



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**TUGAS AKHIR - EE 184801**

**DESAIN DAN IMPLEMENTASI DC - DC BIDIRECTIONAL  
CUK CONVERTER DENGAN AVERAGE CURRENT  
MODE CONTROL UNTUK PENGUJIAN BATERAI LEAD-  
ACID**

Irham Izzatur Rahman  
NRP 0711154000107

Dosen Pembimbing  
Dedet Candra Riawan, S.T., M.Eng., Ph.D.  
Prof. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng., Ph.D.

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





**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**FINAL PROJECT - EE 184801**

**DESIGN AND IMPLEMENTATION OF DC - DC  
BIDIRECTIONAL CUK CONVERTER WITH AVERAGE  
CURRENT MODE CONTROL FOR LEAD-ACID BATTERY  
TESTING**

**Irham Izzatur Rahman**  
NRP 07111540000107

**Advisors**  
**Dedet Candra Riawan, S.T., M.Eng., Ph.D.**  
**Prof. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng., Ph.D.**

**DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING**  
**Faculty of Electrical Technology**  
**Sepuluh Nopember Institute of Technology**  
**Surabaya 2019**



## **PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR**

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tugas akhir saya dengan judul “**DESAIN DAN IMPLEMENTASI DC-DC BIDIRECTIONAL CUK CONVERTER DENGAN AVERAGE CURRENT MODE CONTROL UNTUK PENGUJIAN 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, Juli 2019

**IRHAM IZZATUR RAHMAN**

0711154000107



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

**DESAIN DAN IMPLEMENTASI *DC - DC*  
*BIDIRECTIONAL CUK CONVERTER* DENGAN  
*AVERAGE CURRENT MODE CONTROL* UNTUK  
PENGUJIAN BATERAI *LEAD-ACID***

**TUGAS AKHIR**

Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan Untuk Memperoleh  
Gelara Sarjana Teknik  
Pada Bidang Studi Sistem Tenaga  
Departemen Teknik Elektro  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Menyetujui :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II



Dedet Candra Riawan, S.T., M.Eng., Ph.D.      Prof. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng., Ph.D.  
NIP. 1973 11 19 2000 03 9001      NIP. 1965 10 12 1990 03 1003





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

# DESAIN DAN IMPLEMENTASI *DC-DC* *BIDIRECTIONAL CUK CONVERTER* DENGAN *AVERAGE CURRENT MODE CONTROL* UNTUK PENGUJIAN BATERAI *LEAD-ACID*

Irham Izzatur Rahman  
07111540000107

Pembimbing I: Dedet Candra Riawan, S.T., M.Eng., Ph.D.  
Pembimbing II: Prof. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng., Ph.D.

## ABSTRAK

Baterai *lead-acid* merupakan elemen utama dalam pengembangan kendaraan listrik, UPS, dan sistem pembangkit hibrid. Pada keadaan riil kapasitas dari baterai akan mengalami perubahan sesuai dengan besar arus yang ter-*discharge* dari baterai. Pada pengoperasian baterai sendiri biasa menggunakan acuan tegangan *cut-off*. Namun batas tegangan *cut-off* baterai biasa didapatkan dengan arus *discharge* yang konstan, dimana hal ini tidak dapat dilakukan di lapangan. Acuan lain yang dapat digunakan dalam mengoperasikan baterai adalah dengan menggunakan estimasi *state of charge* (SoC) baterai. Metode estimasi SoC yang umum digunakan adalah *coulomb counting* karena dapat dilakukan secara *real-time*. Pada penelitian ini akan dilakukan pengujian kurva karakteristik *discharge* dan estimasi SoC baterai menggunakan *coulomb counting*. Baterai yang diuji adalah jenis *valve regulated lead-acid* (VRLA) dengan rating 12V 7,2Ah. Untuk mengimplementasikan sistem pengujian digunakan *DC-DC Bidirectional Cuk Converter* dengan menggunakan *Average Current Mode Control*, dimana skema pengujian baterai umum dimodifikasi agar penggunaan daya lebih efisien. Dari hasil pengujian sistem baru ini dapat bekerja dengan baik. Pada pengujian baterai VRLA didapatkan kurva karakteristik *discharge* dan kelebihan-kekurangan estimasi SoC menggunakan metode *coulomb counting*.

**Kata Kunci:** Baterai *lead-acid*, *state of charge*, *coulomb counting*, *DC-DC Bidirectional Cuk Converter*



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

# **DESIGN AND IMPLEMENTATION OF DC – DC BIDIRECTIONAL CUK CONVERTER WITH AVERAGE CURRENT MODE CONTROL FOR LEAD-ACID BATTERY TESTING**

Irham Izzatur Rahman  
07111540000107

Advisor I: Dedet Candra Riawan, S.T.,M.Eng., Ph.D.  
Advisor II: Prof. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng., Ph.D.

## **ABSTRACT**

Lead-acid batteries are key element in the development of electric vehicles, UPS, and hybrid power generation systems. In real conditions the capacity of the battery will change according to the amount of discharge current flowing from the battery. The operation of the battery itself usually uses cut-off voltage as reference. However, the cut-off voltage limit of the battery is normally obtained by using constant discharge current, which is not possible in the field application when load is always change. Another more appropriate reference to use in operating batteries is to use an estimation of the state of charge (SoC) of the battery. The SoC estimation method commonly used is coulomb counting because it can be done in real-time. In this study we will test the discharge characteristics curve and estimating battery SoC using coulomb counting. Battery that used in this study is valve regulated lead-acid (VRLA) type with 12V 7.2Ah rating. To implement the testing system, DC-DC Bidirectional Cuk Converter with Average Current Mode Control is used, where a common battery testing scheme is modified to make power used in more efficient ways. From the results of testing this new system can work well. In the VRLA battery testing the discharge characteristics curve and the advantages and disadvantages of the SoC estimation using the coulomb counting method were obtained and analyzed.

**Keywords:** Lead-acid battery, state of charge, coulomb counting, DC-DC Bidirectional Cuk Converter



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

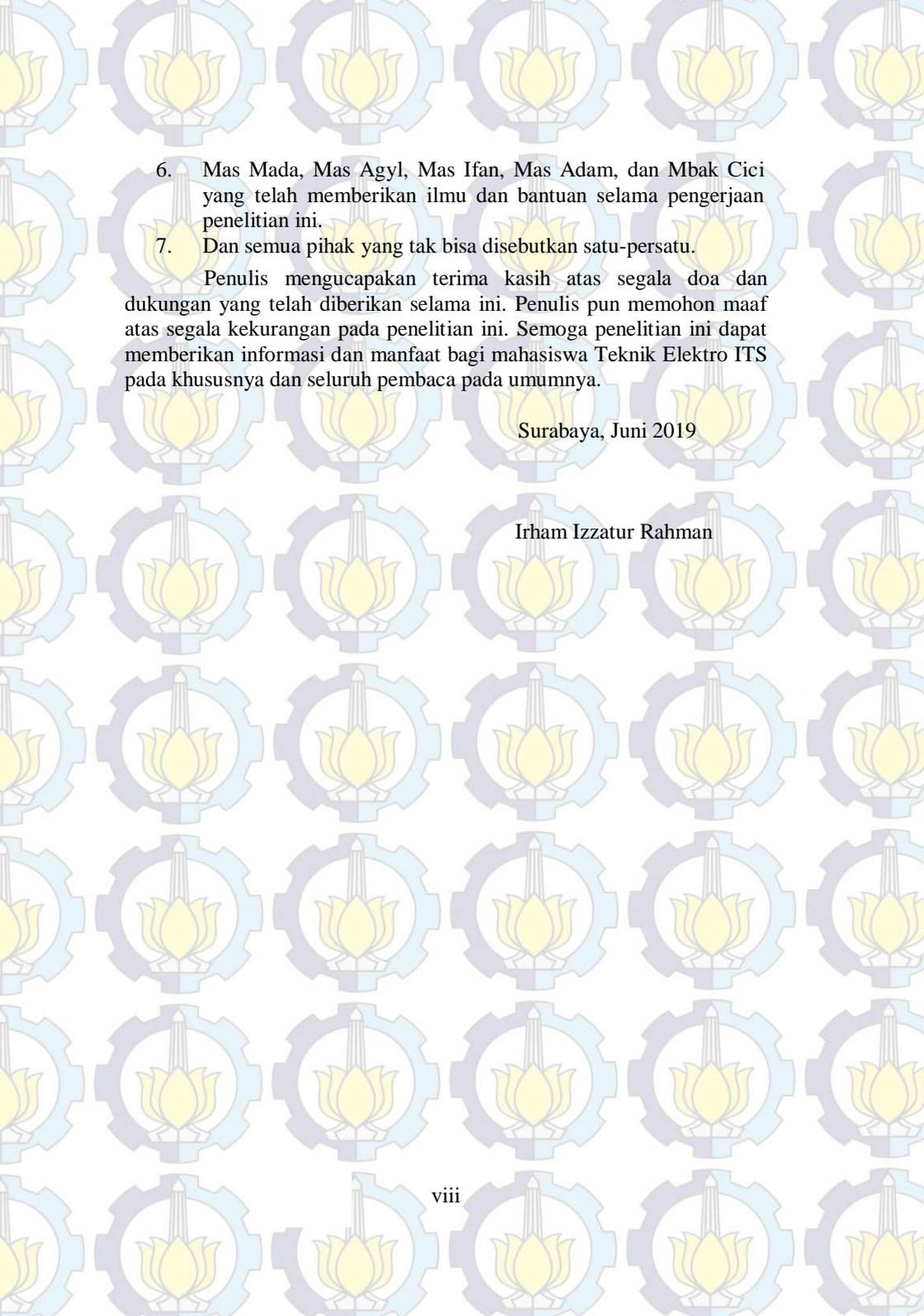
## KATA PENGANTAR

Puji syukur Alhamdulillah senantiasa penulis panjatkan kehadirat Allah, Tuhan yang Mahatinggi dan Maha Suci karena atas limpahan berkah, rahmat, dan hidayah-Nya, maka penulis dapat menyelesaikan buku penelitian ini dengan judul **“Desain Dan Implementasi DC - DC Bidirectional Cuk Converter dengan Average Current Mode Control untuk Pengujian Baterai Lead-Acid”**.

Buku ini penulis persembahkan khususnya untuk keluarga penulis dan umumnya untuk bahan referensi penelitian selanjutnya. Penulisan buku penelitian ini dilakukan dengan penuh kesungguhan agar penelitian ini dapat bermanfaat di masa mendatang. Namun penulis menyadari bahwa buku penelitian ini jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran dari pembaca demi menyempurnakan buku penelitian ini di masa mendatang.

Selama pengerjaan Tugas Akhir ini banyak pihak-pihak yang membantu baik berupa doa, bimbingan dan jasa dalam menyelesaikan penelitian ini. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada semua pihak yang membantu dan membimbing selama proses pengerjaan penelitian ini :

1. Kepada kedua orang tua yang tercinta Bapak Irwan Bagyo Santoso dan Ibu Muzayanah yang senantiasa memberikan do'a dan dukungan yang sangat berarti.
2. Bapak Dedet Candra Riawan, S.T., M.Eng., Ph.D. dan Bapak Prof. Ir. Mochamad Ashari, M.Eng., Ph.D. selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan masukan serta arahan sehingga buku penelitian ini dapat diselesaikan dengan sebaik mungkin.
3. Bapak Heri Suryoatmojo, S.T., M.T., Ph.D. selaku kepala Laboratorium Konversi Energi yang telah memberi masukan serta arahan dan mengizinkan untuk memanfaatkan fasilitas yang ada pada Laboratorium Konversi Energi untuk mendukung kelancaran penelitian.
4. Teman-teman asisten dan member Laboratorium Konversi Energi 2015 dan 2016 yang saling mendukung dan berjuang bersama dalam mengerjakan tugas akhir.
5. Teman-teman e55 yang telah berjuang bersama semenjak awal masuk perkuliahan.



6. Mas Mada, Mas Agyl, Mas Ifan, Mas Adam, dan Mbak Cici yang telah memberikan ilmu dan bantuan selama pengerjaan penelitian ini.

7. 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, Juni 2019

Irham Izzatur Rahman

## DAFTAR ISI

**PERNYATAAN  
AKHIR**

i

**ABSTRAK**

iii

**ABSTRACT**

v

**KATA**

**PENGANTAR**

vii

**DAFTAR  
ISI**

ix

**DAFTAR**

**GAMBAR**

xv

**DAFTAR**

**TABEL**

xvii

**BAB**

**PENDAHULUAN**

1

1

**1.1.** Latar

Belakang

1

**1.2.** Perumusan

Masalah

2  
1.3. Tujuan

3  
1.4. Batasan Masalah

3  
1.5. Metodologi

4  
1.6. Sistematika Penulisan

5  
1.7. Relevansi

6

## **BAB 2 BATERAI LEAD-ACID DAN DC-DC BIDIRECTIONAL CUK CONVERTER**

7  
2.1. Baterai Acid

*Lead-*

7  
2.1.1 Baterai Valve Regulated Lead Acid (VRLA)

7  
2.2. State of Charge (SoC) Baterai

8  
2.2.1 Coulomb Counting (CC)

	9			
	<b>2.2.2</b>	<i>Open (OCV)</i>	<i>Circuit</i>	<i>Voltage</i>
	10			
	<b>2.3.</b>	<i>DC-DC Converter</i>	<i>Bidirectional</i>	<i>Cuk</i>
	11			
	<b>2.3.1</b>	<i>Analisa Rangkaian Converter</i>	<i>DC-DC Bidirectional</i>	<i>Cuk</i>
	12			
	<b>2.3.2</b>	<i>Average Control</i>	<i>Current</i>	<i>Mode</i>
	19			
<b>BAB</b>	<b>3</b>	<b>DESAIN,</b>	<b>SIMULASI,</b>	<b>DAN</b>
		<b>IMPLEMENTASI</b>		
	21			
	<b>3.1.</b>	<i>Skema Baterai</i>		<i>Pengujian</i>
	21			
	<b>3.2.</b>	<i>Diagram Sistem</i>		<i>Blok</i>
	23			
	<b>3.3.</b>	<i>Baterai VRLA 12V 7.2 Ah sebagai Baterai Uji dan Baterai Dummy</i>		
	23			
	<b>3.4.</b>	<i>Desain Konverter DC - DC Bidirectional Cuk Converter</i>		
	26			

3.4.1 Penentuan nilai Rasio Konversi dan *Duty Cycle*

27

3.4.2 Penentuan Beban Nilai

28

3.4.3 Penentuan Nilai Induktor L1 dan L2

28

3.4.4 Penentuan Kapasitor Komponen

30

3.4.5 Penentuan MOSFET komponen

32

3.4.6 Simulasi Konverter dalam Keadaan *Steady State*

33

3.4.7 Konverter Dinamis pada Kondisi

38

3.5. Implementasi *DC-DC Bidirectional Cuk Converter*

3.5.1 Hasil Implementasi *DC-DC Bidirectional Cuk Converter*

40

## BAB 4 HASIL PENGUJIAN DAN ANALISA DATA

43  
4.1. Pengujian Konverter *DC-DC Bidirectional Cuk*  
*Converter*

43  
4.1.1 Pengujian  
Pensakelaran

43  
4.1.2 Pengujian Arus  
Induktor

45  
4.1.3 Pengujian Tegangan  
Kapasitor

46  
4.1.4 Pengujian Tegangan Masukan dan Keluaran  
Konverter

48  
4.1.5 Pengujian Sensor Tegangan dan  
Arus

50  
4.1.6 Pengujian  
Efisiensi

51  
4.2. Pengujian Baterai  
VRLA

53  
4.2.1 Pengujian Kurva *Discharge*  
VRLA Baterai

53

4.2.2 Pengujian Siklus *Charge-Discharge* Baterai  
VRLA

61

4.2.3 Pengujian kombinasi metode OCV dengan  
CC

72

**BAB**

**PENUTUP**

**5**

75

5.1. Kesimpulan

75

5.2. Saran

76

**DAFTAR  
PUSTAKA**

77

**LAMPIRAN**

79

**RIWAYAT  
HIDUP**

97

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Perbandingan SoC dengan OCV baterai VRLA, sumber : Guide Book for Panasonic VRLA Battery[11] .....	11
Gambar 2.2 Rangkaian <i>DC-DC Bidirectional Cuk Converter</i> .....	12
Gambar 2.3 <i>Cuk Converter</i> (a) dengan <i>Switch Ideal</i> (b) Implementasi Menggunakan MOSFET dan Dioda .....	13
Gambar 2.4 <i>Cuk Converter</i> (a) pada saklar di posisi 1 (b) pada saklar di posisi 2 .....	13
Gambar 2.5 bentuk gelombang <i>Cuk Converter</i> untuk : (a) tegangan induktor $v_{L1}(t)$ , (b) tegangan induktor $v_{L2}(t)$ , (c) arus kapasitor $i_{C1}(t)$ , dan (d) arus kapasitor $i_{C2}(t)$ .....	15
Gambar 2.6 Rasio Konversi dari <i>Cuk Converter</i> .....	16
Gambar 2.7 Bentuk Gelombang <i>Cuk Converter</i> untuk : (a) arus induktor $i_1(t)$ , (b) arus induktor $i_2(t)$ , (c) tegangan kapasitor $v_1(t)$ .....	17
Gambar 2.8 Diagram Blok Sistem dengan <i>Average Current Mode Control</i> .....	20
Gambar 3.1 <i>Flow Chart</i> Pengujian (a) Karakteristik Kurva <i>Discharge</i> dan (b) Siklus <i>Charge/Discharge</i> .....	22
Gambar 3.2 Diagram Blok Sistem Peralatan Pengujian .....	23
Gambar 3.3 Kurva karakteristik <i>discharge</i> baterai VRLA LC-V127R226	
Gambar 3.4 Grafik Rasio Konversi Konverter Berdasarkan Nilai <i>Duty Cycle</i> .....	27
Gambar 3.5 Simulasi Konverter Kondisi <i>Steady State</i> menggunakan PSIM .....	33
Gambar 3.6 Gelombang $V_{GS}$ , $V_{DS1}$ , dan $V_{DS2}$ .....	34
Gambar 3.7 Gelombang $V_{GS}$ , $I_{L1}$ , dan $I_{L2}$ Simulasi.....	34
Gambar 3.8 Gelombang $V_{GS}$ , $V_{C1}$ , dan $V_{C3}$ Simulasi .....	35
Gambar 3.9 Gelombang $V_{in}$ dan $V_{out}$ simulasi.....	35
Gambar 3.10 Simulasi Konverter Kondisi <i>Steady State Mode Balik</i> ....	36
Gambar 3.11 Gelombang $V_{GS}$ , $V_{DS1}$ , dan $V_{DS2}$ Mode Balik .....	36
Gambar 3.12 Gelombang $V_{GS}$ , $I_{L1}$ , dan $I_{L2}$ Mode Balik.....	37
Gambar 3.13 Gelombang $V_{GS}$ , $V_{C1}$ , dan $V_{C2}$ Simulasi .....	37
Gambar 3.14 Gelombang $V_{in}$ dan $V_{out}$ simulasi.....	38

Gambar 3.15 Simulasi <i>Close Loop</i> Konverter menggunakan PSIM.....	39
Gambar 3.16 Hasil Simulasi <i>Close Loop</i> Konverter .....	40
Gambar 3.17 Skema pengujian baterai menggunakan <i>DC-DC Bidirectional Cuk Converter</i> .....	42
Gambar 3.18 Hasil Implementasi <i>DC-DC Bidirectional Cuk Converter</i> .....	42
Gambar 4.1 Sinyal $V_{GS}$ , $V_{DS1}$ dan $V_{DS2}$ Mode Normal.....	44
Gambar 4.2 Sinyal $V_{GS}$ , $V_{DS2}$ dan $V_{DS1}$ Mode Balik .....	44
Gambar 4.3 Sinyal $V_{GS}$ , arus $I_{L1}$ dan arus $I_{L2}$ Mode Normal .....	45
Gambar 4.4 Sinyal $V_{GS}$ , arus $I_{L1}$ dan arus $I_{L2}$ Mode Balik.....	46
Gambar 4.5 Sinyal $V_{GS}$ , $V_{C1}$ dan $V_{C3}$ .....	47
Gambar 4.6 Sinyal $V_{GS}$ , $V_{C1}$ dan $V_{C2}$ .....	48
Gambar 4.7 Sinyal $V_{out}$ dan $V_{in}$ Mode Normal Konverter.....	49
Gambar 4.8 Sinyal $V_{out}$ dan $V_{in}$ Mode Normal Balik Konverter.....	49
Gambar 4.9 Grafik Efisiensi Konverter pada Mode Normal.....	52
Gambar 4.10 Grafik Efisiensi Konverter pada Mode Balik .....	52
Gambar 4.11 Kurva hasil pengujian C/5 .....	54
Gambar 4.12 Kurva Hasil pengujian C/10 .....	56
Gambar 4.13 Kurva Hasil pengujian C/20 .....	57
Gambar 4.14 Kurva Karakteristik <i>Discharge</i> Baterai Hasil Pengujian.....	59
Gambar 4.15 Kurva hasil pengujian <i>charge-discharge</i> C/6 siklis ke-1.....	61
Gambar 4.16 Kurva hasil pengujian <i>charge-discharge</i> C/6 siklus ke-2.....	63
Gambar 4.17 Kurva hasil pengujian <i>charge-discharge</i> C/6 siklus ke-3.....	64
Gambar 4.18 Kurva hasil pengujian <i>charge-discharge</i> C/10 siklus ke-1 .....	66
Gambar 4.19 Kurva hasil pengujian <i>charge-discharge</i> C/10 siklus ke-2 .....	67
Gambar 4.20 Kurva hasil pengujian <i>charge-discharge</i> C/10 siklus ke-3 .....	69
Gambar 4.21 Grafik estimasi SoC dengan metode <i>coulomb counting</i> pengujian siklus <i>charge-discharge</i> .....	71

## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Spesifikasi Baterai VRLA yang digunakan dalam pengujian	24
Tabel 3.2 Karakteristik Baterai VRLA yang digunakan dalam pengujian	24
Tabel 3.3 Tabel <i>Ampere/Battery</i> dari <i>datasheet</i> Baterai VRLA LC-V127R2	25
Tabel 3.4 Parameter awal desain <i>DC-DC Bidirectional Cuk Converter</i>	27
Tabel 3.5 Komponen yang Digunakan dalam Implementasi Converter	33
Tabel 3.6 Komponen Implementasi <i>DC-DC Bidirectional Cuk Converter</i>	41
Tabel 4.1 Hasil Pengujian Sensor Arus dan Tegangan	50
Tabel 4.2 Data hasil pengujian C/5	54
Tabel 4.3 Data pengujian C/10	56
Tabel 4.4 Data pengujian C/20	57
Tabel 4.5 Data pengujian <i>charge-discharge</i> C/6 siklus ke-1	61
Tabel 4.6 Data pengujian <i>charge-discharge</i> C/6 siklus ke-2	63
Tabel 4.7 Data pengujian <i>charge-discharge</i> C/6 siklus ke-3	65
Tabel 4.8 Data pengujian <i>charge-discharge</i> C/10 siklus ke-1	66
Tabel 4.9 Data pengujian <i>charge-discharge</i> C/10 siklus ke-2	68
Tabel 4.10 Data pengujian <i>charge-discharge</i> C/10 siklus ke-3	69
Tabel 4.11 Hasil Pengujian kombinasi metode OCV dengan CC	72



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

# BAB 1 PENDAHULUAN

## 1.1. Latar Belakang

Dalam perkembangan kendaraan listrik, sistem *back-up* pada jaringan telekomunikasi, dan pembangkitan dengan sumber energi terbarukan, baterai merupakan elemen yang penting sebagai media penyimpanan energi listrik[1]. Kemampuan sebuah baterai ditentukan dari kapasitasnya dalam bentuk *ampere per hours* (Ah) atau *watts per cell* (w/c). Pemakaian baterai biasa ditentukan dari nilai kapasitas rating *ampere per hours* (Ah) dari baterai. Pada keadaan riilnya hal ini tidak dapat diterapkan, karena kapasitas dari baterai akan berubah sesuai dengan rate arus yang ter-*discharge* dari baterai. Semakin besar rata-rata arus yang di-*discharge* dari baterai kapasitas dari baterai akan semakin berkurang[2] [3]. Pada umumnya dalam pemakaian baterai untuk menjaga baterai dalam keadaan baik dan dapat digunakan kembali pemakai biasa menggunakan acuan tegangan *cut-off* yang disediakan oleh pihak pembuat. Namun batas tegangan *cut-off* pada *datasheet* biasa didapatkan dengan menggunakan arus *discharge* yang konstan. Hal ini tentunya tidak dapat dilakukan dalam keadaan di lapangan dimana arus *discharge* akan berubah-ubah sesuai beban.

Untuk mengetahui daya yang tersisa pada baterai atau *state of charge* (SoC) dari baterai demi mendapatkan pola pengoperasian yang baik, terdapat beberapa metode untuk mengestimasi SoC dari baterai menggunakan beberapa parameter yang dapat diukur seperti *open circuit voltage*, *coulomb counting* dan *kalman filter*[4]. Untuk penerapan pada industri metode *coulomb counting* paling sering digunakan karena memiliki keakuratan yang baik dan dilakukan selama baterai bekerja. Metode coulomb counting sendiri seperti namanya adalah estimasi SoC dengan menghitung arus yang keluar dan masuk dari baterai[5]. Pada penelitian ini akan dilakukan pengujian *baterai valve regulated lead-acid* (VRLA) yang biasa digunakan untuk UPS dan kendaraan listrik. Pengujian dilakukan untuk mendapatkan kurva karakteristik *discharge*

baterai dan perhitungan *coulomb counting* untuk estimasi SoC dengan perbandingan menggunakan metode *open circuit voltage*.

