteries, 2004.
- [12] G. M. Masters, *Renewable and Efficient Electric Power Systems*, 1st ed. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2004.
- [13] T. Handbook, I. Batteries, and F. O. R. Professionals, *WORLD ' S LARGEST BATTERY*, Panasonic., vol. 3, no. 164. Germany: Panasonic, 2017.
- [14] A. Nugroho and E. Rijanto, "Battery State of Charge Estimation by Using a Combination of Coulomb Counting and Dynamic Model With Adjusted Gain," *Int. Conf. Sustain. Energy Eng. Appl.*, vol. 1, pp. 54–58, 2015.
- [15] S. Mischie and L. Toma, "Behavior of the Lead Acid Battery after the Rest Period," *WSEAS Trans. POWER Syst.*, vol. 3, no. 3, pp. 111–117, 2008.
- [16] Andi, "What Is An Electronic Load And Where Do You Use It - West Florida Components," *West Florid Components*, 2005. [Online]. Available: <https://www.westfloridacomponents.com/blog/electronic-load-use/>. [Accessed: 21-Nov-2018].
- [17] Agilent Technologies, "Power Supply Testing." pp. 1–15, 2002.
- [18] L. Jiang, C. Mi, S. Li, M. Zhang, X. Zhang, and C. Yin, "A Novel Soft-Switching Bidirectional DC-DC Converter with Coupled Inductors," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 49, no. 6, pp. 2730–2740, 2013.
- [19] H. R. Karshenas, H. Daneshpajooh, and A. Safaee, *Bidirectional DC-DC Converters for Energy Storage Systems*. InTech, 2011.
- [20] L. Dixon, "Average Current Mode Control of Switching Power Supplies." UNITRODE CORPORATION, p. 14, 2013.
- [21] S. W. Smith, *Digital Signal Processing. A Practical Guide for Engineers and Scientist*, 1st ed. Burlington, MA: British Library Cataloguing-in-Publication Data, 2003.



## **LAMPIRAN**

Daftar Lampiran :

1. Tabel Kawat Tegangan AWG
2. Program Arduino
3. Datasheet Baterai

### 1. Tabel Kawat Tembaga AWG

AWG	Diameter (mm)	Luas Area (mm <sup>2</sup> )	Arus (A)
1	7,350	42,4000	119
2	6,540	33,6000	94
3	5,190	21,2000	75
4	5,190	21,2000	60
5	4,620	16,8000	47
6	4,110	13,3000	37
7	3,670	10,6000	30
8	3,260	8,3500	24
9	2,910	6,6200	19
10	2,590	5,2700	15
11	2,300	4,1500	12
12	2,050	3,3100	9,3
13	1,830	2,6300	7,4
14	1,630	2,6300	5,9
15	1,450	1,650	4,7
16	1,290	1,3100	3,7
17	1,150	1,0400	2,9
18	1,024	0,8230	2,3
19	0,912	0,6530	1,8
20	0,812	0,5190	1,5
21	0,723	0,4120	1,2
22	0,644	0,3250	0,92
23	0,573	0,2590	0,729
24	0,511	0,4120	0,577
25	0,455	0,1630	0,457
26	0,405	0,1280	0,361
27	0,361	0,1020	0,288
28	0,321	0,0804	0,226
29	0,286	0,0646	0,182
30	0,255	0,0503	0,142

## 2. Program Arduino

### a. Program Utama

```
const double Ambang_Bawah = 3.0;
const double Ambang_Atas = 8.0;
bool Proses = false;
bool Kunci1 = true;
bool Kunci2 = true;

void setup() {
Serial.begin(9600);
Inisialisasi_Pin();
Inisialisasi_PWM();
PWM_Mati();
Inisialisasi_LCD();
LCD_Mati();
Inisialisasi_SD_Card();
}

void loop() {
Baca_Data_Sensor();
if (VBaterai1 > Ambang_Bawah && VBaterai1 < Ambang_Atas &&
Kunci1 == true)
{
Proses = true;
Kunci1 = false;
// Data ke-0:
Baca_Data_Sensor();
Tulis_Data_SD_Card();
}

if (Proses == true && Kunci2 == true)
{ Kontrol_PID();
Tampil_Serial_Monitor();
LCD_Tampil();
}

if (VBaterai1 <= 5.4 || VBaterai2 >= 13.8)
```

```

{ Kunci2 = false;
  PWM_Mati();
  LCD_Mati();
}
}
delay(100); // waktu dalam ms untuk Proses Utama
}

