

**PEMODELAN DAN SIMULASI ESTIMASI *STATE OF CHARGE* BATERAI
JENIS LITHIUM – ION BERBASIS IMPEDANSI INTERNAL
MENGUNAKAN KONVERTER DAYA DC-DC**

HASIL TUGAS AKHIR

Karya Ilmiah sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan jenjang strata satu (S-1)
di Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Andalas

Oleh

Rahman Hidayat Tullah

NIM. 2010951025

Pembimbing

Muhammad Imran Hamid, S.T, M.T, Ph.D

NIP. 19710328199903100



**PROGRAM STUDI SARJANA
TEKNIK ELEKTRO FAKULTAS TEKNIK**

UNIVERSITAS ANDALAS

2025

LEMBAR PENGESAHAN

Tugas Akhir

Pemodelan dan Simulasi Estimasi *State of Charge* baterai jenis Lithium – Ion berbasis Impedansi Internal menggunakan Konverter Daya DC-DC

Oleh

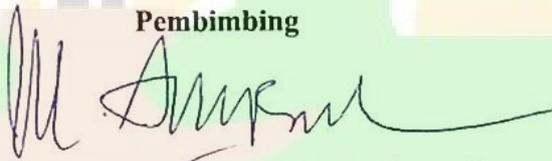
Rahman Hidayat Tullah

2010951025

Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik
Universitas Andalas

Disetujui Pada Tanggal:

Pembimbing



Muhammad Imran Hamid, S.T, M.T, Ph.D.

NIP. 197103281999031002

Mengetahui

Ketua Departemen Teknik Elektro



Prof. Syafii, Ph.D

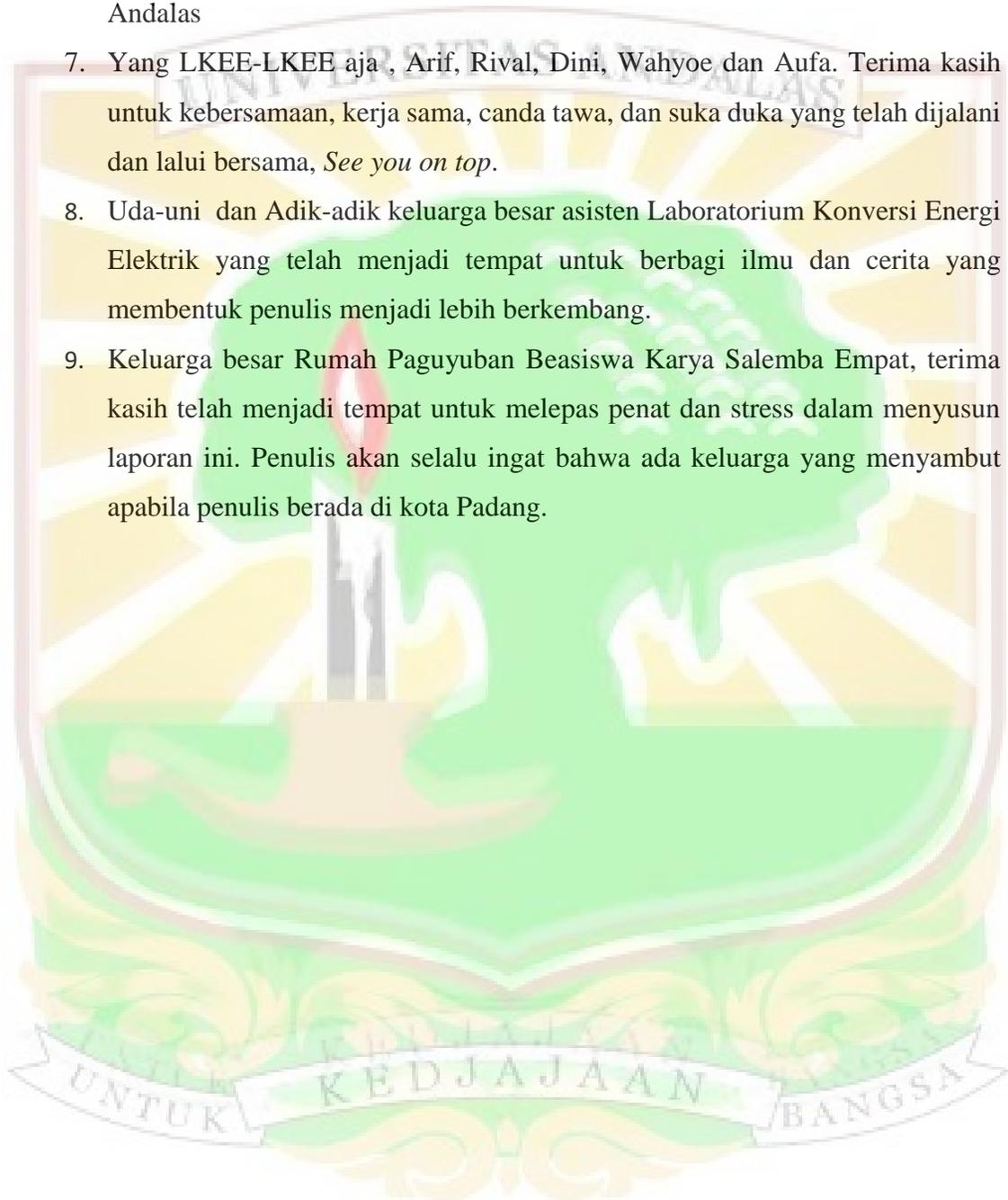
NIP.19405051998021001

HALAMAN PENGHARGAAN

Alhamdulillah, Puji dan syukur kepada Allah SWT yang telah memberikan rahmat, kesehatan dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “Pemodelan dan Simulasi Estimasi *State of Charge* baterai jenis Lithium-Ion berbasis Impedansi Internal menggunakan Konverter Daya DC-DC”. Penyusunan tugas akhir ini melibatkan banyak pihak yang sangat membantu dalam berbagai hal, baik berupa bimbingan, bantuan, waktu, serta dorongan yang bersifat moral maupun material. Pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih kepada:

1. Kedua Orang tua yang sangat penulis sayangi, Ayah Zulbahri dan Mama Pismanawati yang telah mencurahkan segenap kasih sayangnya kepada penulis hingga penulis bisa sampai pada titik ini. Terima kasih atas setiap tetes keringat dan deraihan air mata yang Ayah dan Mama berikan kepada penulis, setiap doa, harapan dan kepercayaan sehingga penulis dapat menjadi pribadi yang lebih baik. Penulis memohon kepada Allah karuniakan surganya kepada Ayah dan Mama dan dijauhkan dari siksa api neraka.
2. Mareta Fitria Fajar dan Bayu Dwi Putra yang selalu mendukung penulis untuk selalu bangkit, selalu berani dalam ketakutan, selalu tertawa bersama sedih dan semua selalu sama ketika bersama. Orang sukses yang sedang menjalani proses.
3. Bapak Muhammad Imran Hamid, Ph.D selaku dosen pembimbing akademik dan pembimbing tugas akhir yang telah memberikan arahan, bimbingan, saran dan motivasi kepada penulis dalam penyelesaian tugas akhir ini. Semoga ilmu yang telah diajarkan bisa menjadi amal jariah.
4. Bapak Prof. Syafii dan Ibuk Dr. Adrianti, S. T, M. T. selaku dosen penguji yang telah memberikan tanggapan, saran dan masukan yang membangun dalam penyusunan tugas akhir ini
5. Bapak Prof.Syafii selaku Ketua Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Andalas

6. Bapak/Ibu dosen dan Bapak/Ibu karyawan/karyawati yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu, yang telah memberikan ilmunya dan membantu penulis selama menjalankan pendidikan di Departemen Teknik Elektro Universitas Andalas
7. Yang LKEE-LKEE aja , Arif, Rival, Dini, Wahyoe dan Aufa. Terima kasih untuk kebersamaan, kerja sama, canda tawa, dan suka duka yang telah dijalani dan lalui bersama, *See you on top*.
8. Uda-uni dan Adik-adik keluarga besar asisten Laboratorium Konversi Energi Elektrik yang telah menjadi tempat untuk berbagi ilmu dan cerita yang membentuk penulis menjadi lebih berkembang.
9. Keluarga besar Rumah Paguyuban Beasiswa Karya Salemba Empat, terima kasih telah menjadi tempat untuk melepas penat dan stress dalam menyusun laporan ini. Penulis akan selalu ingat bahwa ada keluarga yang menyambut apabila penulis berada di kota Padang.



LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Rahman Hidayat Tullah

NIM : 2010951025

Program Studi : S1 Teknik Elektro

Perguruan Tinggi : Universitas Andalas

Dengan ini menyatakan bahwa tugas akhir yang telah saya buat dengan judul “Pemodelan dan Simulasi Estimasi *State of Charge* baterai jenis Lithium–Ion berbasis Impedansi Internal menggunakan Konverter Daya DC-DC “ adalah asli atau tidak plagiat (menjiplak) dan belum pernah diterbitkan/dipublikasikan di mana pun dan dalam bentuk apa pun.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya tanpa ada paksaan dari pihak mana pun. Apabila dikemudian hari saya memberikan keterangan palsu dan/atau ada pihak lain yang menyatakan bahwa tugas akhir yang telah saya buat adalah hasil karya milik seseorang atau badan tertentu, saya bersedia diproses baik secara pidana maupun perdata dan saya bersedia menerima sanksi dari Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Andalas.

Padang, Januari 2025



Rahman Hidayat Tullah

2010951025

RIWAYAT HIDUP



Rahman Hidayat Tullah, dilahirkan di Kabupaten Siak pada hari Rabu tanggal 4 September. Penulis merupakan anak ketiga dari tiga bersaudara dari pasangan Bapak Zulbahri dan Ibu Pisinawati. Penulis menempuh pendidikan tingkat dasar di SD Negeri 01 Minas dari tahun 2009 hingga tahun 2015. Di tahun tersebut, penulis melanjutkan pendidikannya di SMP IT Al-Fatah Minas dan lulus pada tahun 2018. Kemudian, penulis menempuh pendidikan menengah atas di MAN 2 Model Pekanbaru dan lulus pada tahun 2020. Satu tahun setelahnya, penulis melanjutkan Pendidikan di Universitas Andalas dengan mengambil jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Andalas. Pada masa perkuliahan, penulis bergabung menjadi asisten di Laboratorium Konversi Energi Elektrik (LKEE) dengan mengemban amanah sebagai Koordinator Divisi Praktikum. Penulis juga bergabung dalam Keluarga besar Rumah Paguyuban Beasiswa Karya Salemba Empat dan menjadi Anggota dalam divisi Rumah Anak Cerdas. Penulis aktif dalam mengikuti organisasi di tingkat jurusan dan tingkat universitas, yaitu Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro (HMTE). Pada tahun ketiga, penulis telah mengikuti Kuliah Kerja Nyata (KKN) yang diadakan di Nagari Lalan, Kabupaten Sijunjung. Penulis telah menyelesaikan Kerja Praktek di Perusahaan Listrik Negara Nusantara Power (PLN NP), Pekanbaru pada tahun 2024

PRAKATA

Alhamdulillah, Puji dan syukur kepada Allah SWT yang telah memberikan rahmat, kesehatan dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “Pemodelan dan Simulasi Estimasi *State of Charge* baterai jenis Lithium-Ion berbasis Impedansi Internal menggunakan Konverter Daya DC-DC”. Penyusunan tugas akhir ini melibatkan banyak pihak yang sangat membantu dalam berbagai hal, baik berupa bimbingan, bantuan, waktu, serta dorongan yang bersifat moral maupun material. Pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih kepada:

1. Kedua Orang tua yang sangat penulis sayangi, Bapak Zulbahri dan Ibu Pismanawati yang telah mencurahkan segenap kasih sayangnya kepada penulis hingga penulis bisa sampai pada titik ini. Terima kasih atas setiap tetes keringat dan deraihan air mata yang Ayah dan Mama berikan kepada penulis, setiap doa, harapan dan kepercayaan sehingga penulis dapat menjadi pribadi yang lebih baik. Penulis memohon kepada Allah karuniakan surganya kepada Ayah dan Mama dan dijauhkan dari siksa api neraka.
2. Mareta Fitria Fajar dan Bayu Dwi Putra yang menjadikan alasan penulis untuk selalu bangkit tanpa teringat jatuh, selalu berani dalam ketakutan, selalu tertawa bersama sedih dan semua selalu sama ketika bersama. Orang sukses yang sedang menjalani proses.
3. Bapak Muhammad Imran Hamid, Ph.D selaku dosen pembimbing akademik dan pembimbing tugas akhir yang telah memberikan arahan, bimbingan, saran dan motivasi kepada penulis dalam penyelesaian tugas akhir ini. Semoga ilmu yang telah diajarkan bisa menjadi amal jariah.
4. Bapak Prof. Syafii dan Ibuk Dr. Adrianti, S. T, M. T. selaku dosen penguji yang telah memberikan tanggapan, saran dan masukan yang membangun dalam penyusunan tugas akhir ini
5. Bapak Prof.Syafii selaku Ketua Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Andalas

6. Bapak/Ibu dosen dan Bapak/Ibu karyawan/karyawati yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu, yang telah memberikan ilmunya dan membantu penulis selama menjalankan pendidikan di Departemen Teknik Elektro Universitas Andalas
7. Yang LKEE-LKEE aja, Arif, Rival, Dini, Wahyoe, Aufa. Terima kasih untuk kebersamaan, kerja sama, canda tawa, dan suka duka yang telah dijalani dan lalui bersama, *See you on top*.
8. Uda-uni dan Adik-adik keluarga besar asisten Laboratorium Konversi Energi Elektrik yang telah menjadi tempat untuk berbagi ilmu dan cerita yang membentuk penulis menjadi lebih berkembang.
9. Keluarga besar Rumah Paguyuban Beasiswa Karya Salemba Empat, terima kasih telah menjadi tempat untuk melepas penat dan stress dalam menyusun laporan ini. Penulis akan selalu ingat bahwa ada keluarga yang menyambut apabila penulis berada di kota Padang

Semoga Allah SWT melimpahkan rahmat dan karunia-Nya kepada semua pihak yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini. Penulis berharap tulisan ini dapat bermanfaat bagi kita semua. Penulis menyadari bahwa banyak terdapat kesalahan dan kekurangan dalam penulisan tugas akhir ini karena itu penulis menerima segala bentuk kritik dan saran demi kesempurnaan tugas akhir dan perbaikan di masa yang akan datang.

Padang, Januari 2025

Penulis,



Rahman Hidayat Tullah

Judul	Pemodelan dan Simulasi Estimasi <i>State of Charge</i> pada Baterai jenis Lithium-Ion berbasis Impedansi Internal pada baterai menggunakan Konverter Daya Dc-Dc	Rahman Hidayat Tullah
Program Studi	Departemen Teknik Elektro	2010951025
Fakultas Teknik Universitas Andalas		
Abstrak		
<p>Peningkatan efisiensi dan keamanan baterai Lithium-Ion pada kendaraan listrik menjadi fokus utama dalam teknologi transportasi modern. Penelitian ini bertujuan mengembangkan metode pemodelan dan simulasi untuk mengestimasi State of Charge (SoC) baterai berbasis impedansi internal menggunakan konverter daya DC-DC. Proses ini melibatkan pembangkitan sinyal gangguan sinusoidal pada duty cycle, pengukuran impedansi, dan analisis hubungan antara SoC dengan impedansi internal baterai. Simulasi dilakukan menggunakan model baterai pada perangkat lunak MATLAB/Simulink. Hasil menunjukkan bahwa metode ini dapat mendeteksi impedansi internal secara akurat tanpa mengganggu operasi normal baterai. Hubungan linier antara SoC dan impedansi internal baterai berhasil diidentifikasi, memberikan wawasan penting untuk pengelolaan baterai yang lebih efisien. Metode ini berpotensi meningkatkan kinerja Sistem Manajemen Baterai (BMS) pada kendaraan listrik dan menjadi referensi penting untuk penelitian lanjutan dalam pengembangan teknologi baterai.</p> <p>Kata Kunci: Baterai Lithium-Ion, <i>State of Charge</i>, Impedansi Internal, Konverter Daya DC-DC.</p>		

Title	Modeling and Simulation of State of Charge Estimation for Lithium-Ion Batteries based on Internal Impedance in batteries using Dc-Dc Power Converters	Rahman Hidayat Tullah
Mayor	Department of Electrical Engineering	2010951025
Faculty of Engineering Andalas University		
<p style="text-align: center;">Abstract</p> <p><i>Improving the efficiency and safety of Lithium-Ion batteries in electric vehicles is a major focus in modern transportation technology. This research aims to develop a modeling and simulation method to estimate the State of Charge (SoC) of internal impedance-based batteries using DC-DC power converters. This process involves generating a sinusoidal disturbance signal at the duty cycle, measuring the impedance, and analyzing the relationship between the SoC and the internal impedance of the battery. Simulations were conducted using a battery model in MATLAB/Simulink software. The results show that this method can accurately detect the internal impedance without disrupting the normal operation of the battery. A linear relationship between SoC and battery internal impedance was successfully identified, providing important insights for more efficient battery management. This method has the potential to improve the performance of Battery Management Systems (BMS) in electric vehicles and is an important reference for further research in battery technology development.</i></p> <p><i>Key words : Lithium-Ion Battery, State of Charge, Internal Impedance, DC-DC Power Converter.</i></p>		

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	i
HALAMAN PENGHARGAAN.....	ii
LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN	iv
RIWAYAT HIDUP.....	v
PRAKATA.....	vi
Abstrak	viii
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR TABEL.....	xiii
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR SIMBOL.....	xvi
DAFTAR LAMPIRAN.....	xvii
DAFTAR ISTILAH	xviii
DAFTAR SINGKATAN	xx
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	4
1.3 Tujuan Penelitian.....	5
1.4 Batasan Masalah dan lingkup kerja penelitian	5
1.5 Manfaat Penelitian.....	5
1.6 Sistematika Penulisan.....	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.2 Baterai.....	7
2.1 Jenis – jenis baterai pada kendaraan listrik	12
2.2 Konverter Daya DC-DC	13
2.3 Metoda penentuan SoC baterai.....	16
2.3.1 <i>Conventional Method</i>	16

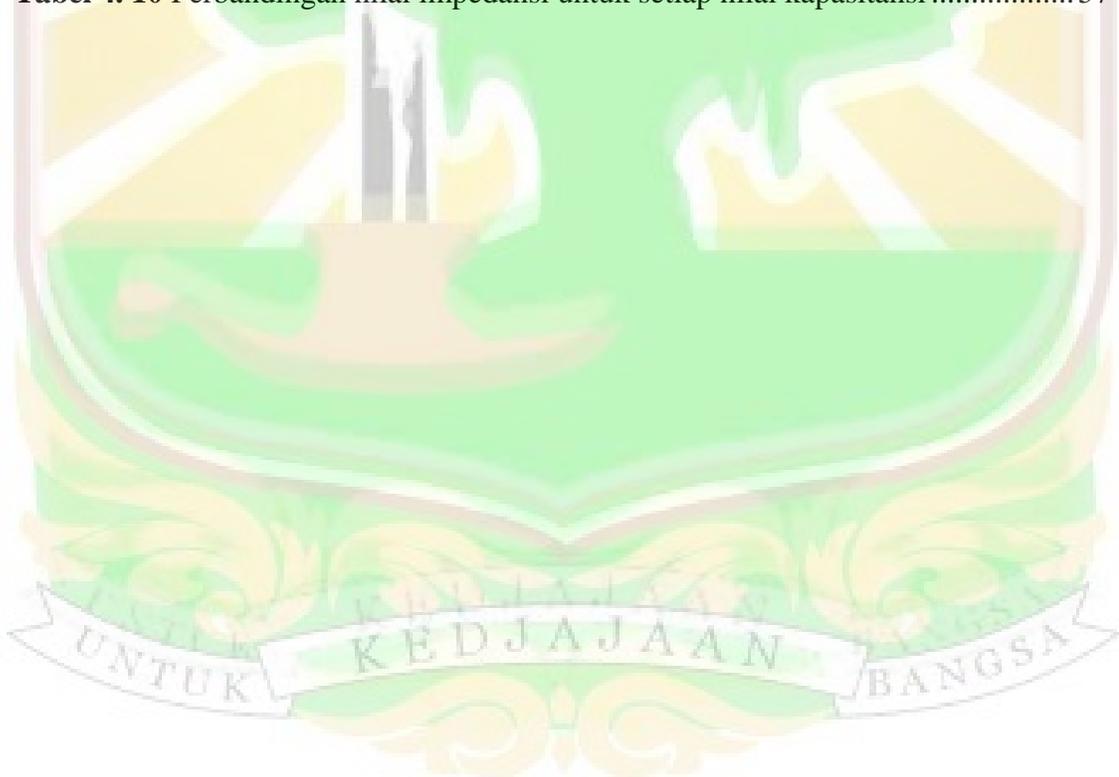
2.3.2 Adaptive Filter Algorithm.....	16
2.3.3 Learning Algorithm.....	16
2.3.4 Non-Linear Observers	16
2.3.5 Others and Hybrid Algorithm Method.....	17
2.4 Conventional Method	17
2.4.1 Ampere-hour Counting	17
2.4.2 Open-circuit Voltage.....	18
2.4.3 Impedance and Internal Resistance Method.....	19
2.4.4 Model-base Method	20
BAB III METODE PENELITIAN.....	22
3.1 Alur Penelitian.....	22
3.2 Prosedur pengujian	24
3.2.1 Proses pengukuran impedansi internal model baterai SIMULINK.....	24
3.2.2 Proses estimasi SoC baterai menggunakan impedansi internalnya secara real time	25
3.3 Perancangan Sistem.....	26
3.3.1 Proses pembentukan sinyal gangguan sinusoidal duty cycle	26
3.3.2 Pengukuran impedansi internal model baterai SIMULINK	29
3.3.3 Proses estimasi SoC baterai menggunakan impedansi internalnya secara real time	30
3.4 Jenis baterai yang akan digunakan	32
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	33
4.1 Pengujian sistem penghasil sinyal duty cycle	33
4.2 Pengujian kemampuan konverter mendeteksi impedansi Z dari beberapa model baterai (R, RL dan RC).....	40
a. Pengujian pada model baterai sebagai impedansi murni R.....	40
b. Pengujian pada model baterai sebagai impedansi RL	46
c. Pengujian pada model baterai sebagai rangkaian RC.....	51
4.3 Penentuan impedansi Z baterai.....	58
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	64