Pada penelitian ini juga diusulkan pengujian yang lebih efisien daya dimana ketika baterai uji di-*discharge* daya yang terbuang akan digunakan untuk mengisi baterai di sisi output atau baterai *dummy*. Setelah pengujian selesai baterai *dummy* akan digunakan bersama dengan *power supply* untuk mengisi kembali baterai yang diuji sehingga penggunaan daya lebih efisien. Untuk merealisasikan sistem pengujian tersebut perlu digunakan konverter DC-DC yang mampu bekerja dua arah dan memiliki kemampuan konversi yang fleksibel. Topologi *Bidirectional Cuk Converter* mampu bekerja dua arah, memiliki rasio konversi yang sama dengan *Buck-Boost Converter* sehingga mampu menghasilkan tegangan output yang lebih tinggi atau lebih rendah dari tegangan inputnya. Selain itu *ripple* arus yang dihasilkan pada kedua sisi konverter kecil sehingga sesuai untuk baterai [6]. Untuk kontrol konverter digunakan metode *Average Current Mode Control* agar mendapatkan nilai arus yang konstan pada sisi uji dan juga saat pengisian kembali baterai yang diuji.

## 1.2. Perumusan Masalah

Kapasitas dari sebuah baterai akan berubah-ubah bergantung dengan arus yang ter-*discharge* dari baterai. Untuk menjaga kondisi baterai biasa digunakan tegangan *cut-off* dari baterai untuk menentukan kapan baterai berhenti dioperasikan. Pada kondisi lapangan dengan beban yang berubah-ubah metode ini tidak dapat dijadikan acuan yang tepat karena akan menimbulkan beberapa permasalahan. Salah satu metode yang lebih akurat digunakan untuk menentukan *state of charge* baterai adalah dengan menghitung arus masuk dan keluar atau *coulomb counting*. Pada penelitian ini akan dilakukan pengujian pada baterai *Valve Regulated Lead Acid* (VRLA) untuk mendapatkan kurva karakteristik discharge dan estimasi SoC menggunakan metode *coulomb counting* yang akan dibandingkan hasilnya dengan metode *open circuit voltage*.

Untuk melakukan pengujian baterai VRLA maka pada penelitian ini juga dirancang alat pengujian baterai menggunakan *DC-DC Bidirectional Cuk Converter* dengan *Average Current Mode Control*

untuk mendapatkan nilai arus konstan. Hal ini didasarkan karena pengujian *discharge* baterai dirasa kurang efisien karena energi terbuang menjadi panas melalui beban resistif. Untuk itu didesain peralatan dengan metode pengujian yang lebih efisien, dimana daya baterai yang terbuang pada saat pengujian digunakan untuk mengisi baterai *dummy*. Kemudian baterai *dummy* akan digunakan untuk mengisi baterai yang diuji dengan arus konstan.

### 1.3. Tujuan

Penelitian ini memiliki tujuan seperti berikut:

1. Membuat desain dan implementasi *DC-DC Bidirectional Cuk Converter* dengan *Average Current Mode Control* untuk aplikasi pengujian *discharge* baterai dengan arus konstan.
2. Membandingkan dan menganalisis hasil implementasi dengan hasil desain dan simulasi *DC-DC Bidirectional Cuk Converter* dengan *Average Current Mode Control* untuk aplikasi pengujian *discharge* baterai dengan arus konstan.
3. Melakukan analisa hasil pengujian baterai untuk mendapatkan karakteristik perubahan kapasitas baterai bergantung dari arus *discharge*-nya.
4. Melakukan estimasi *state of charge* (SoC) baterai menggunakan metode *coulomb counting* dan membandingkan hasilnya dengan metode *open circuit voltage*.

### 1.4. Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Implementasi alat disesuaikan dengan komponen-komponen yang terdapat di pasaran dan peralatan uji di Laboratorium Konversi Energi Listrik.
2. Pengujian hasil implementasi menggunakan sumber tegangan *Variable DC Supply*, serta beban *rheostat* yang terdapat pada laboratorium.
3. Semua analisis dan perhitungan dilakukan dalam mode tunak (*steady state*).
4. Analisa karakteristik *discharge* baterai berdasarkan *datasheet* dan *guidebook* yang tersedia dari produsen, dan menggunakan beberapa asumsi karena keterbatasan data.

5. Faktor akurasi sensor dan temperatur ruangan tidak diperhitungkan dalam metode estimasi SoC baterai menggunakan *coulomb counting* maupun *open circuit voltage*.

## 1.5. Metodologi

Metodologi yang digunakan dalam penyusunan penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

### 1. Studi Literatur

Mempelajari tentang pengujian dan karakteristik baterai *Lead-Acid* terutama jenis *VRLA*, prinsip kerja *DC-DC Bidirectional Cuk Converter*, *Average Current Mode Control*, dan implementasinya pada mikrokontroler yaitu *Arduino Uno* serta implementasi data logger.

### 2. Desain dan Simulasi

Membuat desain *DC-DC Bidirectional Cuk Converter* berdasarkan literatur yang dipelajari. Selanjutnya mensimulasikan dengan program *PSIM* dan membandingkan hasil dari simulasi dengan desain yang telah dibuat. Kemudian mensimulasikan sistem *close-loop* dengan *Average Current Mode Control* untuk mendapatkan nilai arus konstan pada konverter dan simulasi baterai sederhana dengan rangkaian *RC*.

### 3. Implementasi Alat

Pada tahap ini dilakukan pengimplementasian *DC-DC Bidirectional Cuk Converter* berdasarkan hasil perhitungan parameter pada tahap desain. Komponen yang digunakan disesuaikan yang terdapat pada pasar dan laboratorium Konversi Energi. Untuk melengkapi sistem juga diimplementasikan rangkaian *MOSFET driver* dan *data logger* yang diatur menggunakan mikrokontroler *Arduino Uno*. Keseluruhan Rangkaian dicetak pada *PCB* yang didesain menggunakan *software EAGLE*. Hasil akhir dari tahap ini adalah alat yang siap untuk diuji.

### 4. Pengujian Alat

Pada tahap ini dilakukan pengujian *DC-DC Bidirectional Cuk Converter* yang telah diimplementasikan. Pengujian dilakukan secara bertahap, yaitu pengujian sinyal pensakelaran, pengujian tegangan, pengujian karakteristik arus dan tegangan komponen, pengujian efisiensi konverter. Selanjutnya adalah pengujian baterai *VRLA 12 V 7,2 Ah* dimana dilakukan dua jenis pengujian yaitu pengujian kurva

*discharge* dan pengujian siklus *charge-discharge* untuk menentukan SoC dengan metode *coulomb counting*.

### **5. Analisa Data**

Setelah pengujian selesai dilakukan, dilakukan analisa berdasarkan data yang telah didapatkan. Analisa yang dilakukan merupakan analisa untuk *Bidirectional Cuk Converter* hasil uji konverter dan analisa karakteristik *discharge* baterai VRLA 12 V 7,2 Ah dan estimasi SoC menggunakan *coulomb counting*

### **6. Kesimpulan**

Tahap terakhir adalah penarikan kesimpulan berdasarkan hasil analisa data yang diperoleh dari simulasi, perhitungan dan pengujian implementasi *Bidirectional Cuk Converter* dan pengujian baterai VRLA 12V 7.2Ah.

## **1.6. Sistematika Penulisan**

Sistematika penulisan penelitian tugas ini terbagi atas lima bagian 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 Lead-Acid dan DC-DC Bidirectional Cuk Converter**

Bab ini membahas teori tentang Baterai Lead-Acid jenis VRLA, *State of Charge* (SoC) baterai, teori *DC-DC Bidirectional Cuk Converter*, serta teori tentang kontrol *switching converter* dengan *Average Current Mode Control*.

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

Bab ini berisi mengenai skema pengujian pada baterai VRLA yang akan dilakukan, perancangan rangkain *Bidirectional Cuk Converter* untuk pengujian baterai menggunakan perhitungan matematis dari penurunan rumus untuk menentukan nilai-nilai komponen, simulasi dengan menggunakan program PSIM untuk open loop dan close loop untuk kontrol arus pada mode dinamis. Dilanjutkan dengan implementasi *DC-DC Bidirectional Cuk Converter* untuk pengujian baterai dilengkapi dengan *data logger* untuk mendapatkan data pengujian.

## **BAB 4 Pengujian dan Analisis Data**

Bab ini berisi mengenai pengujian *rangkaian DC-DC Bidirectional Cuk Converter* menggunakan peralatan yang terdapat di laboratorium Konversi Energi, dilanjutkan dengan pengujian karakteristik *discharge* dan estimasi SoC menggunakan *coulomb counting* pada baterai VRLA 12V 7.2 Ah. Data yang didapatkan dari pengujian dibandingkan dengan teori dan hasil simulasi.

## **BAB 5 Kesimpulan dan Saran**

Bab ini berisi kesimpulan dari analisa data yang dilakukan dan berisi tentang saran untuk penelitian selanjutnya.

### **1.7. Relevansi**

Penelitian diharapkan dapat memberikan manfaat, yaitu:

1. Menjadi referensi dalam pembuatan dan pengaplikasian konverter terutama jenis *DC-DC Bidirectional Cuk Converter*.
2. Menjadi referensi dalam penelitian karakteristik *discharge* baterai *lead-acid*.
3. Menjadi referensi dalam estimasi *State of Charge* (SoC) baterai, terutama dengan metode *coulomb counting* dan *open circuit voltage* (OCV).
4. Menjadi referensi bagi mahasiswa yang akan melakukan penelitian pada bidang konverter dan energi terbarukan.

## BAB 2

### BATERAI *LEAD-ACID* DAN *DC-DC BIDIRECTIONAL CUK CONVERTER*

#### 2.1. Baterai *Lead-Acid*

Baterai *lead-acid* merupakan jenis baterai yang sering digunakan pada kendaraan listrik dan sistem pembangkitan hibrid karena memiliki harga produksi yang murah, bersifat *robust* terhadap cara pemakaian yang merusak, dan memiliki reabilitas yang tinggi. Prinsip dasar dari baterai *lead-acid* adalah apabila terdapat dua material elektroda yang berbeda berada dalam larutan elektrolit, maka akan terbangkit beda potensial diantara kedua material elektroda tersebut. Apabila kedua elektroda tersebut (anoda dan katoda) disambungkan dengan beban melalui bahan konduktif maka akan mengalir arus, sehingga terjadi konversi energi kimia menjadi energi listrik[7].

Reaksi kimia yang terjadi ketika suatu baterai *lead-acid* ter *discharge* dapat dilihat sebagai berikut :

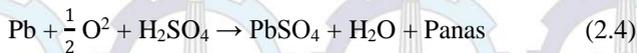


Setelah baterai di-*discharge*, baterai *lead-acid* dapat diisi kembali dengan membalik reaksi kimia pada pers. (2.1) dan (2.2). Pada kondisi ideal kapasitas *discharge* dari baterai selama siklus pemakaian baterai. Namun pada kondisi nyata dengan teknologi paling berkembang pun kapasitas baterai terbatas kurang dari 50% pada waktu *discharge* dengan *rate* 5 jam atau kurang[8].

##### 2.1.1 Baterai Valve Regulated Lead Acid (VRLA)

Baterai *valve regulated lead acid* (VRLA) merupakan perkembangan dari baterai *lead-acid*, dimana pada reaksi kimianya terdapat siklus rekombinasi oksigen. Siklus ini membuat baterai VRLA memiliki umur yang lebih panjang dan memudahkan pemeliharaan.

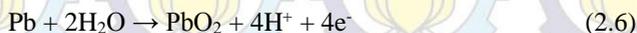
Oksigen mengalami perubahan pada saat akhir pengisian dan ketika mengalami *overcharging* pada elektroda positif, yang mana akan mengalir menuju elektroda negatif melalui udara dan mengalami rekombinasi menjadi air dengan persamaan berikut :



Ketika kedua reaksi ini terjadi maka juga akan terdapat reaksi kimia pada lempeng negatif yaitu perubahan hidrogen, sesuai dengan persamaan berikut :



Dan korosi pada lempeng positif :



Siklus oksigen, pada persamaan (1.3) dan (1.4) membuat potensial dari sisi negatif menjadi kurang negatif sehingga mengurangi perubahan hidrogen. Sehingga didesain katup satu arah berdasarkan tekanan sehingga perubahan jumlah hidrogen tidak mempengaruhi tekanan pada baterai. Hal tersebut yang menjadikan jenis baterai ini disebut *valve regulated lead acid* (VRLA). Pada baterai biasa, selama arus *overcharge* berada dalam batas yang diijinkan, arus pada sisi positif akan dikonsumsi untuk reaksi oksigen dan korosi grid, lalu diseimbangkan dengan reaksi hidrogen pada sisi negatif. Namun pada baterai VRLA, reduksi oksigen membuat potensial dari sisi negatif menjadi berkurang sehingga reaksi hidrogen berkurang. Dengan efisiensi yang baik pada proses rekombinasi reaksi kimia, dan tanpa membuang oksigen pada *cell*, maka laju perubahan hidrogen akan diseimbangkan oleh sisi elektroda positif.

## 2.2. State of Charge (SoC) Baterai

Karakteristik baterai ketika siklus *discharge* dan *charge* bergantung dari beberapa parameter. Parameter-parameter tersebut adalah tegangan, kapasitas, resistansi internal, *self-discharge*, dan kerapatan energi.

Namun karena proses penuaan, beberapa parameter baterai biasanya tidak linear bergantung dengan umur baterai. Parameter-parameter tersebut dapat digunakan untuk memperhitungkan kapasitas dari sebuah baterai. Rasio antar kapasitas yang tersisa pada baterai dibandingkan dengan kapasitas totalnya disebut dengan *State of Charge* (SoC). Agar pemakaian baterai dapat bertahan lama, aman dan efisien maka *State of Charge* (SoC) dari baterai perlu dipantau. [9] Pada *Battery Management System* (BMS) untuk sistem pembangkitan hibrid dan *Uninterruptable Power Supply* (UPS), *State of Charge* (SoC) menjadi salah satu elemen penting yang perlu diperhitungkan nilainya.

$$\text{SoC} = \frac{Q_{\text{aktual}}}{Q_{\text{maksimal}}} \times 100\% \quad (2.7)$$

Namun, karena baterai sendiri merupakan elemen penyimpan energi dalam bentuk energi kimia, dimana energi kimia tidak dapat diukur secara langsung membuat estimasi SoC menjadi suatu masalah yang kompleks. Untuk menentukan SoC dari baterai diterapkan berbagai metode dengan menggunakan parameter-parameter yang dapat diukur dari baterai seperti tegangan, temperatur, dan resistansi internalnya. Beberapa metode estimasi SoC dari baterai berdasarkan parameter-parameter yang dapat diukur adalah sebagai berikut :

### 2.2.1 *Coulomb Counting* (CC)

*Coulomb counting* (CC) merupakan salah satu metode yang umum digunakan dalam menentukan *State of Charge* (SoC) dari baterai. Metode *coulomb counting* (CC) merupakan metode estimasi SoC dengan cara memperkirakan kapasitas yang tersisa pada baterai dengan menghitung arus yang masuk (*charge*) dan keluar (*discharge*) dari baterai. Metode CC dapat dirumuskan dengan persamaan berikut :

$$\text{SoC} = \text{SoC}_0 + \frac{1}{Q_0} \int_{t_0}^t I \, dt \quad (2.8)$$

Dimana  $\text{SoC}_0$  merupakan nilai SoC awal ketika baterai tepat sebelum arus masuk atau keluar dari baterai.  $Q_0$  adalah kapasitas maksimum dari baterai.[4]

Metode CC paling umum digunakan untuk menentukan SoC karena baterai masih dapat digunakan dalam *on-grid* sehingga dapat dilakukan secara real-time pada *Battery Management System* (BMS). Namun metode CC memiliki kelemahan karena tidak memperhitungkan *self-discharge* dan efisiensi *charging* yang terjadi pada baterai sehingga diperlukan recalibrasi secara berkala.

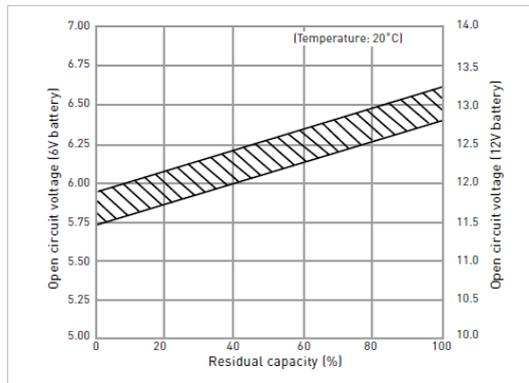
### 2.2.2 *Open Circuit Voltage* (OCV)

Pada umumnya *coulomb counting* (CC) merupakan merupakan metode yang paling sering digunakan karena baterai masih berada dalam kondisi *on-grid*, namun metode ini memiliki beberapa kelemahan karena akurasi dari alat ukur dan diperlukan recalibrasi sebelum dilakukan perhitungan kembali. Karena apabila tidak dilakukan recalibrasi *error* estimasi SoC akan terakumulasi dan menjadi tidak akurat. Metode lainnya adalah estimasi SoC dengan menggunakan tegangan terminal baterai, namun metode ini memiliki kelemahan akurasi karena tegangan terminal baterai akan bervariasi bergantung arus yang *terdischarge* dari baterai.

Metode lain yang dapat digunakan adalah mengukur tegangan terminal baterai ketika tidak terhubung dengan grid atay *open circuit voltage* (OCV). Untuk baterai *lead-acid* tegangan *open circuit* akan proposional secara linear dengan keadaan *discharge* baterai (*State of Discharge*). Dengan mengetahui *State of Discharge* (SoD) pada kondisi baterai yang sehat maka dapat diestimasikan nilai SoC baterai berdasarkan SoD-nya apabila baterai sudah dilepaskan dari grid selama lebih dari dua jam. Namun untuk implementasi pada keadaan riil metode ini memerlukan waktu yang cukup lama dan sulit diimplementasi/kan. Hal yang perlu diperhatikan lagi pada menit-menit awal baterai dilepaskan dari grid tegangan open circuit baterai akan tidak seimbang karena reaksi distribusi elektrolit yang tidak seimbang. Pada hasil penelitian [10] yang pernah dilakukan estimasi SoC baterai *lead-acid* berdasarkan OCV-nya didapatkan hasil *error* dibawah 5% untuk waktu istirahat atau off-grid baterai selama 10 menit membuat metode *open circuit voltage* (OCV) memiliki akurasi yang baik. Untuk meningkatkan akurasi biasanya estimasi OCV digabungkan dengan beberapa parameter

lain seperti temperatur, daya rating namun akan menjadi kompleks dan akan berubah sesuai penuaan dari baterai.

Berikut adalah grafik perbandingan SoC dengan OCV untuk baterai VRLA berdasarkan *datasheet* dari produser. Hasil perbandingan grafik dapat bervariasi bergantung dengan tegangan, temperatur, arus yang *ter-discharge*, dan usia cell dari baterai.

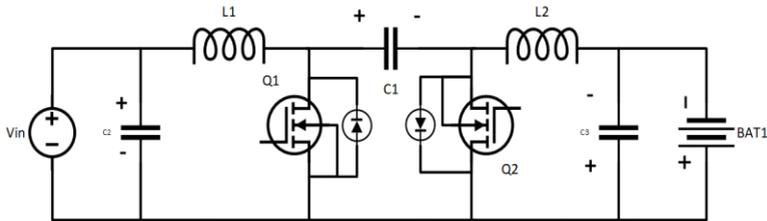


**Gambar 2.1** Perbandingan SoC dengan OCV baterai VRLA, sumber : Guide Book for Panasonic VRLA Battery[11]

### 2.3. DC-DC Bidirectional Cuk Converter

*Bidirectional DC-DC Cuk Converter* adalah salah satu topologi DC-DC konverter dua arah yang merupakan pengembangan dari *Cuk Converter* konvensional dengan menggantikan komponen dioda dengan MOSFET. Topologi ini memiliki keuntungan yaitu *ripple* arus yang rendah pada sisi input maupun output, sehingga *Bidirectional Cuk Converter* merupakan topologi yang tepat untuk digunakan dalam aplikasi yang berhubungan dengan baterai. Karena *Cuk converter* pada dasarnya merupakan topologi boost dan buck yang dipasang seri dengan energi penyimpan kapasitor C, tegangan output dapat diatur lebih tinggi maupun rendah daripada tegangan input pada kedua sisinya. Pada mode operasi forward, Q1 akan bekerja sebagai saklar yang dikontrol sinyal PWM dan Q2 mati sehingga *freewheeling* dioda akan bekerja. Hal yang sama dilakukan pada mode operasi *backward*, dimana Q2 akan dikontrol

oleh sinyal PWM dan Q1 akan mati sehingga freewheeling dioda akan bekerja.[12]



**Gambar 2.2** Rangkaian DC-DC Bidirectional Cuk Converter

### 2.3.1 Analisa Rangkaian DC-DC Bidirectional Cuk Converter

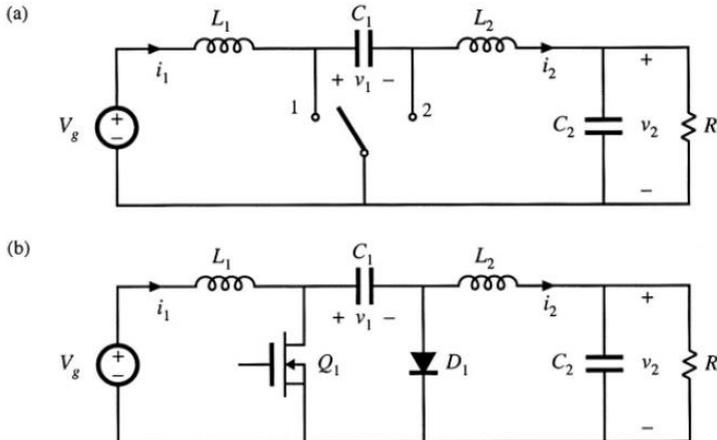
Dikarenakan prinsip kerja dari mode *forward* dan *backward* konverter ini memiliki metode yang sama yaitu satu MOSFET bekerja sebagai pensaklaran dan MOSFET yang lain bekerja sebagai dioda utama. Untuk memudahkan analisa kondisi steady state, topologi *Bidirectional Cuk Converter* dapat dimodelkan dengan topologi *Cuk Converter* konvensional.

Analisa rangkaian *Cuk Converter* konvensional didasarkan berdasarkan pada beberapa asumsi [13].

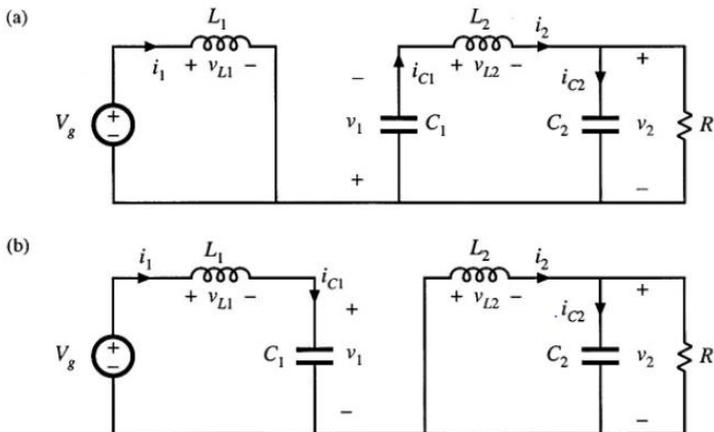
1. Semua kapasitor pada rangkaian mempunyai nilai kapasitansi yang besar, sehingga *ripple* tegangan pada kondisi steady-state dapat diabaikan.
2. *Switch* pada rangkaian merupakan komponen ideal dan nilai kapasitansinya diabaikan.
3. Rangkaian bekerja pada kondisi steady-state sehingga tegangan dan arus merupakan gelombang periodik.

*Cuk Converter* memiliki karakteristik perubahan tegangan yang sama dengan *Buck-Boost Converter* dimana tegangan output dapat lebih rendah maupun lebih tinggi daripada input dengan polaritas yang terbalik. Konverter ini bekerja dengan menyimpan energi pada kapasitor C1 yang terhubung dengan sumber tegangan melewati induktor L1, apabila saklar

berada pada posisi 2 energi akan tersimpan pada kapasitor C1. Ketika saklar berganti ke posisi 1, energi yang tersimpan akan disalurkan ke beban melalui induktor L2 seperti pada gambar 2.3



**Gambar 2.3** Cuk Converter (a) dengan Switch Ideal (b) Implementasi Menggunakan MOSFET dan Dioda



**Gambar 2.4** Cuk Converter (a) pada saklar di posisi 1 (b) pada saklar di posisi 2

Pada subinterval pertama, ketika saklar pada posisi 1, konverter bekerja seperti pada gambar 2-3 (a). Dengan mengasumsikan *ripple* pensaklaran pada  $i_1(t)$ ,  $i_2(t)$ ,  $v_{L1}(t)$  dan  $v_{L2}(t)$  sangat kecil dibandingkan dengan komponen DC  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $V_1$ , dan  $V_2$ . Maka akan didapat persamaan (2.3) sebagai berikut

$$\begin{aligned}v_{L1} &= Vg \\v_{L2} &= -V_1 - V_2 \\i_{C1} &= I_2\end{aligned}\quad (2.3)$$

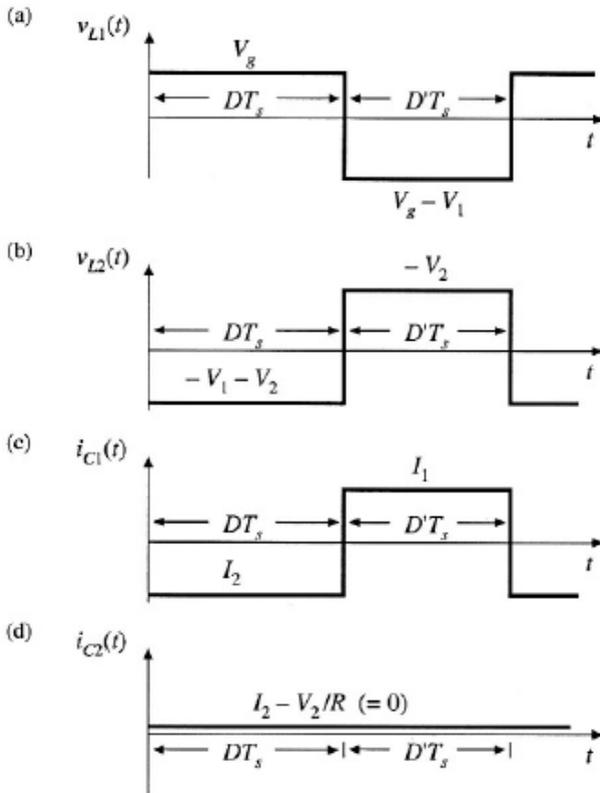
$$i_{C2} = I_2 - \frac{V_2}{R}$$

Pada subinterval kedua, ketika saklar pada posisi 2, konverter akan bekerja seperti pada gambar 2-3 (b). dengan menggunakan asumsi yang sama dengan subinterval pertama, maka akan didapat persamaan (2.4) sebagai berikut

$$\begin{aligned}v_{L1} &= Vg - V_1 \\v_{L2} &= -V_2 \\i_{C1} &= I_1\end{aligned}\quad (2.4)$$

$$i_{C2} = I_2 - \frac{V_2}{R}$$

Persamaan (2.3) dan (2.4) dapat digunakan untuk menggambarkan tegangan induktor dan arus kapasitor yang dapat diamati pada gambar 2-5.