```

### **b. Program PWM**

```

int pinPWM1 = 9;
int pinPWM2 = 10;

```

```

void Inisialisasi_Pin()
{  pinMode(pinPWM1, OUTPUT);
   pinMode(pinPWM2, OUTPUT);
}

```

```

void Inisialisasi_PWM()
{  //Set phase/frequency correct mode non-inverting mode
   TCCR1A = _BV(COM1A1) | _BV(COM1B1) ;
   //Select mode 8 and select divide by 8 on main clock
   TCCR1B = _BV(WGM13) | _BV(CS11);
   ICR1 = 50; //20kHz freq calculation = 16M/(2*8*ICR1 or TOP)
}

```

```

void PWM_Mati()
{  OCR1A = 0; //untuk pin 9
   OCR1B = 0; //untuk pin 10
}

```

### **c. Program pembacaan sensor**

```

#include "MovingAverage.h"
int IRaw1, IRaw2 , VRaw1 , VRaw2 = 0 ;
const int ISense1 = A0 , ISense2 = A1 , VSense1 = A2, VSense2 = A3 ;
int mVperAmp = 185;
int ACSoffset = 2468.23;
double VoltArus1, VoltArus2 = 0; //voltage measuring

```

```

double Amps1 , Amps2 = 0;// Current measuring
double VBaterai1 = 0; //voltage battery 1
double VBaterai2 = 0; //voltage battery 2

void Baca_Data_Sensor()
{
VRaw1 = analogRead(VSense1), VRaw2 = analogRead(VSense2) ,
IRaw1 = analogRead(ISense1), IRaw2 = analogRead(ISense2);
VBaterai1 = (VRaw1 / 1023.0) * 15;
VBaterai2 = (VRaw2 / 1023.0) * 15;
VoltArus1 =(filter.add(IRaw1)/ 1023.0) * 5000.0;
VoltArus2 = (IRaw2 / 1023.0) * 5000.0;
Amps1 = ((VoltArus1 - ACSoffset) / mVperAmp);
Amps2 = ((VoltArus2 - ACSoffset) / mVperAmp);
}

```

#### **d. Program Data Logger**

```

#include <SD.h>
#include <SPI.h>

const double Periode = 1; // Periode penyimpanan data di SD card
unsigned long currentTime, previousTime;
double WaktuSekarang,WaktuTerlewat, WaktuTerdahulu, = 0;
File myFile;

int pinCS_SD Card = 4; // CS SD Card
int nomor = 0;

void loop()
{
WaktuSekarang = millis();
WaktuTerlewat = WaktuSekarang-WaktuTerdahulu;
if (WaktuTerlewat >= Periode*60000) // Periode penyimpanan data
    { Tulis_Data_SD_Card();
      WaktuTerdahulu = WaktuSekarang;
    }
}

```

```

void Tulis_Data_SD_Card()
{
  myFile = SD.open("data.txt", FILE_WRITE);
  myFile.print(nomor);
  myFile.print("\t");
  myFile.print(Amps1,3);
  myFile.print("\t");
  myFile.print(VBaterai1,3);
  myFile.print("\t");
  myFile.print(Amps2,3);
  myFile.print("\t");
  myFile.println(VBaterai2,3);
  myFile.close();
  nomor = nomor+Periode;
}

```

#### **e. Program monitor LCD**

```

#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>

double WaktuSekarangLCD,WaktuTerlewatLCD,WaktuTerdahuluLCD
= 0;

LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,16,2);

void loop()
{
  WaktuSekarangLCD = millis();
  WaktuTerlewatLCD = WaktuSekarangLCD-WaktuTerdahuluLCD;
  if (WaktuTerlewatLCD >= 1000) // Periode tampilan LCD
    { LCD_Tampil();
      WaktuTerdahuluLCD = WaktuSekarangLCD;
    }
}

void Inisialisasi_LCD()
{
  lcd.init();
  lcd.backlight();
}