5.1 Kesimpulan..... 64
5.2 Saran 65
DAFTAR PUSTAKA 66
Lampiran 69



DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Karakteristik dari beberapa jenis baterai	12
Tabel 3. 3 Karakteristik dari baterai yang akan digunakan dalam penelitian	32
Tabel 4. 1 Perbandingan karakteristik sinyal gangguan dutycycle untuk variasi dutycycle DC.....	36
Tabel 4. 2 Perbandingan karakteristik sinyal gelombang gangguan untuk variasi frekuensi.....	39
Tabel 4. 3 Spesifikasi konverter pengujian pada model baterai sebagai impedansi murni R	41
Tabel 4. 4 Karakteristik gelombang tegangan dan arus keluaran konverter	42
Tabel 4. 5 Karakteristik gelombang tegangan dan arus hasil filter	43
Tabel 4. 6 Karakteristik gelombang tegangan dan arus keluaran konverter	47
Tabel 4. 7 Karakteristik gelombang tegangan dan arus hasil filter	48
Tabel 4. 8 Perbandingan nilai impedansi untuk setiap nilai induktansi	50
Tabel 4. 9 Karakteristik gelombang tegangan dan arus keluaran konverter	54
Tabel 4. 10 Perbandingan nilai impedansi untuk setiap nilai kapasitansi	57



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Bagian-bagian baterai	7
Gambar 2. 2 Model baterai dari jurnal oleh T. O. Tin.....	8
Gambar 2. 3 Rangkaian dalam baterai.....	9
Gambar 2. 4 Karakteristik pengosongan baterai	9
Gambar 2. 5 Karakteristik pengisian baterai	10
Gambar 2. 6 Blok pengatur parameter baterai.....	11
Gambar 2. 7 Rangkaian konverter boost	13
Gambar 2. 8 Saat saklar S ON.....	14
Gambar 2. 9 Saat saklar S OFF	14
Gambar 2. 10 Rangkaian metode pengukuran tahanan beban DC.....	19
Gambar 2. 11 Rangkaian metode pengukuran impedansi injeksi sinyal AC	20
Gambar 3. 1 Diagram alir penelitian	22
Gambar 3. 2 Diagram Proses pengukuran impedansi internal baterai	24
Gambar 3. 3 Estimasi SoC baterai menggunakan impedansi internalnya secara real time.....	25
Gambar 3. 4 Rangkaian pembentukan sinyal gangguan sinusoidal duty cycle.....	26
Gambar 3. 5 Sinyal Sinusoidal, Amplitudo 0.025, Frekuensi 50 Hz	27
Gambar 3. 6 sinyal gergaji, Amplitudo 1, Frekuensi 1000 Hz.....	27
Gambar 3. 7 Modulasi sinyal sinusoidal dan gergaji.....	28
Gambar 3. 8 Sinyal hasil modulasi.....	29
Gambar 3. 9 Rangkaian pengukuran impedansi internal model baterai SIMULINK.....	29
Gambar 3. 10 Rangkaian estimasi SoC baterai menggunakan impedansi internalnya secara real time.....	31
Gambar 4. 1 Rangkaian penghasil sinyal dutycycle.....	33
Gambar 4. 2 Gelombang sinyal gangguan sinusoidal dutycycle pada dutycycle DC 0.3.....	34
Gambar 4. 3 Gelombang sinyal gangguan sinusoidal dutycycle pada dutycycle DC 0.4.....	34
Gambar 4. 4 Gelombang sinyal gangguan sinusoidal dutycycle pada dutycycle DC 0.5.....	34
Gambar 4. 5 Gelombang sinyal gangguan sinusoidal dutycycle pada dutycycle DC 0.6.....	35
Gambar 4. 6 Gelombang sinyal gangguan sinusoidal dutycycle pada dutycycle DC 0.7.....	35
Gambar 4. 7 Tampilan fitur FFT Analysis simulink untuk menentukan nilai THD .36	
Gambar 4. 8 Besar THD terhadap nilai dutycycle sinyal sistem saklar	37

Gambar 4. 9 Gelombang sinyal gangguan sinusoidal dutycycle pada frekuensi 250 Hz	38
Gambar 4. 10 Gelombang sinyal gangguan sinusoidal dutycycle pada frekuensi 500 Hz	38
Gambar 4. 11 Gelombang sinyal gangguan sinusoidal dutycycle pada frekuensi 1 KHz	38
Gambar 4. 12 Gelombang sinyal gangguan sinusoidal dutycycle pada frekuensi 2,5 KHz	38
Gambar 4. 13 Gelombang sinyal gangguan sinusoidal dutycycle pada frekuensi 5 KHz	39
Gambar 4. 14 Besar THD terhadap frekuensi sinyal sistem saklar	39
Gambar 4. 15 Gambar rangkaian sistem konverter	41
Gambar 4. 16 Gelombang tegangan(A) dan arus(B) keluaran konverter	42
Gambar 4. 17 First-Order Filter dengan tipe Highpass	43
Gambar 4. 18 Gelombang tegangan(A) dan arus(b) hasil filter	43
Gambar 4. 19 Spesifikasi blok RMS	44
Gambar 4. 20 Grafik tegangan(a) dan arus(b) RMS	45
Gambar 4. 21 Rangkaian konverter dengan beban impedansi RL	46
Gambar 4. 22 Gelombang tegangan dan arus keluaran konverter	47
Gambar 4. 23 Gelombang tegangan dan arus hasil high-pass filter	48
Gambar 4. 24 Grafik tegangan dan arus RMS	49
Gambar 4. 25 Perbandingan antara Impedansi terhitung dan terukur dalam pengujian beban induktansi	51
Gambar 4. 26 Gelombang tegangan dan arus keluaran konverter	54
Gambar 4. 27 Gelombang tegangan dan arus hasil high-pass filter	55
Gambar 4. 28 Grafik tegangan dan arus RMS	56
Gambar 4. 29 Perbandingan antara Impedansi terhitung dan terukur dalam pengujian beban kapasitansi	57
Gambar 4. 30 Rangkaian simulasi pengisian baterai	58
Gambar 4. 31 Grafik hubungan SoC vs impedansi model baterai dari simulink	59
Gambar 4. 32 Grafik tegangan, arus dan SoC baterai saat proses pengisian	60
Gambar 4. 33 Gelombang tegangan(a) dan arus(b) baterai	Error! Bookmark not defined.
Gambar 4. 34 Gelombang tegangan(a) dan arus(b) hasil filter	61
Gambar 4. 35 Nilai RMS komponen AC dalam tegangan dan arus DC baterai saat t = 60 s	62
Gambar 4. 36 Nilai RMS komponen AC dalam tegangan dan arus DC baterai saat t = 120 s	62

DAFTAR SIMBOL



V_L	: Tegangan Induktor (V)
L	: Induktansi (H)
I	: Arus (A)
T_{on}	: Waktu aktif PWM
T_{off}	: Waktu nonaktif PWM
V_i	: Tegangan input (V)
V_o	: Tegangan output (V)
D	: Duty cycle
F	: Frekuensi (Hz)
SoC	: State of Charge (%)
T	: Periode (S)
C_n	: Kapasitas nominal baterai (Ah)
η	: Efisiensi Coulomb
S_d	: <i>Self-discharging rate</i>
$Z_{battery}$: Impedansi baterai (Ω)
V_{ac}	: Tegangan AC (V)
I_{ac}	: Arus AC (A)
X_{rms}	: nilai RMS
V_{rms}	: Tegangan RMS
I_{rms}	: Arus RMS

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Tabel hubungan SoC dan nilai impedansi internal baterai69

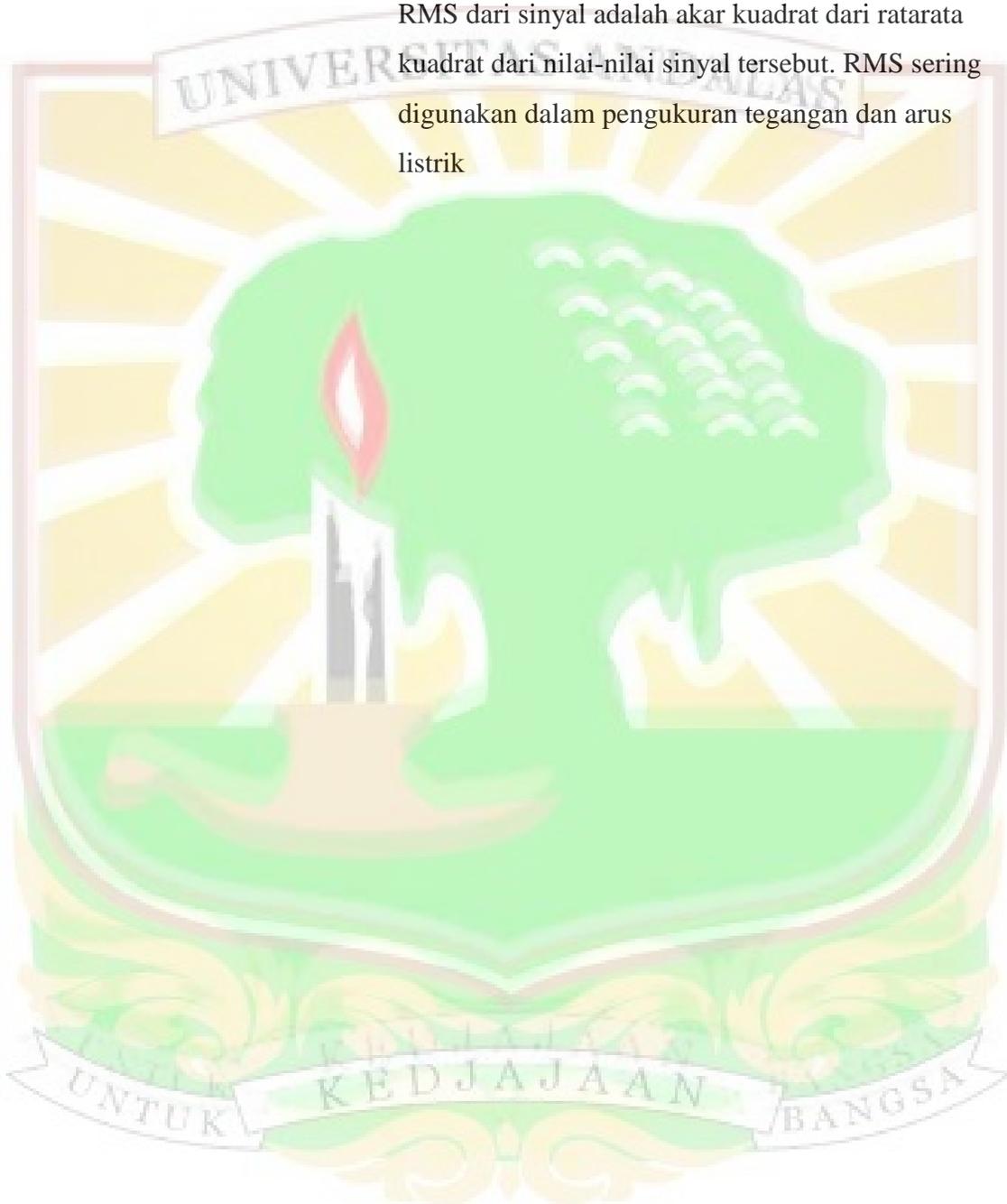


DAFTAR ISTILAH



SoC	: Indikator energi baterai yang tersisa
Impedansi internal	: Hambatan dalam
BMS	: Sistem manajemen Baterai agar baterai dapat bertahan lama
OCV_{est}	: Open Circuit Voltage estimation, metoda estimasi OCV dalam mendapatkan SoC menggunakan tegangan nominal baterai saat baterainya dalam keadaan rangkaian terbuka
Nominal Voltage	: Tegangan nominal menggambarkan akhir dari zona linier pada karakteristik pengosongan
Rated Capacity	: kapasitas efektif minimum dari baterai.
Initial State of Charge	: Nilai SoC awal
Electric Vehicle	: Kendaraan yang menggunakan mesin listrik
Hybrid EV	: Kendaraan listrik yang digerakkan oleh mesin listrik dan mesin bakar
MOSFET	: Semikonduktor yang dapat difungsikan sebagai saklar
Dutycycle	: Sinyal pulsa berupa waktu on dan off dalam satu periode
Signal builder	: Fitur pada aplikasi SIMULINK yang dapat menciptakan signal yang berasal dari file impor
FFT analysis	: Fitur aplikasi SIMULINK yang dapat menghitung Total Harmonic Distortion pada sebuah gelombang
Total Harmonic Distortion	: nilai persentase antara total komponen harmonisa dengan komponen fundamental

- Time Constant : Nilai yang mengatur kecepatan respon filter terhadap perubahan sinyal inputnya
- Root Mean Square : ukuran magnitudo yang efektif dari sinyal AC. RMS dari sinyal adalah akar kuadrat dari rata-rata kuadrat dari nilai-nilai sinyal tersebut. RMS sering digunakan dalam pengukuran tegangan dan arus listrik



DAFTAR SINGKATAN

- SoC : State of Charge
EV : Electric Vehicle
HEV : Hybrid Electric Vehicle
BMS : Battery Management System
ECM : Equivalent Circuit Model
R : Resistansi
R-L : Resistansi Induktansi
R-C : Resistansi Kapasitansi
Z : Impedansi
RMS : Root Mean Square
THD : Total Harmonic Distortion



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kendaraan listrik telah menjadi tren didalam sektor transportasi, hal ini dikarenakan Kendaraan listrik memiliki keunggulan dalam beberapa aspek dibandingkan dengan kendaraan berbahan bakar minyak, seperti tingkat kebisingan yang lebih rendah dan polusi yang lebih rendah. Penggunaan kendaraan listrik adalah salah satu cara dalam hal mengurangi penggunaan minyak bumi. Pengembangan dari kendaraan listrik juga akan mengurangi emisi karbon dari sektor transportasi. Berdasarkan berita yang telah dilaporkan, telah terdapat lebih dari 6 juta kendaraan bertenaga listrik yang sudah diciptakan sejak tahun 2011 [1].

Kendaraan listrik menggunakan listrik yang disimpan dalam baterai. Baterai sebagai media untuk menyimpan energi utama yang menyediakan daya untuk menggerakkan kendaraan.

Salah satu jenis baterai yang sering digunakan adalah baterai Lithium – Ion. Baterai jenis ini sangat diminati sebagai solusi penyimpanan energi untuk kendaraan listrik besar karena memiliki kepadatan energi yang tinggi, masa pakai yang panjang, tidak terpengaruh oleh efek memori, dan memiliki tingkat self-discharge yang rendah. Namun, pengisian berlebihan atau pengosongan yang terlalu dalam dapat menyebabkan penurunan kapasitas, mengurangi masa pakai, dan bahkan berpotensi menyebabkan kegagalan atau bahaya seperti ledakan [2].

Untuk menjamin penggunaan yang aman dari baterai lithium-ion serta memperpanjang masa pakainya, sistem manajemen baterai (Battery Management System/BMS) sangat penting [3]. BMS dapat secara efektif mengelola kinerja baterai lithium-ion secara menyeluruh, efisien, dan cermat. Penting untuk memastikan kinerja baterai yang optimal dan masa pakai yang panjang dalam berbagai aplikasi. Keandalan dari Sistem Manajemen Baterai tergantung pada ketepatan estimasi keadaan muatan (SoC) dari baterai lithium-ion. SoC

mengindikasikan kapasitas tersisa dan memberikan petunjuk apakah baterai perlu diisi ulang atau dikosongkan. Namun, SoC adalah kondisi internal dari baterai dan tidak dapat diukur secara langsung. Hanya dapat diestimasi berdasarkan hubungan antara tegangan, arus, suhu, dan penuaan baterai. Oleh karena itu, sangat penting untuk mengembangkan algoritma estimasi SoC yang dapat diandalkan yang mempertimbangkan semua faktor yang relevan untuk memastikan kinerja dan keamanan optimal dari baterai lithium-ion dalam berbagai aplikasi.

Salah satu metoda yang digunakan dalam menentukan estimasi SoC baterai adalah Metode Konvensional. Metode Konvensional terbagi lagi atas berbagai sub metode, yaitu: *Ampere-hour Counting*, *Open Circuit Voltage (OCV)*, *Impedance and Internal Resistance Method* dan *Model-base Method* [4], [5]. Metode *Ampere-hour Counting* mudah diimplementasikan dengan kompleksitas komputasi rendah. Metode *Ampere-hour Counting* mengestimasi SoC dengan cara mengintegrasikan arus pengosongan atau pengisian untuk menghitung jumlah muatan dalam baterai. Kelebihan dari metode *Ampere-hour Counting* adalah biaya komputasi daya yang rendah, sehingga metode ini banyak digunakan [5], [6]. Metode *Open Circuit Voltage (OCV)* adalah metode yang memanfaatkan hubungan linier antara tegangan dan SoC pada baterai. Metode OCV ini mengukur SoC pada baterai berdasarkan nilai tegangan pada baterai dalam keadaan terbuka atau tanpa beban. Hasil dari metode OCV adalah estimasi nilai State of Charge (SoC) baterai Li-Ion yang bisa dijadikan sebagai panduan untuk mengukur kapasitas baterai [6]. Metode perkiraan SoC Konvensional yang lain adalah dengan mengukur impedansi dan resistansi internal. Untuk mendapatkan resistansi internal, diperlukan arus searah (DC) dan nilai tegangan dan arus pada interval waktu kecil [7]. Metode Konvensional berikutnya adalah *Model-base Method*. Metode ini menggunakan algoritma estimasi keadaan nonlinier. Metode ini mudah diimplementasikan dan tidak bergantung pada nilai awal yang akurat. Namun, metode ini bergantung pada akurasi model baterai, sehingga membangun model baterai yang akurat sangat penting untuk *Model-base Method* [5]

Metode Konvensional sering digunakan dalam pembacaan estimasi SoC pada baterai. Namun metode-metode yang ada pada kategori ini memiliki beberapa kekurangan. Kelemahan dari *Ampere-hour Counting* adalah bahwa ia tidak dapat tetap akurat untuk waktu yang lama. Hal ini disebabkan karena SoC awal yang tidak diketahui, penurunan kapasitas, tingkat Self-discharge, dan kesalahan sensor arus. Pada metoda Open-circuit Voltage, estimasi pembacaan SoC dipengaruhi oleh suhu ruangan baterai dan masa pakai siklus baterai. Pada metode resistansi internal berubah secara perlahan dan sulit untuk diamati untuk estimasi SoC[5].