**Gambar 2.5** bentuk gelombang *Cuk Converter* untuk : (a) tegangan induktor  $v_{L1}(t)$ , (b) tegangan induktor  $v_{L2}(t)$ , (c) arus kapasitor  $i_{C1}(t)$ , dan (d) arus kapasitor  $i_{C2}(t)$ .

Selanjutnya adalah menyamakan komponen-komponen dc, atau nilai rata-rata pada gambar 2-5 menjadi nol, untuk menentukan kondisi steady-state dari konverter. Hasilnya adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 v_{L1} &= DV_g + D'(V_g - V_1) = 0 \\
 v_{L2} &= D(-V_1 - V_2) + D'(-V_2) = 0
 \end{aligned}
 \tag{2.5}$$

$$i_{C1} = D I_2 + D' I_1 = 0$$

$$i_{C2} = I_2 - \frac{V_2}{R} = 0$$

Solusi dari sistem persamaan untuk komponen dc dari tegangan induktor dan arus kapasitor dapat diturunkan lagi menjadi

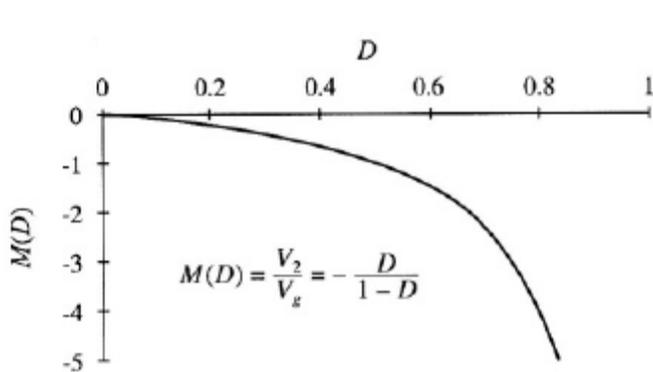
$$V_1 = \frac{V_g}{D'}$$

$$V_2 = -\frac{D}{D'} V_g \quad (2.6)$$

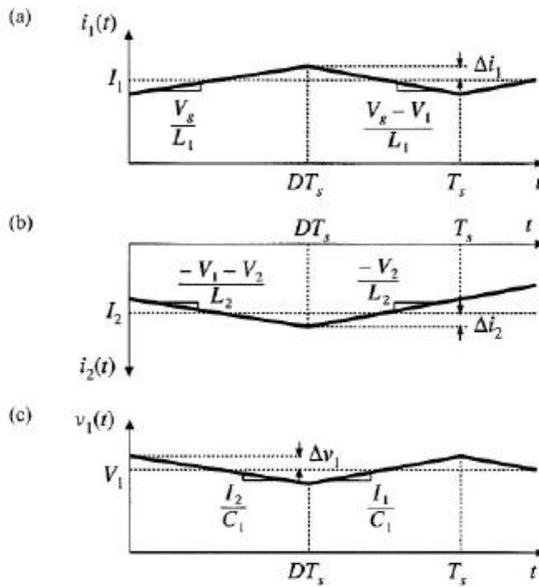
$$I_1 = \frac{D}{D'} I_2 = \left(\frac{D}{D'}\right)^2 \frac{V_g}{R}$$

$$I_2 = \frac{V_2}{R} = -\frac{D}{D'} \frac{V_g}{R}$$

Pengaruh dari *duty cycle* D terhadap nilai tegangan output  $V_2$  dapat dilihat pada gambar 2-6. Arus pada induktor dan tegangan pada kapasitor  $v_1(t)$  dapat dilihat pada gambar 2-9.



**Gambar 2.6** Rasio Konversi dari *Cuk Converter*



**Gambar 2.7** Bentuk Gelombang *Cuk Converter* untuk : (a) arus induktor  $i_1(t)$ , (b) arus induktor  $i_2(t)$ , (c) tegangan kapasitor  $v_1(t)$ .

Pada subinterval pertama, perubahan gelombang dapat digambarkan dengan persamaan berikut ini dengan mensubstitusikan persamaan 2.3 untuk  $v_{L1}$ ,  $v_{L2}$ , dan  $i_{C1}$ .

$$\begin{aligned} \frac{di_1(t)}{dt} &= \frac{v_{L1}(t)}{L_1} = \frac{V_g}{L_1} \\ \frac{di_2(t)}{dt} &= \frac{v_{L2}(t)}{L_2} = \frac{-V_1 - V_2}{L_2} \\ \frac{dv_1(t)}{dt} &= \frac{i_{C1}(t)}{C_1} = \frac{I_2}{C_1} \end{aligned} \quad (2.7)$$

Pada subinterval kedua, perubahan gelombang dapat digambarkan dengan persamaan berikut ini dengan mensubstitusikan persamaan 2.4 untuk  $v_{L1}$ ,  $v_{L2}$ , dan  $i_{C1}$ .

$$\begin{aligned}\frac{di_1(t)}{dt} &= \frac{v_{L1}(t)}{L_1} = \frac{V_g - V_1}{L_1} \\ \frac{di_2(t)}{dt} &= \frac{v_{L2}(t)}{L_2} = \frac{-V_2}{L_2} \\ \frac{dv_1(t)}{dt} &= \frac{i_{C1}(t)}{C_1} = \frac{I_1}{C_1}\end{aligned}\quad (2.8)$$

Pada subinterval pertama, nilai dari  $i_1(t)$ ,  $i_2(t)$ , dan  $v_1(t)$  masing-masing berubah  $2\Delta i_1$ ,  $-2\Delta i_2$ , dan  $-2\Delta v_1$ . Perubahan ini sama dengan perubahan pada persamaan (2.7), dikalikan dengan panjang subinterval  $DT_s$ , menghasilkan persamaan baru :

$$\begin{aligned}\Delta i_1 &= \frac{V_g DT_s}{2L_1} \\ \Delta i_2 &= \frac{V_1 + V_2}{2L_2} DT_s \\ \Delta v_1 &= \frac{-I_2 DT_s}{2C_1}\end{aligned}\quad (2.9)$$

Persamaan komponen dc pada persamaan (2.6), dapat digunakan untuk menyederhanakan persamaan (2.9) untuk menghilangkan  $V_1$ ,  $V_2$ , dan  $I_1$ , menghasilkan persamaan baru :

$$\begin{aligned}\Delta i_1 &= \frac{V_g DT_s}{2L_1} \\ \Delta i_2 &= \frac{V_g DT_s}{2L_2} \\ \Delta v_1 &= \frac{V_g (D^2) T_s}{2D RC_1}\end{aligned}\quad (2.10)$$

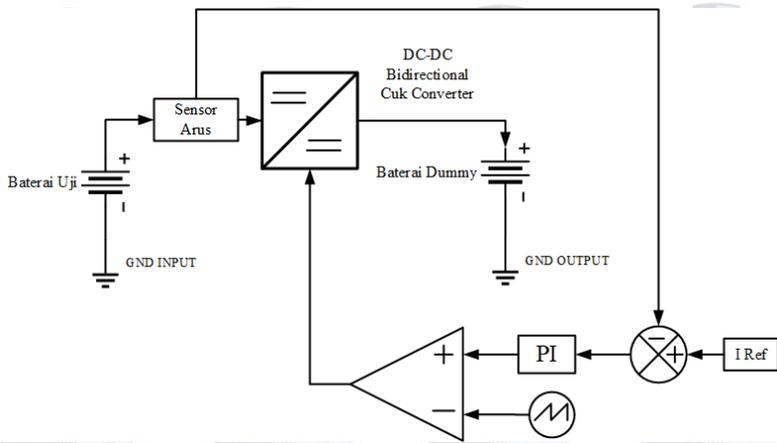
Persamaan (2.10) dapat digunakan untuk menentukan nilai  $L_1$ ,  $L_2$ , dan  $C_1$ , untuk mendapatkan nilai *ripple* pensaklaran yang diinginkan.[14]

Untuk menentukan nilai kapasitor filter  $C_2$  dapat menggunakan persamaan tegangan kapasitor pada saat *mode discharge*. Dengan menyederhanakan persamaan kapasitor saat *mode discharge* maka didapatkan persamaan :

$$\Delta V = V_{max} \left( \frac{t_{off}}{RC} \right)$$
$$C_o = V_{max} \left( \frac{1-D}{R_o \Delta V_o f_s} \right) \quad (2.11)$$

### 2.3.2 Average Current Mode Control

*Average Current Mode Control* adalah metode kontrol untuk mendapatkan arus rata-rata induktor yang konstan pada konverter. Hal ini diperlukan karena baterai uji yang menjadi sumber dari konverter akan mengalami perubahan tegangan selama terjadi *discharge*. Sama halnya dengan baterai *dummy* yang digunakan akan mengalami perubahan resistansi internal dan tegangan selama proses pengisian. *Bidirectional Cuk Converter* merupakan salah satu jenis *switching converter* sehingga keluaran dari konverter dapat diatur berdasarkan nilai *duty cycle* dari *Pulse Width Modulation* (PWM). Dengan mengubah-ubah nilai *duty cycle* maka arus *discharge* untuk pengujian baterai dapat dijaga konstan. Pengaturan *duty cycle* dapat dilakukan secara otomatis dengan membandingkan nilai arus induktor pada sisi uji dengan nilai referensi untuk mendapatkan nilai eror yang kemudian akan diproses menggunakan kontrol *Propotional Integral* (PI). Dengan menggunakan nilai referensi kontrol PI akan mengatur *duty cycle* untuk mendapatkan nilai eror mendekati nol, atau dengan kata lain arus induktor pada sisi uji mendekati nilai yang ditentukan. Kontrol PI menggunakan parameter  $K_p$  dan  $K_i$  yang digunakan untuk memperbaiki nilai eror. Parameter  $K_p$  dan  $K_i$  ini dicari menggunakan metode *trial and error*.



**Gambar 2.8** Diagram Blok Sistem dengan *Average Current Mode Control*

## BAB 3

### DESAIN, SIMULASI, DAN IMPLEMENTASI

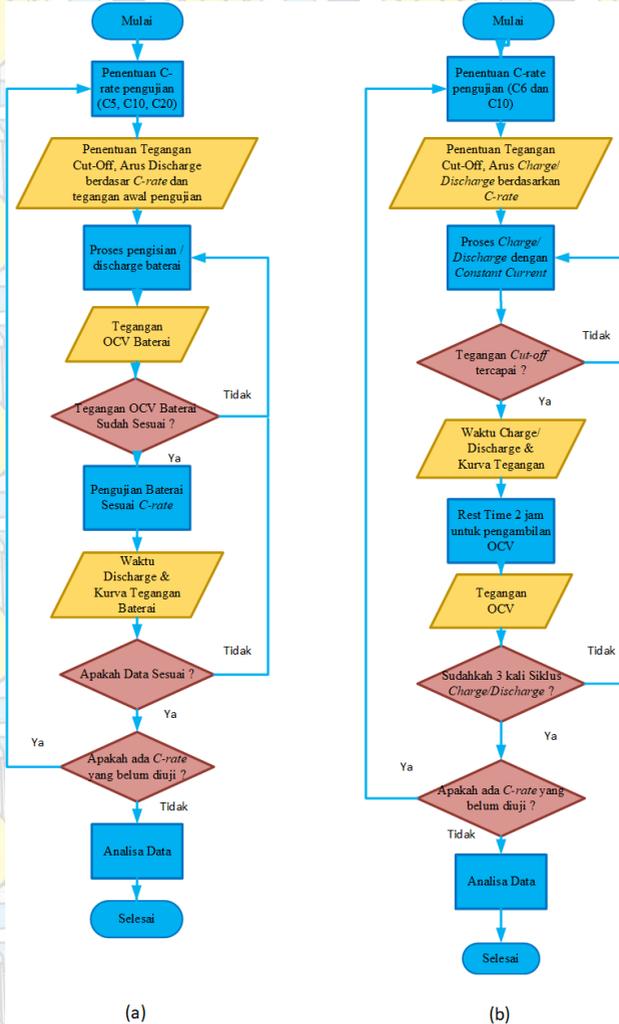
Pada bab ini akan dibahas mengenai proses desain, simulasi serta implementasi *DC-DC Bidirectional Cuk Converter* untuk pengujian baterai. Proses desain meliputi perhitungan parameter komponen yang digunakan sesuai dengan persamaan pada bab 2. Setelah ditentukan nilai-nilai parameter komponen yang akan dilakukan, maka akan dilakukan simulasi terlebih dahulu menggunakan *software* PSIM. Simulasi dilakukan untuk mengetahui apakah desain dari konverter yang dibuat sudah sesuai dengan perhitungan. Pada simulasi juga diterapkan sistem open-loop dan close-loop untuk menguji kontrol arus. Hasil yang didapat dari simulasi akan dijadikan sebagai acuan implementasi alat. Secara umum, diagram blok rangkaian Bidirectional Cuk Converter untuk pengujian adalah sebagai berikut.

#### 3.1. Skema Pengujian Baterai

Untuk mendapatkan kurva karakteristik *discharge* dari baterai dan melakukan estimasi SoC baterai menggunakan metode *coulomb counting* maka akan dilakukan dua jenis pengujian pada penelitian ini. Pengujian pertama dengan tujuan untuk mendapatkan kurva karakteristik *discharge* baterai maka baterai akan dikondisikan dalam keadaan SoC yang mendekati sama. Untuk mengetahui SoC baterai pada pengujian ini digunakan metode *open circuit voltage* dan mengkondisikan baterai dalam tegangan yang mendekati sama. Setelah itu baterai akan *didischarge* dengan *C-rating* yang berbeda sampai tegangan baterai berada di tegangan *cut-off*-nya. Waktu pengujian, arus *discharge* dan tegangan baterai dicatat dan digunakan untuk mengestimasi kapasitas baterai dari SoC inisial sampai SoC habis (*cut-off*). Setelah itu akan diplot kurva karakteristik dari baterai dan dianalisa hasilnya.

Pengujian kedua adalah pengujian metode estimasi SoC menggunakan *coulomb counting*, dimana baterai akan dilakukan siklus *charge-discharge* dengan arus yang sama berulang kali sampai didapatkan SoC baterai yang mendekati sama. Hasil estimasi *coulomb counting* akan dibandingkan dengan metode *open circuit voltage* dan

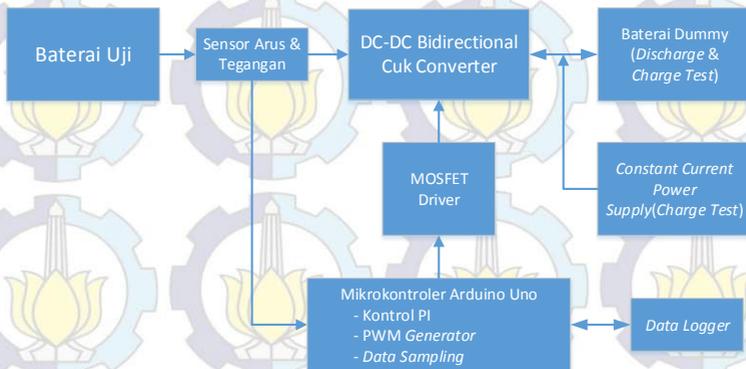
dianalisa hasilnya. Alur pengujian pertama dan kedua dapat dilihat pada gambar berikut.



**Gambar 3.1** Flow Chart Pengujian (a) Karakteristik Kurva Discharge dan (b) Siklus Charge/Discharge

### 3.2. Diagram Blok Sistem

Untuk melakukan pengujian baterai yang telah disebutkan pada sub-bab 3.1 maka dilakukan perancangan sistem pengujian baterai menggunakan *DC-DC Bidirectional Cuk Converter*. Selain konverter utama juga diperlukan komponen pendukung lain untuk melakukan pengujian baterai. Komponen pendukung yang dibutuhkan antara lain rangkaian *MOSFET Driver* untuk melakukan pensaklaran MOSFET, sensor arus dan tegangan, kontrol arus menggunakan PI dan sistem *data logging* untuk mendapatkan data pengujian baterai. Semua komponen pendukung tersebut dikendalikan dan diimplementasikan menggunakan mikrokontroler *Arduino Uno*. Skema peralatan pengujian dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 3.2 Diagram Blok Sistem Peralatan Pengujian

### 3.3. Baterai VRLA 12V 7.2 Ah sebagai Baterai Uji dan Baterai Dummy

Baterai Valve Regulated Lead Acid (VRLA) merupakan perkembangan baterai jenis Lead Acid dimana terdapat katup tekanan yang akan terbuka apabila terjadi tekanan tinggi atau aktivitas kimia berlebih pada baterai. Hal ini membuat rugi elektrolit pada saat evaporasi, tumpahan, atau aktivitas gas berkurang sehingga baterai memiliki usia yang lebih panjang dan mengurangi *maintenance*.

Baterai VRLA yang diuji dan digunakan sebagai baterai *dummy* selama pengujian adalah jenis yang sama. Baterai *dummy* pada penelitian ini adalah baterai yang kondisi *charge* dan *discharge*-nya dapat dibuat melebihi kapasitasnya sesuai kebutuhan pengujian. Kondisi baterai uji jarang digunakan dan berumur sekitar 2-3 tahun. Sesuai dengan *datasheet* baterai VRLA jenis LC-V127R2 [13], maka dapat ditentukan parameter yang dibutuhkan dalam pendesainan. Spesifikasi baterai VRLA yang digunakan dapat dilihat pada tabel berikut.

**Tabel 3.1** Spesifikasi Baterai VRLA yang digunakan dalam pengujian

Parameter		Nilai
Jenis		VRLA Battery
Model		LC-V127R2
Tegangan Nominal		12 V
Kapasitas <i>Rating</i>		7,2 Ah
Dimensi	Panjang	151 mm
	Lebar	64,5 mm
	Tinggi	94 mm
	Tinggi Total	100 mm
Massa Rata-rata		2,30 kg
Terminal		Faston 187 & 250M

Karakteristik baterai seperti perubahan kapasitas sesuai *C-rating*, *self discharge*, dan sebagainya dapat dilihat pada tabel berikut.

**Tabel 3.2** Karakteristik Baterai VRLA yang digunakan dalam pengujian

Parameter		Nilai
Kapasitas (25° C)	20 Jam	7,2 Ah
	10 Jam	6,5 Ah
	3 Jam	5,8 Ah
	1 Jam	4,9 Ah

**Tabel 3.2** Karakteristik Baterai VRLA yang digunakan dalam pengujian (lanjutan)

Parameter		Nilai
Resistansi Internal (25° C)	Kedaaan Terisi Penuh	24mΩ
Pengaruh Temperatur terhadap Kapasitas (20 jam)	40° C	102%
	25° C	100%
	0° C	85%
	-15° C	65%
Self-Discharge	Setelah 3 Bulan	91%
	Setelah 6 Bulan	82%
	Setelah 12 Bulan	64%

Berdasarkan karakteristik baterai VRLA diatas, dapat dilihat bahwa kapasitas penggunaan daya pada baterai akan berubah bergantung dengan durasi rating penggunaan. Hal ini berarti kapasitas baterai akan berubah sesuai dengan arus rata-rata yang ter-*discharge* dari baterai. Dengan perubahan arus *discharge* juga akan terjadi perubahan tegangan *cut-off* atau tegangan minimum yang diperbolehkan agar baterai tidak kehilangan kemampuan untuk di-*charge* kembali. Berikut ini adalah tabel penggunaan baterai berupa *rate* waktu penggunaan, arus *discharge*, dan tegangan *cut-off*-nya.

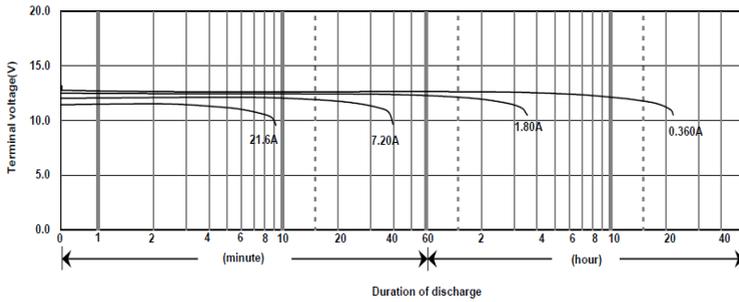
**Tabel 3.3** Tabel *Ampere/Battery* dari *datasheet* Baterai VRLA LC-V127R2

Tegangan Cut-Off	1 Jam	3 Jam	5 Jam	6 Jam	10 Jam	20 Jam
9,6 V	5,1	2	1,26	1,02	0,67	0,363
9,9 V	5,05	1,99	1,25	1,01	0,667	0,362
10,2 V	5	1,97	1,24	1	0,66	0,361
10,5 V	4,9	1,94	1,23	0,988	0,657	0,36
10,8 V	4,8	1,9	1,2	0,972	0,65	0,358

\* Nilai diatas merupakan rata-rata (25° C)

Selain karakteristik yang telah dijelaskan diatas kurva *discharge* dengan tegangan terminalnya juga mengalami perubahan sesuai dengan arus *discharge*-nya yang dapat dilihat pada gambar dibawah ini.

■ Discharge characteristics(25°C)



**Gambar 3.3** Kurva karakteristik *discharge* baterai VRLA LC-V127R2

Dengan mengetahui karakteristik baterai VRLA LC-V127R2 pada keadaan *rating*, maka dapat ditentukan batas-batas untuk pengujian baterai dan jenis pengujian yang dapat dilakukan. Pada penelitian ini akan dilakukan pengujian untuk mendapatkan kurva karakteristik *discharge* baterai dan penentuan *state of charge* (SoC) baterai dengan metode *coulomb counting* untuk dengan metode siklus *charge-discharge* dengan arus konstan.

### 3.4. Desain Konverter DC - DC Bidirectional Cuk Converter

Proses awal dalam mendesain konverter adalah menentukan parameter-parameter awal dengan berdasarkan spesifikasi beban dan sumber yang akan digunakan. Penentuan parameter-parameter juga disesuaikan dengan peralatan yang ada di laboratorium Konversi Energi dan komponen yang terdapat di pasaran. Nilai-nilai awal yang perlu diperhitungkan pada pendesainan konverter antara lain daya output, tegangan input, tegangan output, frekuensi *switching*, *ripple* arus induktor, *ripple* tegangan kapasitor. Penentuan nilai-nilai tersebut akan dijadikan acuan dalam menentukan dan mendesain komponen yang akan digunakan. Parameter awal dari rangkaian DC-DC bidirectional cuk converter awal dapat dilihat pada tabel berikut.

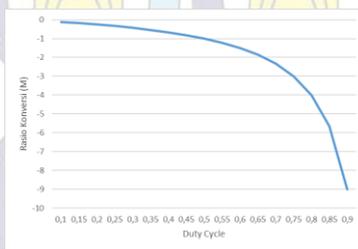
**Tabel 3.4** Parameter awal desain *DC-DC Bidirectional Cuk Converter*

No.	Parameter	Nilai	Satuan
1.	Tegangan Input ( $V_{in}$ )	12	Volt
2.	Tegangan Output ( $V_{out}$ )	12	Volt
3.	Daya Output ( $P_{out}$ )	60	Watt
4.	Frekuensi <i>Switching</i> ( $f_s$ )	20	kHz
5.	Ripple arus induktor L1 dan L2 ( $\% \Delta i_1$ & $\% \Delta i_2$ )	1,875	%
6.	Ripple Tegangan Kapasitor <i>Coupling</i> C1 ( $\% \Delta v_{c1}$ )	1	%
7.	Ripple Tegangan Kapasitor <i>Filter</i> Output C2 & C3 ( $\% \Delta v_{c2}$ & $\% \Delta v_{c3}$ )	1,5	%

*Range* nilai tegangan masukan dan keluaran ditentukan berdasarkan perubahan tegangan internal pada baterai VRLA dimana berkisar antara 10.8V dan 13.6V sehingga diambil nilai 12V yaitu nilai rata-rata baterai untuk input dan output. Daya output sebesar 60W berdasarkan nilai arus *discharge* yang tertera pada *datasheet* baterai VRLA. Nilai *ripple* induktor L1 dan L2 dibuat kecil yaitu 1,875% agar arus output dan arus input konverter mendekati stabil untuk menjaga kondisi baterai. Nilai tegangan *ripple* kapasitor C1 adalah 1% dan C2 adalah 1,5% disesuaikan dengan komponen yang ada di pasar.

### 3.4.1 Penentuan nilai Rasio Konversi dan *Duty Cycle*

Berdasarkan persamaan 2.6 pada bab 2, rasio konversi *DC-DC Bidirectional Cuk Converter* dipengaruhi oleh nilai *duty cycle*. Nilai keluaran konverter berdasarkan *duty cycle*-nya dapat dilihat dari kurva pada gambar berikut.