```

```

}

void LCD_Tampil()
{ if (BACA == 0)
  { lcd.clear();
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("Discharge");
  }
  if (BACA == 1)
  { lcd.clear();
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print("Charge");
  }

  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print("V=");
  lcd.setCursor(2,1);
  lcd.print(VBaterai1,1);
  lcd.setCursor(6,1);
  lcd.print("V");
  lcd.setCursor(8,1);
  lcd.print("A=");
  lcd.print(Amps1,3);
}

```

```

void LCD_Mati()
{ lcd.clear();
  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print("Sistem Off");
}

```

**f. Program close loop**

```

#define BACA 0 //0=discharge 1=charge
const double setpoint = 1.23; // Arus yang dikehendaki
const double kp = 0.5;
const double ki = 0.01;
const double kd = 0.0;

```

```
double elapsedTime,error,lastError,input,output,cumError,rateError;
double DutyCycle = 0;
```

```
void Kontrol_PID()
{  input = Amps1;
  output = computePID(input);
  DutyCycle = DutyCycle+output;
  if(DutyCycle > 90){DutyCycle = 90;}
  if(DutyCycle < 10) { DutyCycle = 10;}
  #if BACA == 0
    OCR1A = (DutyCycle/100)*ICR1;
    OCR1B = 0;
  #else
    OCR1A = 0;
    OCR1B = (DutyCycle/100)*ICR1;
  #endif
}
```

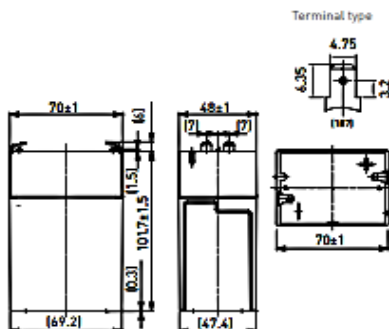
```
double computePID(double inp){
  currentTime = millis();
  elapsedTime = (double)((currentTime - previousTime))/1000;
  error = setpoint - inp;
  cumError += error * elapsedTime;
  rateError = (error - lastError)/elapsedTime;

  double out = kp*error + ki*cumError + kd*rateError;

  lastError = error;
  previousTime = currentTime;
  return out;
}
```



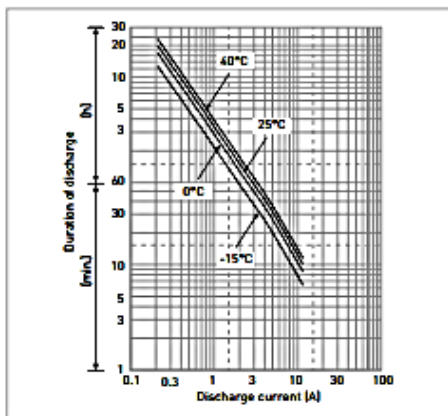
## DIMENSIONS (MM)



Contents indicated (including the recycle marking, etc.) are subject to change without notice. Battery case resin: standard [UL94 HB]

Specifications		LC-R064R5P**
Nominal voltage (V)		6
Nominal capacity	20 hours rate (Ah)	4.5
Dimensions	Length (mm)	48
	Width (mm)	70
	Total height (mm)	108
Approx. mass (kg)		0.70
Terminal type		Faston 187
Capacity (25°C)	20 hours rate (Ah)	4.5
	10 hours rate (Ah)	4.1
	3 hours rate (Ah)	3.6
	1 hour rate (Ah)	3.1
Impedance (mΩ)	Fully charged battery (25°C)	20
	40°C	102
Temperature dependency of capacity (%) - 20 hours rate	25°C	100
	0°C	85
	+15°C	65
	After 3 months (%)	91
Remaining capacity (25°C)	After 6 months (%)	82
	After 12 months (%)	64

## DURATION OF DISCHARGE VS. DISCHARGE CURRENT



## WATT TABLE [25°C]

(Wattage/battery)