Dari beberapa kekurangan yang dimiliki oleh metoda konvensional seperti yang telah disebutkan sebelumnya, maka di berbagai tempat, telah dilakukan pengembangan metode konvensional. Salah satu metode konvensional yang telah dikembangkan adalah metode resistansi internal. Pada penelitian yang dilakukan oleh Wangxin [8], pengukuran resistansi diganti dengan mengukur impedansi. Hal ini dikarenakan susunan rangkaian dalam baterai terdapat komponen beban impedansi sehingga pengukuran menjadi lebih akurat. Impedansi internal baterai diukur menggunakan konverter daya DC-DC. Nilai duty cycle konverter daya DC-DC yang digunakan untuk menghubungkan betari dengan beban, diberi gangguan secara sinusoidal pada frekuensi tertentu disekitar nilai DC saat keadaan *steady state*. Gangguan duty cycle ini menghasilkan nilai sinuoidal pada tegangan dan arus baterai. Ripple sinusoidal dari tegangan dan arus baterai kemudian diukur dan digunakan untuk menentukan impedansi baterai pada frekuensi gangguan tersebut. Metode ini dapat digunakan secara periodik tanpa mengganggu operasi normal sistem baterai dan konverter daya. Kemudian, nilai impedansi yang didapat digunakan untuk menentukan OCV_{est} yang nantinya akan di plot dengan nilai persentase SoC baterai sehingga didapatkan hubungan atau regresi antara persentase SoC baterai dengan nilai OCV_{est}

Penelitian yang dilakukan oleh Wangxin ini [8], memang dapat mengukur impedansi baterai tanpa mengganggu operasi normal baterai. Namun pada penelitian itu tidak dijelaskan bagaimana mengatur nilai duty cycle pada konverter daya DC-DC sehingga output tegangan dan arus baterai membentuk sinusoidal. Selain itu,

dalam penelitian Wangxin [8], nilai impedansi internal baterai yang didapat tidak di plot dengan SoC baterai sehingga hubungan atau regresi antara nilai persentase SoC baterai dan impedansi internal baterai tidak diketahui. Wangxin mengukur impedansi internal baterai dengan membagi nilai *peak-to-peak* dari tegangan dan arus baterai. Menggunakan nilai *peak-to-peak* dari tegangan dan arus baterai untuk mendapatkan impedansi internal memiliki kekurangan apabila tegangan dan arus baterai yang terbentuk tidak sinusoidal murni, sehingga harus didapatkan nilai tegangan dan arus efektif nya untuk mendapatkan nilai impedansi internal. Dalam penelitian tersebut tidak ditunjukkan bagaimana cara memisahkan komponen DC dan AC dari arus dan tegangan baterai, sehingga nilai peak to peak tegangan dan arus akan selalu berubah. Penelitian Wangxin hanya sebatas penentuan persentase SoC baterai dan tidak dilanjutkan ke proses pengisian baterai

Berdasarkan permasalahan diatas, pada penelitian tugas akhir ini akan diusulkan sebuah pemodelan berupa simulasi dalam menentukan persentase SoC baterai berbasis impedansi internal baterai menggunakan konverter daya DC-DC. Dalam penelitian ini juga akan dibuat model simulasi dalam mengendalikan sinyal duty cycle. Sinyal duty cycle yang masuk kedalam konverter daya DC-DC akan dikendalikan sehingga nilainya akan membentuk sinyal sinusoidal. Dari penelitian yang dilakukan akan diketahui bagaimana hubungan antara nilai persentase SoC baterai dengan impedansi internal baterai. Selain itu, dalam penelitian ini juga akan dibuat sebuah simulasi pengisian baterai dengan arus konstan. Simulasi ini dibuat untuk mengetahui berapa energi yang harus di suply ke baterai setelah baterai tersebut sudah ditentukan persentase SoC nya

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang diatas, maka permasalahan pada penelitian ini pada umumnya terkait pada pengoperasian konverter DC-DC, yaitu dalam hal :

1. Bagaimana mengatur nilai duty cycle sinyal kendali bagi komponen switch konverter DC-DC agar diperoleh tegangan output DC yang mengandung komponen osilasi (sinusoidal)

2. Bagaimana memanfaatkan output konverter DC-DC untuk mendapatkan impedansi internal baterai
3. Bagaimana mendapatkan hubungan antara SoC baterai dengan nilai impedansi internal baterai
4. Bagaimana mensimulasikan deteksi Z baterai untuk mengestimasi SoC baterai selama proses pengisian secara *realtime*

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Mengetahui cara mengatur nilai duty cycle sinyal kendali bagi komponen switch konverter DC-DC agar diperoleh tegangan output DC yang mengandung komponen osilasi (sinusoidal)
2. Mengetahui cara memanfaatkan output konverter DC-DC untuk mendapatkan impedansi internal baterai
3. Mengetahui cara mendapatkan hubungan antara SoC baterai dengan nilai impedansi internal baterai
4. Mengetahui cara mensimulasikan proses pengisian baterai setelah didapatkan inisial SoC nya

1.4 Batasan Masalah dan lingkup kerja penelitian

Penetapan batasan masalah bertujuan untuk mengurangi kompleksitas permasalahan dalam proposal penelitian ini. Batasan masalah dalam proposal penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Model baterai yang digunakan adalah jenis Lithium – Ion, dan model desain tersebut di desain melalui MATLAB versi 2020a
2. Pengembangan model berisikan strategi membangkitkan gelombang sinusoidal pada tegangan DC di keluaran konverter DC-DC

1.5 Manfaat Penelitian

Tujuan yang diharapkan dari penelitian ini adalah :

1. Temuan dari penelitian ini diharapkan dapat berperan sebagai langkah inovatif dalam meningkatkan sistem penentuan SoC baterai untuk kendaraan listrik
2. Akan menjadi referensi penting untuk penelitian masa depan tentang penentuan SoC baterai pada kendaraan listrik

1.6 Sistematika Penulisan

Penulisan Tugas Akhir ini mengikuti panduan penulisan yang ditetapkan oleh Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Andalas. Berikut adalah Struktur Penulisan dari penelitian ini :

BAB I PENDAHULUAN

Pada bab ini membahas tentang latar belakang, permasalahan, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai dasar teoritis yang mendukung solusi atas permasalahan yang diajukan dalam proposal penelitian ini.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini akan membahas tentang proses penelitian yang umum, Desain rangkaian yang diusulkan dan jadwal pelaksanaan penelitian.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini memberi informasi hasil dan pembahasan mengenai hasil penelitian .

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisi kesimpulan dari hasil dan pembahasan penelitian dan saran untuk penelitian selanjutnya.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Dalam Bab tinjauan pustaka ini berisi tentang landasan teori yang akan menjadi dasar dalam penelitian yang dilakukan, diantaranya :

1. Model baterai
2. Jenis baterai pada kendaraan listrik
3. Metoda penentuan SoC baterai
4. Sub-metode konvensional penentuan SoC baterai

2.2 Baterai

Baterai merupakan sebuah komponen yang dapat mengubah energi kimia menjadi energi listrik yang berguna untuk berbagai perangkat elektronik. Energi listrik yang dihasilkan akan disimpan dalam baterai sebagai sumber daya. Terdapat 2 terminal pada baterai, yaitu terminal listrik. Terdapat dua terminal pada baterai, yaitu terminal positif (katoda) dan terminal negatif (anoda), serta elektrolit yang berfungsi sebagai penghantar. Output dari baterai berupa arus listrik searah (DC). Ada 2 jenis baterai yang umum digunakan, yakni baterai primer (Sekali pakai) dan baterai sekunder (dapat diisi ulang). Pada gambar dibawah menunjukkan dari bentuk umum sebuah baterai.

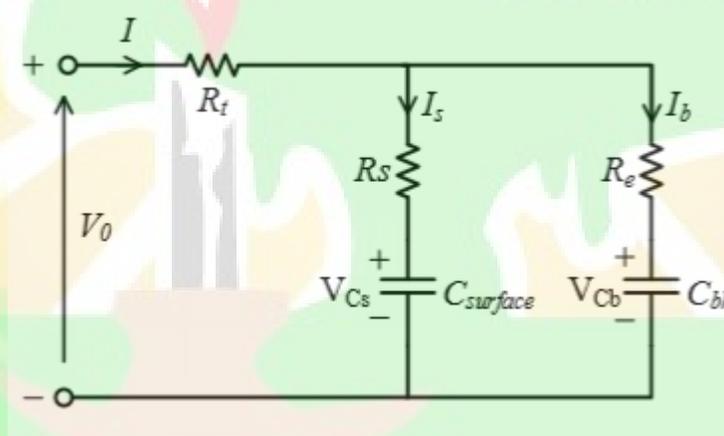


Gambar 2. 1 Bagian-bagian baterai

Kapasitas baterai diukur dalam Ah (ampere hour), yang menunjukkan kemampuan baterai untuk mempertahankan aliran arus sebesar 1 ampere selama 1 jam. Misalnya, jika aliran arusnya adalah 2A, baterai akan habis dalam waktu setengah jam. Sebaliknya, jika aliran arusnya hanya 0,5A, baterai akan bertahan selama 2 jam. Arus pengisian atau pengosongan baterai diukur dengan skala C –

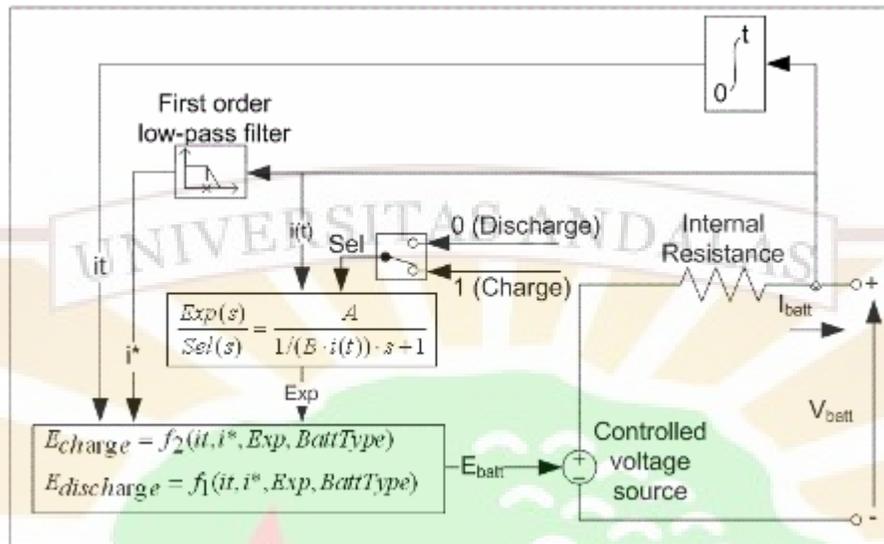
rate. 1 C – rate setara dengan kapasitas nominal baterai. Misalnya, jika sebuah baterai memiliki kapasitas 1 Ah dan diisi dengan 1 C – rate, maka arus pengisian yang dibutuhkan adalah 1A. Dalam kondisi ini, baterai akan terisi penuh dalam waktu satu jam. Jika baterai diisi atau dikosongkan pada 2 C – rate, maka arus yang dibutuhkan adalah 2A

Terdapat beberapa model baterai yang telah digunakan dalam beberapa penelitian , salah satunya adalah model baterai yang diusulkan dalam jurnal oleh T. O. Tin [9]. Model ini dirancang dengan konfigurasi terdiri dari sebuah resistor dan dua rangkaian RC yang disusun secara paralel. Pada model tersebut, salah satu kapasitor berperan sebagai komponen utama penyimpan energi dalam bentuk muatan listrik, dengan nilai kapasitansi yang lebih besar dibandingkan dengan kapasitor lainnya.



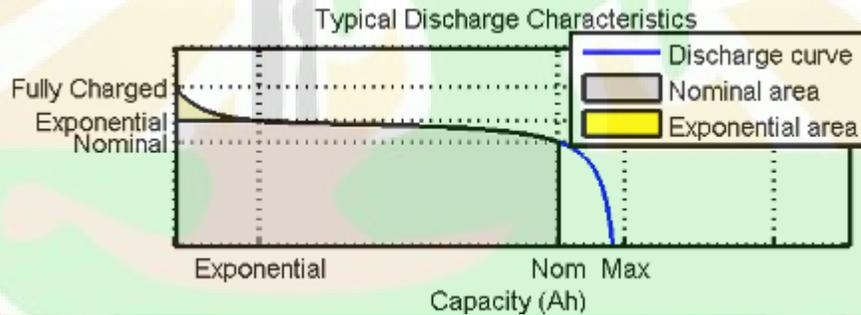
Gambar 2. 2 Model baterai dari jurnal oleh T. O. Tin

Pada *software* simulink, terdapat jenis model baterai yang disediakan. Berikut adalah rangkaian ekuivalen dari model baterai *software* simulink [10]



Gambar 2. 3 Rangkaian dalam baterai

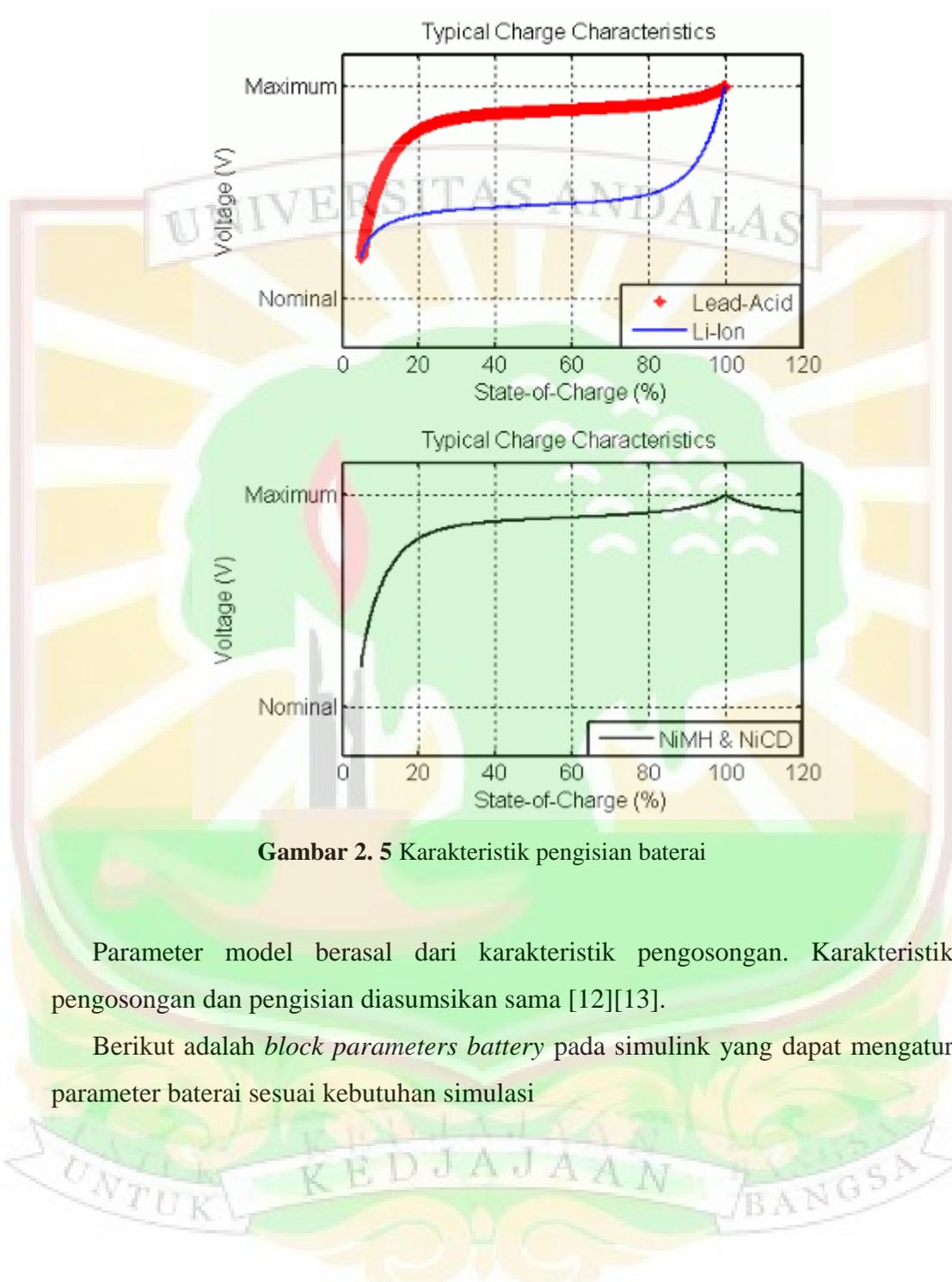
Parameter rangkaian pada model baterai dapat diubah sesuai dengan jenis baterai tertentu dan karakteristik penggunaannya. Kurva pengosongan baterai dibagi menjadi tiga bagian, seperti yang ditunjukkan pada gambar di bawah ini.



Gambar 2. 4 Karakteristik pengosongan baterai

Bagian pertama menunjukkan penurunan tegangan secara eksponensial saat baterai diisi. Lebar penurunan ini bergantung pada jenis baterainya. Bagian kedua menunjukkan muatan yang dapat diambil dari baterai hingga tegangan turun di bawah tegangan nominal baterai. Terakhir, bagian ketiga menunjukkan total pengosongan baterai, di mana tegangan turun dengan cepat [11].

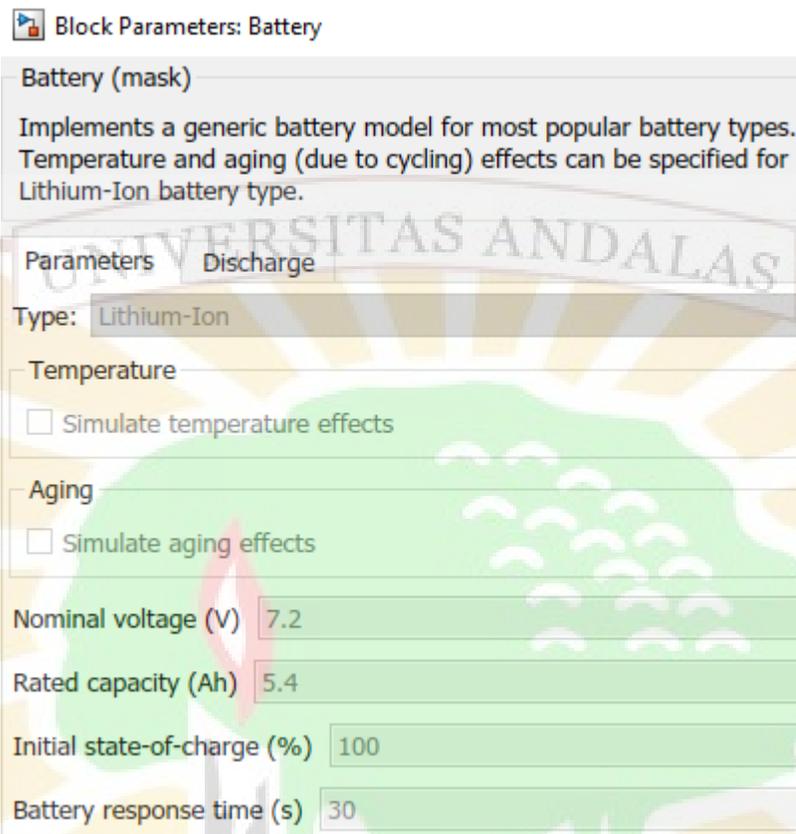
Ketika arus baterai negatif, baterai dalam kondisi pengisian, berikut adalah karakteristik pengisian untuk beberapa jenis baterai.



Gambar 2. 5 Karakteristik pengisian baterai

Parameter model berasal dari karakteristik pengosongan. Karakteristik pengosongan dan pengisian diasumsikan sama [12][13].

Berikut adalah *block parameters battery* pada simulink yang dapat mengatur parameter baterai sesuai kebutuhan simulasi



Gambar 2. 6 Blok pengatur parameter baterai

Pada blok diatas, dapat digunakan fitur yang disediakan untuk mengatur parameter baterai, berikut adalah fitur yang disediakan oleh simulink :

1. *Type – Battery model*

Blok ini menyediakan karakteristik pengisian yang telah ditentukan untuk empat jenis baterai. Untuk baterai Lithium-Ion, blok ini menyediakan model untuk mensimulasikan efek suhu dan penuaan.

2. *Nominal voltage*

Tegangan nominal menggambarkan akhir dari zona linier pada karakteristik pengosongan.

3. *Rated capacity*

Kapasitas terukur adalah kapasitas efektif minimum dari baterai.

4. *Initial State of Charge*

State of Charge atau SOC baterai, yang dinyatakan sebagai persentase dari kapasitas pengisian maksimum, pada awal simulasi. SOC sebesar 100% menunjukkan baterai yang terisi penuh, sementara SOC sebesar 0% menunjukkan baterai yang kosong.

2.1 Jenis – jenis baterai pada kendaraan listrik

Umumnya, baterai dapat dibagi menjadi 2 jenis, yakni baterai primer dan baterai sekunder. Baterai primer hanya dapat digunakan sekali pakai, sementara baterai sekunder dapat diisi ulang setelah digunakan. Dalam konteks kendaraan listrik (EV) dan hibrida (HEV), baterai sekunder sangat penting karena memiliki siklus hidup yang panjang, tingkat kehilangan energi yang rendah dan ramah lingkungan

Beberapa jenis baterai yang sering digunakan dalam kendaraan listrik diantaranya Lithium – ion, asam timbal, nikel – cadmium (NiCd), nikel – metal hibrida (NiMh), dan sebagainya [14].

Tabel 2. 1 Karakteristik dari beberapa jenis baterai

Tipe Baterai	Kepadatan Energi (Wh/Kg)	Waktu Pengisian (Jam)	Suhu Pengisian (°C)	Suhu Pengosongan (°C)	Tingkat Kandungan Racun
Lithium - Ion	150 – 250	1 – 2	0 – 45	-20 – 60	Rendah
Asam timbal	30 – 50	8 – 16	-20 – 50	-20 – 50	Sangat tinggi
NiCd	45 – 80	1 – 2	0 – 45	-20 – 65	Sangat tinggi
NiMh	60 – 120	2 – 4			Rendah

Tabel diatas menampilkan karakteristik utama dari jenis – jenis baterai ini. Dari tabel tersebut, terlihat bahwa baterai Li – Ion secara signifikan lebih unggul dibandingkan dengan jenis baterai lainnya, dari kepadatan energi dan waktu pengisian. Baterai Li – Ion juga diunggulkan sebagai bahan ramah lingkungan

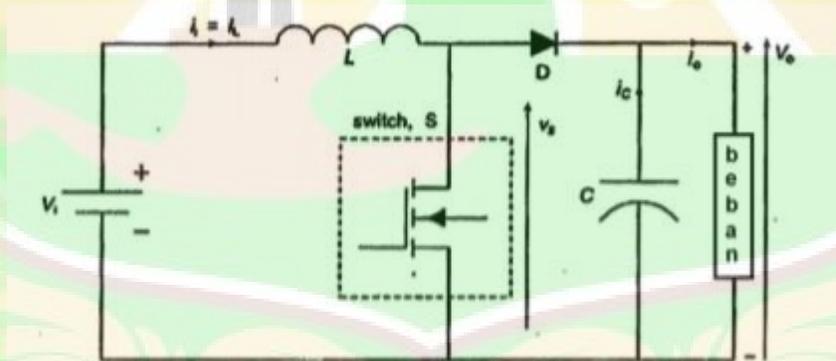
tanpa gas beracun yang perlu dikhawatirkan. Karena alasan – alasan tersebut, baterai Li – Ion menjadi pilihan utama yang sangat baik dalam kendaraan listrik

2.2 Konverter Daya DC-DC

Konverter DC-DC adalah rangkaian elektronik yang memanfaatkan kendali saklar (seperti MOSFET, IGBT, Thyristor, dan lainnya) untuk mengubah sumber tegangan DC dari satu level tegangan ke level tegangan yang berbeda [15].