**Gambar 3.4** Grafik Rasio Konversi Konverter Berdasarkan Nilai *Duty Cycle*

Pada penelitian ini ditentukan nilai tegangan masukan dan keluaran konverter adalah 12V berdasarkan nilai rata-rata tegangan baterai 12V 7.2 Ah yang akan diuji. Maka besarnya rasio nilai konversi adalah :

$$M = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{12}{12} = 1$$

Dengan menggunakan persamaan 2.6, maka nilai *duty cycle* yang diperlukan untuk mendapatkan konversi demikian adalah :

$$V_2 = -\frac{D}{1-D} V_g$$

$$-12 = -\frac{D}{1-D} 12$$

$$D = 0.5$$

Nilai *duty cycle* yang diperlukan untuk mendapatkan nilai konversi yang diinginkan adalah 0.5 atau 50% dengan frekuensi 20 kHz. Kedua nilai tersebut akan digunakan untuk membangkitkan sinyal PWM dari mikrokontroler. Mikrokontroler yang digunakan adalah Arduino Uno. Sinyal PWM ini akan mengatur saklar semikonduktor yaitu MOSFET.

### 3.4.2 Penentuan Nilai Beban

Nilai beban yang akan digunakan pada simulasi akan ditentukan berdasarkan nilai tegangan *output* dan daya *output*. Besarnya nilai tegangan output berdasarkan desain awal adalah 12 Volt dan 60 Watt. Dengan menggunakan persamaan daya dapat ditemukan nilai beban sebagai berikut.

$$R = \frac{V_{out}^2}{P} = \frac{12^2}{60} = 2.4 \Omega$$

### 3.4.3 Penentuan Nilai Induktor L1 dan L2

Nilai induktansi induktor L1 dan L2 dihitung berdasarkan persamaan (2.10) dan dalam mode Continuous Current Mode (CCM), yakni arus yang mengalir pada induktor tidak sampai nol. Sebelum menentukan nilai induktor terlebih dahulu ditentukan arus yang mengalir pada induktor. Berdasarkan desain awal arus yang mengalir pada induktor adalah :

$$I_1 = \frac{P_{out}}{V_{in}} = \frac{60}{12} = 5A$$

Maka *ripple* arus yang mengalir pada induktor berdasarkan desain adalah

$$\Delta i_1 = I_1 \times \% \Delta i_1$$

$$\Delta i_1 = 5 \times 1,875\% = 0,09375 A$$

Dengan menggunakan persamaan (2.10) dapat ditentukan nilai induktor yang dibutuhkan sebagai berikut.

$$\Delta i_1 = \frac{VgDTs}{2L_1} \quad (2.10)$$

$$L_1 = \frac{VgD}{2\Delta i_1 f_s}$$

$$L_1 = \frac{12 \times 0,5}{2 \times 0,09375 \times 20k} = 1,6 \text{ mH}$$

Karena nilai *ripple* arus pada induktor L2 sama dengan induktor L1 yaitu 5 Ampere maka nilai induktor L2 juga sama dengan L1 yaitu 1,6mH.

Karena induktor dengan spesifikasi sekian susah didapatkan dipasaran maka akan dibuat induktor secara manual menggunakan inti besi *ferrite cores* jenis toroid dengan nilai *inductance factor*  $A_L$  sebesar  $75 \text{ nH/T}^2$ . Persamaan yang digunakan untuk mencari jumlah belitan induktor adalah :

$$N = \sqrt{\frac{L}{A_L}}$$

Dimana N adalah jumlah belitan kawat, L nilai induktansi induktor dalam nH, dan  $A_L$  adalah inductance factor dari inti besi (dalam  $\text{nH/T}^2$ ), maka jumlah belitan yang diperlukan dalam pembuatan induktor adalah :

$$N = \sqrt{\frac{1,6 \times 1.000.000}{75}} = 146,05 \approx 147 \text{ belitan.}$$

Selanjutnya adalah pemilihan kawat induktor yang digunakan. Penentuan nilai kawat berdasarkan dengan frekuensi *switching* yang digunakan serta besarnya arus yang melewatinya. Kawat yang digunakan untuk pembuatan induktor adalah jenis AWG (*American Wire Gauge*). Kabel AWG yang dipilih adalah yang memiliki diameter 0,45 mm. Kawat jenis ini dapat digunakan untuk frekuensi *switching* 85 kHz, memiliki resistansi 0,106  $\Omega$ /m, serta kapasitas arus maksimal sebesar 0,457 A. Berdasarkan desain ketika kondisi beban maksima arus yang melewati induktor adalah 5A, maka dilakukan pemilinan kawat untuk mendapatkan kemampuan kawat dengan arus yang lebih besar.

Dalam implementasinya, nilai arus yang mengalir bisa jadi lebih besar dari nilai arus yang diperhitungkan. Hal ini karena komponen yang digunakan tidak ideal. Oleh karena itu, induktor didesain agar dapat dilewati arus lebih dari 5 A, yang mana ditentukan sebesar 9,3 A. Berdasarkan tabel kawat AWG, kawat yang mampu dilewati arus sebesar 9,3 A memiliki diameter sebesar 2,05232 mm. Sehingga jumlah pilinan yang diperlukan adalah :

$$\text{Jumlah pilinan kawat} = \frac{2,05232}{0,45} = 4,56 \approx 5 \text{ pilinan}$$

Maka dibuat dua buah induktor L1 dan L2 dengan bahan-bahan sesuai desain dengan peralatan yang ada di laboratorium Konversi Energi.

#### 3.4.4 Penentuan Komponen Kapasitor

Kapasitor yang terdapat pada rangkaian DC-DC Bidirectional Cuk Converter adalah tiga buah, yaitu kapasitor C1 sebagai kapasitor coupling untuk penyaluran daya dan kapasitor C2 sebagai kapasitor filter pada sisi output dan juga sisi input karena konverter bekerja dua arah.

Untuk mengetahui nilai kapasitor coupling C1 perlu ditentukan nilai *ripple* tegangan pada kapasitor berdasarkan desain awal yaitu 1%. Untuk mengetahui nilai tegangan kapasitor C1 digunakan persamaan (2.6)

$$V_1 = \frac{V_g}{D}$$

$$V_1 = \frac{12}{1-0,5} = 24$$

Maka *ripple* tegangan kapasitor C1 adalah

$$\Delta V_1 = V_1 \times \% \Delta v_{c1} = 24 \times 1\% = 0,24 \text{ V}$$

Penentuan kapasitor coupling C1 dapat ditentukan dari persamaan (2.10) :

$$\Delta v_1 = \frac{v_g(D^2)T_s}{2D'RC1}$$

$$C1 = \frac{v_g(D^2)}{2D'RAv_1f_s}$$

$$C1 = \frac{12(0,5^2)}{2 \cdot 0,5 \cdot 2,4 \cdot 0,24 \cdot 20k} = 260,41667 \text{ uF}$$

Nilai kapasitor ditentukan sesuai yang berada di pasar yaitu 330uF dengan tegangan maksimal 250 V karena konverter akan dijalankan pada *duty cycle* sebesar 20-80% dimana tegangan maksimal  $V_1$  mencapai 60 V pada *duty cycle* 80%.

Selanjutnya menentukan nilai kapasitor filter C2 pada sisi input dan output konverter. Desain awal dengan *ripple* tegangan  $\Delta v_2$  adalah 1,5%. Untuk mengetahui nilai kapasitor filter C2 yang diperlukan menggunakan persamaan *discharge mode* kapasitor (2.11) sebagai berikut.

$$C_o = V_{max} \left( \frac{1-D}{R_o \Delta V_o f_s} \right) \quad (2.11)$$

$$C2 = (V_o + V_o \cdot \% \Delta V_o) \left( \frac{1-D}{R_o (V_o \cdot \% \Delta V_o) f_s} \right)$$

$$C2 = (12 + 12 \cdot 1,5\%) \left( \frac{1-0,5}{2,4 (12 \cdot 1,5\%) 20k} \right)$$

$$C2 = 704,86 \text{ uF}$$

Nilai kapasitor ditentukan sesuai dengan yang ada di pasar yaitu 1000uF dengan tegangan maksimal 63V karena *duty cycle* maksimal diset 80% maka nilai konversi maksimum konverter adalah 4 kali tegangan inputnya. Maka tegangan maksimum konverter dengan input 12 V adalah 48 V.

### 3.4.5 Penentuan komponen MOSFET

Pada rangkaian *DC-DC Bidirectional Cuk Converter* menggunakan dua buah MOSFET dimana ketika bekerja salah satu MOSFET akan bekerja sebagai saklar yang di *switching* dan satu lagi bekerja sebagai dioda tergantung dari arah input dan output yang diinginkan. Pemilihan jenis MOSFET yang akan digunakan berdasarkan kapasitas arus yang mengalir pada *drain* ke *source* ( $I_{ds}$ ), tegangan drain ke source ( $V_{ds}$ ), serta frekuensi *switching* MOSFET. Besarnya  $V_{ds}$  dapat dicari dengan mengabaikan tegangan *ripple* pada kapasitor C1, maka tegangan maksimum pada saklar MOSFET saat steady state dapat dicari menggunakan persamaan :

$$V_{ds} = V_1 + V_{C1} = \left(\frac{1}{1-D}\right) V_1$$

$$V_{ds} = \left(\frac{1}{1-0.5}\right) 12 = 24 \text{ V}$$

Untuk nilai arus  $I_{ds}$  yang melewati MOSFET setara dengan arus induktor L1 pada mode *charging* sehingga dapat ditentukan

$$I_{ds} = I_{L1max} \cdot D$$

$$I_{ds} = \{I_{L1} + (I_{L1} \cdot \% \Delta i_1)\} \cdot D$$

$$I_{ds} = \{5 + (5 \cdot 1,875\%)\} \cdot 0,5 = 2,54678 \text{ A}$$

Setelah mendapatkan parameter  $V_{ds}$  dan  $I_{ds}$ , ditambahkan dengan frekuensi *switching* yaitu 20 kHz dari desain awal dapat ditentukan jenis MOSFET yang digunakan. MOSFET yang digunakan adalah tipe IRFP4332. MOSFET ini memiliki memiliki kemampuan tegangan  $V_{dsmax}$  sebesar 250 V, arus  $I_{dsmax}$  sebesar dengan tegangan input untuk *Gain to Source* ( $V_{gs}$ ) maksimal sebesar 30V dan resistansi  $R_{ds}$  sebesar 29 mΩ

ketika  $V_{gs}$  12 V. MOSFET IRFP4332 dipilih karena mampu untuk melakukan kerja dalam parameter yang sudah ditentukan sesuai desain awal.

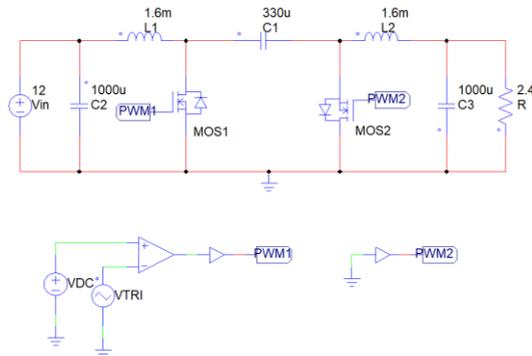
Berdasarkan hasil perhitungan desain maka komponen yang diperlukan dalam implementasi *DC-DC Bidirectional Cuk Converter* dapat dilihat pada tabel berikut.

**Tabel 3.5** Komponen yang Digunakan dalam Implementasi Converter

No.	Komponen	Nilai
1	Beban R	2,4 $\Omega$
2	Induktor L1 dan L2	1,6 mH
3	Kapasitor <i>Coupling</i> C1	330uF/250V
4	Kapasitor <i>Filter</i> C2 dan C3	1000uF/63V
5	MOSFET	IRFP 4332

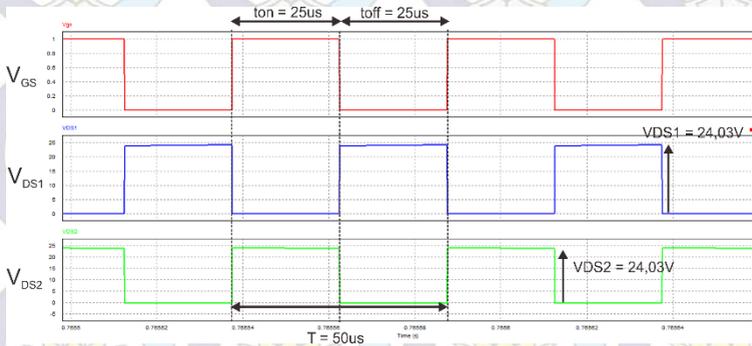
### 3.4.6 Simulasi Konverter dalam Keadaan *Steady State*

Simulasi rangkaian *DC-DC Bidirectional Cuk Converter* dilakukan dalam kondisi *steady state*. Rangkaian konverter dalam kondisi *steady state* dapat dilihat pada gambar berikut.



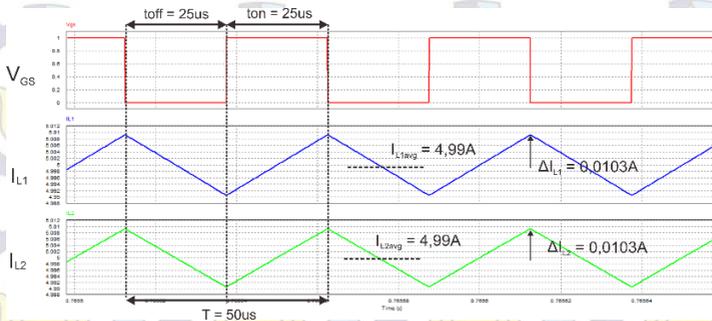
**Gambar 3.5** Simulasi Konverter Kondisi *Steady State* menggunakan PSIM

Dengan parameter yang sudah ditentukan sesuai dengan desain yang sudah dibuat. Maka dilakukan simulasi rangkaian konverter menggunakan *software* PSIM untuk mengetahui apakah konverter sudah bekerja sesuai perhitungan.



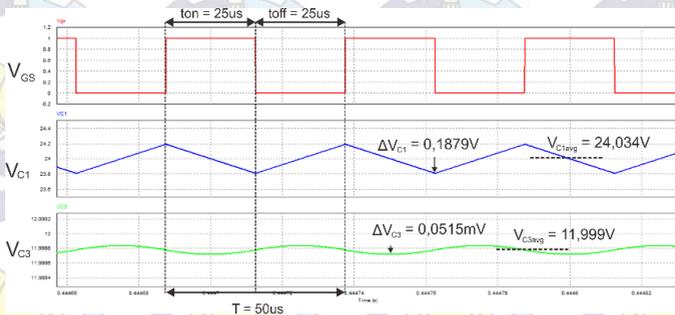
**Gambar 3.6** Gelombang  $V_{GS}$ ,  $V_{DS1}$ , dan  $V_{DS2}$

Gambar 3.5 merupakan hasil simulasi berupa sinyal tegangan GS, tegangan DS1 dan tegangan DS2 saat konverter bekerja. MOSFET akan konduksi ketika diberi logika 1 pada sisi *gate-source* dan akan mati ketika diberi logika 0. Dapat dilihat dengan memberi *duty cycle* 0,5 dan frekuensi *switching* 20kHz pada MOSFET 1 memiliki tegangan maksimal pada sisi *drain-source* 24,03V pada saat non konduksi dan MOSFET 2 memiliki tegangan maksimal sebesar 24,03 saat bekerja sebagai dioda sesuai dengan desain.



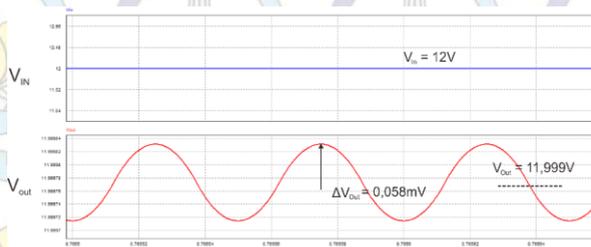
**Gambar 3.7** Gelombang  $V_{GS}$ ,  $I_{L1}$ , dan  $I_{L2}$  Simulasi

Pada gambar 3.7 dapat dilihat bentuk gelombang arus pada induktor L1 dan L2. Dapat dilihat terdapat sedikit perbedaan nilai *ripple* arus dari hasil simulasi dan perhitungan namun masih dalam nilai yang dapat diterima. Nilai *ripple* arus pada simulasi L1 dan L2 adalah 0,0103A. Juga sedikit perbedaan pada arus rata-rata yang melalui induktor yaitu 4,99 A namun juga masih dalam batas yang bisa diterima karena pada desain adalah 5A.



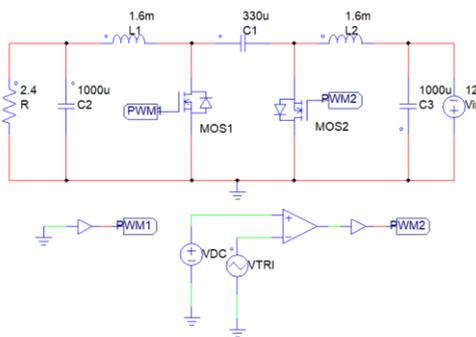
**Gambar 3.8** Gelombang  $V_{GS}$ ,  $V_{C1}$ , dan  $V_{C3}$  Simulasi

**Gambar 3.8** menunjukkan bentuk gelombang  $V_{C1}$  dan  $V_{C3}$  saat konverter bekerja.  $V_{C1}$  merupakan tegangan pada kapasitor *coupling* dengan nilai tegangan rata-rata 24,034V dan *ripple* tegangan 0,1879V mendekati dari nilai perhitungan yang sudah dibuat. Dapat dilihat kapasitor *coupling* C1 mengalami *charging* ketika MOSFET 1 mati dan *discharge* ketika MOSFET 1 konduksi.  $V_{C3}$  merupakan tegangan pada kapasitor *filter* pada output konverter dengan nilai tegangan rata-rata 11,999V dan *ripple* tegangan 0,0515mV mendekati dengan nilai perhitungan.



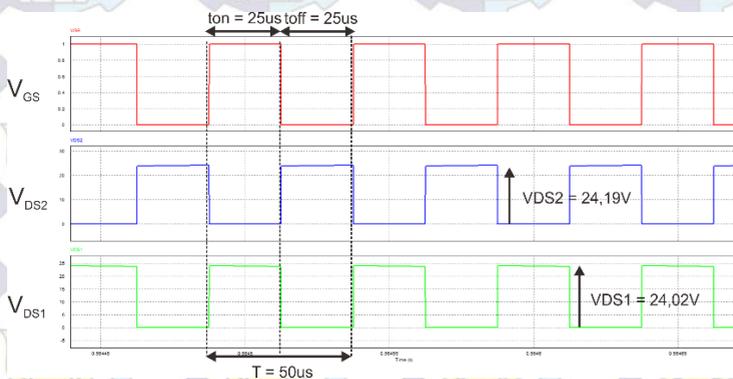
**Gambar 3.9** Gelombang  $V_{in}$  dan  $V_{out}$  Simulasi

**Gambar 3.9** menunjukkan bentuk tegangan konverter pada sisi input dan output. Pada sisi input tegangan tetap pada 12 V karena menggunakan *DC Source* dan pada tegangan output memiliki tegangan rata-rata 11,999V dengan *ripple* tegangan 0,058mV mendekati dengan hasil perhitungan. Untuk mengetahui apakah konverter dapat melakukan kerja dua arah atau *bidirectional* maka dilakukan simulasi *steady state* untuk mode balik sesuai gambar berikut.



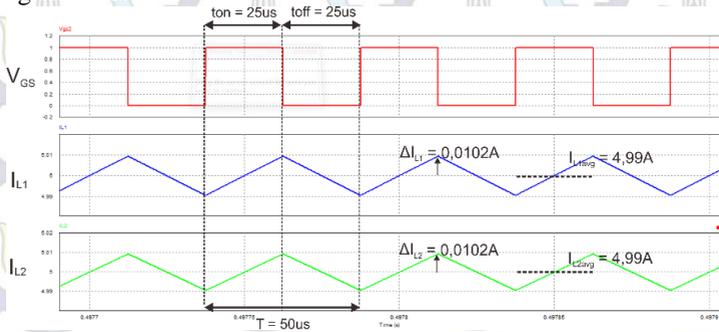
**Gambar 3.10** Simulasi Konverter Kondisi *Steady State* Mode Balik

Berikut ini adalah hasil simulasi konverter pada mode balik untuk memastikan apakah konverter dapat bekerja sesuai desain perhitungan yang telah dibuat.



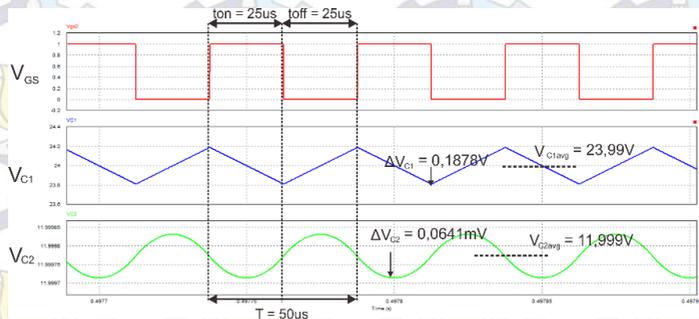
**Gambar 3.11** Gelombang  $V_{GS}$ ,  $V_{DS1}$ , dan  $V_{DS2}$  Mode Balik

Dapat dilihat pada gambar 3.11 pada mode balik arah konverter bekerja sebagaimana konverter cuk konvensional dimana sekarang MOSFET 2 bekerja sebagai *switching* dan MOSFET 1 bekerja sebagai *forward dioda*. Dapat dilihat dengan memberi *duty cycle* 0,5 dan frekuensi *switching* 20kHz pada MOSFET 2 memiliki tegangan maksimal pada sisi *drain-source* 24,19V pada saat non konduksi dan MOSFET 1 memiliki yang bekerja sebagai *forward dioda* memiliki tegangan maksimal saat MOSFET 2 konduksi yaitu 24,02V. Hasil ini mendekati nilai perhitungan yang telah dibuat.



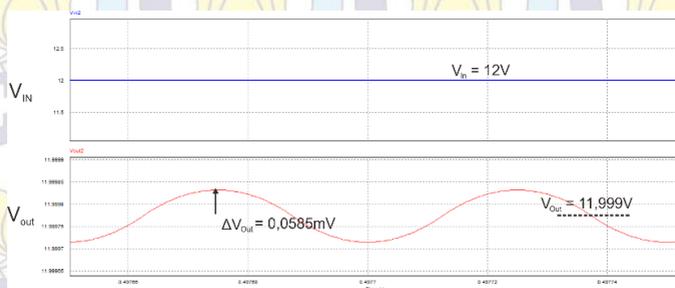
**Gambar 3.12** Gelombang  $V_{GS}$ ,  $I_{L1}$ , dan  $I_{L2}$  Mode Balik

Dapat dilihat pada gambar 3.12 ketika MOSFET 2 konduksi maka induktor L1 dan L2 akan *charging* dan ketika non-konduksi akan terjadi *discharge* yang terjadi berulang-ulang. Dapat dilihat arus rata-rata pada induktor L1 dan L2 adalah 4,99A dengan *ripple* arus 0,0102A mendekati perhitungan.



**Gambar 3.13** Gelombang  $V_{GS}$ ,  $V_{C1}$ , dan  $V_{C2}$  Simulasi

Gambar 3.13 menunjukkan bentuk gelombang  $V_{C1}$  dan  $V_{C2}$  saat konverter bekerja mode balik.  $V_{C1}$  merupakan tegangan pada kapasitor *coupling* dengan nilai tegangan rata-rata 23,99V dan *ripple* tegangan 0,1879V mendekati dari nilai perhitungan yang sudah dibuat. Dapat dilihat kapasitor *coupling* C1 mengalami *charging* ketika MOSFET 1 mati dan *discharge* ketika MOSFET 1 konduksi.  $V_{C2}$  merupakan tegangan pada kapasitor *filter* pada output konverter dengan nilai tegangan rata-rata 11,999V dan *ripple* tegangan 0,0641mV mendekati dengan nilai perhitungan.



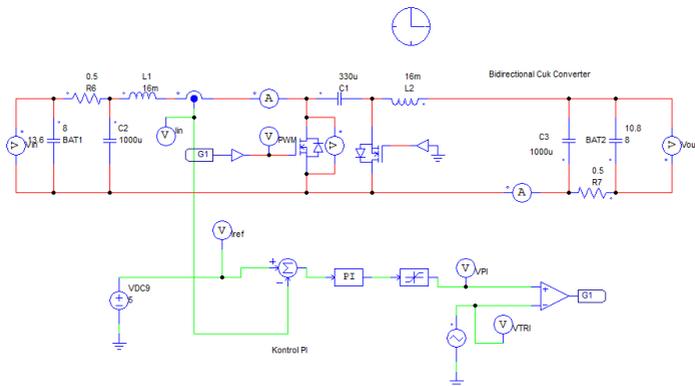
**Gambar 3.14** Gelombang  $V_{in}$  dan  $V_{out}$  simulasi

Dari **gambar 3.14** dapat dilihat tegangan masukan dan keluaran dari konverter ketika mode balik. Dapat dilihat tegangan masukan adalah 12V karena bersumber dari *dc source*. Sedangkan untuk tegangan output memiliki nilai rata-rata 11,999V dan *ripple* 0,0585mV mendekati nilai perhitungan yang ditentukan.