Cut-off	3min.	5min.	10min.	15min.	20min.	30min.	45min.	1h	1.5h	2h	3h	4h	5h	6h	10h	20h
4.80V	135.0	107	69.7	53.2	44.6	33.3	23.5	18.8	12.9	9.99	7.44	5.71	4.72	3.79	2.51	1.36
4.95V	125.0	100	68.3	52.8	43.9	32.9	23.3	18.6	12.7	9.92	7.40	5.68	4.68	3.78	2.50	1.36
5.10V	116.0	93.7	66.5	51.8	43.1	32.5	23.1	18.4	12.4	9.66	7.33	5.64	4.64	3.75	2.48	1.35
5.25V	103.0	84.0	61.6	48.2	41.0	31.8	22.7	18.0	12.1	9.32	7.21	5.60	4.60	3.70	2.46	1.35
5.40V	84.9	74.2	55.0	44.9	39.9	30.7	22.4	17.7	11.8	8.88	7.07	5.53	4.49	3.64	2.44	1.34

## AMPERE TABLE [25°C]

(Amps/battery)

Cut-off	3min.	5min.	10min.	15min.	20min.	30min.	45min.	1h	1.5h	2h	3h	4h	5h	6h	10h	20h
4.80V	24.3	19.1	12.4	9.25	7.69	5.69	4.00	3.19	2.19	1.69	1.25	0.956	0.788	0.633	0.419	0.227
4.95V	22.6	17.9	12.2	9.19	7.56	5.63	3.98	3.16	2.14	1.68	1.24	0.950	0.781	0.630	0.417	0.226
5.10V	20.8	16.8	11.9	9.00	7.44	5.56	3.94	3.13	2.10	1.63	1.23	0.944	0.775	0.625	0.413	0.226
5.25V	18.5	15.1	11.0	8.38	7.06	5.44	3.88	3.06	2.06	1.58	1.21	0.938	0.769	0.618	0.411	0.225
5.40V	15.6	13.3	9.81	7.81	6.88	5.25	3.81	3.00	2.00	1.50	1.19	0.925	0.750	0.608	0.406	0.224

All mentioned values are average values

\*\* This battery is also available with a flame-retardant battery case resin [UL94 V-0]: LC-V064R5P.

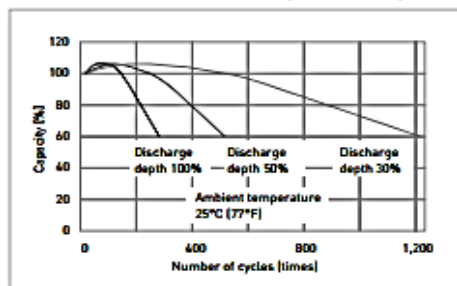
## CHARGING METHOD [25°C]

<b>Cycle use</b>	Control voltage: 7.25V - 7.45V Initial current: 1.80A or smaller
------------------	---

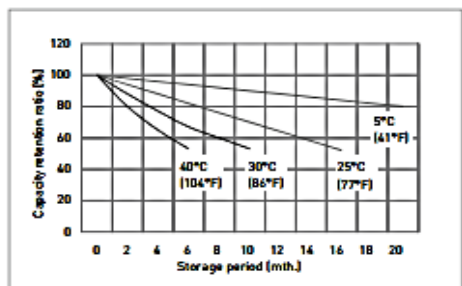
## CUT-OFF VOLTAGE

<b>Discharge current</b>	0.225A - 0.900A	0.900A - 2.25A	2.25A - 4.50A	4.50A - 9.00A	9.00A - 13.5A
<b>Cut-off voltage</b>	5.25V	5.10V	4.95V	4.85V	4.35V

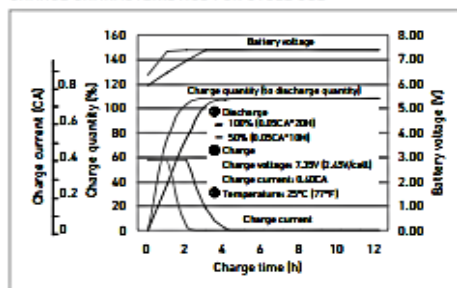
## CYCLE LIFE VS. DEPTH OF DISCHARGE [ACC. IEC 61056]