Diantara jenis-jenis konverter DC-DC, 3 diantaranya adalah konverter buck (menurunkan tegangan DC), konverter boost (menaikkan tegangan DC) dan konverter buck-boost (menaikkan atau menurunkan tegangan DC).

Secara umum, konverter DC-DC terdiri dari perangkat semikonduktor daya (seperti thyristor, BJT daya, MOSFET daya, IGBT, dan lain-lain, yang berfungsi sebagai sakelar), sumber tegangan DC sebagai masukan, induktor, kapasitor, resistor, serta beban keluaran, seperti yang ditunjukkan pada gambar dibawah. Tegangan keluaran pada beban diatur dengan mengubah durasi ON dan OFF saklar, atau yang dikenal sebagai duty cycle [15].

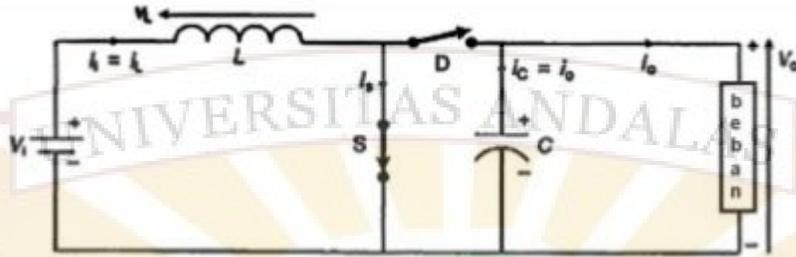


Gambar 2. 7 Rangkaian konverter boost

Gambar diatas merupakan rangkaian konverter boost. Konverter jenis ini dapat menghasilkan tegangan keluaran yang lebih tinggi dari tegangan masukan.

Saat saklar S ON pada $t = 0$, arus akan melewati induktor L dan akan menyimpan arus tersebut dalam bentuk medan magnet. Dioda dalam keadaan off

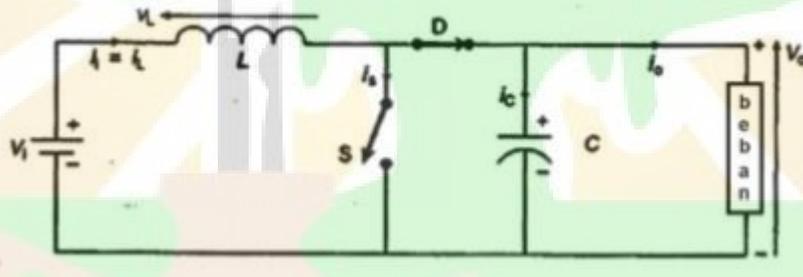
karena anoda berada pada potensial nol karena sakelar. Rangkaian ini dapat dilihat pada gambar dibawah ini



Gambar 2. 8 Saat saklar S ON

Pada periode ini, tegangan yang dirasakan oleh induktor sama dengan tegangan input, dan arus naik secara linear dari I_1 ke I_2 . Persamaan untuk nilai tegangan yang dirasakan oleh induktor adalah sebagai berikut :

$$V_L = L \frac{I_2 - I_1}{T_{on}} = V_i \text{ atau } T_{on} = \frac{L \Delta I_L}{V_i} \quad (2.1)$$



Gambar 2. 9 Saat saklar S OFF

Ketika saklar OFF, arus mengalir ke induktor melalui dioda D, kapasitor C, dan beban. Ini menyebabkan energi yang terakumulasi selama sakelar keadaan ON dipindahkan ke kapasitor, dengan arus pada input sama dengan arus pada induktor, seperti yang terlihat pada gambar diatas. Tegangan di induktor saat saklar off adalah $V_o - V_i$ dan arus turun secara linear dari I_2 ke I_1 . Persamaan tegangan pada induktor menjadi :

$$V_L = L \frac{I_2 - I_1}{T_{off}} = V_o - V_i \text{ atau } T_{off} = \frac{L \Delta I_L}{V_o - V_i} \quad (2.2)$$

Dari persamaan II.1 dan II.2, persamaan untuk ΔI_L adalah :

$$\Delta I_L = \frac{V_i T_{on}}{L} = \frac{V_o - V_i}{L} = T_{off} \quad (2.3)$$

Atau

$$V_o = \frac{V_i T_{on} + V_i T_{off}}{T_{off}} = \frac{T_{on} + T_{off}}{T_{off}} V_i = V_i \frac{T}{T_{off}} \quad (2.4)$$

Atau

$$V_o = \frac{V_i}{1 - D} \quad (2.5)$$

Dari persamaan diatas, rentang nilai D berkisar $0 < D < 1$, $V_o > V_i$, dan mungkin saja nilai V_o dapat bervariasi dari v_1 ke nilai yang tak terbatas. Oleh karena itu, secara umum V_o lebih besar atau sama dengan V_i .

Apabila perangkat penyaklaran dianggap tidak memiliki rugi-rugi, maka daya input ($V_i I_i$) dan daya output ($V_o I_o$) dari konverter adalah sama. Sehingga dari persamaan II.5, didapatkanlah persamaan sebagai berikut :

$$V_i I_i = V_o I_o = \frac{V_i I_o}{1 - D} \text{ atau } I_i = \frac{I_o}{1 - D} \quad (2.6)$$

Dengan menggunakan rumus T_{on} dan T_{off} dari persamaan II.1 dan II.2, frekuensi penyaklaran dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{T_{on} + T_{off}} = \frac{V_i (V_o V_i)}{V_o \Delta I_L L} \quad (2.7)$$

Sehingga dari persamaan II.5 dan II.6, arus riak dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$\Delta I_L = \frac{V_i D}{f L} \quad (2.8)$$

2.3 Metoda penentuan SoC baterai

Menurut Zhang [5], ada 5 metode yang dapat digunakan dalam menentukan SoC pada baterai

2.3.1 *Conventional Method*

Metoda konvensional adalah metoda yang menggunakan algoritma pemrograman sederhana. Metoda ini adalah metoda yang paling umum digunakan dalam aplikasi penentuan SoC baterai

2.3.2 *Adaptive Filter Algorithm*

Adaptive Filter Algorithm dalam teori kontrol modern memberikan pendekatan tambahan untuk memprediksi SOC (State of Charge) baterai dengan lebih tepat dan mengurangi gangguan dari noise terhadap model baterai. Terdapat tiga fungsi utama yang digunakan dalam metode ini. Pertama, adalah bagaimana menggunakan model SOC baterai untuk memprediksi SOC yang telah ditentukan sebagai masukan untuk model. Kedua, adalah model yang seharusnya menghitung tegangan baterai pada SOC yang telah ditentukan sebagai hasil keluaran dari model. Ketiga, adalah bagaimana menghitung gain untuk memperbarui SOC dengan membandingkan tegangan yang diukur dengan tegangan model.

2.3.3 *Learning Algorithm*

Learning Algorithm adalah algoritma yang dibuat untuk mengelompokkan kejadian, menemukan pola dalam sampel, meramalkan hasil, dan mengambil keputusan yang terinformasi. Algoritma ini dapat digunakan secara individual atau dikombinasikan untuk mencapai akurasi optimal saat menghadapi data yang rumit dan tidak terduga [16].

2.3.4 *Non-Linear Observers*

Non-linear observers adalah algoritma matematika yang digunakan dalam teori kontrol untuk memperkirakan keadaan atau variabel internal dari suatu sistem dinamis dengan menggunakan pengukuran masukan dan keluaran yang tersedia, bahkan jika model sistem tersebut bersifat non-linear atau tidak lengkap. Dengan kata lain, mereka memberikan perkiraan yang

akurat tentang keadaan internal sistem berdasarkan data yang dapat diukur, meskipun sistem tersebut tidak mengikuti model matematis yang sederhana atau lengkap.

2.3.5 Others and Hybrid Algorithm Method

Hybrid Algorithm method menggabungkan dua atau lebih algoritma untuk meningkatkan efisiensi dan akurasi model baterai serta menghindari kekurangan yang mungkin ada pada penggunaan satu algoritma saja. Pendekatan ini tidak hanya menghasilkan hasil yang handal dan efektif, tetapi juga mengurangi biaya sistem manajemen baterai. Namun, metode ini melibatkan perhitungan matematis yang kompleks, membutuhkan penyimpanan memori yang besar, dan memerlukan daya komputasi yang tinggi.

2.4 Conventional Method

Metode konvensional dalam menentukan nilai SoC pada baterai terdiri dari *Ampere-hour Counting*, *The Open Circuit Method*, *The Impedance and Internal Resistance Method* dan *Model-based Method* [5]

2.4.1 Ampere-hour Counting

Ampere-hour Counting (Ah) adalah metode yang sederhana untuk memperkirakan *State of Charge* (SOC) dari baterai dengan menggunakan kompleksitas komputasi yang rendah. Metode ini menghitung sisa muatan baterai dengan cara mengintegrasikan arus pengisian atau pengosongan yang terjadi. Dirumuskan dengan :

$$SoC(k) = SoC(0) - \frac{T}{C_n} \int_0^k (\eta \cdot I(t) - S_d) dt \quad (2.9)$$

- Keterangan :
- SoC (0) : Nilai SoC awal pada baterai
 - I (t) : Jumlah arus pada waktu t
 - T : Perida pengambilan sampel
 - C_n : Kapasitas nominal baterai

η : Effisiensi Coulomb

S_d : *Self-discharging rate*

Kelebihan utama dari metode ini adalah biaya komputasi yang rendah, sehingga metode ini sering digunakan untuk memperkirakan SOC (State of Charge) baterai. Namun, kelemahannya adalah ketidakmampuannya untuk tetap akurat dalam jangka waktu yang lama. Ketidakpastian SOC awal, penurunan kapasitas, laju pengosongan diri, dan kesalahan sensor arus merupakan faktor penyebab ketidakakuratan dalam metode penghitungan Ah. Untuk meningkatkan akurasi metode Ah, perlu dilakukan koreksi dan penyesuaian secara berkala terhadap kapasitas awal baterai, nilai SOC, serta drift sensor arus .

2.4.2 Open-circuit Voltage

Metode OCV bergantung pada hubungan antara tegangan terminal baterai saat kondisi tanpa beban (OCV) dan tingkat pengisian baterai (SOC). OCV terjadi ketika baterai mencapai keseimbangan internal tanpa beban. Meskipun OCV baterai sedikit dipengaruhi oleh suhu baterai, penelitian ini dilakukan pada kondisi suhu yang tetap. Penulis menganggap bahwa suhu pak baterai pada kendaraan listrik (EV/HEV) diatur dengan baik oleh sistem manajemen suhu, sehingga efek suhu terhadap OCV tidak dijadikan pertimbangan dalam penelitian ini .

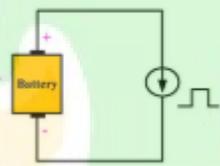
Karena tingkat pengisian (SOC) dalam baterai lithium-ion bergantung pada jumlah lithium yang terbenam dalam bahan aktifnya, OCV (tegangan sirkuit terbuka) dapat digunakan sebagai perkiraan SOC setelah baterai istirahat cukup untuk mencapai keseimbangan. Umumnya, terdapat hubungan linier yang kasar antara SOC dan OCV [17]. Namun, hubungan ini tidak sama untuk semua jenis baterai dan dipengaruhi oleh kapasitas serta jenis bahan yang digunakan dalam baterai tersebut. Sebagai contoh, baterai timbal-asam menunjukkan hubungan linier antara SOC dan OCV, sedangkan baterai lithium-ion tidak menunjukkan hubungan yang sama [5].

2.4.3 Impedance and Internal Resistance Method

Beberapa metode pengukuran resistansi baterai telah diusulkan dalam beberapa literatur [18], [19], [20]. Metode-metode ini dapat diklasifikasikan menjadi dua kategori utama, yaitu metode beban DC dan metode injeksi sinyal AC. Seperti yang diilustrasikan pada Gambar dibawah, dalam metode beban DC, baterai akan dikosongkan dengan arus beban DC sebesar I_1 selama T_1 , lalu dengan arus beban lain sebesar I_2 selama T_2 . Resistansi DC dari baterai dalam metode ini ditentukan oleh

$$z_{battery\ DC} = \frac{V_1 - V_2}{I_2 - I_1} \quad (2.10)$$

Di mana V_1 dan V_2 adalah tegangan terminal baterai ketika diberi arus beban DC masing-masing sebesar I_1 dan I_2 . Metode beban dc ini hanya menghasilkan nilai resistansi DC ohmik dari baterai.

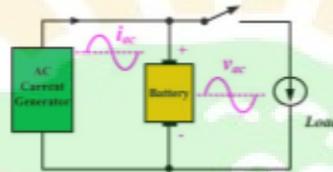


Gambar 2. 10 Rangkaian metode pengukuran tahanan beban DC

Di sisi lain, metode injeksi sinyal AC lebih sering digunakan untuk mengukur impedansi AC baterai. Ide dasarnya adalah memberikan sinyal arus/tegangan AC sinusoidal kecil pada baterai dengan frekuensi tertentu, seperti yang diilustrasikan pada gambar dibawah. Kemudian, dilakukan pengukuran respons tegangan/arus AC baterai terhadap sinyal arus/tegangan AC yang diberikan untuk menentukan impedansi AC baterai menggunakan persamaan ini.

$$z_{battery}(f) = \frac{V_{ac}}{I_{ac}} e^{j\phi_z} \quad (2.11)$$

Di mana V_{ac} dan I_{ac} adalah amplitudo puncak dari komponen AC pada tegangan baterai dan arus baterai, masing-masing. Sedangkan ϕ_z adalah fase impedansi baterai. Metode injeksi sinyal AC ini relatif lebih rumit dan mahal karena memerlukan perangkat tambahan atau sistem rangkaian untuk menghasilkan sinyal eksitasi AC yang dibutuhkan dan untuk mengukur responsnya.



Gambar 2. 11 Rangkaian metode pengukuran impedansi injeksi sinyal AC

2.4.4 Model-base Method

Dalam pendekatan konvensional, pendekatan-pendekatan tersebut belum memadai untuk memperoleh nilai SOC secara online. Untuk mencapai nilai SOC online yang akurat, perlu dilakukan pengembangan model-model baterai. Salah satu model baterai yang umum digunakan meliputi model elektrokimia dan model rangkaian setara (ECMs) [5].

Model-model ECM saat ini adalah yang paling umum digunakan. Umumnya, ECM menggunakan resistansi dan elemen RC untuk mensimulasikan karakteristik listrik dari sel baterai lithium-ion (LiB). Sebuah ECM yang ideal harus mampu mensimulasikan tegangan LiB yang sesungguhnya di bawah berbagai rangsangan arus. Namun, dalam praktiknya, beberapa fitur dari LiB tidak dapat direpresentasikan dengan baik oleh elemen-elemen rangkaian, seperti efek histeresis atau efek Warburg. Terdapat dua metode yang digunakan untuk mengestimasi SOC menggunakan ECM. Metode pertama adalah pendekatan langsung di mana SOC diperkirakan langsung melalui identifikasi parameter ECM. OCV adalah parameter ECM yang paling umum digunakan untuk estimasi SOC. Metode kedua menggunakan nilai SOC yang telah ditentukan untuk

menghitung OCV, kemudian tegangan LiB diestimasi menggunakan ECM. Dengan membandingkan tegangan model dengan yang diukur, nilai SOC yang baru dimodifikasi. Kedua metode ini menerapkan hubungan SOC-OCV dalam ECM untuk mengestimasi SOC.

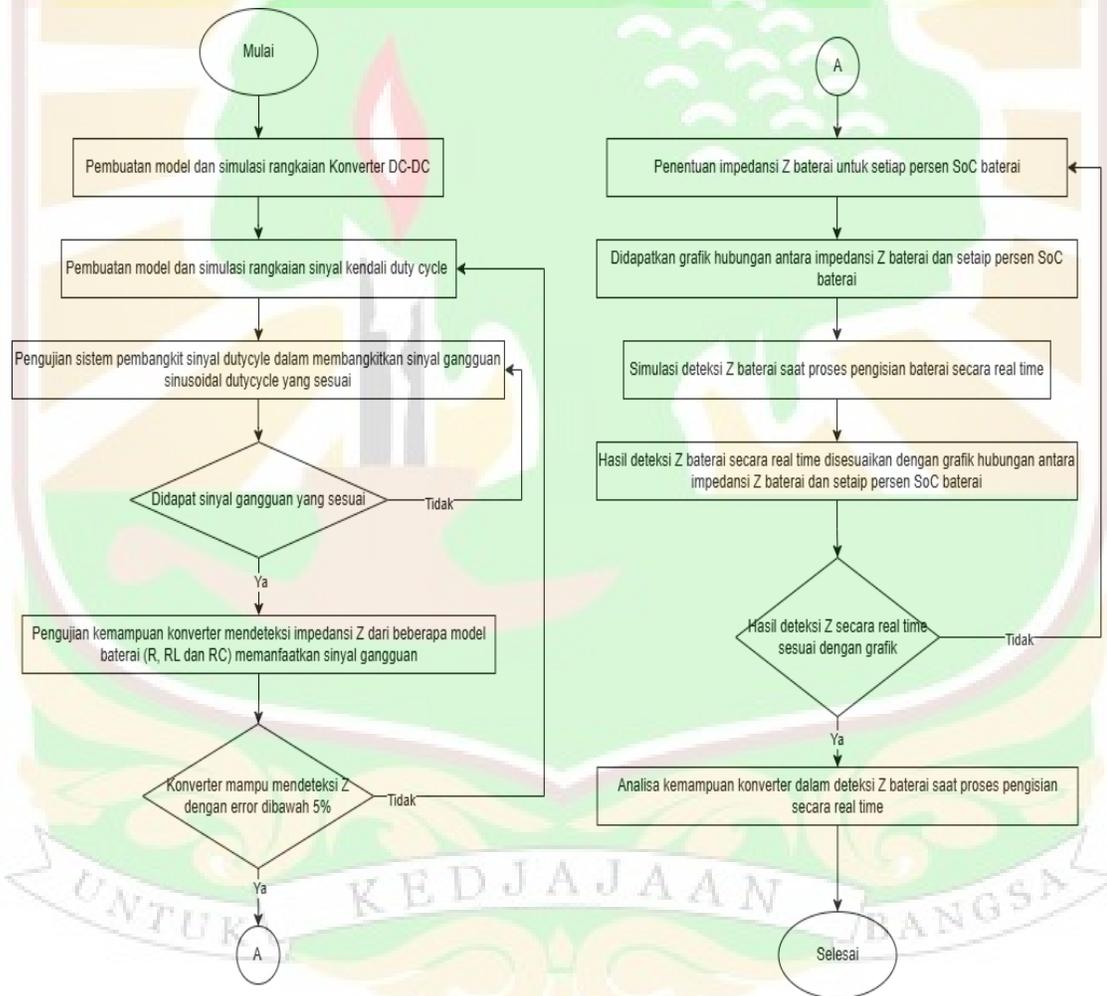


BAB III METODE PENELITIAN

Pada bab ini akan dibahas mengenai penyelesaian masalah yang telah dibahas di bab 1

3.1 Alur Penelitian

Alur penelitian disusun untuk memfasilitasi pemahaman mengenai langkah-langkah yang terlibat dalam penelitian ini. Diagram alir penelitian dapat digambarkan dalam Gambar 3.1.