### 3.4.7 Konverter pada Kondisi Dinamis

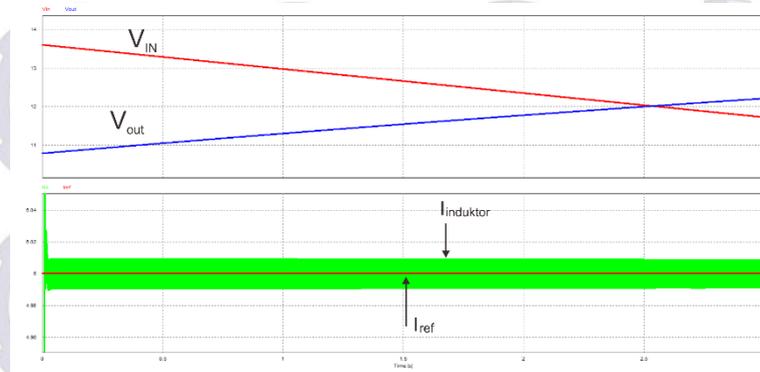
Pada saat kondisi dinamis, konverter *DC-DC Bidirectional Cuk Converter* harus mampu mempertahankan nilai arus *discharge* dan *charging* pada sisi baterai uji atau input V1. Sisi input dan output pada kondisi nyata adalah menggunakan baterai VRLA 12V 7,2Ah dengan tegangan maksimal 13,8V dan 10,8V. Oleh karena itu konverter harus dapat mempertahankan arus pada sisi uji baik dalam mode normal dan mode balik (uji *discharge* dan *charge* baterai) dalam keadaan tegangan input yang berubah-ubah dan resistansi output yang juga berubah-ubah sesuai keadaan SOC baterai.

Untuk mendapatkan arus konstan saat pengujian maka dilakukan pengontrolan *close loop* untuk mengontrol *duty cycle* konverter. Pengontrol yang digunakan adalah jenis PI (Proportional-Integrator). Simulasi kondisi dinamis dengan menggunakan baterai dilakukan menggunakan *software* PSIM yang dapat dilihat pada gambar 3.14 dibawah ini.



**Gambar 3.15** Simulasi *Close Loop* Konverter menggunakan PSIM

Pada simulasi *close loop* baterai digunakan rangkaian permodelan baterai sederhana dengan kapasitor (C) dan resistor (R). Tegangan awal baterai uji adalah tegangan maksimalnya yaitu 13,6 V dan baterai dummy adalah tegangan minimalnya 10,8 V. Pengontrolan menggunakan *duty cycle* dilakukan pengontrol PI (*Proportional-Integrator*) untuk mendapatkan arus konstan. Feedback nilai arus induktor L1 akan dikurangkan dengan nilai referensi yang sudah ditentukan untuk mendapatkan nilai *error*, kemudian *error* ini akan diolah PI untuk mendapatkan nilai *error* mendekati nol atau sudah sesuai referensi. Parameter yang digunakan pada kontrol PI ditentukan dengan metode *trial and error*. Hasil simulasi dapat dilihat pada gambar berikut.



**Gambar 3.16** Hasil Simulasi *Close Loop* Konverter

Dapat dilihat dari hasil simulasi *close loop* yang dilakukan nilai arus pada induktor L1 dapat dijaga konstan mengikuti arus referensi ( $I_{ref}$ ) yang diberikan pada kontrol PI. Dapat dilihat juga tegangan baterai uji mulai mengalami penurunan dan tegangan baterai *dummy* mulai bertambah namun arus *discharge* tetap konstan. Maka dari hasil simulasi yang telah dilakukan dapat dilanjutkan ke tahap implementasi karena desain perhitungan dan simulasi sudah sesuai.

### 3.5. Implementasi *DC-DC Bidirectional Cuk Converter*

Tahap implementasi sistem merupakan tahap pembuatan peralatan untuk pengujian yaitu *DC-DC Bidirectional Cuk Converter* dan komponen pendukung pengujian. Implementasi konverter adalah tahap pembuatan konverter dengan menggunakan komponen-komponen, seperti kapasitor, MOSFET, dan pembuatan induktor yang sudah ditentukan nilainya pada subbab sebelumnya. Implementasi komponen pendukung pengujian antara lain pembuatan rangkaian MOSFET *driver* dan *data logger*.

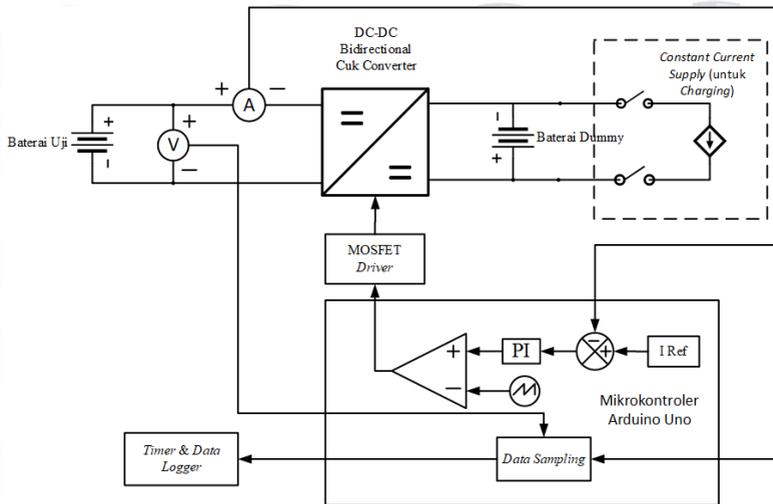
#### 3.5.1 Hasil Implementasi *DC-DC Bidirectional Cuk Converter*

Berikut adalah komponen-komponen yang diperlukan untuk melakukan implementasi *DC-DC Bidirectional Cuk Converter* bersama komponen pendukungnya. Komponen yang digunakan disesuaikan dengan desain yang dibuat dan ada di pasaran.

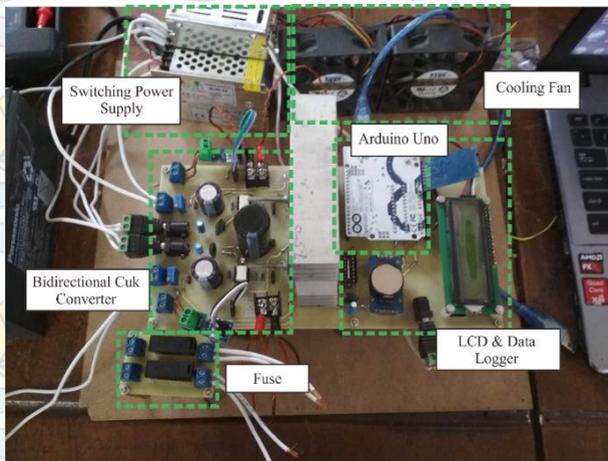
**Tabel 3.6** Komponen Implementasi *DC-DC Bidirectional Cuk Converter*

<b>Parameter Baterai</b>	<b>Nilai</b>
Baterai VRLA	LC-V127R2
Tegangan Nominal	12 V
Kapasitas <i>Rating</i>	7,2 Ah
<b>Parameter Konverter</b>	<b>Nilai</b>
Mikrokontroler	Arduino Uno
Frekuensi <i>Switching</i>	20 kHz
Induktor L1 dan L2	1,6mH
Kapasitor C1	330uF/250V
Kapasitor C2 dan C3	1000uF/63V
MOSFET 1 dan 2	IRFP 4332
MOSFET <i>Driver</i> (2)	TLP 250
Supply MOSFET <i>Driver</i> (2)	<i>Switching Supply</i> 12 Vdc
<b>Sensor dan Data Logger</b>	<b>Nilai</b>
Sensor Tegangan	Multiturn 200kΩ
Sensor Arus	ACS 712/20A
<i>Data Logger</i>	<i>Micro SD Module</i>
<i>Clock/Timer</i>	RTC DS3231
Supply Arduino Uno, dll	<i>Switching Supply</i> 5 Vdc

Skema pengujian dan hasil implementasi konverter untuk melakukan pengujian baterai dapat dilihat pada gambar berikut. Setiap komponen yang digunakan tentunya memiliki rugi-rugi karena tidak ada komponen yang ideal. Sehingga daya pada sisi keluaran akan bernilai lebih rendah dari daya masukan.



**Gambar 3.17** Skema pengujian baterai menggunakan *DC-DC Bidirectional Cuk Converter*



**Gambar 3.18** Hasil Implementasi *DC-DC Bidirectional Cuk Converter*

## BAB 4

### HASIL PENGUJIAN DAN ANALISA DATA

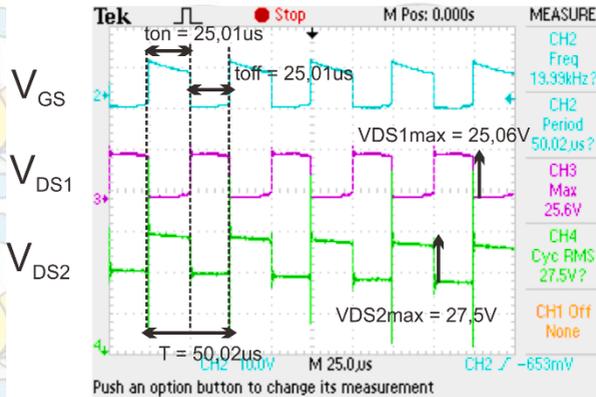
Pada bab 4 akan dibahas mengenai pengujian *DC-DC Bidirectional Cuk Converter*, pengujian baterai dan analisis data hasil pengujian tersebut. Pengujian konverter dilakukan untuk mengetahui apakah konverter sudah bekerja sesuai desain. Hasil pengujian akan dianalisis dan dibandingkan dengan hasil simulasi dan perhitungan. Pengujian baterai digunakan untuk mengetahui karakteristik *discharge* baterai dengan *C-rating* yang berbeda-beda untuk menentukan kurva *discharge* dari baterai. Selanjutnya dilakukan analisa *State of Charge (SoC)* dari baterai VRLA menggunakan metode *Coulomb Counting (CC)* dan *Open Circuit Voltage (OCV)* dari data pengujian yang telah didapat. Pengujian baterai kedua adalah siklus *charge-discharge* untuk mengestimasi SoC menggunakan *coulomb counting*.

#### 4.1. Pengujian Konverter *DC-DC Bidirectional Cuk Converter*

Berbagai pengujian dilakukan apakah konverter yang telah diimplementasikan sudah bekerja sesuai desain atau tidak. Untuk mengetahuinya dilakukan berbagai macam jenis pengujian. Pengujian-pengujian yang dilakukan pada konverter beserta analisisnya akan dibahas pada subbab berikut.

##### 4.1.1 Pengujian Pensakelaran

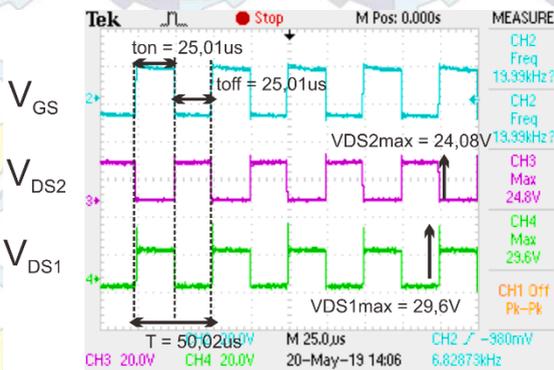
Pengujian pensakelaran dilakukan untuk mengetahui apakah pembangkitan sinyal PWM sudah sesuai dengan frekuensi dan nilai tegangan yang diinginkan. Pengujian ini dilakukan dengan mengamati gelombang  $V_{GS}$ ,  $V_{DS1}$  dan  $V_{DS2}$ . Pada saat  $V_{GS}$  memiliki nilai tegangan maka MOSFET 1 akan dalam keadaan konduksi sehingga akan mengalir arus dari *drain* ke *source*. Pada saat tegangan gate ke source nol maka MOSFET 1 dalam keadaan non-konduksi dan tidak mengalirkan arus. Untuk MOSFET 2 karena tidak dilakukan pensakelaran atau  $V_{GS}$  nol, maka MOSFET 2 akan bekerja sebagai dioda dan melewatkan arus apabila MOSFET 1 mati atau dalam mode *reverse biased*. Ketika MOSFET 1 konduksi maka diode MOSFET 2 akan bekerja pada mode *forward biased* yang dapat dilihat pada gambar berikut.



**Gambar 4.1** Sinyal  $V_{GS}$ ,  $V_{DS1}$  dan  $V_{DS2}$  Mode Normal

Dapat dilihat dari gambar 4.1, konverter sudah bekerja sesuai dengan desain yang telah direncanakan dengan frekuensi *switching* 19,99 kHz dan *duty cycle* 0,5. Nilai tegangan maksimal  $V_{DS1}$  dan  $V_{DS2}$  mencapai 25,6 V dan 27,5 V sedikit diatas dari perhitungan awal yaitu 24 V. Hal ini dikarenakan komponen MOSFET yang digunakan tidak ideal.

Selanjutnya juga dilakukan pengujian sinyal  $V_{GS}$ ,  $V_{DS1}$  dan  $V_{DS2}$  pada saat konverter dalam mode balik dimana sekarang MOSFET 2 yang akan mengalami pensaklaran dan MOSFET 1 bekerja sebagai dioda. Hasil pengujian dapat dilihat pada gambar berikut.

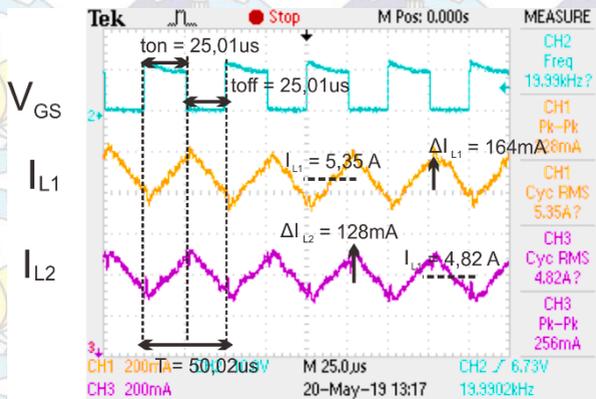


**Gambar 4.2** Sinyal  $V_{GS}$ ,  $V_{DS2}$  dan  $V_{DS1}$  Mode Balik

Dapat dilihat dari hasil pengujian pada mode balik konverter juga sudah dapat bekerja sesuai desain dengan frekuensi *switching* 19,9 kHz dan *duty cycle* 0,5. Nilai tegangan maksimal  $V_{DS2}$  dan  $V_{DS1}$  untuk mode balik mencapai 24,08 V dan 29,6 V sedikit diatas dari perhitungan awal yaitu 24 V. Hal ini dikarenakan karena pengaruh *switching* pada MOSFET yang tidak ideal.

#### 4.1.2 Pengujian Arus Induktor

Pengujian arus induktor bertujuan untuk mengetahui mode *charging-discharging* induktor berdasarkan waktu pensakelaran, yang hasilnya dibandingkan dengan hasil simulasi. Berikut hasil pengujian arus induktor L1 dan L2 pada mode normal konverter.

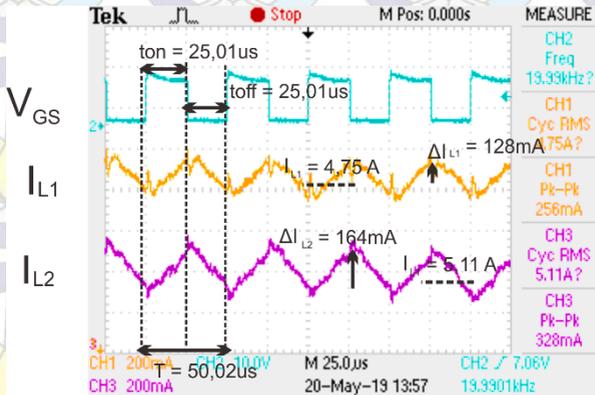


**Gambar 4.3** Sinyal  $V_{GS}$ , arus  $I_{L1}$  dan arus  $I_{L2}$  Mode Normal

Pada **gambar 4.3** dapat dilihat arus induktor L1 dan L2 saat mode normal konverter berada pada mode CCM (*Continuous Conduction Mode*). Arus yang mengalir pada induktor L1 adalah 5,35 A melebihi dari desain, sedangkan arus yang mengalir pada induktor L2 adalah 4,82 A dibawah dari desain. Hal ini dikarenakan karena komponen induktor tidak ideal sehingga memiliki nilai resistif yang mengakibatkan rugi-rugi. Hal yang sama juga terjadi pada arus *ripple* L1 dan L2 yang bernilai 164 mA dan 128 mA dimana melebihi nilai desain. Hal ini dikarenakan karena faktor ketidakidealan komponen seperti rugi-rugi tembaga, inti besi dan fluks bocor sehingga *ripple* arus mengalami kenaikan, namun nilai tersebut

masih bisa ditoleransi dan konverter masih bekerja sesuai yang diinginkan.

Selanjutnya adalah pengujian arus induktor L1 dan L2 dalam mode balik yang hasilnya dapat dilihat pada gambar berikut.



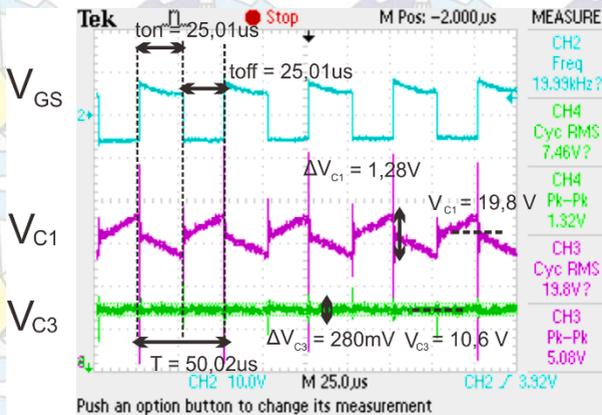
**Gambar 4.4** Sinyal  $V_{GS}$ , arus  $I_{L1}$  dan arus  $I_{L2}$  Mode Balik

Dari gambar diatas dapat diamati bahwa karakteristik dan nilai arus induktor L1 dan L2 pada mode normal dan mode balik hampir sama. Pada mode balik arus yang mengalir pada induktor L1 menjadi lebih rendah dari desain yaitu 4,75 A. Sedangkan arus yang mengalir pada induktor L2 lebih tinggi dari desain yaitu 5,11 A, yang mana berkebalikan dari mode normal karena sisi input dan output konverter bertukar. Dapat dilihat arus induktor L1 dan L2 sedikit berbeda dari nilai desain hal ini juga dikarenakan karena komponen yang digunakan pada konverter tidak ideal sehingga akan timbul rugi-rugi seperti rugi tembaga, inti besi dan fluks bocor. Dari sisi *ripple* arus yang dihasilkan sendiri memiliki nilai yang sama pada mode balik dan mode normal dan masih dalam batas yang bisa ditoleransi. Pada mode normal maupun balik induktor L1 dan L2 bekerja dalam mode CCM sehingga sesuai dengan pendesainan awal dan dapat digunakan.

### 4.1.3 Pengujian Tegangan Kapasitor

Pengujian tegangan kapasitor bertujuan untuk mengetahui karakteristik *charging* dan *discharging* kapasitor bersesuaian dengan

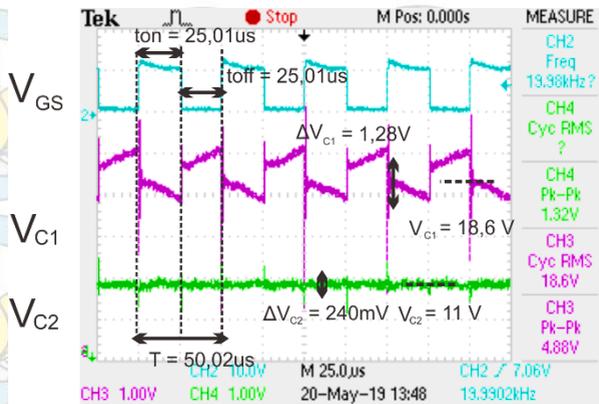
mode sakelar yang sedang bekerja. Pengujian dilakukan pada tegangan masukan 12 V dan *duty cycle* 50%. Pada konverter ini terdapat tiga kapasitor  $C_1$ ,  $C_2$ , dan  $C_3$ . Kapasitor  $C_1$  bekerja sebagai kapasitor *coupling* untuk mengalirkan daya dari sisi input ke output, sedangkan kapasitor  $C_2$  dan  $C_3$  sama-sama bekerja sebagai kapasitor filter untuk mode normal dan balik. Hasil pengujian mode normal dapat dilihat pada gambar berikut.



**Gambar 4.5** Sinyal  $V_{GS}$ ,  $V_{C1}$  dan  $V_{C3}$

Dapat dilihat dari hasil pengujian sinyal *charge* dan *discharge*, Bentuk sinyal kapasitor *coupling*  $C_1$  dan kapasitor *filter* mode normal  $C_3$  sudah sesuai desain dan simulasi yang telah dilakukan. Pada kapasitor  $C_1$  tegangan rata-ratanya adalah 19,8 V dengan *ripple* 1,28 V. Sedangkan untuk kapasitor  $C_3$  memiliki tegangan rata-rata 10,6 V dan *ripple* 280 mV. Tegangan pada setiap komponen kapasitor yang diuji berada dibawah nilai desain, hal ini dikarenakan ketidakidealan komponen pada konverter sehingga terdapat rugi-rugi. *Ripple* tegangan kapasitor juga berada diatas desain yaitu 1,28 V atau 6,46% dan 280 mV atau 2,64%. Hal ini dikarenakan komponen yang digunakan tidak ideal. Namun dari gelombang sinyalnya dapat disimpulkan konverter dapat bekerja sesuai yang diharapkan pada mode normal.

Selanjutnya juga akan diuji sinyal tegangan kapasitor *coupling*  $C_1$  dan kapasitor *filter* untuk mode balik  $C_2$  yang hasilnya dapat dilihat pada gambar berikut.

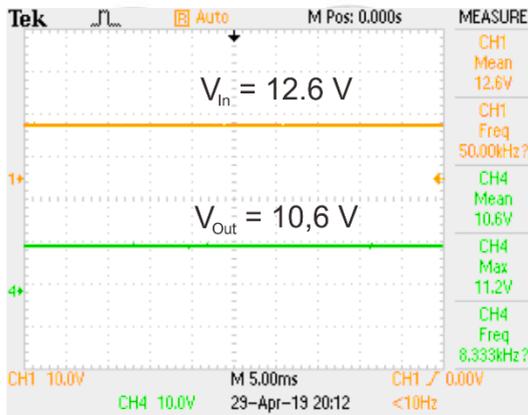


**Gambar 4.6** Sinyal  $V_{GS}$ ,  $V_{C1}$  dan  $V_{C2}$

Dapat dilihat dari hasil pengujian sinyal ketika *charge* dan *discharge* kapasitor pada mode balik memiliki bentuk gelombang yang sama dengan mode normal. Pada mode balik tegangan rata-rata kapasitor C1 adalah 18,6 V dibawah nilai desain dan tegangan rata-rata kapasitor C2 adalah 11 V juga dibawah nilai desain. Hal ini dikarenakan karena ketidakidealan komponen yang menyebabkan rugi-rugi. *Ripple* tegangan kapasitor juga berada diatas nilai desainnya yaitu 1,28 V atau 6,88% dan 240 mV atau 2,18%. Hal ini dikarenakan karena komponen yang digunakan tidak ideal sehingga terdapat rugi-rugi. Namun dapat dilihat dari hasil pengujian sinyal tegangan kapasitor bahwa konverter dapat bekerja sesuai yang diinginkan pada mode normal dan mode balik.

#### 4.1.4 Pengujian Tegangan Masukan dan Keluaran Konverter

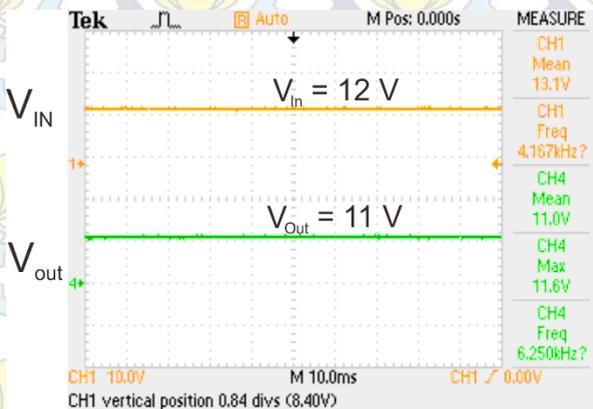
Pengujian tegangan masukan dan keluaran konverter bertujuan untuk mengetahui apakah implementasi dapat menghasilkan tegangan output yang sesuai dengan desan dan simulasi. Pengujian dilakukan dengan tegangan masukan 12 Volt dan *duty cycle* 50%. Hasil dari pengujian tegangan  $V_{out}$  dan  $V_{in}$  ditampilkan pada gambar berikut.



**Gambar 4.7** Sinyal  $V_{out}$  dan  $V_{in}$  Mode Normal Konverter

Pada gambar 4.7 nilai tegangan pada sisi input bernilai 12 V dengan *ripple* yang sangat kecil, dikarenakan menggunakan tegangan input adalah sumber DC. Sedangkan pada sisi output dengan *duty cycle* 50% dihasilkan tegangan sebesar 10,6 V. Tegangan output menjadi lebih rendah karena komponen yang digunakan tidak ideal dan menimbulkan rugi-rugi.

Selanjutnya juga dilakukan pengujian untuk mode balik konverter yang dapat dilihat pada gambar 4.8 berikut.



**Gambar 4.8** Sinyal  $V_{out}$  dan  $V_{in}$  Mode Normal Balik Konverter

Dari hasil pengujian sinyal output dan input pada mode balik didapatkan hasil yang sama pada mode normal. Tegangan input adalah 12 V dengan *ripple* tegangan yang sangat kecil karena menggunakan sumber DC. Pada sisi output dengan 50% *duty cycle* terbangkit tegangan 11 V pada sisi output, dimana sedikit tidak sesuai dengan desain akibat komponen yang tidak ideal mengakibatkan rugi. Dari hasil pengujian sinyal tegangan input dan output dapat disimpulkan bahwa konverter dapat bekerja dengan baik walaupun terdapat sedikit perbedaan dari desain akibat komponen yang tidak ideal.