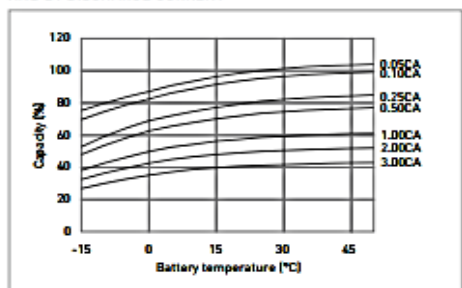
## RESIDUAL CAPACITY TEST RESULT



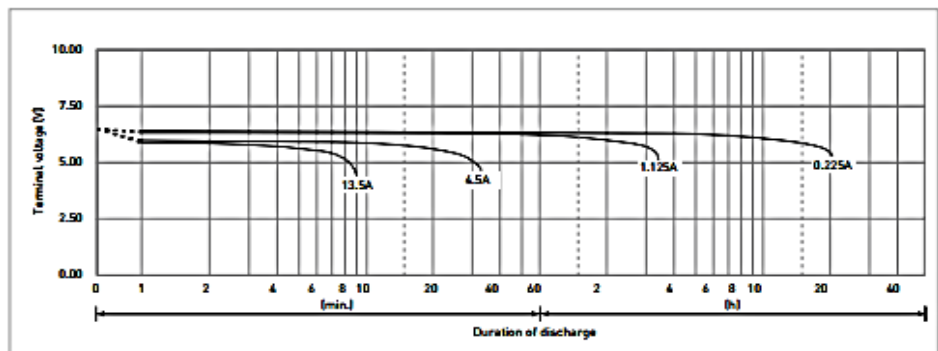
## CONSTANT-VOLTAGE CONSTANT-CURRENT CHARGE CHARACTERISTICS FOR CYCLE USE



## DISCHARGE CAPACITY BY TEMPERATURE AND BY DISCHARGE CURRENT



## DISCHARGE CHARACTERISTICS



\*1 This battery is also available with a flame-retardant battery case resin (UL94 V-0): LC-V064R5P.

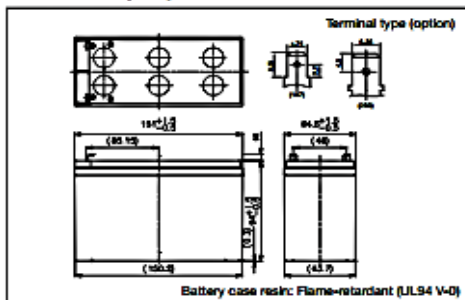
The data in this document are for descriptive purposes only and are not intended to make or imply any guarantee or warranty. Regarding handling and safety please consult our VRLA technical handbook chapter "Precautions for handling VRLA batteries".

# LC-P127R2P

For standby power supplies.  
Expected trickle design life: 10 – 12 years at 20°C according to Eurobat.



## Dimensions (mm)



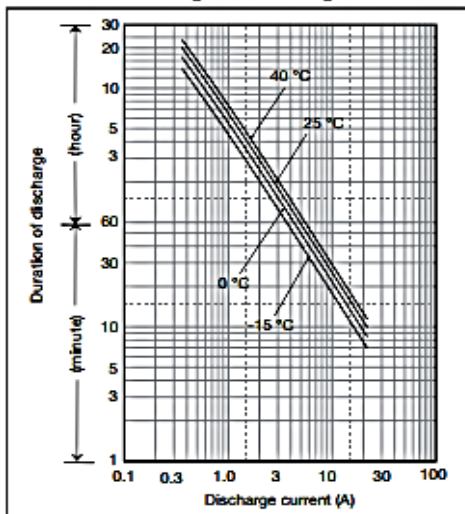
## Specifications

Nominal voltage		12V
Nominal capacity (20 hour rate)		7.2Ah
Dimensions	Length	151mm
	Width	64.5mm
	Height	94mm
	Total Height	100mm
Approx. mass		2.5kg
Terminal		Faston 187 or Faston 250 with hole