Gambar 3. 1 Diagram alir penelitian

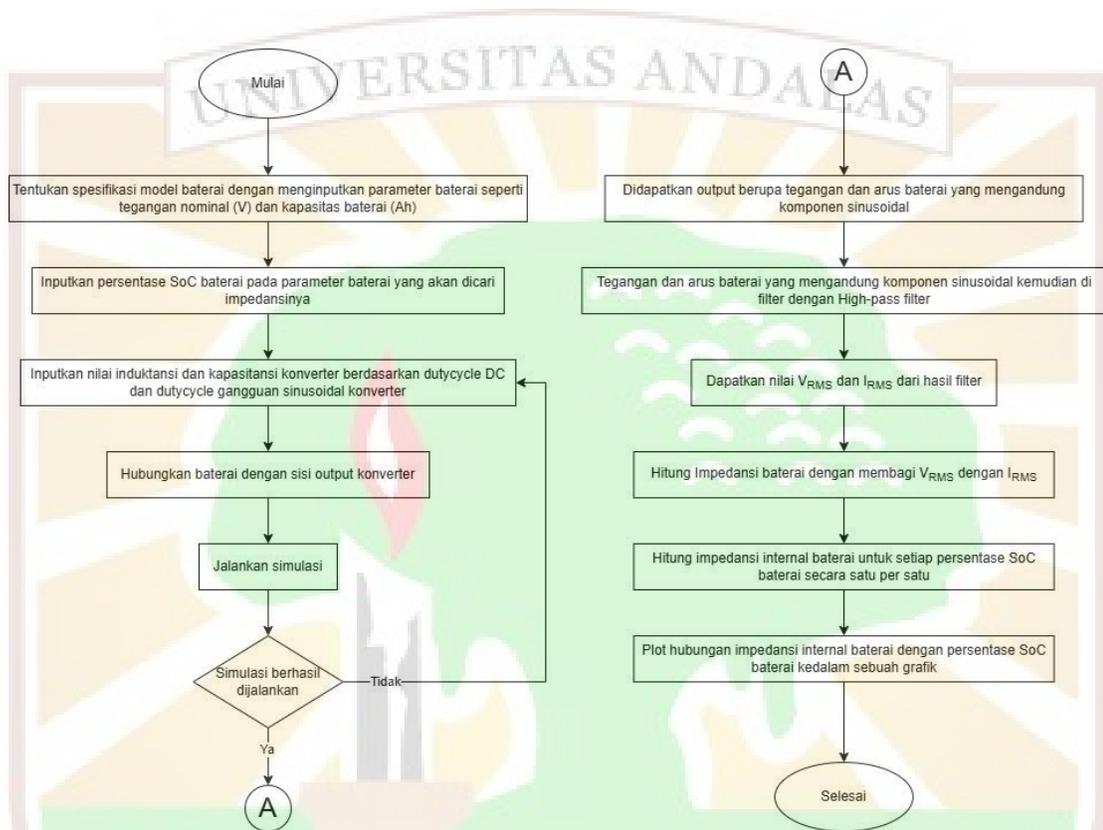
Langkah awal dalam penelitian ini adalah merancang model dan simulasi rangkaian konverter DC-DC. Proses ini mencakup penentuan parameter utama konverter, seperti nilai induktansi dan kapasitansi. Tahap berikutnya adalah pengembangan model dan simulasi pembangkit sinyal gangguan sinusoidal pada duty cycle. Proses ini melibatkan modulasi beberapa sinyal untuk menghasilkan sinyal duty cycle yang mengandung komponen sinusoidal. Sinyal yang dihasilkan akan digunakan sebagai kontrol untuk mengatur saklar pada konverter.

Setelah memperoleh sinyal yang sesuai, konverter DC-DC dan sistem kendalinya yang mampu membangkitkan sinyal sinusoidal, terlebih dahulu diuji dalam level simulasi komputer untuk melihat kemampuan konverter dalam membangkitkan tegangan DC yang mengandung komponen sinusoidal dan dalam mendapatkan impedansi sebuah beban. Tiga jenis konfigurasi beban yang memodelkan baterai diuji yaitu beban model R, RL dan RC. Jika konverter mampu mendeteksi nilai impedansi dengan tingkat kesalahan (error) kurang dari 5%, maka langkah selanjutnya adalah menentukan nilai impedansi model baterai dari library simulink pada berbagai tingkat SoC. Tahap ini bertujuan untuk mendapatkan hubungan antara impedansi baterai dan persentase SoC.

Setelah hubungan antara impedansi dan SoC diperoleh, dilakukan simulasi untuk mendeteksi nilai impedansi baterai selama proses pengisian secara real-time. Hasil simulasi ini yang berupa impedansi Z baterai pada waktu tertentu kemudian dibandingkan dengan grafik hubungan yang telah diperoleh sebelumnya. Jika hasil simulasi menunjukkan kesesuaian dengan grafik tersebut, maka analisis kemampuan konverter dalam mendeteksi nilai impedansi baterai dilakukan secara baik.

3.2 Prosedur pengujian

3.2.1 Proses pengukuran impedansi internal model baterai SIMULINK



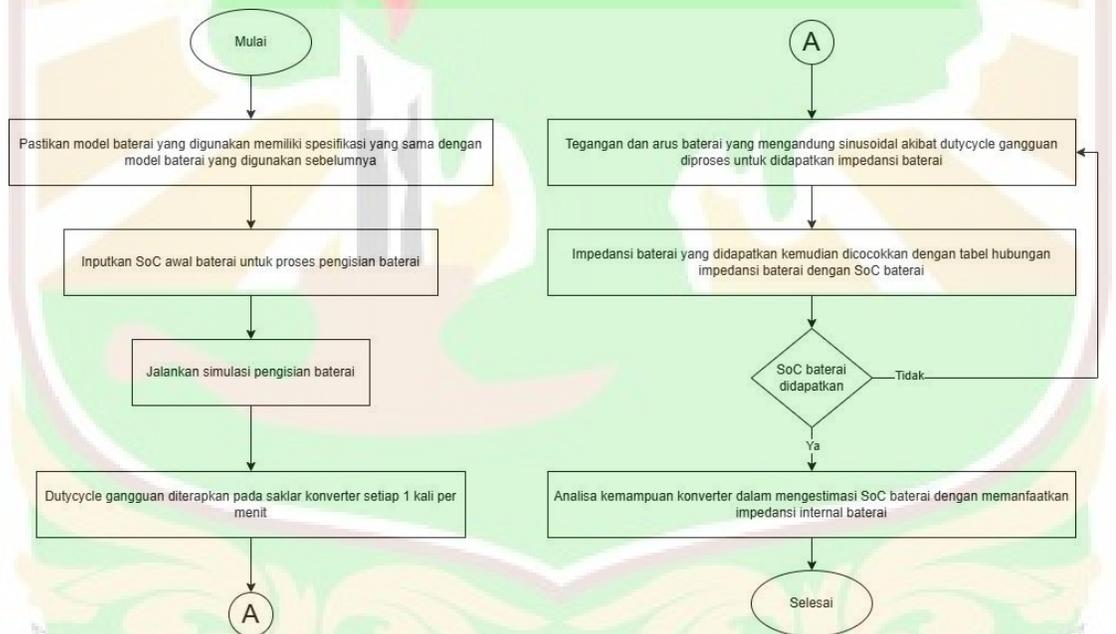
Gambar 3. 2 Diagram Proses pengukuran impedansi internal baterai

Langkah awal dalam proses simulasi adalah menentukan spesifikasi model baterai pada Simulink dengan menginput parameter utama, seperti tegangan nominal dan kapasitas baterai. Setelah itu, persentase SoC baterai yang akan dihitung impedansi internalnya diatur sebagai parameter masukan. Selanjutnya, nilai induktansi dan kapasitansi konverter diinput berdasarkan nilai duty cycle DC dan duty cycle gangguan yang telah ditentukan. Model baterai kemudian dihubungkan ke sisi output konverter agar baterai berada dalam kondisi pengisian. Apabila simulasi berhasil dijalankan, hasil yang diperoleh berupa tegangan dan arus baterai yang mengandung komponen sinusoidal akibat pengaruh sinyal gangguan sinusoidal pada duty cycle. Tegangan dan arus tersebut selanjutnya diproses menggunakan filter high-pass dengan tujuan

menghilangkan komponen DC. Hasil tegangan dan arus yang telah difilter kemudian dihitung nilai tegangan RMS dan arus RMS-nya. Berdasarkan kedua parameter ini, nilai impedansi internal baterai dapat dihitung dengan membagi tegangan RMS dengan arus RMS. Proses ini diulang untuk setiap persentase SoC baterai hingga diperoleh data impedansi baterai untuk seluruh rentang SoC. Langkah terakhir adalah memvisualisasikan hubungan antara impedansi internal baterai dan persentase SoC dalam bentuk grafik.

Setelah memperoleh data tegangan dan arus pada filter, langkah selanjutnya adalah menghitung nilai Root Mean Square (RMS) dari tegangan dan arus tersebut. Nilai RMS ini berfungsi untuk mengukur besaran tegangan dan arus tanpa memperhitungkan perbedaan fase antara keduanya

3.2.2 Proses estimasi SoC baterai menggunakan impedansi internalnya secara real time



Gambar 3. 3 Estimasi SoC baterai menggunakan impedansi internalnya secara real time

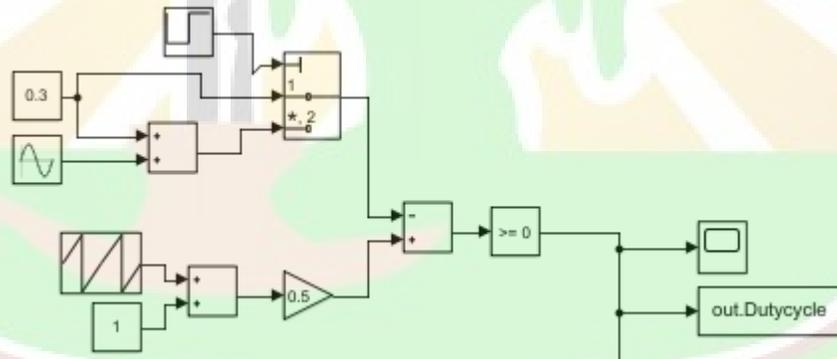
Sebelum memulai proses pengisian, pastikan bahwa model baterai yang digunakan sama dengan model baterai yang sebelumnya digunakan untuk mendapatkan grafik hubungan antara impedansi internal baterai dengan persentase SoC. Setelah itu,

masukkan nilai SoC awal baterai sebagai parameter masukan untuk proses pengisian. Dalam proses deteksi impedansi Z secara real-time selama pengisian, duty cycle gangguan diterapkan pada saklar konverter setiap satu menit sekali. Pendekatan ini memungkinkan pemantauan kondisi impedansi internal baterai dan nilai SoC secara berkala setiap menit. Ketika duty cycle gangguan diterapkan, tegangan dan arus baterai yang mengandung komponen sinusoidal akan diperoleh. Tegangan dan arus tersebut kemudian diproses untuk menghitung nilai impedansi Z baterai. Nilai impedansi Z yang diperoleh selanjutnya dicocokkan dengan tabel hubungan antara impedansi internal baterai dan persentase SoC. Hasil analisis ini digunakan untuk mengevaluasi kemampuan konverter dalam mendeteksi dan menghitung nilai impedansi Z baterai selama proses pengisian.

3.3 Perancangan Sistem

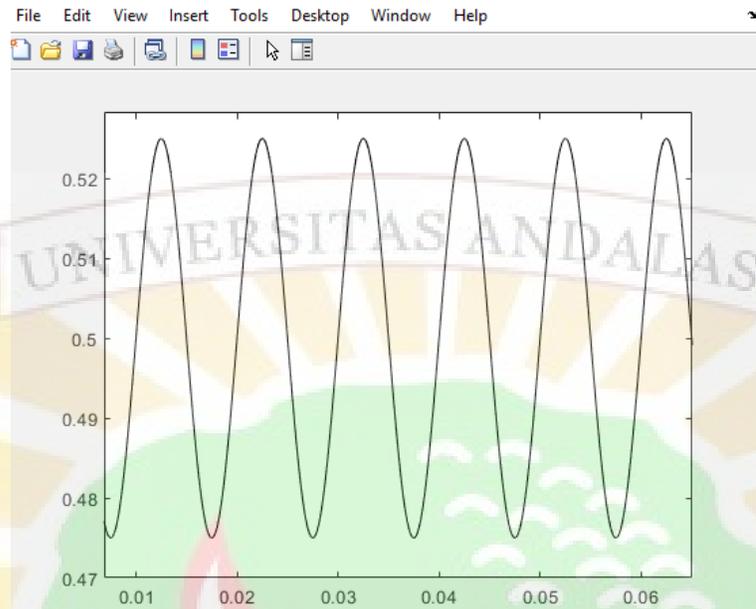
3.3.1 Proses pembentukan sinyal gangguan sinusoidal duty cycle

Dibawah ini merupakan gambar proses pembentukan sinyal gangguan sinusoidal duty cycle



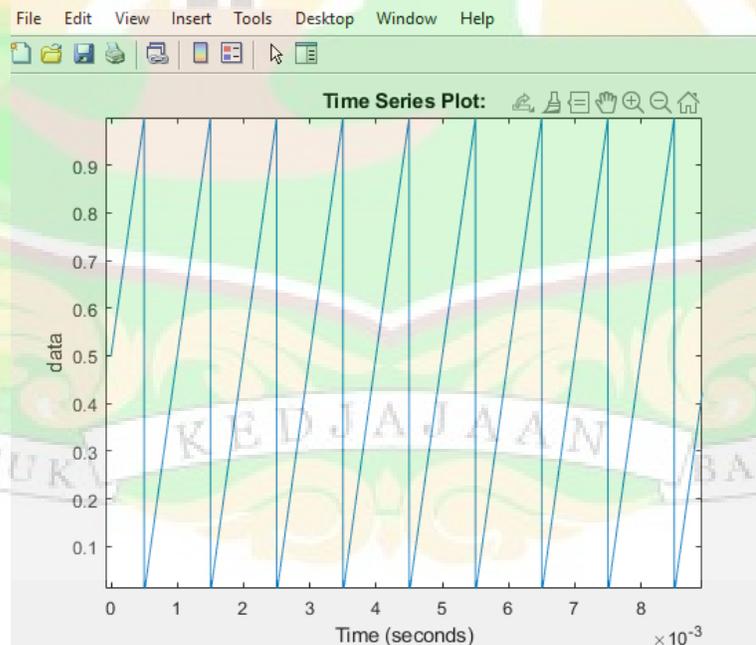
Gambar 3. 4 Rangkaian pembentukan sinyal gangguan sinusoidal duty cycle

Pembentukan sinyal gangguan ini dimulai dengan sebuah sinyal sinusoidal dengan amplitudo 0,025 dengan frekuensi 100 Hz. Sinyal sinusoidal tersebut ditambah dengan sinyal konstan 0,5 agar sinyal sinusoidal berada diatas nilai 0.



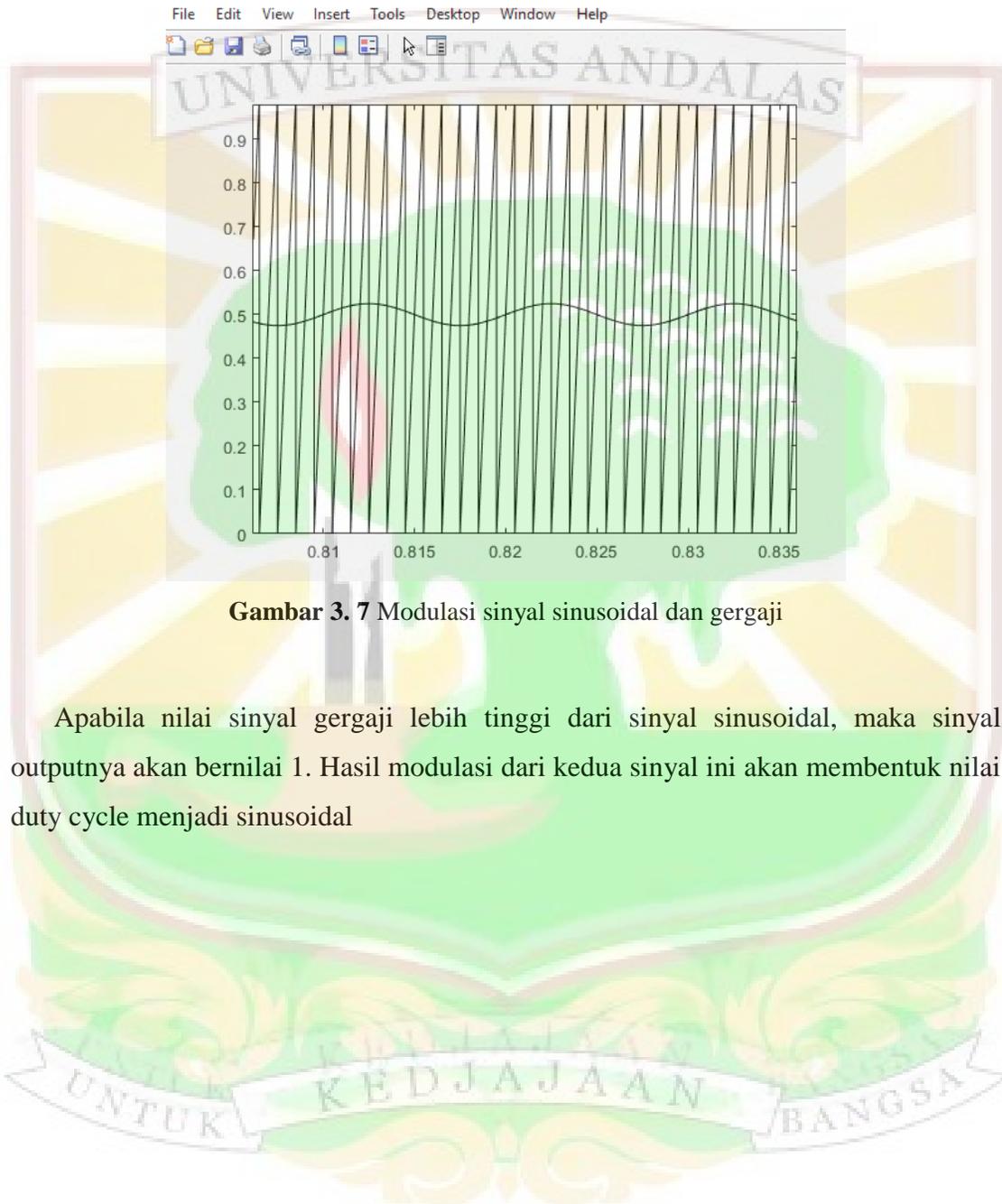
Gambar 3. 5 Sinyal Sinusoidal, Amplitudo 0.025, Frekuensi 50 Hz

Kemudian dibuat sebuah sinyal gergaji dengan amplitudo 1 dengan frekuensi tertentu. Sinyal gergaji ini ditambah dengan sinyal konstan 1 agar sinyal berada diatas nilai 0. Sinyal tersebut dikali dengan 0,5 agar amplitudo sinyal menjadi 0 – 1. Frekuensi sinyal gergaji ini nantinya yang akan mengatur frekuensi penyaklaran konverter



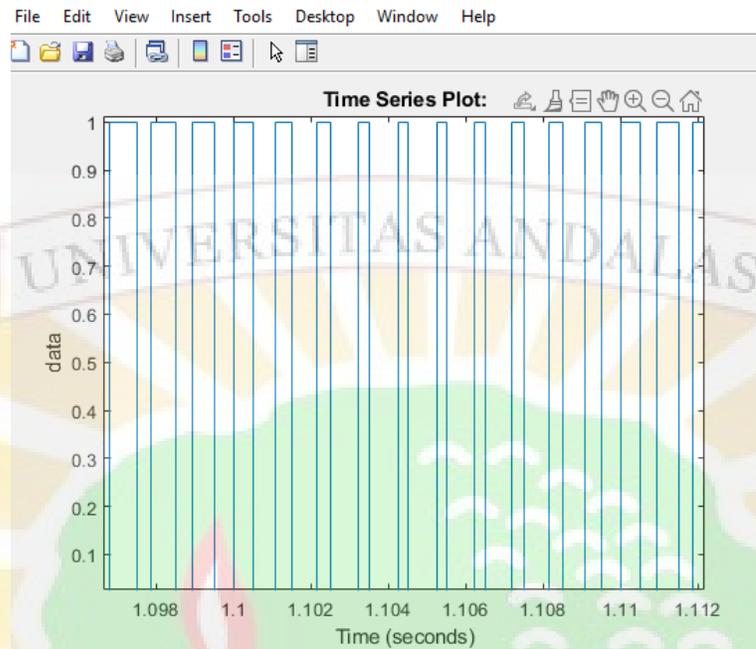
Gambar 3. 6 sinyal gergaji, Amplitudo 1, Frekuensi 1000 Hz

Sinyal sinusoidal dan sinyal gergaji ini akan dimodulasi. Kedua sinyal ini akan diteruskan ke blok Add.