#### 4.1.5 Pengujian Sensor Tegangan dan Arus

Pengujian sensor digunakan untuk mengetahui tingkat akurasi dari sensor yang digunakan dalam penelitian. Sensor yang digunakan adalah sensor tegangan menggunakan *multiturn* dan sensor arus ACS 712. Hasil pengujian sensor dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

**Tabel 4.1** Hasil Pengujian Sensor Arus dan Tegangan

Arus Aktual (A)	Arus Sensor (A)	Error Sensor (%)	Tegangan Aktual (V)	Tegangan Sensor (V)	Error Sensor (%)
0,1	0,109	9	0,5	0,51	2
0,25	0,256	2,40	1,01	1	0,99
0,45	0,497	10,44	1,533	1,53	0,20
0,75	0,744	0,80	2,02	2,02	0,00
1	0,99	1,00	2,528	2,53	0,08
1,21	1,2	0,83	3	3,02	0,67
1,54	1,52	1,30	3,513	3,53	0,48
1,73	1,65	4,62	3,98	3,97	0,25
2,05	2,01	1,95	4,53	4,51	0,44
2,52	2,28	9,52	5,04	5,04	0,00
2,71	2,47	8,86	5,47	5,47	0,00
3,04	2,99	1,64	5,98	5,98	0,00
3,24	3,16	2,47	6,41	6,41	0,00
3,55	3,47	2,25	7,05	7,05	0,00

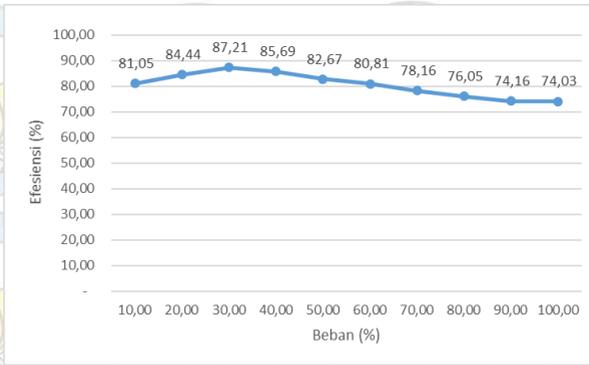
**Tabel 3.4 (Lanjutan)** Hasil Pengujian Sensor Tegangan dan Arus

Arus Aktual (A)	Arus Sensor (A)	Error Sensor (%)	Tegangan Aktual (V)	Tegangan Sensor (V)	Error Sensor (%)
3,76	3,68	2,13	7,49	7,48	0,13
4,01	3,95	1,50	7,99	7,99	0,00
4,28	4,19	2,10	8,53	8,54	0,12
4,52	4,37	3,32	9,22	9,22	0,00
4,75	4,59	3,37	9,49	9,47	0,21
5,01	4,86	2,99	10,17	10,15	0,20
<b>Rata-rata error (%)</b>		<b>3,63</b>	<b>Rata-rata error (%)</b>		<b>0,29</b>

Berdasarkan tabel diatas dapat dilihat untuk sensor arus dan tegangan memiliki kemampuan yang baik dalam membaca nilai aktual dengan akurasi yang baik. Untuk sensor arus memiliki *error* rata-rata 3,63 % dan *error* paling tinggi adalah 10,44 % dan untuk sensor tegangan memiliki rata-rata *error* 0,29 % dengan *error* paling tinggi adalah 2%. Dari hasil ini dapat ditarik kesimpulan sensor tegangan memiliki akurasi yang tinggi sehingga tidak diperlukan recalibrasi setiap penggunaan, sedangkan karena konverter yang dirancang dengan kontrol *constant current* maka setiap penggunaan sensor arus perlu dilakukan kalibrasi sehingga mendapatkan hasil yang diharapkan.

#### 4.1.6 Pengujian Efisiensi

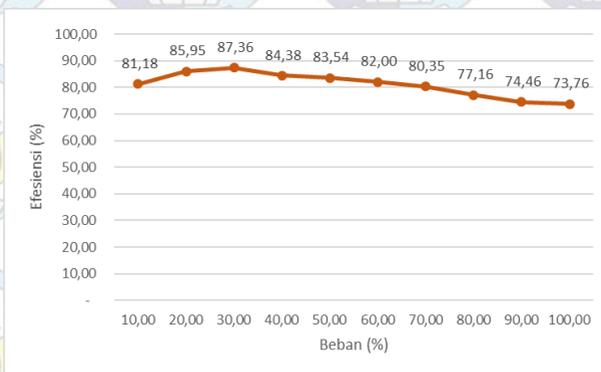
Pengujian efisiensi konverter digunakan untuk mengetahui seberapa efisien konverter dengan beban yang bervariasi dari rendah ke *full-load* desainnya. Pada pengujian efisiensi tegangan masukan dijaga tetap konstan 12 V, dan tegangan keluaran juga dijaga konstan 12 V dengan mengubah nilai *duty cycle* dimana beban akan ditambahkan sampai nilai *full-load* konverter. Gambar berikut merupakan grafik efisiensi dari *DC-DC Bidirectional Cuk Converter* dengan nilai pembebanan dari 10% hingga 100% dalam mode normalnya.



**Gambar 4.9** Grafik Efisiensi Konverter pada Mode Normal

Dari grafik tersebut dapat dilihat konverter dapat mencapai efisiensi maksimum 87,21% pada pembebanan 30% dan efisiensi minimum pada pembebanan 74,03% pada pembebanan *full-load*. Dari pengujian efisiensi pada mode normalnya konverter memiliki rata-rata efisiensi 80,43%. Dapat dilihat efisiensi konverter mengalami penurunan semakin besar pembebanannya, hal ini dikarenakan terdapat rugi-rugi pada pensaklaran MOSFET dan losses  $I^2R$  pada induktor.

Untuk mode balik konverter juga dilakukan pengujian efisiensi dengan perlakuan yang sama. Hasil pengujian efisiensi konverter pada mode balik dapat dilihat pada gambar berikut.



**Gambar 4.10** Grafik Efisiensi Konverter pada Mode Balik

Dapat dilihat dari grafik diatas pada mode balik efisiensi konverter hampir sama dengan grafik efisiensi mode normal. Hal ini dikarenakan mode normal dan balik memiliki tegangan input dan output yang sama sehingga nilai *duty cycle* yang digunakan juga sama. Dari grafik diatas konverter memiliki efisiensi maksimum pada pembebanan 30% dengan efisiensi 87,36%. Pada pembebanan *full-load* konverter memiliki efisiensi terendah yaitu 73,76%. Konverter pada mode balik memiliki efisiensi 81,01% hampir sama dengan mode normal konverter. Hal ini menunjukkan bahwa konverter dapat bekerja dengan baik pada mode normal dan balik. Rugi-rugi yang mengurangi efisiensi dari konverter disebabkan oleh komponen pensaklaran MOSFET dan rugi-rugi induktor yaitu inti besi dan  $I^2R$  losses.

## 4.2. Pengujian Baterai VRLA

Setelah melakukan pengujian konverter dan didapatkan bahwa *DC-DC Bidirectional Cuk Converter* dapat bekerja sesuai dengan yang diharapkan, maka dilakukan tahap selanjutnya yaitu pengujian Baterai VRLA 12V 7,2 Ah. Sesuai dengan apa yang sudah dibahas dalam Bab 3, maka akan dilakukan pengujian untuk mendapatkan kurva *discharge* baterai dan penentuan *State of Charge* (SoC) baterai menggunakan siklus *charge-discharge* dengan metode *Coulomb Counting* (CC). Kemudian hasil pengujian baterai ini akan dianalisa dan dibandingkan dengan metode penentuan SoC dengan Open Circuit Voltage (OCV). Untuk mengklarifikasi metode CC pada keadaan di industri maka juga dilakukan pengujian dengan menggunakan nilai SoC baterai awal dengan metode OCV dan dilakukan *charge-discharge* untuk mengetahui apakah perhitungan SoC sudah sesuai.

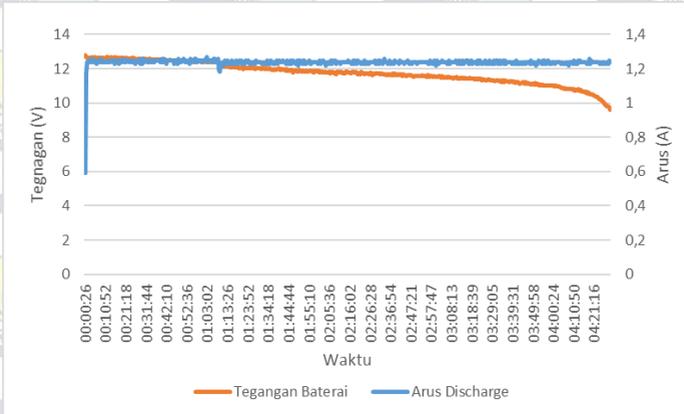
### 4.2.1 Pengujian Kurva *Discharge* Baterai VRLA

Pengujian kurva *discharge* dilakukan menggunakan *C-ratings* C/5, C/10, dan C/20 untuk mendapatkan karakteristik kurva *discharge* baterai. Tegangan internal pada baterai dikondisikan sama agar mendapatkan nilai SoC yang mendekati sama dengan pengisian *Constant Current*. Hasil pengujian akan dianalisa dan dilakukan penentuan kapasitas baterai

dengan metode *Coulomb Counting* (CC) dan hasilnya dibandingkan dengan *Open Circuit Voltage* (OCV). Berikut adalah hasil pengujian karakteristik *discharge* baterai.

#### 4.2.1.1 Pengujian C/5

Data hasil dari pengujian C/5 dapat dilihat pada gambar dan tabel dibawah ini.



**Gambar 4.11** Kurva hasil pengujian C/5

**Tabel 4.2** Data hasil pengujian C/5

Parameter	Nilai
Tegangan Awal OCV	13,1 V
Arus <i>Discharge</i>	1,25 A
Tegangan <i>Cut-off</i>	9,6 V
Waktu Pengujian	4 jam 21 menit
Tegangan Akhir OCV	11,43 V

Dari data pengujian tegangan baterai dikondisikan mendekati tegangan 13V sehingga dari tegangan *open circuit*-nya dapat diketahui SoC baterai berada di antara 80-95%. Arus *discharge* dan tegangan *cut-off* disesuaikan dengan rating pemakaian baterai pada 5 jam (C/5). Dari hasil pengujian baterai mencapai tegangan *cut-off* setelah ter-*discharge* selama 4 jam 21 menit atau 4,35 jam dimana tidak sesuai waktu

penggunaan yaitu 5 jam. Hal ini dikarenakan keadaan baterai tidak terisi penuh berdasarkan tegangan *open circuit*-nya. Dengan mengalikan arus *discharge* ( $i$ ) dan waktu *discharge* ( $t$ ) maka dapat diketahui kapasitas baterai ( $C_o$ ) sesuai perhitungan berikut :

$$C_o = \int_{t_0}^t I dt \quad (4.1)$$

$$C_o = i \times t \quad (4.2)$$

$$C_o = 1,25 \times 4,35 = 5,438 \text{ Ah}$$

Pada akhir pengujian tegangan baterai saat *open circuit* adalah 11,43 V dimana berdasarkan tabel OCV maka SoC akhir dari baterai adalah 0%. Dengan mengetahui parameter SoC akhir dan kapasitas baterai yang terdischarge dapat diketahui SoC awal dari baterai menggunakan persamaan *coulomb counting* 2.8 maka didapatkan persamaan.

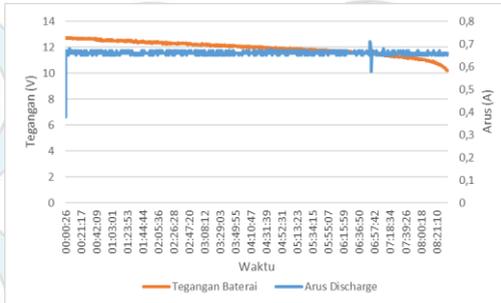
$$\text{SoC}_0 = \text{SoC} + \frac{C_0}{C_n} \quad (4.3)$$

$$\text{SoC}_0 = 0\% + \frac{5,438}{6,25} = 87\%$$

Kapasitas penuh ( $C_n$ ) dari baterai ditentukan sesuai dari rating pada *datasheet* yaitu 6,25 Ah pada arus *discharge* 1,25 dengan *rate* C/5. Dengan perhitungan diatas dapat diestimasikan SoC baterai mula-mula adalah 87 %. Jika dibandingkan dengan metode OCV dimana SoC baterai berada diantara 80-95% maka metode *coulomb counting* (CC) dapat mengestimasi SoC baterai dengan benar.

#### 4.2.1.1 Pengujian C/10

Data hasil pengujian C/10 dapat dilihat pada gambar dan tabel dibawah ini.



**Gambar 4.12** Kurva Hasil pengujian C/10

**Tabel 4.3** Data pengujian C/10

Parameter	Nilai
Tegangan Awal OCV	13,08 V
Arus <i>Discharge</i>	0,66 A
Tegangan <i>Cut-off</i>	10,2 V
Waktu Pengujian	8 jam 36 menit
Tegangan Akhir OCV	11,5 V

Dari data pengujian tegangan baterai dikondisikan mendekati tegangan 13V sehingga dari tegangan *open circuit*-nya dapat diketahui SoC baterai berada di antara 80–95%. Arus *discharge* dan tegangan *cut-off* disesuaikan dengan rating pemakaian baterai pada 10 jam (C/10). Dari hasil pengujian baterai mencapai tegangan *cut-off* setelah ter-*discharge* selama 8 jam 36 menit atau 8,6 jam dimana tidak sesuai waktu penggunaan jam. Hal ini dikarenakan keadaan baterai tidak terisi penuh berdasarkan tegangan *open circuit*-nya. Dengan menggunakan persamaan (4.2) maka didapatkan kapasitas baterai adalah.

$$C_0 = 0,66 \times 8,6 = 5,676 \text{ Ah}$$

Pada akhir pengujian tegangan baterai saat *open circuit* adalah 11,5 V dimana berdasarkan tabel OCV maka SoC akhir dari baterai adalah 0%. Dengan mengetahui parameter SoC akhir dan kapasitas baterai yang

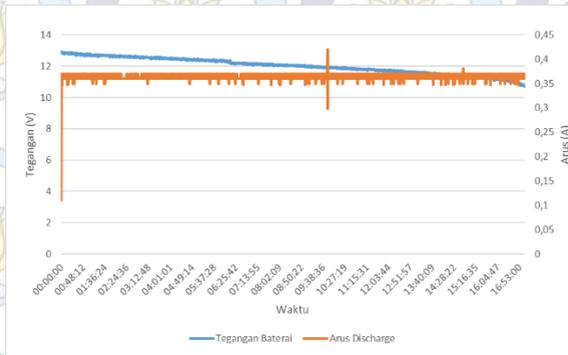
terdicharge dapat diketahui SoC awal dari baterai menggunakan persamaan (4.3) berikut.

$$\text{SoC}_0 = 0\% + \frac{5,676}{6,6}\% = 86\%$$

Kapasitas penuh ( $C_n$ ) dari baterai ditentukan sesuai dari rating pada *datasheet* yaitu 6,6 Ah pada arus *discharge* 0,66 selama 10 jam. Dengan perhitungan diatas dapat diestimasikan SoC baterai mula-mula adalah 86 %. Jika dibandingkan dengan metode OCV dimana SoC baterai berada diantara 80-95% maka metode *coulomb counting* dapat mengestimasi SoC baterai dengan benar.

#### 4.2.1.2 Pengujian C/20

Data hasil pengujian *discharge* untuk C/20 dapat diamati pada gambar dan tabel berikut.



**Gambar 4.13** Kurva Hasil pengujian C/20

**Tabel 4.4** Data pengujian C/20

Parameter	Nilai
Tegangan Awal OCV	13 V
Arus <i>Discharge</i>	0,36 A
Tegangan <i>Cut-off</i>	10,8 V
Waktu Pengujian	17 jam 4 menit
Tegangan Akhir OCV	11,21 V

Dari data diatas dapat dilihat tegangan awal pengujian dibuat mendekati 13 V untuk mendapatkan SoC yang mendekati sama yaitu diantara 80-95%. Pengujian menggunakan arus *discharge* 0,36 A dan tegangan cut-off 10,8 V sesuai yang tertera pada *datasheet* baterai. Didapatkan baterai mencapai tegangan *cut-off* setelah baterai ter-*discharge* selama 17 jam 4 menit atau 17,067 jam. Hal ini karena baterai tidak dalam kondisi terisi penuh. Dengan menggunakan persamaan (4.2) maka didapatkan kapasitas baterai adalah

$$C_0 = 0,36 \times 17,067 = 6,144 \text{ Ah}$$

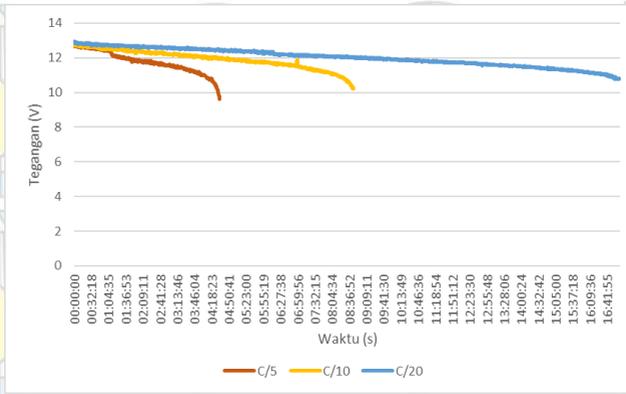
Pada akhir pengujian tegangan baterai saat *open circuit* adalah 11,2 V, berdasarkan dari tabel OCV maka SoC akhir dari baterai adalah 0%. Dengan mengetahui parameter SoC akhir dan kapasitas baterai yang terdischarge dapat diketahui SoC awal dari baterai menggunakan persamaan (4.3) berikut.

$$\text{SoC}_0 = 0\% + \frac{6,144}{7,2}\% = 85,33\%$$

Kapasitas penuh ( $C_n$ ) dari baterai ditentukan sesuai dari rating pada *datasheet* yaitu 7,2 Ah pada arus *discharge* 0,36 selama 20 jam. Dengan perhitungan diatas dapat diestimasikan SoC baterai mula-mula adalah 85,33 %. Jika dibandingkan dengan metode OCV dimana SoC baterai berada diantara 80-95% maka metode *coulomb counting* (CC) dapat mengestimasi SoC baterai dengan benar.

#### 4.2.1.3 Analisa Akhir Pengujian Kurva Karakteristik *Discharge* Baterai

Dari hasil pengujian *discharge* yang telah dilakukan dengan *C-rating* yang berbeda-beda maka didapatkan kurva karakteristik baterai yang dapat diamati pada gambar berikut.



**Gambar 4.14** Kurva Karakteristik *Discharge* Baterai Hasil Pengujian

Dari kurva diatas dapat dilihat dengan *C-rating* yang berbeda (*C/5*, *C/10*, dan *C/20*) akan didapatkan karakteristik kurva yang juga berbeda. Dapat dilihat pada *C/5* dengan arus *discharge* paling tinggi yaitu 1,25 A akan mengalami drop tegangan paling cepat, sebaliknya pada *C/20* dengan arus *discharge* paling rendah yaitu 0,36 A akan mengalami drop tegangan paling lama. Selain itu dengan nilai SoC yang mendekati sama pada perhitungan *coulomb counting* yaitu 87%, 86%, dan 85,33% pada masing-masing pengujian didapatkan kapasitas baterai yang perbedaannya cukup signifikan yaitu 5,438 Ah, 5,676 Ah, dan 6,144 Ah.

Perbedaan drop tegangan dan kapasitas baterai yang terjadi dengan arus *discharge* yang berbeda ini diakibatkan oleh adanya reaksi kimia diluar reaksi kimia yang mengubah energi kimia menjadi listrik terjadi pada baterai yang mengakibatkan adanya daya yang hilang dari keseluruhan daya pada baterai yang tidak permanen. Reaksi kimia ini akan semakin banyak terjadi semakin banyak arus yang keluar dari baterai. Reaksi kimia ini secara elektrik digambarkan sebagai resistansi *internal* baterai. Sehingga dengan menggunakan penjelasan resistansi *internal* baterai maka dapat dilihat semakin besar arus maka akan semakin besar rugi-rugi daya dari baterai atau dengan kata lain efisiensi dari baterai akan semakin rendah. Hal ini juga yang mengakibatkan semakin

besar arus *discharge* maka penurunan tegangan akan semakin lebih tinggi.

Dapat dilihat dari grafik tegangan *cut-off* baterai dengan masing-masing *C-rating* memiliki nilai yang berbeda. Tegangan *cut-off* digunakan sebagai batasan untuk pengguna baterai sebagai tanda bahwa *state of charge* (SoC) dari baterai sudah mendekati habis dan apabila dilewati terdapat kemungkinan baterai bisa mengalami degradasi atau tidak dapat digunakan kembali. Namun batas tegangan *cut-off* ditentukan dari pen-*discharge*-an baterai dengan arus konstan yang mana pada kondisi pada lapangan arus yang keluar akan berubah-ubah sesuai beban. Hal ini menimbulkan batas tegangan *cut-off* juga sebenarnya akan berubah. Untuk menghindari *discharge* berlebih, biasanya digunakan batas tegangan *cut-off* paling tinggi dimana pada baterai VRLA yang diuji adalah 10,8 V. Namun pada *discharge* dengan arus tinggi akan timbul drop tegangan yang besar karena resistansi internal baterai sehingga nilai *cut-off* 10,8 V akan cepat tercapai yang mana dari *datasheet* dan hasil pengujian baterai masih bisa di-*discharge* lebih lama lagi. Namun sebaliknya apabila digunakan tegangan *cut-off* terendah dalam hal ini 9,6 V apabila baterai di-*discharge* dengan arus yang kecil maka baterai akan ter-*discharge* melebihi kemampuannya yang dapat mengakibatkan kecacatan pada baterai. Kedua hal ini mengakibatkan pola pemakaian baterai yang beracuan dengan tegangan baterai kurang sesuai untuk diimplementasikan karena dapat mengakibatkan masalah yang sudah disebutkan diatas.

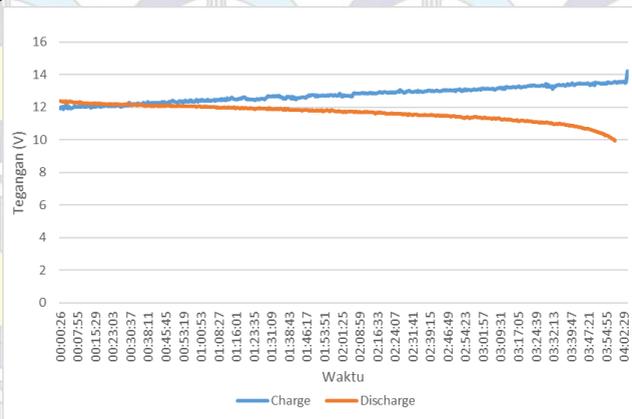
Oleh karena itu diperlukan metode lain untuk mengestimasi kondisi daya baterai atau SoC-nya untuk mendapatkan pola pengoperasian baterai yang baik. Metode yang dapat diterapkan adalah estimasi SoC baterai menggunakan *coulomb counting*, dimana arus yang masuk dan keluar dihitung dan digunakan untuk mengetahui SoC baterai saat ini. Metode ini biasa diimplementasikan dalam *Battery Management System* (BMS) yang baik karena dapat memprediksi keadaan baterai secara akurat dan langsung. Untuk mengetahui cara kerja metode *coulomb counting* dan kesesuaiannya untuk implementasi di dunia industri maka akan dilakukan pengujian siklus *charge-discharge* baterai yang akan dibahas pada subbab setelah ini.

## 4.2.2 Pengujian Siklus Charge-Discharge Baterai VRLA

Pengujian siklus *charge-discharge* baterai digunakan untuk mengetahui SoC insial baterai ketika dimasukkan kesistem dengan diisi menggunakan metode *constant current* dan di-*discharge* kembali dengan arus yang sama dengan arus pengisian. Metode *constant current charge* digunakan karena merupakan metode pengisian yang cepat dengan batasan tegangan *cut-off* maksimal yaitu 14,4 V atau 2,4 V per sel baterai. Kemudian baterai akan di *discharge* kembali dengan arus konstan, dari siklus ini akan ditentukan SoC dari baterai menggunakan metode *coulomb counting* dan dibandingkan hasilnya dengan metode *open circuit voltage*. Pengujian siklus *charge-discharge* dilakukan berulang sebanyak tiga kali untuk mengetahui nilai SoC yang akurat dari hasil pengisian *constant current*. Nilai *C-rating* yang digunakan dalam pengujian ini adalah C/6 dan C/10 yang hasilnya dapat dilihat pada bagian berikut.

### 4.2.2.1 Pengujian Charge-Dicsharge C/6 Siklus ke-1

Data hasil pengujian *charge-discharge* C/6 siklis ke-1 dapat dilihat pada gambar dan tabel berikut.