## Characteristics

Capacity (25°C)	20 hour rate	7.2Ah
	10 hour rate	6.8Ah
	5 hour rate	6.3Ah
	1 hour rate	4.9Ah
Internal resistance	Fully charged battery (25°C)	21mΩ
Temperature dependency of capacity (20 hour rate)	40°C	102%
	25°C	100%
	0°C	85%
	-15°C	65%
Self discharge (25°C)	After 3 months	91%
	After 6 months	82%
	After 12 months	64%

## Duration of discharge vs Discharge current



## Watt Table

Dis-ent v	(Wattage/Battery)																
	3min	5min	10min	15min	20min	30min	45min	1h	1.5h	2h	3h	4h	5h	6h	10h	20h	24h
9.6V	433	341	223	170	143	106	75.1	60.1	41.3	32.0	23.8	18.3	15.1	12.1	8.04	4.38	3.64
9.9V	401	320	218	169	140	105	74.7	60.1	40.5	31.7	23.7	18.2	15.0	12.1	8.00	4.34	3.62
10.2V	370	300	213	166	138	104	74.0	58.9	39.7	30.9	23.4	18.0	14.9	12.0	7.92	4.33	3.61
10.5V	329	269	197	154	131	102	72.8	57.7	38.9	29.8	23.1	17.9	14.7	11.8	7.88	4.32	3.60
10.8V	278	237	178	144	128	98	71.8	56.5	37.8	28.4	22.8	17.7	14.4	11.7	7.80	4.30	3.58

## Ampere Table

Dis-ent v	(Ampere/Battery)																
	3min	5min	10min	15min	20min	30min	45min	1h	1.5h	2h	3h	4h	5h	6h	10h	20h	24h
9.6V	38.9	30.6	19.9	14.8	12.3	9.1	6.4	5.1	3.50	2.70	2.00	1.53	1.28	1.012	0.670	0.363	0.303
9.9V	38.1	28.7	19.5	14.7	12.1	9.0	6.4	5.1	3.43	2.68	1.99	1.52	1.25	1.008	0.667	0.362	0.302
10.2V	33.3	26.9	19.0	14.4	11.9	8.9	6.3	5.0	3.36	2.61	1.97	1.51	1.24	1.000	0.660	0.361	0.301
10.5V	29.6	24.1	17.8	13.4	11.3	8.7	6.2	4.9	3.29	2.52	1.94	1.50	1.23	0.988	0.657	0.360	0.300
10.8V	25.0	21.3	15.7	12.5	11.0	8.4	6.1	4.8	3.20	2.40	1.90	1.48	1.20	0.972	0.650	0.358	0.298

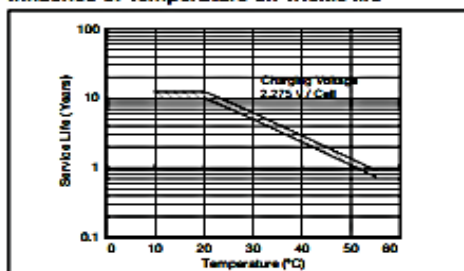
## Charging Method

Trickle Use	Control voltage: 13.6 - 13.8V; Initial current: 1.06A or smaller
-------------	---

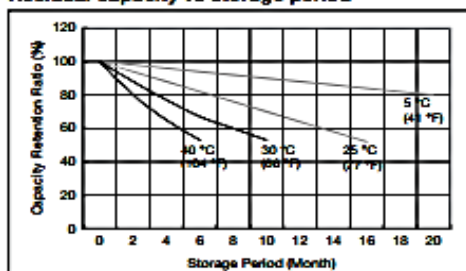
## Cut off voltage

Discharge current	0.36A - 1.44A	1.44A - 3.6A	3.6A - 7.2A	7.2A - 14.4A	14.4A - 21.6A
Cut off voltage (V)	10.5	10.2	9.9	9.5	8.7

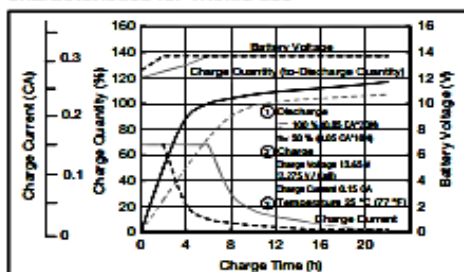
## Influence of Temperature on Trickle life