Gambar 3. 7 Modulasi sinyal sinusoidal dan gergaji

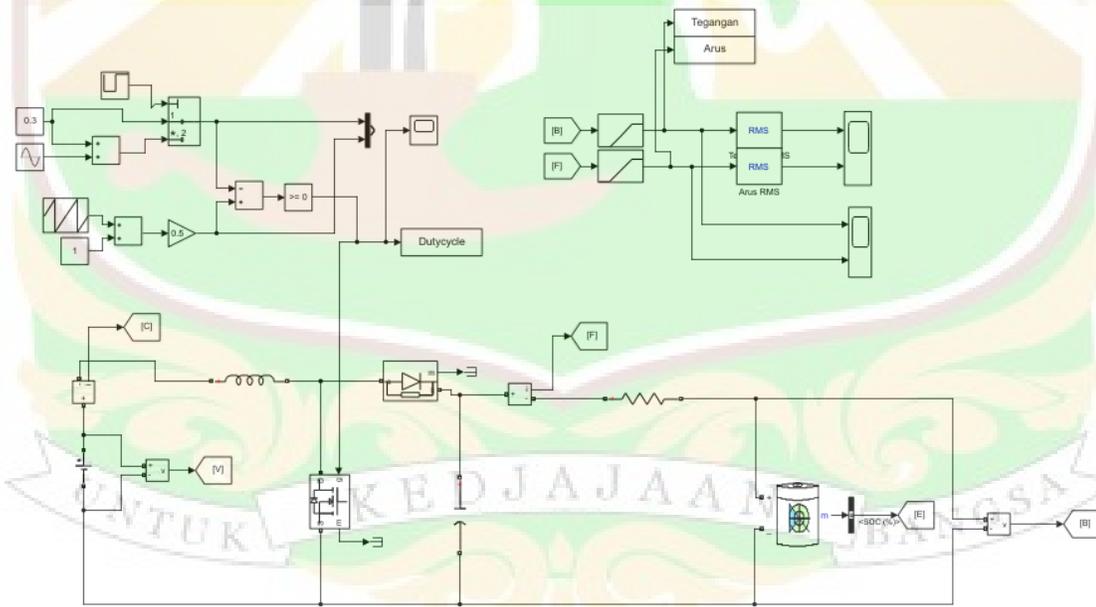
Apabila nilai sinyal gergaji lebih tinggi dari sinyal sinusoidal, maka sinyal outputnya akan bernilai 1. Hasil modulasi dari kedua sinyal ini akan membentuk nilai duty cycle menjadi sinusoidal



Gambar 3. 8 Sinyal hasil modulasi

3.3.2 Pengukuran impedansi internal model baterai SIMULINK

Dibawah ini merupakan gambar rangkaian proses pengukuran impedansi internal model baterai SIMULINK



Gambar 3. 9 Rangkaian pengukuran impedansi internal model baterai SIMULINK

Pada saat simulasi, mula-mula sistem kendali pada saklar konverter didesain membangkitkan dutycycle bagi komponen konverter bernilai tetap pada periode switching frekuensi tertentu, akibatnya output dari konverter menghasilkan output DC yang tetap sebanding dengan dutycycle tersebut. Kemudian pada waktu tertentu t , dutycycle diubah secara sinusoidal, hal ini akan membangkitkan tegangan dan arus keluaran konverter yang mengandung komponen sinusoidal. Tegangan dan arus tersebut diukur menggunakan scope untuk menampilkan bentuk gelombangnya. Setelah data gelombang tegangan dan arus keluaran dari konverter diperoleh, langkah berikutnya adalah memproses kedua gelombang tersebut menggunakan filter high-pass. Proses ini dilakukan untuk menghilangkan komponen DC pada gelombang tegangan dan arus, sehingga hanya komponen sinyal AC atau gelombang sinusoidal murni yang tersisa. Langkah selanjutnya adalah menghitung nilai RMS dari tegangan dan arus baterai yang mengandung komponen sinusoidal menggunakan rumus [21] :

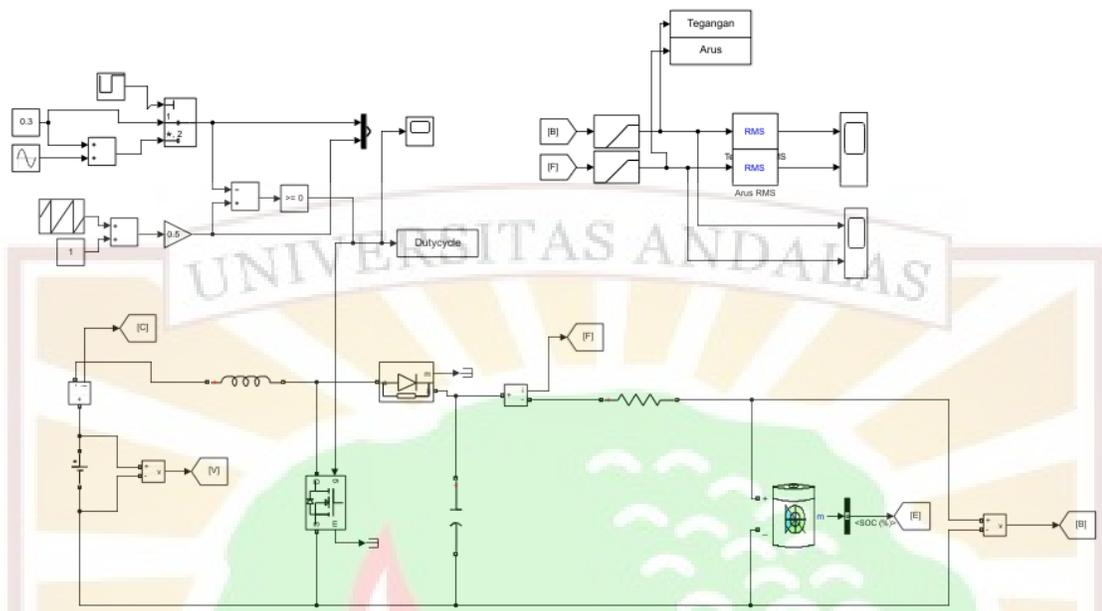
$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{X_1^2 + X_2^2 + X_3^2 + \dots + X_n^2}{n}} \quad (3.1)$$

Setelah memperoleh data tegangan dan arus RMS, langkah berikutnya adalah menghitung nilai impedansi baterai dengan membagi tegangan RMS dengan arus RMS menggunakan rumus :

$$Z = \frac{V_{RMS}}{I_{RMS}} \quad (3.2)$$

3.3.3 Proses estimasi SoC baterai menggunakan impedansi internalnya secara real time

Dibawah ini merupakan gambar rangkaian proses pengisian baterai



Gambar 3. 10 Rangkaian estimasi SoC baterai menggunakan impedansi internalnya secara real time

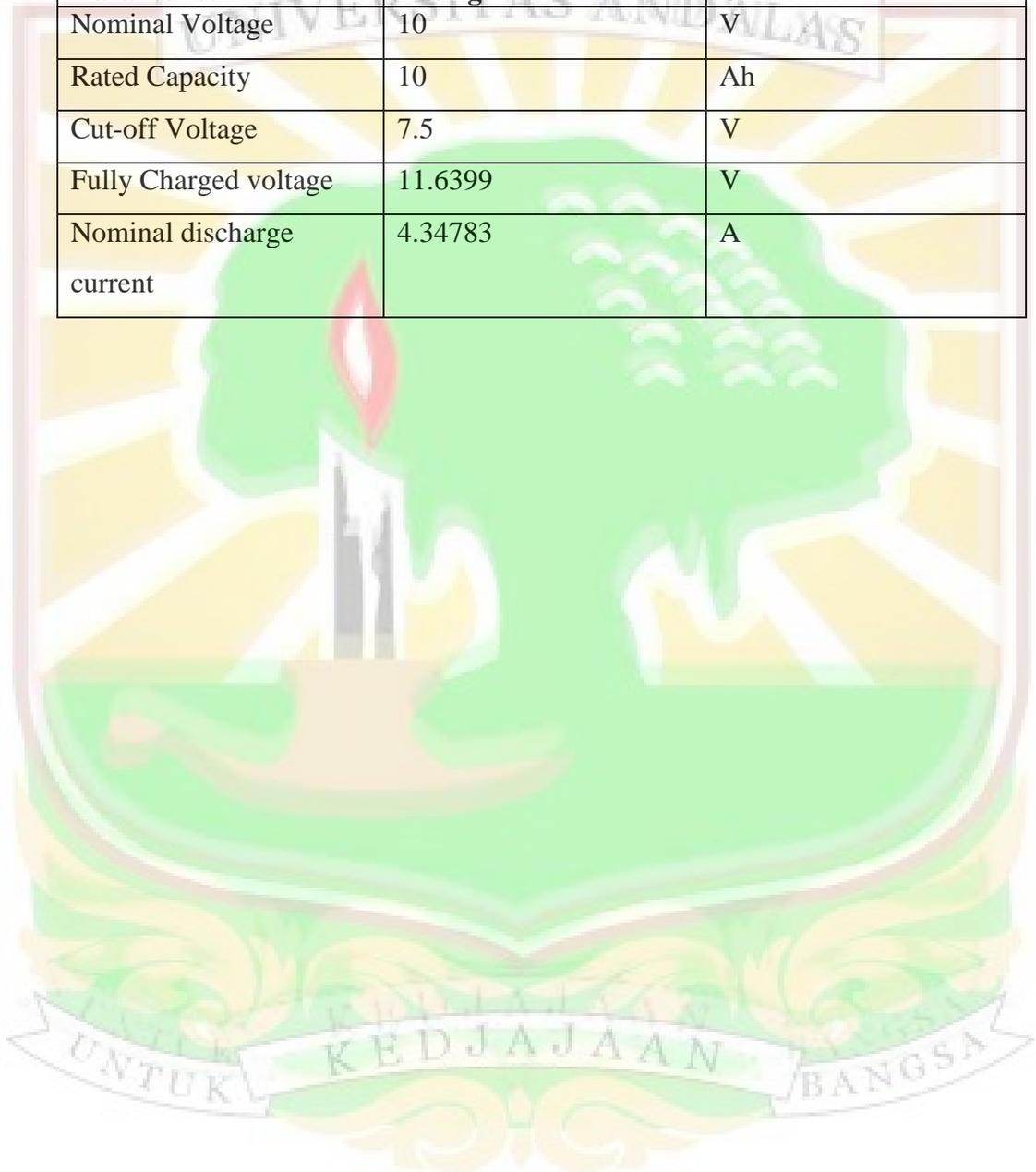
Rangkaian diatas merupakan rangkaian pengisian baterai menggunakan Konverter daya jenis boost konverter dengan suply tegangan bernilai konstan. Tegangan dari sumber suplai akan ditingkatkan sesuai dengan nilai duty cycle yang diterapkan pada saklar konverter. Arus output dari konverter kemudian digunakan untuk mengisi baterai. Akibat adanya sinyal gangguan sinusoidal pada duty cycle, tegangan dan arus baterai yang dihasilkan akan mengandung komponen sinusoidal. Tegangan dan arus baterai tersebut selanjutnya diproses melalui filter high-pass untuk memisahkan komponen sinusoidal dari komponen DC. Setelah itu, nilai tegangan dan arus RMS dari sinyal hasil filter dihitung, sehingga diperoleh tegangan dan arus RMS. Dengan membagi nilai tegangan RMS dengan arus RMS, nilai impedansi internal baterai dapat dihitung.

3.4 Jenis baterai yang akan digunakan

Jenis baterai yang akan digunakan pada penelitian ini adalah jenis baterai Lithium – Ion. Berikut adalah tabel yang menjelaskan spesifikasi baterai yang akan digunakan

Tabel 3. 1 Karakteristik dari baterai yang akan digunakan dalam penelitian

Karakteristik	Rating	Unit
Nominal Voltage	10	V
Rated Capacity	10	Ah
Cut-off Voltage	7.5	V
Fully Charged voltage	11.6399	V
Nominal discharge current	4.34783	A

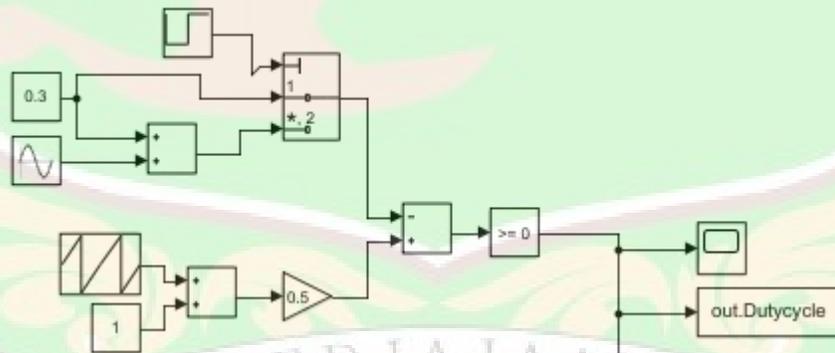


BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

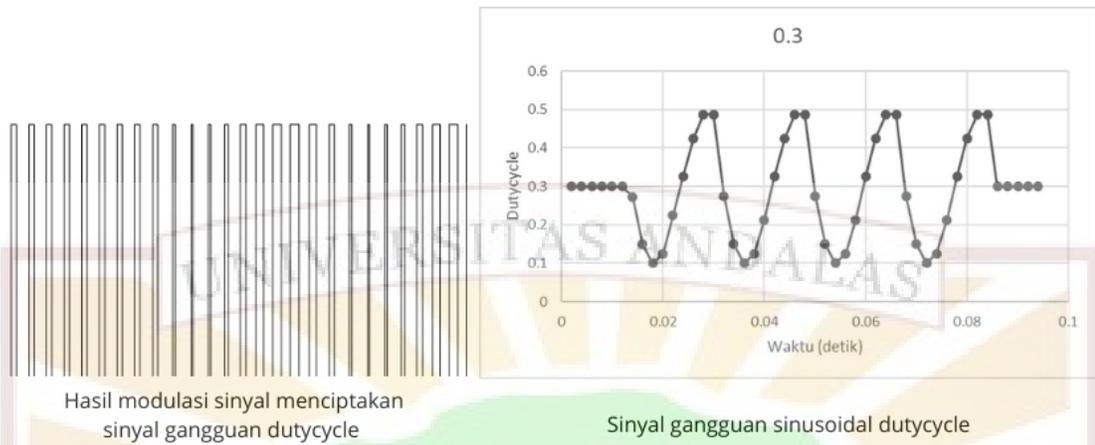
Pada Bab ini akan dibahas mengenai hasil dari switching konverter dalam menciptakan tegangan dan arus baterai menjadi gelombang yang berisolasi, juga akan dibahas bagaimana tegangan dan arus baterai yang berisolasi ini digunakan dalam menentukan impedansi internal baterai dan hubungannya dengan SoC baterai

4.1 Pengujian sistem penghasil sinyal duty cycle

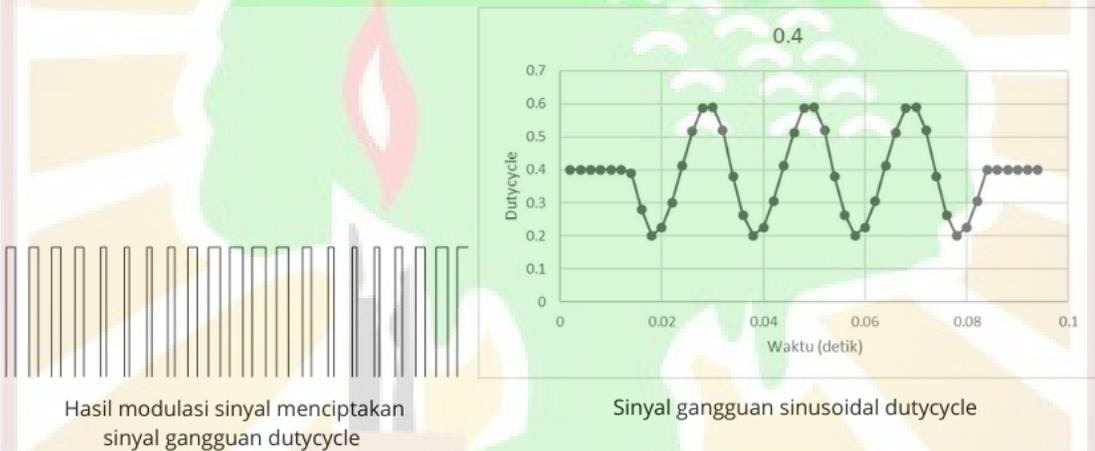
Sebelum menerapkan sinyal duty cycle ke konverter, dilakukan pengujian pada sistem pembangkit sinyal duty cycle untuk memastikan kesesuaian sinyal yang dihasilkan. Data sinyal duty cycle ini diperoleh dari pengukuran menggunakan scope pada rangkaian yang ditunjukkan pada Gambar 4.1. Pengujian dilakukan pada berbagai nilai duty cycle DC, yaitu 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, dan 0.7, dengan tujuan untuk mengamati bentuk gelombang sinyal dan mengidentifikasi duty cycle mana yang menghasilkan komponen sinyal gangguan sinusoidal yang paling stabil dan sesuai. Hal ini bertujuan untuk memastikan kualitas sinyal yang optimal saat sinyal tersebut diterapkan ke dalam sistem konverter. Data sinyal dutycycle yang terbentuk kemudian di plot kedalam file excel agar gelombang sinyal gangguan dapat dilihat. Gelombang sinyal gangguan duty cycle dapat dilihat pada gambar 4.2 – 4.6



Gambar 4. 1 Rangkaian penghasil sinyal dutycycle



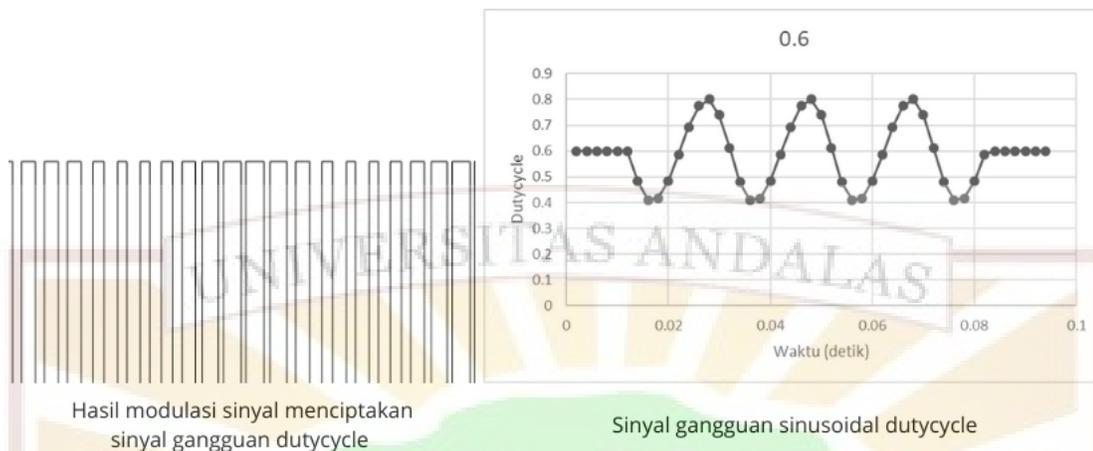
Gambar 4. 2 Gelombang sinyal gangguan sinusoidal dutycycle pada dutycycle DC 0.3



Gambar 4. 3 Gelombang sinyal gangguan sinusoidal dutycycle pada dutycycle DC 0.4



Gambar 4. 4 Gelombang sinyal gangguan sinusoidal dutycycle pada dutycycle DC 0.5

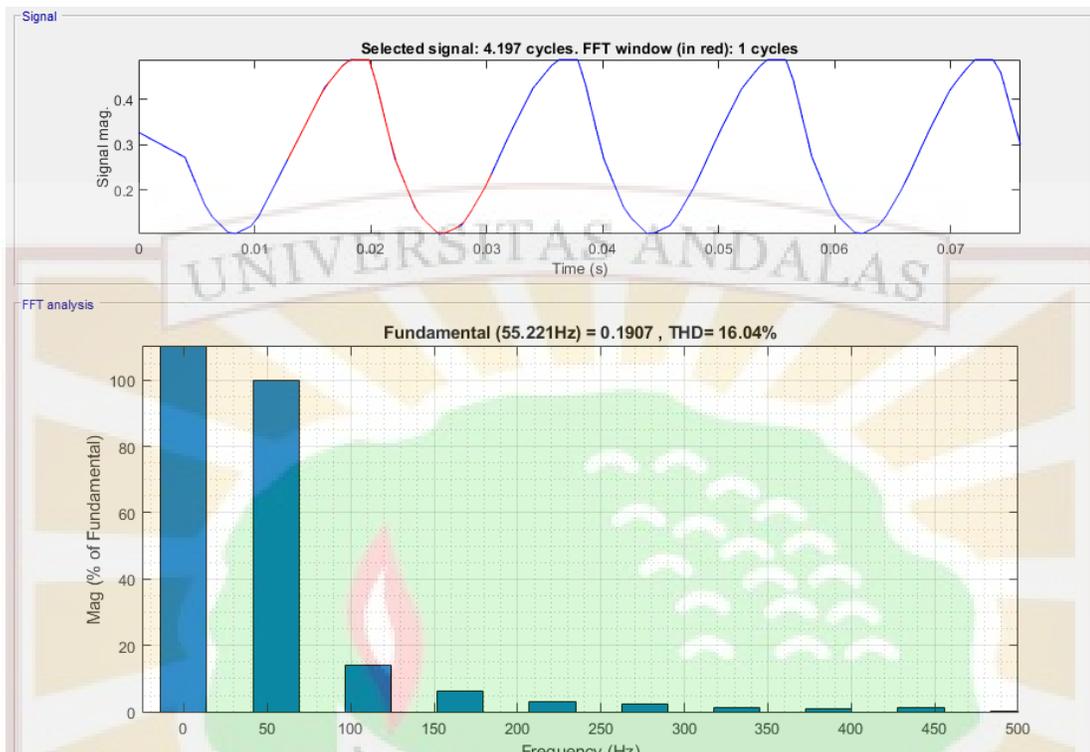


Gambar 4. 5 Gelombang sinyal gangguan sinusoidal dutycycle pada dutycycle DC 0.6



Gambar 4. 6 Gelombang sinyal gangguan sinusoidal dutycycle pada dutycycle DC 0.7

Data sinyal gangguan yang dihasilkan dari file excel dimasukkan kedalam blok *signal builder* untuk membangkitkan gelombang sinyal gangguan tersebut kedalam simulink. Kemudian dihitung nilai Total Harmonic Distortion (THD) guna menentukan gelombang dengan nilai THD terendah. Semakin rendah nilai THD suatu gelombang, semakin mendekati bentuk gelombang sinusoidal murni, yang umumnya menunjukkan kualitas sinyal yang lebih baik dan lebih sedikit distorsi harmonis. Nilai THD dihitung menggunakan fitur *FFT Analysis* di Simulink. Berikut adalah gambar 4.7 yang tampilan prosedur untuk memperoleh nilai THD dari gelombang yang dianalisis.