Gambar 4.15 Kurva hasil pengujian *charge-discharge* C/6 siklis ke-1

Tabel 4.5 Data pengujian *charge-discharge* C/6 siklis ke-1

Parameter	Nilai	
	Charge	Discharge
Tegangan Awal OCV	11,2 V	12,55 V
Arus	1 A	1 A
Tegangan <i>Cut-off</i>	14,4 V	10,2 V
Waktu Pengujian	4 jam 5 menit	3 jam 59 menit
Tegangan Akhir OCV	12,55 V	11,38 V

Dapat dilihat dari tabel diatas pada saat *charge* tegangan awal OCV baterai adalah 11,2 V mendekati nilai SoC 0% dimana pada akhir *charge* tegangan OCV (*open circuit voltage*) menjadi 12,55 V dimana berdasarkan tabel OCV baterai adalah 60-80% kapasitas baterai. Waktu pengisian baterai adalah 4 jam 5 menit atau 4,083 jam dengan arus konstan 1 A. Dengan perhitungan *coulomb counting* berikut ini didapatkan persamaan.

$$\text{SoC} = \text{SoC}_0 - \frac{1}{C_n} \int_{t_0}^t I_d dt \quad (2.8)$$

$$\text{SoC}_0 = \text{SoC} + \frac{I \cdot t}{C_n} \quad (4.4)$$

$$\text{SoC}_0 = 0\% + \frac{1 \cdot 4,083}{6} \% = 68,05\%$$

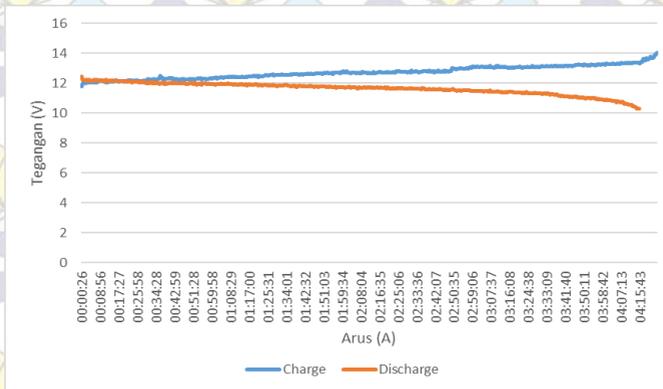
Maka dari perhitungan *coulomb counting* didapatkan SoC baterai setelah pengisian adalah 68,05% dimana sesuai dengan estimasi SoC menggunakan OCV baterai. Selanjutnya baterai di *discharge* kembali dengan arus konstan 1 A dan mencapai tegangan *cut-off* setelah 3 jam 59 menit atau 3,983 jam. Maka dapat ditentukan SoC baterai pada awal *discharge* dengan persamaan (4.4)

$$\text{SoC}_0 = 0\% + \frac{1 \cdot 3,983}{6} \% = 66,38\%$$

Didapatkan SoC baterai awal adalah 66,38% menggunakan metode *coulomb counting* dimana juga sesuai dengan estimasi menggunakan metode OCV. Dapat dilihat ketika charging dan discharging terdapat sedikit perbedaan nilai SoC pada baterai, hal ini dikarenakan adanya efisiensi *charging* dari baterai, sehingga terdapat sedikit perbedaan antara arus yang masuk dan yang keluar dari baterai untuk mendapatkan SoC yang sama.

#### 4.2.2.2 Pengujian Charge-Dicsharge C/6 Siklus ke-2

Data hasil pengujian *charge-discharge* C/6 pada siklus kedua dapat dilihat pada gambar dan tabel berikut.



**Gambar 4.16** Kurva hasil pengujian *charge-discharge* C/6 siklus ke-2

**Tabel 4.6** Data pengujian *charge-discharge* C/6 siklus ke-2

Parameter	Nilai	
	Charge	Discharge
Tegangan Awal OCV	11,38 V	12,58 V
Arus	1 A	1 A
Tegangan <i>Cut-off</i>	14,4 V	10,2 V
Waktu Pengujian	4 jam 23 menit	4 jam 16 menit
Tegangan Akhir OCV	12,58 V	11,28 V

Dapat dilihat dari tabel diatas pada saat *charge* tegangan awal OCV baterai adalah 11,38 V mendekati nilai SoC 0% dimana pada akhir *charge* tegangan OCV (*open circuit voltage*) menjadi 12,58 V. Berdasarkan tabel OCV baterai adalah 60-80% kapasitas baterai. Waktu pengisian baterai adalah 4 jam 23 menit atau 4,383 jam dengan arus konstan 1 A. Dengan perhitungan *coulomb counting* menggunakan persamaan (4.4).

$$SoC_0 = 0\% + \frac{1 \cdot 4,383}{6} \% = 73,05\%$$

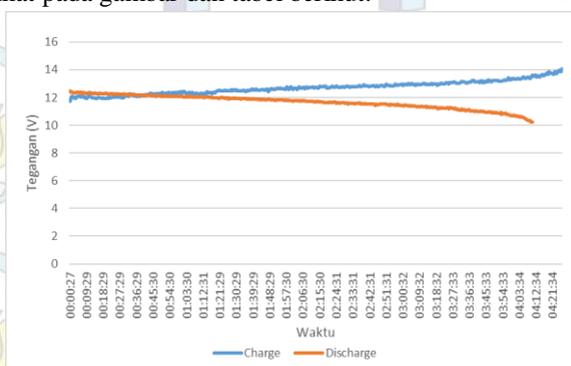
Maka dari perhitungan *coulomb counting* didapatkan SoC baterai setelah pengisian adalah 73,05% dimana sesuai dengan estimasi SoC menggunakan OCV baterai. Selanjutnya baterai di *discharge* kembali dengan arus konstan 1 A dan mencapai tegangan *cut-off* setelah 4 jam 16 menit atau 4,267 jam. Maka dengan persamaan (4.4) dapat ditentukan SoC baterai pada awal *discharge* yaitu

$$\text{SoC}_0 = 0\% + \frac{1 \cdot 4,267}{6}\% = 71,12\%$$

Didapatkan SoC baterai awal adalah 71,12% menggunakan metode *coulomb counting* dimana juga sesuai dengan estimasi menggunakan metode OCV. Dapat dilihat ketika charging dan discharging terdapat sedikit perbedaan nilai SoC pada baterai, hal ini dikarenakan adanya efisiensi *charging* dari baterai. Selain itu dari siklus pertama dan kedua terdapat sedikit perbedaan SoC rata-rata yaitu pada siklus pertama adalah 67,22% dan siklus kedua adalah 72,09% hal ini bisa diakibatkan oleh tingkat akurasi sensor arus yang tidak terlalu presisi sehingga terdapat sedikit *error* pembacaan, dimana pembacaan ini akan mempengaruhi kontrol dari konverter untuk menghasilkan arus *charge-discharge* yang konstan. Oleh karena itu faktor tingkat keakuratan sensor juga merupakan hal yang sangat penting dalam perhitungan *coulomb counting*.

#### 4.2.2.3 Pengujian *Charge-Dicsharge* C/6 Siklus ke-3

Data hasil pengujian *charge-discharge* C/6 siklus ketiga dari baterai dapat dilihat pada gambar dan tabel berikut.



Gambar 4.17 Kurva hasil pengujian *charge-discharge* C/6 siklus ke-3

**Tabel 4.7** Data pengujian *charge-discharge* C/6 siklus ke-3

Parameter	Nilai	
	Charge	Discharge
Tegangan Awal OCV	11,36 V	12,56 V
Arus	1 A	1 A
Tegangan <i>Cut-off</i>	14,4 V	10,2 V
Waktu Pengujian	4 jam 26 menit	4 jam 12 menit
Tegangan Akhir OCV	12,56 V	11,34 V

Dapat dilihat dari tabel diatas pada saat *charge* tegangan awal OCV baterai adalah 11,36 V mendekati nilai SoC 0% dimana pada akhir *charge* tegangan OCV (*open circuit voltage*) menjadi 12,56 V. Berdasarkan tabel OCV baterai adalah 60-80% kapasitas baterai. Waktu pengisian baterai adalah 4 jam 26 menit atau 4,433 jam dengan arus konstan 1 A. Dengan persamaan (4.4) berikut

$$\text{SoC}_0 = 0\% + \frac{1 \cdot 4,433}{6}\% = 73,88\%$$

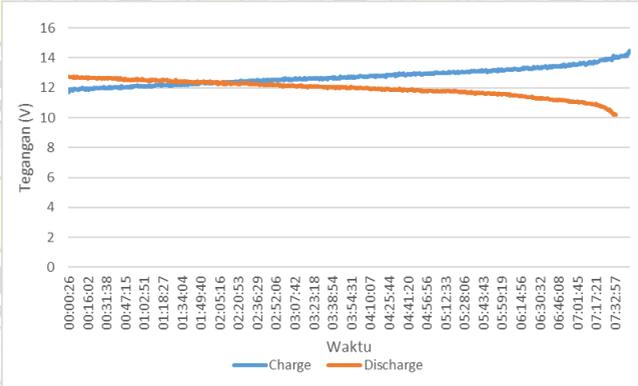
Maka dari perhitungan *coulomb counting* didapatkan SoC baterai setelah pengisian adalah 73,88% dimana sesuai dengan estimasi SoC menggunakan OCV baterai. Selanjutnya baterai di *discharge* kembali dengan arus konstan 1 A dan mencapai tegangan *cut-off* setelah 4 jam 12 menit atau 4,2 jam. Maka dapat ditentukan SoC baterai pada awal *discharge* dengan persamaan (4.4)

$$\text{SoC}_0 = 0\% + \frac{1 \cdot 4,2}{6}\% = 70\%$$

Didapatkan SoC baterai awal adalah 70% menggunakan metode *coulomb counting* dimana juga sesuai dengan estimasi menggunakan metode OCV. Dapat dilihat ketika charging dan discharging terdapat sedikit perbedaan nilai SoC pada baterai, hal ini dikarenakan adanya efisiensi *charging* dari baterai. Dapat dilihat juga nilai SoC baterai rata-rata pada siklus ketiga yaitu 71.94% mendekati dengan nilai SoC baterai pada siklus kedua.

#### 4.2.2.4 Pengujian *Charge-Discharge* C/10 Siklus ke-1

Data hasil pengujian *charge-discharge* baterai pada C/10 untuk siklus pertama dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 4.18 Kurva hasil pengujian *charge-discharge* C/10 siklus ke-1

Tabel 4.8 Data pengujian *charge-discharge* C/10 siklus ke-1

Parameter	Nilai	
	Charge	Discharge
Tegangan Awal OCV	11,4 V	12,8 V
Arus	0,66 A	0,66 A
Tegangan <i>Cut-off</i>	14,4 V	10,2 V
Waktu Pengujian	7 jam 44 menit	7 jam 34 menit
Tegangan Akhir OCV	12,8 V	11,32 V

Dapat dilihat dari hasil diatas pada saat *charge* tegangan awal OCV baterai adalah 11,4 V mendekati nilai SoC 0% dimana pada akhir *charge* tegangan OCV (*open circuit voltage*) menjadi 12,8 V. Berdasarkan tabel OCV baterai adalah 70-85% kapasitas baterai. Waktu pengisian baterai adalah 7 jam 44 menit atau 7,733 jam dengan arus konstan 0,66 A. Dengan perhitungan *coulomb counting* menggunakan persamaan (4.4) berikut ini

$$SoC_0 = 0\% + \frac{0,66 \cdot 7,733}{6,6}\% = 77,33\%$$

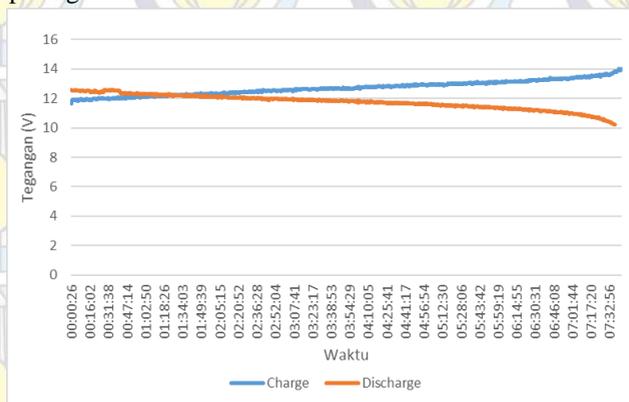
Maka dari metode *coulomb counting* diestimasi SoC baterai setelah pengisian adalah 77,3% dimana sesuai dengan estimasi SoC menggunakan OCV baterai yaitu diantara 70-85%. Selanjutnya baterai di *discharge* kembali dengan arus konstan 0,66 A dan mencapai tegangan *cut-off* setelah 7 jam 34 menit atau 7,567 jam. Dengan menggunakan persamaan (4.4) maka dapat ditentukan SoC baterai pada awal *discharge* yaitu

$$\text{SoC}_0 = 0\% + \frac{0,66 \cdot 7,567}{6,6}\% = 75,67\%$$

Didapatkan SoC baterai awal setelah *charging* adalah 75,67% menggunakan metode *coulomb counting* dimana juga sesuai dengan estimasi menggunakan metode OCV. Pada pengujian terdapat perbedaan waktu antara *charging* dan *discharging* juga SoC-nya. Hal ini dikarenakan terdapat faktor efisiensi *charging* baterai yang mempengaruhi sehingga saat perhitungan SoC dengan *coulomb counting* pada pengisian lebih tinggi dari pada saat pengosongan baterai.

#### 4.2.2.5 Pengujian Charge-Discharge C/10 Siklus ke-2

Data hasil pengujian *charge-discharge* C/10 siklus kedua dapat dilihat pada gambar dan tabel berikut.



Gambar 4.19 Kurva hasil pengujian *charge-discharge* C/10 siklus ke-2

**Tabel 4.9** Data pengujian *charge-discharge* C/10 siklus ke-2

Parameter	Nilai	
	Charge	Discharge
Tegangan Awal OCV	11,32 V	12,8 V
Arus	0,66 A	0,66 A
Tegangan <i>Cut-off</i>	14,4 V	10,2 V
Waktu Pengujian	7 jam 42 menit	7 jam 38 menit
Tegangan Akhir OCV	12,8 V	11,34 V

Dapat dilihat dari tabel diatas sebelum *charge* tegangan awal OCV baterai adalah 11,32 V mendekati nilai SoC 0% dimana pada akhir *charge* tegangan OCV (*open circuit voltage*) menjadi 12,8 V. Berdasarkan tabel OCV baterai adalah 70-85% kapasitas baterai. Waktu pengisian baterai adalah 7 jam 42 menit atau 7,7 jam dengan arus konstan 0,66 A. Maka dapat ditentukan SoC awal dengan persamaan (4.4)

$$\text{SoC}_0 = 0\% + \frac{0,66 \cdot 7,7}{6,6}\% = 77\%$$

Maka dari metode *coulomb counting* diestimasikan SoC baterai setelah pengisian adalah 77% dimana sudah sesuai dengan estimasi SoC menggunakan OCV baterai yaitu diantara 60-85%. Selanjutnya baterai di *discharge* kembali dengan arus konstan 0,66 A dan mencapai tegangan *cut-off* setelah 8 jam 38 menit atau 7,633 jam. Maka dapat ditentukan SoC baterai pada awal *discharge* dengan persamaan (4.4)

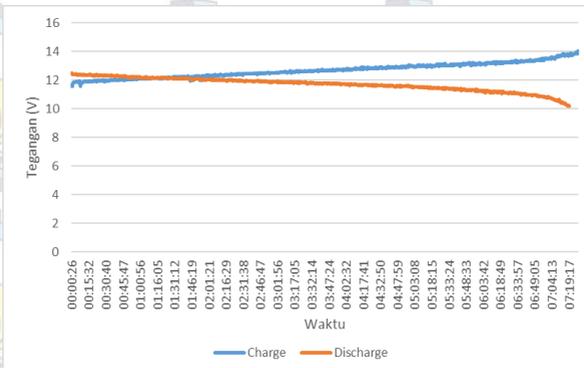
$$\text{SoC}_0 = 0\% + \frac{0,66 \cdot 7,633}{6,6}\% = 76,33\%$$

Didapatkan SoC baterai awal setelah *charging* adalah 76,33% menggunakan metode *coulomb counting* dimana juga sesuai dengan estimasi menggunakan metode OCV. Pada pengujian terdapat perbedaan waktu antara *charging* dan *discharging* juga SoC-nya. Hal ini dikarenakan terdapat faktor efisiensi *charging* baterai yang mempengaruhi sehingga saat perhitungan SoC dengan *coulomb counting* pada pengisian lebih tinggi dari pada saat pengosongan baterai. Dapat

dilihat pada siklus pertama dan kedua nilai SoC baterai hampir mendekati sama.

#### 4.2.2.6 Pengujian *Charge-Discharge C/10* Siklus ke-3

Data hasil pengujian *charge-discharge* baterai untuk *C/10* siklus ketiga dapat dilihat pada gambar dan tabel berikut.



**Gambar 4.20** Kurva hasil pengujian *charge-discharge C/10* siklus ke-3

**Tabel 4.10** Data pengujian *charge-discharge C/10* siklus ke-3

Parameter	Nilai	
	Charge	Discharge
Tegangan Awal OCV	11,2 V	12,7 V
Arus	0,66 A	0,66 A
Tegangan <i>Cut-off</i>	14,4 V	10,2 V
Waktu Pengujian	7 jam 27 menit	7 jam 21 menit
Tegangan Akhir OCV	12,7 V	11,28 V

Dapat dilihat dari hasil diatas pada saat *charge* tegangan awal OCV baterai adalah 11,2 V mendekati nilai SoC 0% dimana pada akhir *charge* tegangan OCV (*open circuit voltage*) menjadi 12,7 V. Berdasarkan tabel OCV baterai adalah 70-85% kapasitas baterai. Waktu pengisian baterai pada pengujian ini adalah 7 jam 27 menit atau 7,45 jam dengan arus konstan 0,66 A. Dengan persamaan (4.4)

$$\text{SoC}_0 = 0\% + \frac{0,66 \cdot 7,45}{6,6}\% = 74,5\%$$

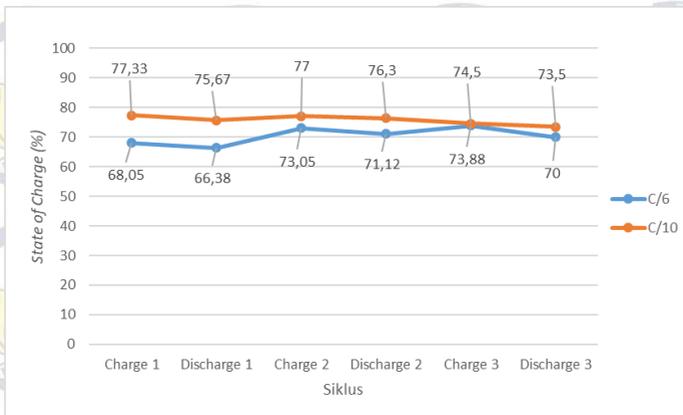
Maka dari metode *coulomb counting* diestimasikan SoC baterai setelah pengisian adalah 74,5% dimana sesuai dengan estimasi SoC menggunakan OCV baterai yaitu diantara 70-85%. Selanjutnya baterai di *discharge* kembali dengan arus konstan 0,66 A dan mencapai tegangan *cut-off* setelah 7 jam 21 menit atau 7,35 jam. Maka dapat ditentukan SoC baterai pada awal *discharge* dengan persamaan (4.4)

$$\text{SoC}_0 = 0\% + \frac{0,66 \cdot 7,567}{6,6}\% = 73,5\%$$

Didapatkan SoC baterai awal setelah *charging* adalah 73,5% menggunakan metode *coulomb counting* dimana juga sesuai dengan estimasi menggunakan metode OCV. Pada pengujian terdapat perbedaan waktu antara *charging* dan *discharging* juga SoC-nya. Hal ini dikarenakan terdapat faktor efisiensi *charging* baterai.

#### 4.2.2.7 Analisa Akhir Pengujian Charge-Discharge Baterai

Dari hasil estimasi *State of Charge* (SoC) baterai VRLA menggunakan metode *coulomb counting*, didapatkan nilai yang mendekati sama dan sesuai dengan range SoC yang sesuai dengan metode estimasi menggunakan *open circuit voltage* (OCV) dari baterai. Gambar berikut merupakan grafik SoC dari siklus pengujian *charge-discharge* pada C/6 dan C/10.



**Gambar 4.21** Grafik estimasi SoC dengan metode *coulomb counting* pengujian siklus *charge-discharge*

Dapat dilihat dari grafik diatas nilai rata-rata *state of charge* (SoC) baterai pada siklus *charge-discharge* untuk *rate* C/6 adalah 70,41 %, dimana berdasarkan estimasi menggunakan metode lain yaitu *open circuit voltage* (OCV) didapatkan estimasi SoC diantara 60-80%. Untuk *rate* C/10 didapatkan rata-rata SoC baterai dari tiga siklus *charge-discharge* adalah 75,72 % dimana dengan menggunakan OCV diestimasi nilai SoC adalah 70-85%. Dengan *C-rating* yang berbeda didapatkan estimasi menggunakan *coulomb counting* dapat menentukan SoC baterai dengan baik beracuan dari metode *open circuit voltage* yang merupakan metode estimasi SoC dengan tingkat keakuratan yang tinggi.

Dari data pengujian yang telah dilakukan juga dapat diketahui beberapa kelemahan metode *coulomb counting* yang perlu dipertimbangkan. Pertama adalah tingkat akurasi sensor arus yang digunakan yang dapat dilihat pada hasil pengujian C/6 pada siklus pertama memiliki perbedaan yang cukup signifikan dari hasil pada siklus kedua dan ketiga. Selain itu dapat dilihat dari grafik terdapat *trend* dimana estimasi SoC ketika *charging* akan lebih tinggi daripada ketika *discharging*. Hal ini dikarenakan metode *coulomb counting* tidak memperhitungkan efisiensi *charging* dan *self-discharge* dari baterai. Hal ini dikarenakan metode *coulomb counting* hanya memperhitungkan arus yang masuk dan keluar dari baterai dengan nilai yang sama akan menghasilkan SoC yang sama, hal ini dibahas pada penelitian [4] [5].

Namun dari hasil pengujian dapat disimpulkan metode estimasi *State of Charge* (SoC) menggunakan *coulomb counting* memiliki akurasi yang baik. Selain itu metode ini dapat dilakukan ketika baterai terpasang pada *grid* dan dalam keadaan bekerja, berbeda dengan metode OCV dimana baterai harus dilepas dari *grid* dan memerlukan *rest time* yang cukup lama sebelum melakukan pengtesan. Kelemahan dari metode *coulomb counting* pun sebenarnya dapat diatasi, pertama dengan menggunakan sensor arus dengan akurasi yang baik, kedua dengan menggunakan koefisien efisiensi *charging* baterai dalam perhitungan, dan ketiga adalah dengan melakukan kalibrasi ulang secara berkala untuk menghindari akumulasi *error* pembacaan SoC.

#### 4.2.3 Pengujian kombinasi metode OCV dengan CC

Pengujian kombinasi ini dilakukan untuk mengetahui apakah metode yang biasa dilakukan di lapangan sudah sesuai. Pada kondisi real metode *coulomb counting* diperlukan nilai SoC awal yang akan digunakan sebagai patokan perhitungan SoC selanjutnya. Disini SoC awal akan ditentukan menggunakan metode OCV dan dilakukan pengisian baterai sampai pada 80% kapasitas tanpa memperhitungkan batasan tegangan. Setelah itu SoC baterai akan diklarifikasi menggunakan metode OCV dan metode CC dengan mengosongkan baterai dengan arus konstan yang sama ketika pengisian. Berikut dapat dilihat data hasil pengujian

**Tabel 4.11** Hasil Pengujian kombinasi metode OCV dengan CC

Parameter	Nilai	
	Charge	Discharge
Tegangan Awal OCV	12,5 V	12,79 V
SoC initial OCV	42,5-77,5 %	65-95%
Arus Charge/Discharge	1A	1A
Tegangan Cut-off	-	10,2 V
Waktu Pengujian	1 jam 12 menit	5 jam
Tegangan Akhir OCV	12,79 V	11,4V
SoC estimasi CC	80%	0%
SoC estimasi OCV	65-95%	0%

Dapat dilihat dari hasil tersebut baterai awalnya memiliki tegangan 12,5 V dimana dengan metode OCV dapat diketahui SoC rata-rata baterai adalah 60%. Menggunakan persamaan 4.4 maka dapat diketahui waktu

untuk mengisi baterai dengan arus konstan 1 A agar mencapai SoC 80% adalah

$$80\% = 60\% + \frac{1 \text{ A} \cdot t}{6} \%$$

$$t = 1,2 \text{ jam}$$

Maka waktu yang diperlukan untuk pengisian baterai adalah 1,2 jam atau 1 jam 12 menit. Dari tabel dapat dilihat setelah baterai diisi memiliki tegangan 12,79 V sehingga didapatkan SoC baterai adalah 80% dengan metode OCV. Hasil ini akan diklarifikasi dengan mengosongkan baterai menggunakan arus konstan 1 A sampai mencapai batas tegangan *cut-off* dan didapatkan SoC baterai dengan persamaan 4.4 adalah

$$\text{SoC}_0 = 0\% + \frac{1 \cdot 5}{6} \% = 83,33\%$$

Dimana didapatkan hasil yang cukup mendekati dimana estimasi SoC adalah 80% menggunakan metode kombinasi dan pada keadaan riil adalah 83,33%. Dapat dilihat menggunakan kombinasi OCV untuk menentukan nilai awal SoC baterai kemudian menggunakan metode CC ketika baterai dalam keadaan on-grid memiliki tingkat keakuratan yang baik dan dapat digunakan pada kondisi lapangan.



**--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, implementasi dan pengujian *DC-DC Bidirectional Cuk Converter* dan Baterai VRLA dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Implementasi konverter DC - DC *Bidirectional Cuk Converter* pada penelitian ini dapat bekerja sesuai desain dengan efisiensi rata-rata pada pembebanan 10% sampai 100% adalah 80,43% untuk mode normal dan 81,01% untuk mode balik.
2. Implementasi *Average Current Mode Control* untuk mengatur *duty cycle* dapat menghasilkan arus *charge* dan *discharge* yang konstan untuk pengujian baterai VRLA.
3. Pada pengujian kurva *discharge* baterai VRLA didapatkan bahwa kapasitas baterai akan berubah tergantung dari arus *discharge* dan metode operasi baterai dengan mempertimbangkan tegangan *cut-off* baterai tidak cocok untuk digunakan pada beban yang dinamis.
4. Pada pengujian siklus *charge-discharge* baterai VRLA didapatkan metode estimasi *State of Charge (SoC)* baterai dengan *coulomb counting* memiliki akurasi yang tinggi dengan perbandingan menggunakan metode estimasi SoC menggunakan *open circuit voltage*.
5. Kelemahan pada metode *coulomb counting* adalah tingkat akurasi sensor arus dan tidak memperhitungkan efisiensi *charging* dan *self-discharge* dari baterai namun hal ini dapat diatasi dengan investasi lebih dan recalibrasi berkala.
6. Metode kombinasi *open circuit voltage* dan *coulomb counting* cocok untuk digunakan dalam *Battery Management System (BMS)* yang baik karena memiliki reabilitas tinggi dalam menentukan kondisi SoC baterai.