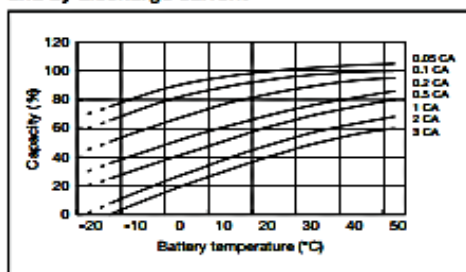
## Residual capacity vs storage period



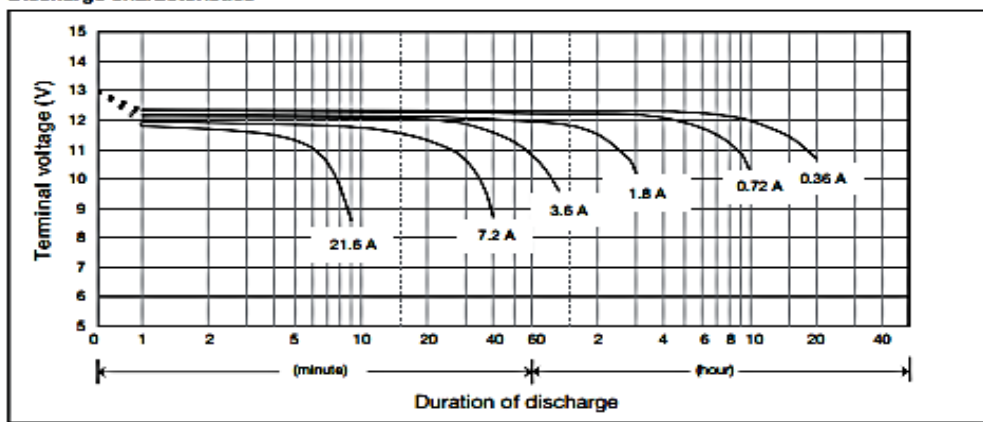
## Constant-voltage and constant-current charge characteristics for Trickle use



## Discharge capacity by temperature and by discharge current



## Discharge characteristics



## RIWAYAT HIDUP



Penulis buku penelitian berjudul “Desain dan Implementasi *Constant Current Control DC Electronic Load* dengan Topologi *Bidirectional Buck-Boost Converter* untuk Pengujian Karakteristik Baterai *Lead Acid*” ini bernama lengkap Aprilia Dini Rosani, biasa dipanggil April. Penulis lahir di Surabaya, 6 April 1997. Penulis besar di Surabaya bersama kedua orang tua dan seorang adik. Penulis memulai pendidikan formal mulai dari tingkat dasar di SDN Nginden Jangkungan 1-247 Surabaya, pendidikan tingkat menengah di SMPN 6

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

Surabaya, pendidikan tingkat lanjut di SMAN 5 Surabaya, saat ini sedang menempuh pendidikan Strata 1 di Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Selama masa perkuliahan penulis aktif di kegiatan organisasi kampus tingkat fakultas yaitu BEM FTI-ITS dan BEM FTE-ITS. Penulis juga aktif pada kegiatan kepanitiaan kampus, diantaranya yaitu REM (Red Euforia Month 7), ELECTRA (Electrical Competition, Tour and Rally 2016, 2017), Evolty (Event of Electrical Faculty), dan OC Profesor Summit 2019. Selain itu, penulis juga aktif menjadi anggota Microsoft U-Crew ITS, dan menjadi asisten Laboratorium Konversi Energi Listrik. Dalam bidang keilmiahan, penulis memiliki pengalaman diantaranya adalah menjadi semifinalis LTIN Esfra di Universitas Islam Sultan Agung, juara 2 LKTIN PRISMA 7 Universitas Brawijaya, Juara 1 LKTIN Propelan Open 2018 Institut Pertanian Bogor, Finalis PIMNAS 31 Universitas Negeri Yogyakarta 2018 dan PKM Terdanai DIKTI tahun 2019.