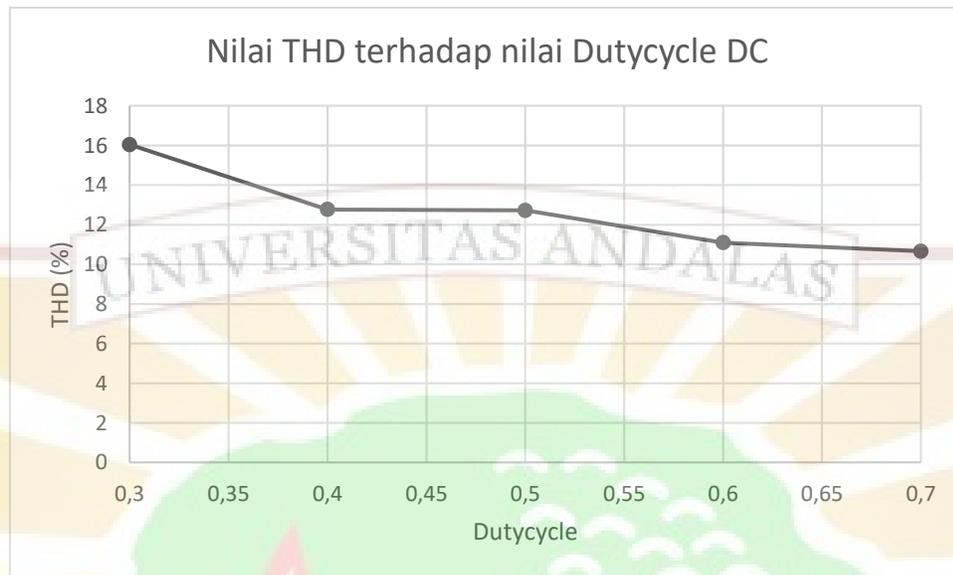


Gambar 4. 7 Tampilan fitur *FFT Analysis* simulink untuk menentukan nilai THD

Persamaan gelombang gangguan yang dihasilkan untuk pengujian pada kondisi duty cycle 0.3, 0.4, 0.5, 0.6 dan 0.7 diperlihatkan pada tabel 4. 1

Tabel 4. 1 Perbandingan karakteristik sinyal gangguan dutycycle untuk variasi dutycycle DC

Dutycycle	Frekuensi (Hz)	Persamaan gelombang sinyal gate	Nilai puncak gelombang gangguan	THD (%)
0.3		$0.3 + 0.2 \sin 1100,442\pi t$	0.1 dan 0.5	16,04
0.4		$0.4 + 0.2 \sin 1100,442\pi t$	0.2 dan 0.6	12.77
0.5	550,221	$0.5 + 0.2 \sin 1100,442\pi t$	0.3 dan 0.7	12.72
0.6		$0.6 + 0.2 \sin 1100,442\pi t$	0.4 dan 0.8	11.1
0.7		$0.7 + 0.2 \sin 1100,442\pi t$	0.5 dan 0.9	10.66

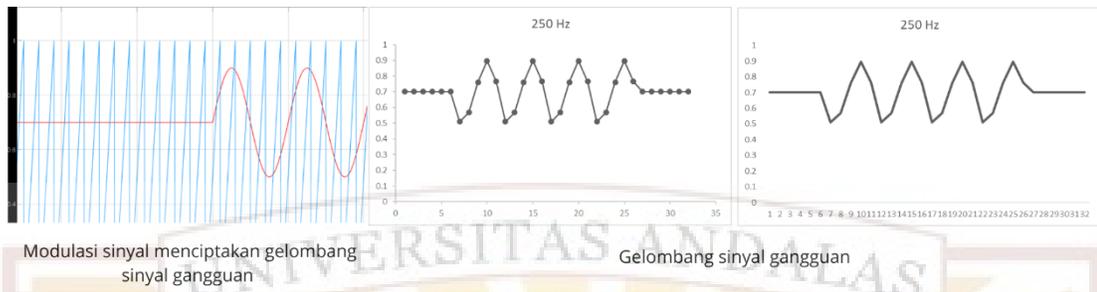


Gambar 4. 8 Besar THD terhadap nilai dutcycle sinyal sistem saklar

Berdasarkan informasi pada tabel 4. 1 dan gambar 4. 8, pengaturan duty cycle DC sebesar 0.7 menghasilkan nilai THD yang paling rendah dibandingkan pengaturan lainnya. Oleh karena itu, duty cycle DC sebesar 0.7 dipilih dan akan digunakan sebagai parameter utama dalam proses pengujian selanjutnya.

Setelah menyelesaikan pengujian pada duty cycle DC, langkah berikutnya adalah melakukan pengujian terhadap frekuensi modulasi pembentukan gelombang sinyal gangguan. Dalam tahap ini, sistem akan diuji pada kondisi frekuensi 250, 500, 1000, 2500 dan 5000 Hz, untuk mengevaluasi bagaimana variasi frekuensi tersebut mempengaruhi kualitas sinyal dan nilai THD. Pengujian ini bertujuan untuk menentukan frekuensi optimal yang menghasilkan performa sinyal terbaik dan mendekati bentuk sinusoidal ideal.

. Modulasi pembentukan gelombang dutcycle gangguan dapat dilihat pada gambar 4.9 – 4.13



Modulasi sinyal menciptakan gelombang sinyal gangguan

Gelombang sinyal gangguan

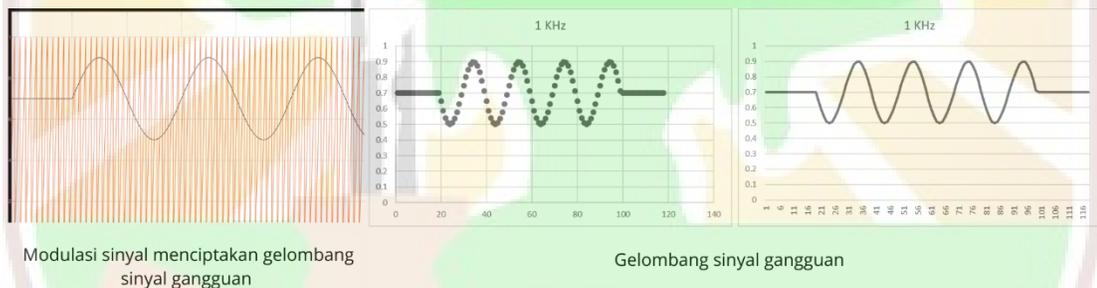
Gambar 4. 9 Gelombang sinyal gangguan sinusoidal dutycycle pada frekuensi 250 Hz



Modulasi sinyal menciptakan gelombang sinyal gangguan

Gelombang sinyal gangguan

Gambar 4. 10 Gelombang sinyal gangguan sinusoidal dutycycle pada frekuensi 500 Hz



Modulasi sinyal menciptakan gelombang sinyal gangguan

Gelombang sinyal gangguan

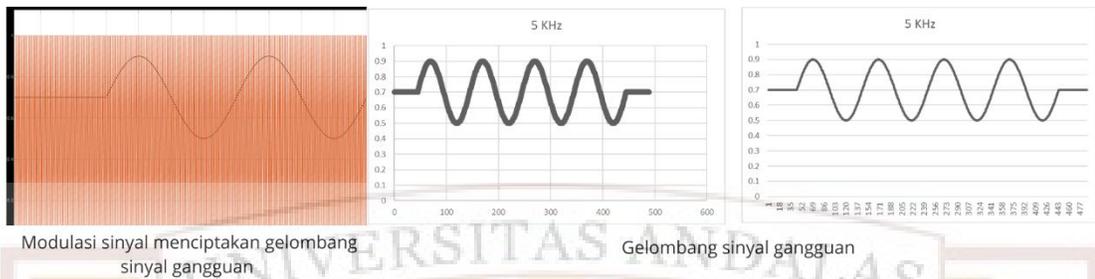
Gambar 4. 11 Gelombang sinyal gangguan sinusoidal dutycycle pada frekuensi 1 KHz



Modulasi sinyal menciptakan gelombang sinyal gangguan

Gelombang sinyal gangguan

Gambar 4. 12 Gelombang sinyal gangguan sinusoidal dutycycle pada frekuensi 2,5 KHz

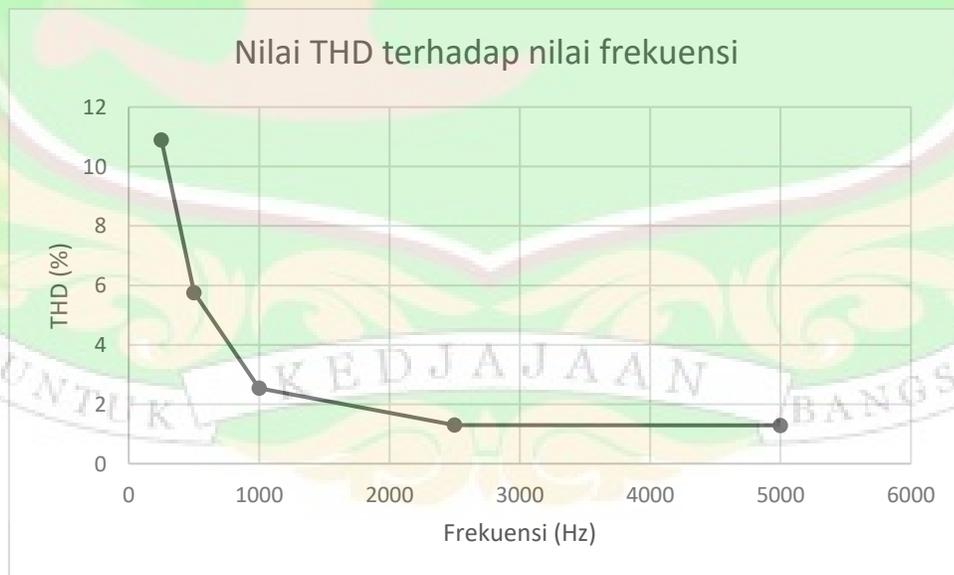


Gambar 4. 13 Gelombang sinyal gangguan sinusoidal dutycycle pada frekuensi 5 KHz

Berikut adalah tabel perbandingan gelombang sinyal yang terbentuk dari variasi frekuensi sinyal gelombang gangguan

Tabel 4. 2 Perbandingan karakteristik sinyal gelombang gangguan untuk variasi frekuensi

Frekuensi	Dutycycle DC	Persamaan gelombang sinyal gate	Nilai puncak Gangguan	THD (%)
250		$0.7 + 0.2 \sin 100\pi t$		10.89
500		$0.7 + 0.2 \sin 100\pi t$		5.76
1000	0.7	$0.7 + 0.2 \sin 100\pi t$	0.5 dan 0.9	2.54
2500		$0.7 + 0.2 \sin 100\pi t$		1.3
5000		$0.7 + 0.2 \sin 100\pi t$		1.29



Gambar 4. 14 Besar THD terhadap frekuensi sinyal sistem saklar

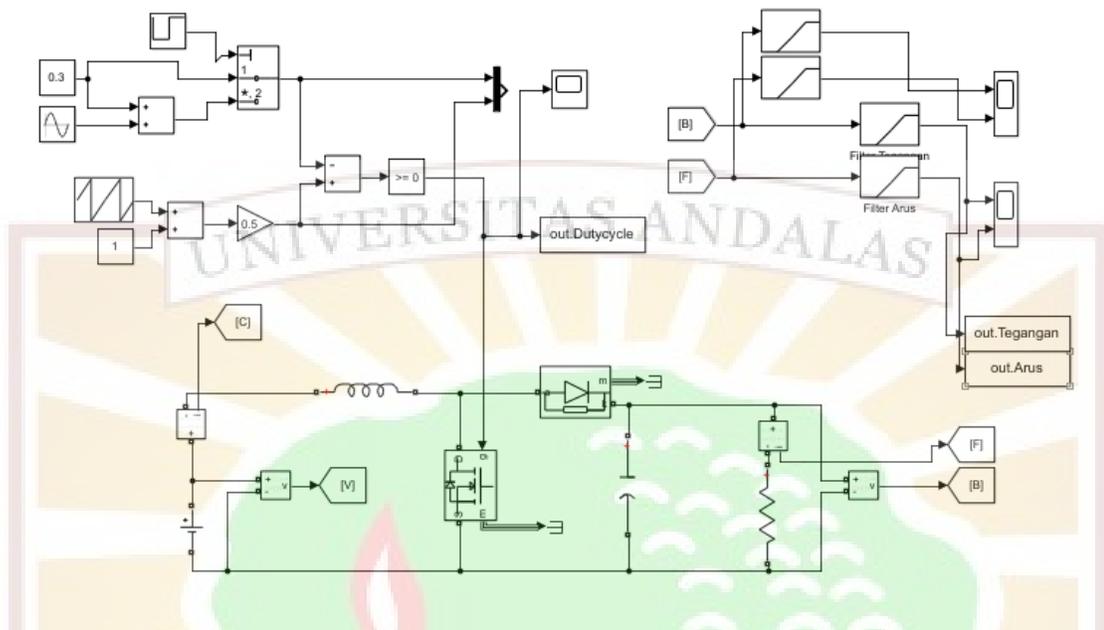
Berdasarkan informasi pada tabel 4. 2 dan gambar 4. 14, pengujian dengan frekuensi sebesar 5000 Hz menghasilkan nilai Total Harmonic Distortion (THD) yang paling rendah dibandingkan frekuensi lainnya. Oleh karena itu, frekuensi 5000 Hz ini dipilih sebagai nilai yang optimal untuk digunakan dalam sistem penyaklaran konverte

4.2 Pengujian kemampuan konverter mendeteksi impedansi Z dari beberapa model baterai (R, RL dan RC)

Sebelum diuji pada penerapan pengisian baterai, konverter DC-DC dan sistem kendalinya yang mampu membangkitkan sinyal sinusoidal, terlebih dahulu diuji dalam level simulasi komputer untuk melihat kemampuan konverter dalam membangkitkan tegangan DC yang mengandung komponen sinusoidal dan dalam mendapatkan impedansi sebuah beban. Tiga jenis konfigurasi beban yang memodelkan baterai diuji yaitu beban model R, RL dan RC.

a. Pengujian pada model baterai sebagai impedansi murni R

Untuk melakukan hal ini, konverter dihubungkan pada sumber DC tetap dan resistor 1Ω sebagai bebannya. Diagram simulasi simulink matlab yang digunakan terlihat pada gambar 4. 15. Rangkaian konverter terdiri dari induktor, kapasitor, alat ukur tegangan dan arus dan saklar (MOSFET). MOSFET dilengkapi dengan sistem kendali dutycycle. sistem kendali tersebut terdiri dari sinyal sinus dan gergaji yang dimodulasi sehingga mampu menghasilkan nilai duty cycle yang mengandung komponen sinusoidal. Kemudian pada sisi output konverter, tegangan dan arus output akan diteruskan dan diproses ke filter High-Pass dan bentuk gelombangnya dilihat menggunakan scope. Penggunaan filter high-pass bertujuan untuk menghilangkan komponen sinyal DC, sehingga diperoleh tampilan gelombang sinusoidal murni yang dihasilkan oleh konverter



Gambar 4. 15 Gambar rangkaian sistem konverter

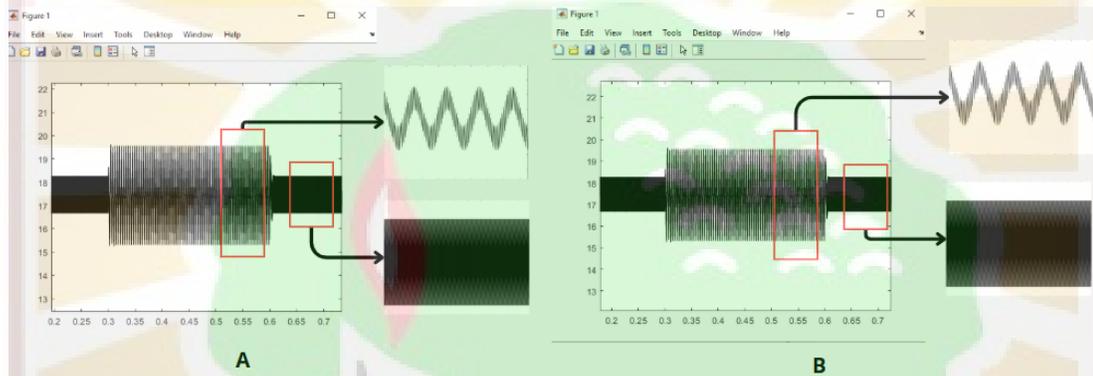
Berikut adalah spesifikasi konverter yang digunakan dalam pengujian pada model baterai sebagai impedansi murni R

Tabel 4. 3 Spesifikasi konverter pengujian pada model baterai sebagai impedansi murni R

Karakteristik	Rating	Unit
Tegangan masukan	10	V
Tegangan keluaran	20	V
Duty cycle	0.7	
Rentang dutycycle sinyal gangguan	0.725 – 0.675	
Induktansi	0.147×10^{-3}	H
Kapasitansi	1.2×10^{-3}	F
Beban resistansi	1	Ω
Frekuensi penyaklaran	5000	Hz

Pada saat simulasi, mula-mula sistem kendali pada saklar konverter didesain membangkitkann dutycycle bagi komponen konverter bernilai tetap, $D = 0.7$ pada

periode switching 5000 Hz, akibatnya output dari konverter menghasilkan output DC yang tetap sebanding dengan dutycycle tersebut. Kemudian pada waktu tertentu t, dutycycle diubah secara sinusoidal, $D = 0.7 + 0.025 \sin 1000\pi t$, hal ini akan membangkitkan tegangan dan arus keluaran konverter yang mengandung komponen sinusoidal. Tegangan dan arus tersebut diukur menggunakan scope untuk menampilkan bentuk gelombangnya. Gambar 4.16 adalah gelombang tegangan dan arus keluaran konverter



Gambar 4. 16 Gelombang tegangan(A) dan arus(B) keluaran konverter

Persamaan gelombang tegangan dan arus keluaran konverter yang mengandung komponen sinusoidal diperlihatkan pada tabel 4. 4

Tabel 4. 4 Karakteristik gelombang tegangan dan arus keluaran konverter

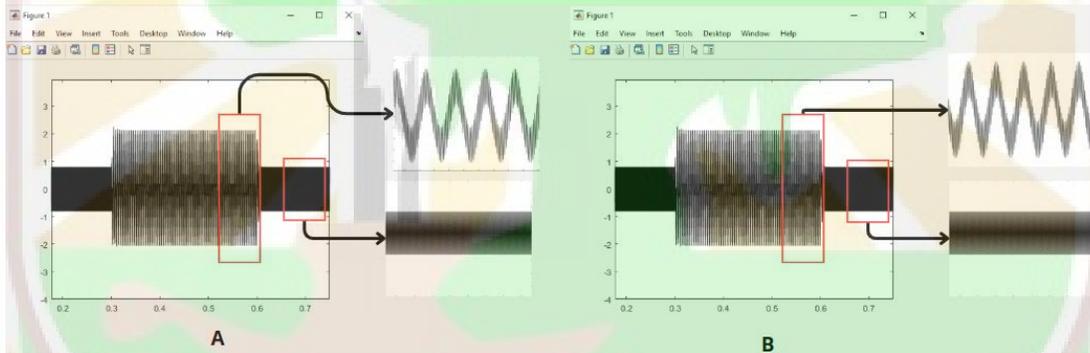
Parameter	Frekuensi gelombang sinusoidal (Hz)	Persamaan sinyal yang mengandung sinusoidal	Nilai puncak gelombang	THD (%)
Tegangan	250	$17.45 + 2.11\sin 500\pi t$	19.56 dan 15,34	49.81
Arus		$17.45 + 2.11\sin 500\pi t$	19.56 dan 15,34	49.81

Setelah data gelombang tegangan dan arus keluaran dari konverter diperoleh, langkah berikutnya adalah memproses kedua gelombang tersebut menggunakan filter high-pass. Proses ini dilakukan untuk menghilangkan komponen DC pada gelombang tegangan dan arus, sehingga hanya komponen sinyal AC atau gelombang sinusoidal murni yang tersisa. Gambar 4. 17 adalah spesifikasi filter yang digunakan.



Gambar 4. 17 First-Order Filter dengan tipe Highpass

Filter yang digunakan adalah First-Order Filter dengan tipe highpass. Filter ini dapat diatur parameter *Time constant* nya yang berfungsi untuk mengatur seberapa cepat respon filter terhadap perubahan sinyal inputnya. Gambar 4.18 adalah gelombang tegangan dan arus hasil filter yang diperoleh.