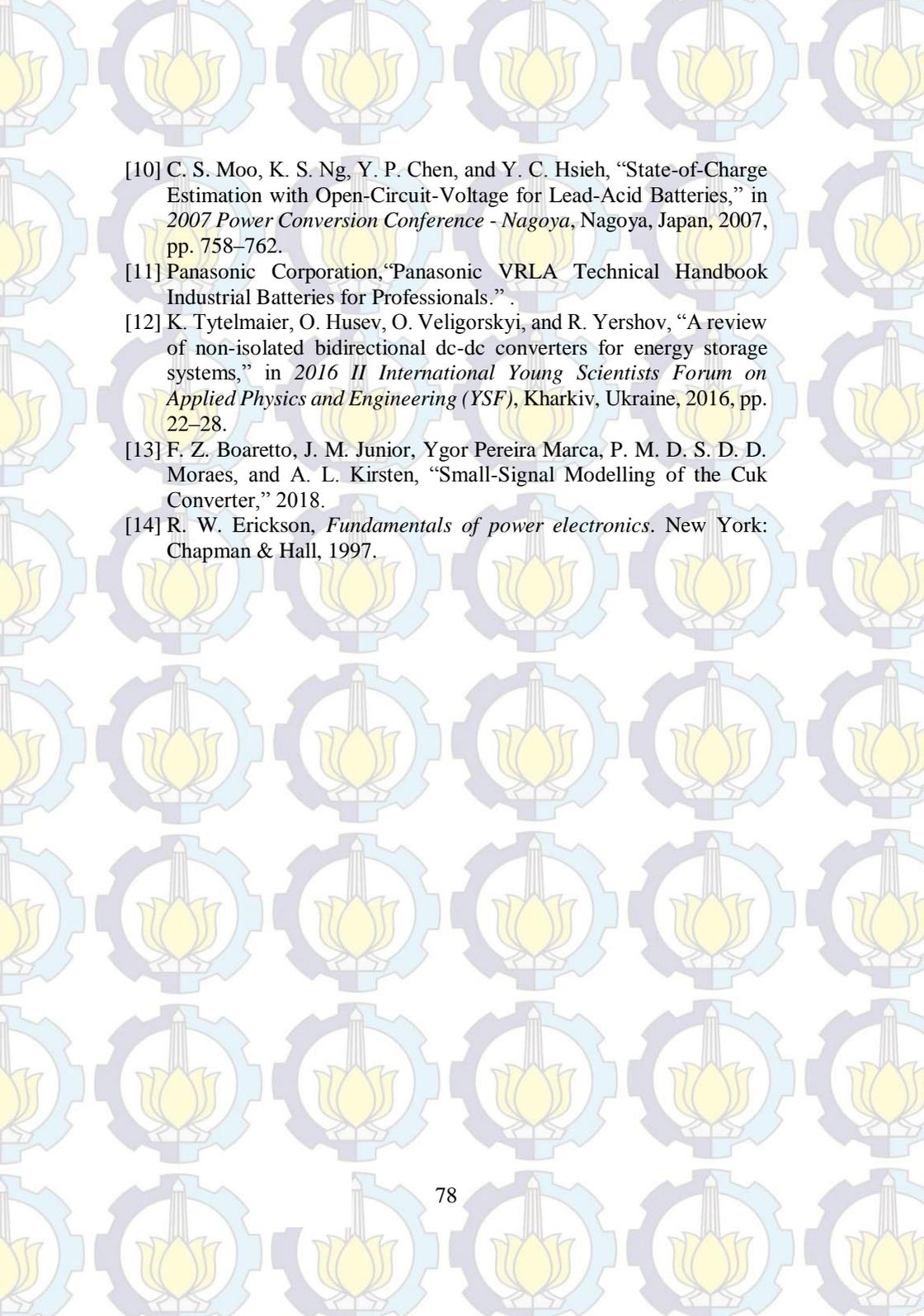
## 5.2. Saran

Saran yang diberikan untuk pengembangan penelitian selanjutnya adalah:

1. Dalam implementasi induktor untuk konverter diperlukan pemilihan kawat induktor yang memiliki resistansi yang rendah karena sebagian besar rugi pada konverter DC-DC ada pada induktor.
2. Dalam pemilihan komponen perlu dipertimbangkan nilai resistansi tiap komponen, terutama untuk *DC-DC Cuk Converter* yang berbasis kapasitor sebagai penyimpan daya, dimana ESR dari kapasitor akan berperan cukup banyak dalam rugi-rugi daya.
3. Menggunakan sensor arus yang memiliki akurasi lebih baik, dikarenakan tingkat keakurasian sensor arus berpengaruh besar pada pengujian baterai VRLA dengan arus yang harus dijaga konstan.
4. Rangkaian *DC-DC Bidirectional Cuk Converter* dapat dikembangkan sebagai sistem antar grid dengan baterai yang dapat dilengkapi dengan algoritma perhitungan SoC dengan metode *coulomb counting* untuk menghasilkan BMS yang baik.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Ausswamaykin and B. Plangklang, "Design of real time management unit for power battery in PV-hybrid power supplies by application of Coulomb counting method," in *2014 International Electrical Engineering Congress (iEECON)*, Chonburi, Thailand, 2014, pp. 1–4.
- [2] Technical Bulletin, C&D Technologies, "Capacity Testing of VRLA Batteries (20 to 200 Ampere-Hours Capacity)".
- [3] P. E. Pascoe and A. H. Anbuky, "VRLA Battery Discharge Reserve Time Estimation," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 19, no. 6, pp. 1515–1522, Nov. 2004.
- [4] G. Fathoni, S. A. Widayat, P. A. Topan, A. Jalil, A. I. Cahyadi, and O. Wahyunggoro, "Comparison of State-of-Charge (SOC) estimation performance based on three popular methods: Coulomb counting, open circuit voltage, and Kalman filter," in *2017 2nd International Conference on Automation, Cognitive Science, Optics, Micro Electro-Mechanical System, and Information Technology (ICACOMIT)*, Jakarta, 2017, pp. 70–74.
- [5] M. I. Wahyuddin, P. S. Priambodo, and H. Sudiby, "State of Charge (SoC) Analysis and Modeling Battery Discharging Parameters," in *2018 4th International Conference on Science and Technology (ICST)*, Yogyakarta, 2018, pp. 1–5.
- [6] K. Tytelmaier, O. Husev, O. Veligorskyi, and R. Yershov, "A review of non-isolated bidirectional dc-dc converters for energy storage systems," in *2016 II International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF)*, Kharkiv, Ukraine, 2016, pp. 22–28.
- [7] D. Pavlov, *Lead-acid batteries: science and technology: a handbook of lead-acid battery technology and its influence on the product*. Amsterdam ; Singapore: Elsevier Science Ltd, 2011.
- [8] "Patrick T. Moseley, Jurgen Garche, C.D. Parker, D.A.J. Rand - Valve-Regulated Lead-Acid Batteries-Elsevier Science (2004).pdf."
- [9] A. Sedighfar and M. R. Moniri, "Battery state of charge and state of health estimation for VRLA batteries using Kalman filter and neural networks," in *2018 5th International Conference on Electrical and Electronic Engineering (ICEEE)*, Istanbul, 2018, pp. 41–46.

- 
- [10] C. S. Moo, K. S. Ng, Y. P. Chen, and Y. C. Hsieh, "State-of-Charge Estimation with Open-Circuit-Voltage for Lead-Acid Batteries," in *2007 Power Conversion Conference - Nagoya*, Nagoya, Japan, 2007, pp. 758–762.
- [11] Panasonic Corporation, "Panasonic VRLA Technical Handbook Industrial Batteries for Professionals."
- [12] K. Tytelmaier, O. Husev, O. Veligorskyi, and R. Yershov, "A review of non-isolated bidirectional dc-dc converters for energy storage systems," in *2016 II International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF)*, Kharkiv, Ukraine, 2016, pp. 22–28.
- [13] F. Z. Boaretto, J. M. Junior, Ygor Pereira Marca, P. M. D. S. D. D. Moraes, and A. L. Kirsten, "Small-Signal Modelling of the Cuk Converter," 2018.
- [14] R. W. Erickson, *Fundamentals of power electronics*. New York: Chapman & Hall, 1997.

## LAMPIRAN

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. Listing program Arduino

### a. *Open Loop*

// value of duty cycle of pwm defined from analog read or program  
unsigned long pwm1;

```
void setup() {  
  // put your setup code here, to run once:  
  Serial.begin(9600);  
  //Set pin 9 and 10 as output pwm signal  
  pinMode(9, OUTPUT);  
  pinMode(10, OUTPUT);  
  //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(CS10);  
  ICR1 = 400; //20kHz freq calculation = 16M/(2*ICR1 or TOP)  
}
```

```
void loop() {  
  // Assign values to OCR Registers, which output the PWM duty  
  cycle. (max 255/1023 still dont know)  
  OCR1A = 0*ICR1; // change duty cycle by multiplier ex: 0.5 =  
  50% duty cycle  
  OCR1B = 0*ICR1;  
}
```

### b. *Constant Current Charging*

```
#include <PID_v1.h>  
#include<DS3231.h>  
#include<SPI.h>  
#include<SD.h>  
#include<Wire.h>  
#include<LiquidCrystal_I2C.h>  
  
//LCD parameters  
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,20,4); // set the LCD address to 0x27  
  
// voltage input read parameters
```

```

const int analogVoltageIn = A2;
float rawVoltageIn = 0.0;
float voltageIn = 0.0;

// value of duty cycle of pwm defined from analog read or program
unsigned long pwm1;

//Define variable of PID
double Setpoint, Input, Output;
//Specify the links of PID and tuning parameters
double consKp= 0.8, consKi = 5, consKd= 0 ;
double aggKp = 0.8, aggKi = 25, aggKd = 0 ;
PID currentPID(&Input, &Output, &Setpoint, consKp, consKi,
consKd, DIRECT);

//Current Sensor ACS 712 20A for Input
float mVperAmp = 100; // 5A =185 ; 20A = 100 ; 30A = 60

//for Input
float aCSoffsetIn = 2500; // for calibrating ACS
const int analogCurIn = A0;
float rawValue0 = 0;
double voltageACS0 = 0;
double amps0 = 0;

//data logger
int chipSelect=4;
unsigned long previousMillis0 = 0;
unsigned long interval = 30000;
int c = 0;

//cut off voltage
unsigned long cutOffVoltage = 13.8;

//data sampling parameter
float a = 0.0;
float vInCount = 0.0;
float vInSampling = 0.0;

```

```
float ampsInCount = 0.0;
float ampsInSampling = 0.0;
unsigned long previousMillis1 = 0;
```

```
//init the DS3231 using the hardware interface
DS3231 rtc(SDA,SCL);
```

```
void Initialize_RTC() {
// Initialize the rtc object
rtc.begin();
```

```
##### the following lines can be uncommented to set the date and
time for the first time###
```

```
// rtc.setDOW(WEDNESDAY); // Set Day-of-Week to SUNDAY
rtc.setTime(00, 00, 00); // Set the time to 12:00:00 (24hr format)
// rtc.setDate(5, 1, 2019); // Set the date to January 1st, 2014
}
```

```
void Initialize_SDcard(){
```

```
// see if the card is present and can be initialized:
if (SD.begin(chipSelect)) {
}
else {
return;
}
```

```
// open the file. note that only one file can be open at a time,
// so you have to close this one before opening another.
File dataFile = SD.open("LoggerCD.txt", FILE_WRITE);
// if the file is available, write to it:
if (dataFile) {
dataFile.println("Date,Time,AmpIn,AmpOut,VoltageIn,PWM");
//Write the first row of the excel file
dataFile.close();
}
else {}
}
```

```
void Write_SDcard()
```

```

{
    // open the file. note that only one file can be open at a time,
    // so you have to close this one before opening another.
    File dataFile = SD.open("LoggerCD.txt", FILE_WRITE);

    // if the file is available, write to it:

    if (dataFile) {
        dataFile.print(rtc.getDateStr()); //Store date on SD card
        dataFile.print(","); //Move to next column using a ","
        dataFile.print(rtc.getTimeStr()); //Store date on SD card
        dataFile.print(","); //Move to next column using a ","
        dataFile.print(ampsInSampling);
        dataFile.print(",");
        dataFile.print(vInSampling);
        dataFile.print(",");
        dataFile.print(pwm1);
        dataFile.println(); //End of Row move to next row
        dataFile.close(); //Close the file

        //Print to LCD if SD card print done
        lcd.clear();
        lcd.setCursor(1,0);
        lcd.print(rtc.getTimeStr());
        lcd.setCursor(1,1);
        lcd.print("write done");
        delay(100);
    }
    else
    {
        //Print to LCD if SD card print failed
        lcd.clear();
        lcd.setCursor(1,0);
        lcd.print(rtc.getTimeStr());
        lcd.setCursor(1,1);
        lcd.print("write fail");
        delay(100);
    }
}

```

```

void SD_Card_Cutoff() {
    // open the file. note that only one file can be open at a time,
    // so you have to close this one before opening another.
    File dataFile = SD.open("LoggerCD.txt", FILE_WRITE);
    if (dataFile) {
        dataFile.println("Cut Off Voltage reached, Discharge Mode
terminated"); //Write the first row of the excel file
        dataFile.close();
    } else {}
}

void Initialize_LCD() {
    lcd.init(); //initialize the lcd
    lcd.init();
    // Print a message to the LCD
    lcd.backlight();
    lcd.setCursor(1,0);
    lcd.print("hello");
    lcd.setCursor(1,1);
    lcd.print("ready");
}

void LCD_print() {
    //LCD print
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(1,0);
    lcd.print("T = ");
    lcd.print(rtc.getTimeStr());
    lcd.setCursor(1,1);
    lcd.print("V1=");
    lcd.print(voltageIn,2);
    lcd.print("I1=");
    lcd.print(amps0,2);
}

void Sampling_Data() {
    unsigned long currentMillis1 = millis();
    if (currentMillis1 - previousMillis1 < interval) {

```

```

vInCount = vInCount + voltageIn;
ampsInCount = ampsInCount + amps0;
a = a + 1;
vInSampling = vInCount / a ;
ampsInSampling = ampsInCount / a ;
}
else {

vInCount = 0.0;
ampsInCount = 0.0;
a = 0;
previousMillis1 = currentMillis1;
}
}

```

```

void setup() {
// put your setup code here, to run once:
Wire.begin();
//Set pin 9 and 10 as output pwm signal
pinMode(9, OUTPUT);
pinMode(10, OUTPUT);

//set pin analog as input
pinMode(analogCurIn, INPUT);
pinMode(analogCurOut, INPUT);
pinMode(analogVoltageIn, INPUT);
//data logger
pinMode(chipSelect, OUTPUT);

//Set setpoint of PID Control
Input = 0;
Setpoint = 0.66;

//LCD initialize
Initialize_LCD0;

//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(CS10);
ICR1 = 400; //20kHz freq calculation = 16M/(2*ICR1 or TOP)

Initialize_SDcard();
Initialize_RTC();
}

void loop() {
// put your main code here, to run repeatedly:

//Current read calculation

//for current input (L1)
rawValue0=analogRead(analogCurIn);
voltageACS0 = ((rawValue0/1024)*5000);
amps0 = ((voltageACS0 - aCSoffsetIn)/mVperAmp)*(-1);

//for current output (L2)
rawValue1=analogRead(analogCurOut);
voltageACS1 = ((rawValue1/1024)*5000);
amps1 = ((voltageACS1 - aCSoffsetOut)/mVperAmp)*(-1);

//voltage Input Reading (by multi turn)
rawVoltageIn = analogRead(analogVoltageIn);
voltageIn = rawVoltageIn/1024.0*20;

//PID initialize
Input = amps0;
currentPID.SetOutputLimits(51,204);
currentPID.SetMode(AUTOMATIC);
double gap = abs(Setpoint-Input);
if(gap<0.03) {
    currentPID.SetTunings(consKp,consKi,consKd);
} else {
    currentPID.SetTunings(aggKp,aggKi,aggKd);
}
currentPID.Compute();

```

```
pwm1 = (Output/255)*ICR1; //calculate the duty cycle of pwm
// pwm duty cycle (x/50 %)
```

```
OCR1A = 0;
OCR1B = pwm1; //pwm1
```

```
// Sampling data
Sampling_Data();
```

```
// data logger
unsigned long currentMillis0 = millis();
if (currentMillis0 - previousMillis0 >= interval) {
    Write_SDcard();
    previousMillis0 = currentMillis0;
```

```
// checking VIN voltage if its already below Cut Off Voltage
discharge stopped
```

```
while(vInSampling > cutOffVoltage){
    OCR1A = 0;
    OCR1B = 0;
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(1,0);
    lcd.print("Charge Mode");
    lcd.setCursor(1,1);
    lcd.print("Finished");
    SD_Card_Cutoff;
}
}
```

```
// LCD display
LCD_print();
```

```
delay(250);
}
```

### c. Constant Current Discharging

```
#include <PID_v1.h>
```

```

#include<DS3231.h>
#include<SPI.h>
#include<SD.h>
#include<Wire.h>
#include<LiquidCrystal_I2C.h>

//LCD parameters
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,20,4); // set the LCD address to 0x27

#include "Wire.h"

// voltage input read parameters
const int analogVoltageIn = A2;
float rawVoltageIn = 0.0;
float voltageIn = 0.0;

// value of duty cycle of pwm defined from analog read or program
unsigned long pwml;

//Define variable of PID
double Setpoint, Input, Output;
//Specify the links of PID and tuning parameters
double consKp= 0.8, consKi = 5, consKd= 0 ;
double aggKp = 0.8, aggKi = 25, aggKd = 0 ;
PID currentPID(&Input, &Output, &Setpoint, consKp, consKi,
consKd, DIRECT);

//Current Sensor ACS 712 20A for Input
float mVperAmp = 100; // 5A =185 ; 20A = 100 ; 30A = 60
float aCSoffsetIn = 2500 // for calibrating ACS
const int analogCurIn = A0;
float rawValue0 = 0;
double voltageACS0 = 0;
double amps0 = 0;

```

```
//data logger
int chipSelect=4;
unsigned long previousMillis0 = 0;
unsigned long interval = 30000;
int c = 0;

//cut off voltage
unsigned long cutOffVoltage = 10.2;

//data sampling parameter
float a = 0.0;
float vInCount = 0.0;
float vInSampling = 0.0;
float ampsInCount = 0.0;
float ampsInSampling = 0.0;
unsigned long previousMillis1 = 0;

//init the DS3231 using the hardware interface
DS3231 rtc(SDA,SCL);

void Initialize_RTC(){
  // Initialize the rtc object
  rtc.begin();

  ##### the following lines can be uncommented to set the date and
  time for the first time###

  //rtc.setDOW(WEDNESDAY); // Set Day-of-Week to
  SUNDAY
  rtc.setTime(00, 00, 00); // Set the time to 12:00:00 (24hr
  format)
  //rtc.setDate(5, 1, 2019); // Set the date to January 1st, 2014
}

void Initialize_SDcard()
```

```

{
  // see if the card is present and can be initialized:
  if (SD.begin(chipSelect)) {
    //Serial.println("SD card is ready to use.");
  }
  else {
    return;
  }
  // open the file. note that only one file can be open at a time,
  // so you have to close this one before opening another.
  File dataFile = SD.open("LoggerCD.txt", FILE_WRITE);
  // if the file is available, write to it:
  if (dataFile) {
    dataFile.println("Date,Time,AmpIn,VoltageIn,PWM"); //Write
the first row of the excel file
    dataFile.close();
  }
  else { }
}

```

```

void Write_SDcard()
{ // open the file. note that only one file can be open at a time,
  // so you have to close this one before opening another.
  File dataFile = SD.open("LoggerCD.txt", FILE_WRITE);

```

```

// if the file is available, write to it:
if (dataFile) {
  dataFile.print(rtc.getDateStr()); //Store date on SD card
  dataFile.print(","); //Move to next column using a ","
  dataFile.print(rtc.getTimeStr()); //Store date on SD card
  dataFile.print(","); //Move to next column using a ","
  dataFile.print(ampsInSampling);
  dataFile.print(",");
  dataFile.print(vInSampling);
  dataFile.print(",");
  dataFile.print(pwm1);
}

```

```

dataFile.println(); //End of Row move to next row
dataFile.close(); //Close the file

//Print to LCD if SD card print done
lcd.clear();
lcd.setCursor(1,0);
lcd.print(rtc.getTimeStr());
lcd.setCursor(1,1);
lcd.print("SD card write done");
delay(100);
}
else
{
//Print to LCD if SD card print failed
lcd.clear();
lcd.setCursor(1,0);
lcd.print(rtc.getTimeStr());
lcd.setCursor(1,1);
lcd.print("SD card writing failed");
delay(100);
}
}

void SD_Card_Cutoff() {
// open the file. note that only one file can be open at a time,
// so you have to close this one before opening another.
File dataFile = SD.open("LoggerCD.txt", FILE_WRITE);
if (dataFile) {
dataFile.println("Cut Off Voltage reached");
dataFile.println("Discharge mode terminated");//Write the first
row of the excel file
dataFile.close();
//Serial.println("Done.");
} else {}
}

```

```
void Initialize_LCD(){
  lcd.init(); //initialize the lcd
  lcd.init();
  // Print a message to the LCD
  lcd.backlight();
  lcd.setCursor(1,0);
  lcd.print("hello everyone");
  lcd.setCursor(1,1);
  lcd.print("konichiwaa");
}
```

```
void LCD_print() {
  //LCD print
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(1,0);
  lcd.print("T =");
  lcd.print(rtc.getTimeStr());
  lcd.setCursor(1,1);
  lcd.print("V1=");
  lcd.print(voltageIn,2);
  lcd.print("I1=");
  lcd.print(ampsIn,2);
}
```

```
void Sampling_Data()
{
  unsigned long currentMillis1 = millis();
  if (currentMillis1 - previousMillis1 < interval) {
    vInCount = vInCount + voltageIn;
    ampsInCount = ampsInCount + amps0;
    a = a + 1;
    vInSampling = vInCount / a ;
    ampsInSampling = ampsInCount / a ;
  }
  else {
    vInCount = 0.0;
  }
}
```

```
    ampsInCount = 0.0;
    a = 0;
    previousMillis1 = currentMillis1;
  }
}
```

```
void setup() {
  // put your setup code here, to run once:
  Wire.begin();
  //Set pin 9 and 10 as output pwm signal
  pinMode(9, OUTPUT);
  pinMode(10, OUTPUT);

  //set pin analog as input
  pinMode(analogCurIn, INPUT);
  //pinMode(analogCurOut, INPUT);
  pinMode(analogVoltageIn, INPUT);
  //data logger
  pinMode(chipSelect, OUTPUT);

  //Set setpoint of PID Control
  Input = 0;
  Setpoint = 0.66;

  //LCD initialize
  Initialize_LCD();

  //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(CS10);
  ICR1 = 400; //20kHz freq calculation = 16M/(2*ICR1 or TOP)

  Initialize_SDcard();
  Initialize_RTC();
}
```

```

void loop() {
  // put your main code here, to run repeatedly:

  //Current read calculation

  //for current input (L1)
  rawValue0=analogRead(analogCurIn);
  voltageACS0 = ((rawValue0/1024)*5000);
  amps0 = ((voltageACS0 - aCSoffsetIn)/mVperAmp);

  //voltage Input Reading (by multi turn)
  rawVoltageIn = analogRead(analogVoltageIn);
  voltageIn = rawVoltageIn/1024.0*20;

  //PID initialize
  Input = amps0;
  currentPID.SetOutputLimits(51,204);
  currentPID.SetMode(AUTOMATIC);
  double gap = abs(Setpoint-Input);
  if(gap<0.1){
    currentPID.SetTunings(consKp,consKi,consKd);
  } else {
    currentPID.SetTunings(aggKp,aggKi,aggKd);
  }
  currentPID.Compute();

  pwm1 = (Output/255)*ICR1; //calculate the duty cycle of pwm
  // pwm duty cycle (x/50 %)

  OCR1A = pwm1;
  OCR1B = 0;

  // Sampling data
  Sampling_Data();
}

```

```
// data logger
unsigned long currentMillis0 = millis();
if (currentMillis0 - previousMillis0 >= interval) {
  Serial.print("Date = ");
  Serial.print(rtc.getDateStr());
  Serial.print("\ttime = ");
  Serial.print(rtc.getTimeStr());
  Write_SDcard();
  previousMillis0 = currentMillis0;
  // checking VIN voltage if its already below Cut Off Voltage
  discharge stopped
  while(vInSampling < cutOffVoltage){
    OCR1A = 0;
    OCR1B = 0;
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(1,0);
    lcd.print("Discharge Mode");
    lcd.setCursor(1,1);
    lcd.print("Finished");
    SD_Card_Cutoff;
  }
  // LCD display
  LCD_print();

  delay(250);
}
```



--Halaman ini sengaja dikosongkan--

## RIWAYAT HIDUP



Penulis buku penelitian berjudul **“Desain dan Implementasi DC-DC Bidirectional Cuk Converter dengan Average Current Mode Control untuk Pengujian Baterai Lead-Acid”** ini bernama lengkap Irham Izzatur Rahman, dan biasa dipanggil Irham atau Iwe. Penulis lahir di Surabaya, 8 Februari 1997 dan hidup besar di Surabaya. Tinggal bersama kedua orang tua dan memiliki dua orang adik. Riwayat pendidikan penulis ialah SDN Kalisari II Surabaya, SMPN 1 Surabaya, SMAN 5 Surabaya. Saat ini penulis sedang menempuh pendidikan S1 di Departemen Teknik Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Penulis memiliki pengalaman organisasi dan kepanitiaan yang cukup banyak diantaranya Sie Keamanan dan Perijinan ELECTRA 2017 dan 2018, Sie Keamanan dan Perijinan BARONAS (Lomba Robot Nasional 2017 dan 2018), dan Asisten Laboratorium Konversi Energi Listrik, Selain itu penulis juga memiliki pengalaman keilmiahan yaitu sebagai finalis Astra Green Energy Student Innovation 2018.