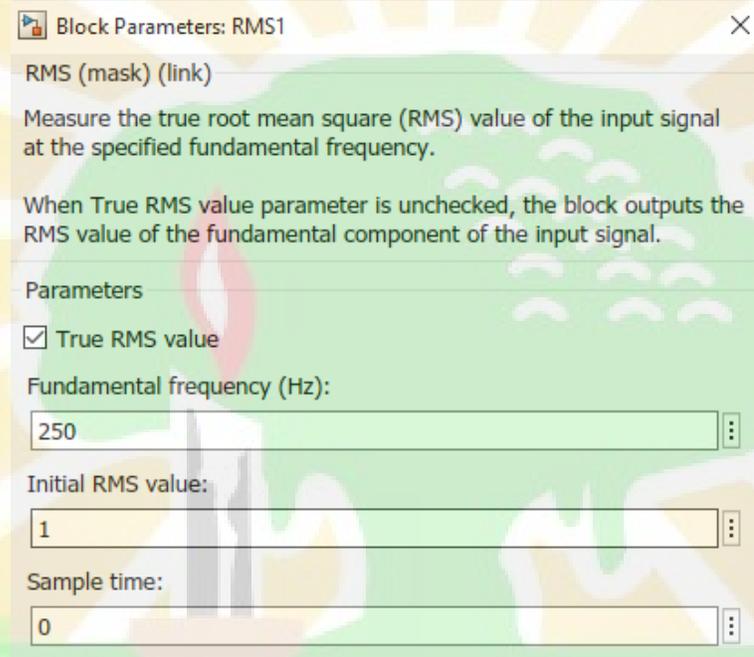
Gambar 4. 18 Gelombang tegangan(A) dan arus(b) hasil filter

Persamaan gelombang tegangan dan arus hasil filter yang mengandung komponen sinusoidal diperlihatkan pada tabel 4. 5

Tabel 4. 5 Karakteristik gelombang tegangan dan arus hasil filter

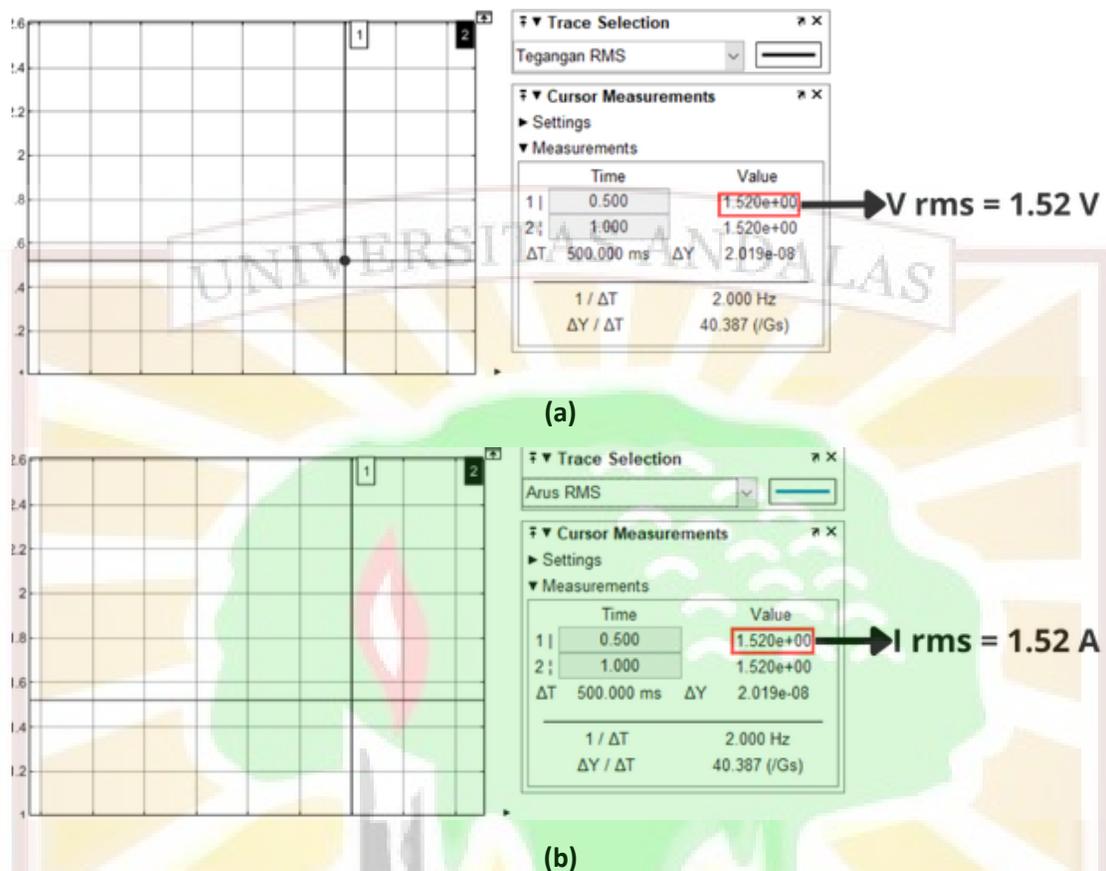
Parameter	Frekuensi gelombang sinusoidal (Hz)	Persamaan sinyal sinusoidal	THD (%)
Tegangan	250	$2.11\sin 500\pi t$	50.39
Arus		$2.11\sin 500\pi t$	50.39

Setelah memperoleh data tegangan dan arus pada filter, langkah selanjutnya adalah menghitung nilai Root Mean Square (RMS) dari tegangan dan arus tersebut. Nilai RMS ini berfungsi untuk mengukur besaran tegangan dan arus tanpa memperhitungkan perbedaan fase antara keduanya. Untuk mendapatkan nilai RMS, tegangan dan arus akan diteruskan ke blok RMS untuk mendapatkan tegangan dan arus RMS. Gambar 4.19 adalah gambar spesifikasi blok RMS.



Gambar 4. 19 Spesifikasi blok RMS

Gambar 4. 20 adalah gambar grafik tegangan dan arus RMS yang merupakan output dari blok RMS



Gambar 4. 20 Grafik tegangan(a) dan arus(b) RMS

Dari grafik diatas, didapatkan nilai tegangan dan arus RMS dengan besar $V_{RMS} = 1.52 V$ dan $I_{RMS} = 1.52 A$

Setelah memperoleh data tegangan dan arus RMS, langkah berikutnya adalah menghitung nilai resistansi beban resistor. Perhitungan resistansi beban resistor menggunakan rumus berikut :

$$R = \frac{V_{RMS}}{I_{RMS}}$$

Menggunakan rumus diatas, maka didapatkan :

$$R = \frac{1.52}{1.52} = 1\Omega$$

Dari hasil diatas, resistansi yang dihitung sama hasilnya dengan resistansi terukur. Maka dapat disimpulkan bahwa sistem konverter dan kendalinya dapat menentukan besar resistansi beban resistor yang terhubung ke konverter

b. Pengujian pada model baterai sebagai impedansi RL

Selanjutnya dilakukan pengujian pada konverter dan sistem kendalinya dengan menggunakan beban impedansi. Hal ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan konverter dalam menghasilkan nilai impedansi yang sesuai dengan karakteristik beban yang telah ditentukan. Untuk melakukan hal itu, konverter dihubungkan pada sumber DC tetap dan beban yang terdiri dari resistor 1 Ω dan beberapa induktor. Pada kondisi pertama digunakan induktor dengan induktansi 0.001 H. Untuk menghitung besar impedansi beban tersebut dapat menggunakan rumus :

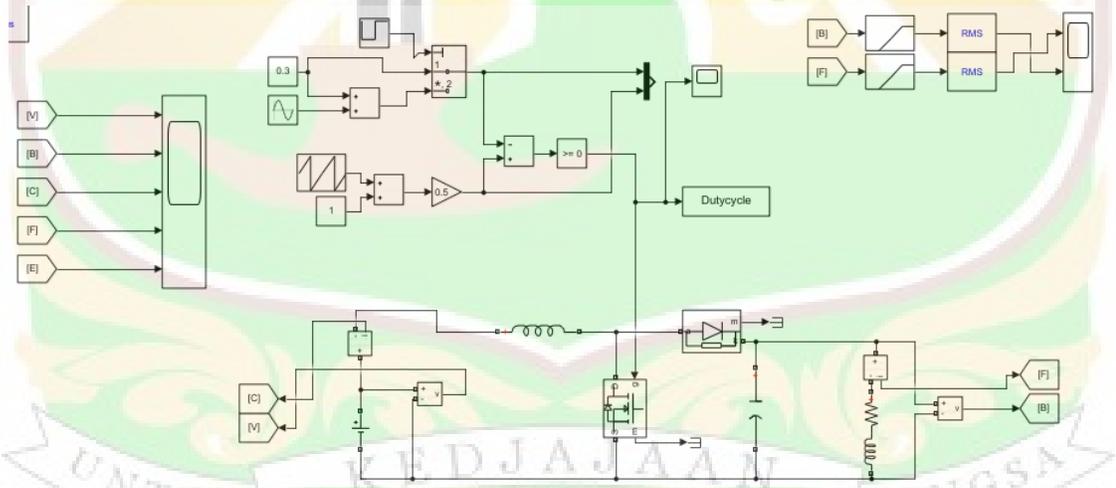
$$Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + (2\pi fL)^2}$$

$$Z = \sqrt{1^2 + (2\pi 250. 0.001)^2}$$

$$Z = 1.862 \Omega$$

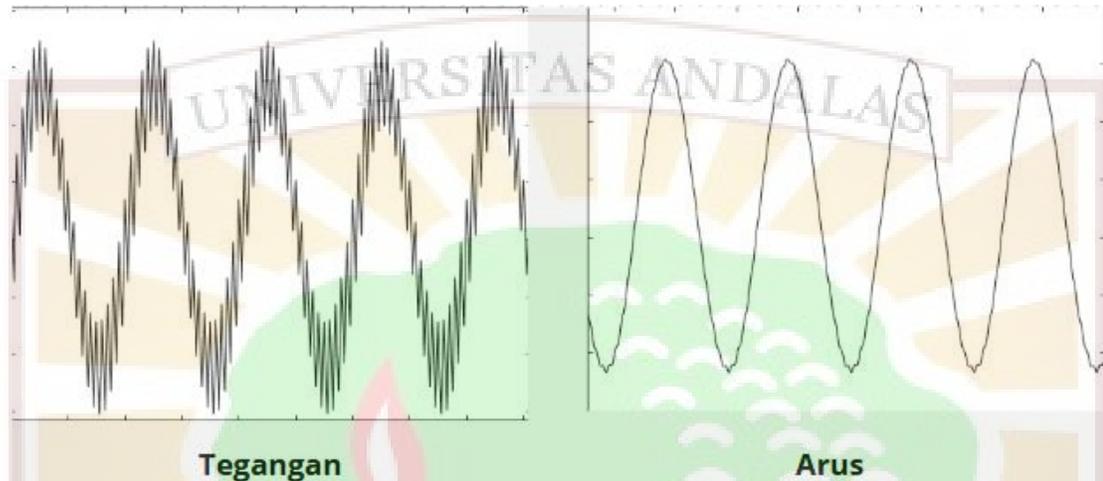
Diagram simulasi simulink matlab yang digunakan terlihat pada gambar 4. 22.



Gambar 4. 21 Rangkaian konverter dengan beban impedansi RL

Pada saat simulasi, akibat sinyal gangguan sinusoidal dutycycle, konverter membangkitkan tegangan DC yang mengandung komponen sinusoidal. Tegangan yang dihasilkan digunakan untuk diteruskan ke beban impedansi RL sehingga muncul

arus beban I_{RL} yang memiliki pola sama dengan V_{DC} . tegangan dan arus diukur menggunakan scope untuk menampilkan bentuk gelombangnya. Gambar 4.23 adalah gelombang tegangan dan arus keluaran konverter yang diperoleh.



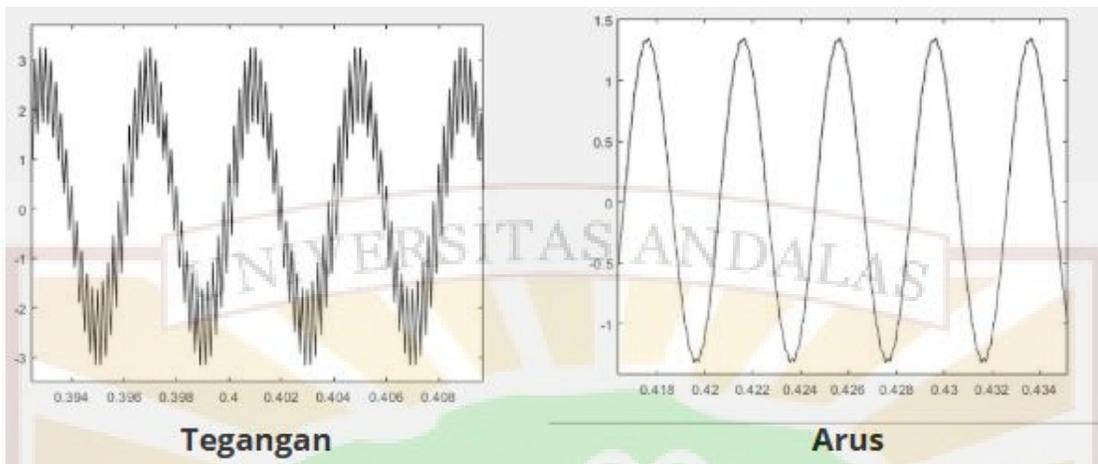
Gambar 4. 22 Gelombang tegangan dan arus keluaran konverter

Persamaan gelombang tegangan dan arus keluaran konverter diperlihatkan pada tabel 4. 6

Tabel 4. 6 Karakteristik gelombang tegangan dan arus keluaran konverter

Parameter	Frekuensi gelombang sinusoidal (Hz)	Persamaan sinyal yang mengandung sinusoidal	Nilai puncak gelombang	THD (%)
Tegangan	250	$17,21 + 3,22\sin 500\pi t$	20.43 dan 13.99	25,85
Arus		$17.185 + 1.345\sin 500\pi t$	18.53 dan 15.84	2,36

Setelah data gelombang tegangan dan arus keluaran dari konverter diperoleh, langkah berikutnya adalah memproses kedua gelombang tersebut menggunakan filter high-pass. Gambar 4. 24 adalah gelombang tegangan dan arus hasil filter yang diperoleh.



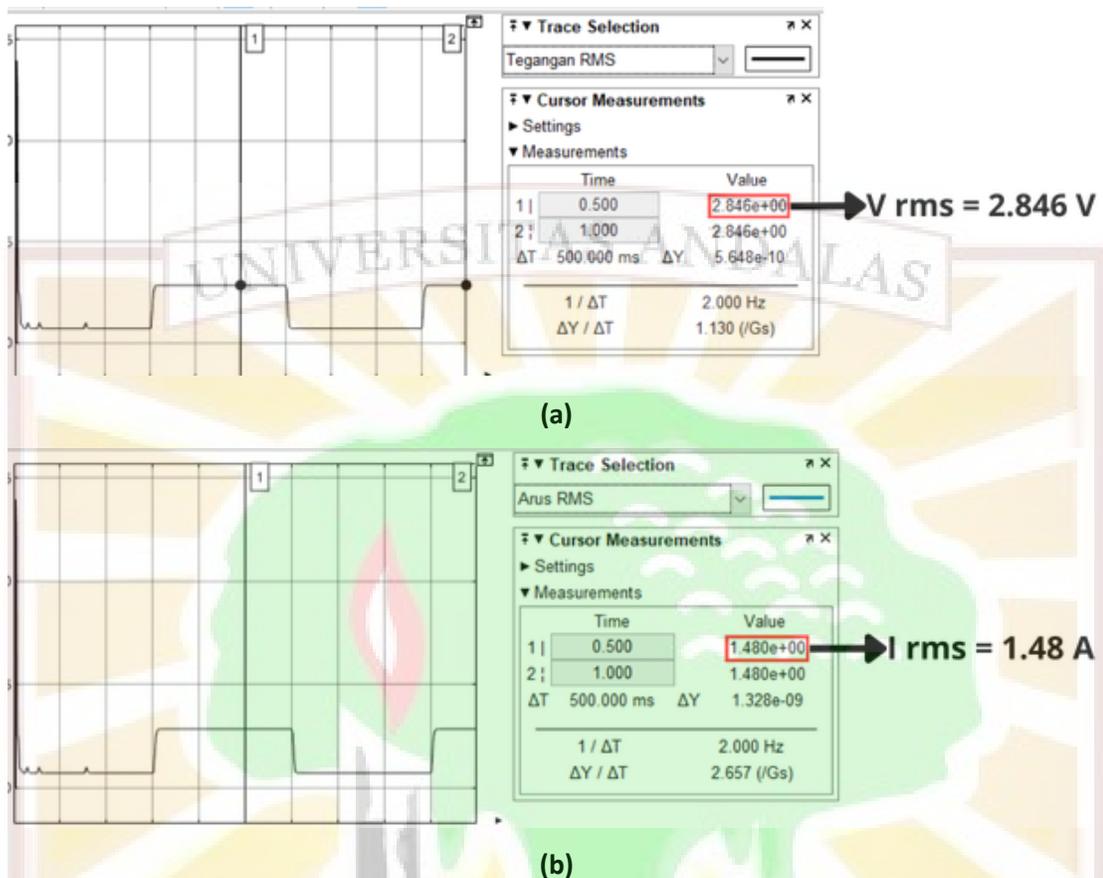
Gambar 4. 23 Gelombang tegangan dan arus hasil high-pass filter

Semua informasi mengenai gelombang tegangan dan arus keluaran konverter diperlihatkan pada tabel 4. 7

Tabel 4. 7 Karakteristik gelombang tegangan dan arus hasil filter

Parameter	Frekuensi gelombang sinusoidal (Hz)	Persamaan sinyal yang mengandung sinusoidal	THD (%)
Tegangan	250	$3,22\sin500\pi t$	26.18
Arus		$1.345\sin500\pi t$	2.38

Setelah memperoleh data tegangan dan arus pada filter, langkah selanjutnya adalah menghitung nilai Root Mean Square (RMS) dari tegangan dan arus tersebut. Tegangan dan arus akan diteruskan ke blok RMS untuk mendapatkan tegangan dan arus RMS. Gambar 4. 24 adalah gambar grafik tegangan dan arus RMS yang merupakan output dari blok RMS



Gambar 4. 24 Grafik tegangan(a) dan arus(b) RMS

Dari grafik diatas, didapatkan nilai tegangan dan arus RMS dengan besar $V_{RMS} = 2.846 \text{ V}$ dan $I_{RMS} = 1.48 \text{ A}$

Setelah memperoleh data tegangan dan arus RMS, langkah berikutnya adalah menghitung nilai impedansi beban. Perhitungan impedansi beban menggunakan rumus berikut :

$$Z = \frac{V_{RMS}}{I_{RMS}}$$

Menggunakan rumus diatas, maka didapatkan :

$$Z = \frac{2.846}{1.48} = 1.92297\Omega$$

Kemudian kita hitung persen error dari data impedansi terhitung dan data impedansi terukur menggunakan rumus berikut :

$$\text{Persentase Error} = \frac{|X_{\text{terukur}} - X_{\text{terhitung}}|}{|X_{\text{terhitung}}|} \times 100\%$$

Menggunakan rumus diatas, maka didapatkan :

$$\text{Persentase Error} = \frac{|1.9229 - 1.862|}{|1.862|} \times 100\%$$

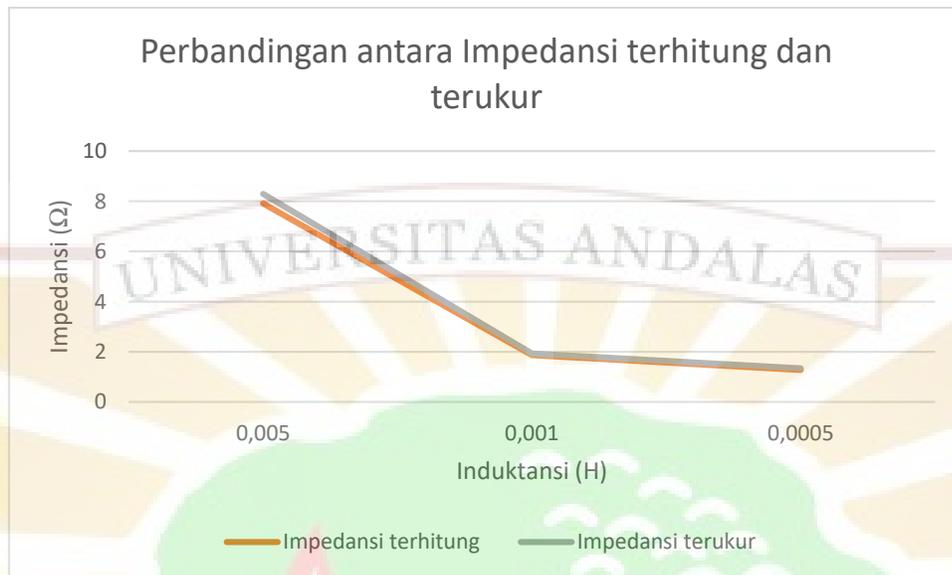
$$\text{Persentase Error} = 3.27\%$$

Berdasarkan hasil yang didapat, kemampuan konverter dan sistem kendalinya mampu mendapatkan nilai impedansi pada sebuah beban RL dengan persen error 3.58%

Selanjutnya adalah pengujian pada kondisi induktansi 5×10^{-3} H dan 1×10^{-2} . Dengan langkah yang sama, maka didapatkanlah hasil dari konverter yang dapat dilihat pada tabel 4.8.

Tabel 4. 8 Perbandingan nilai impedansi untuk setiap nilai induktansi

Resistansi (Ω)	Induktansi (H)	Impedansi terhitung (Ω)	Impedansi terukur (Ω)	Error (%)
1	1×10^{-3}	1.862	1.9229	3.27
	5×10^{-3}	7.917	8.291	4.72
	5×10^{-4}	1.291	1.335	4.98

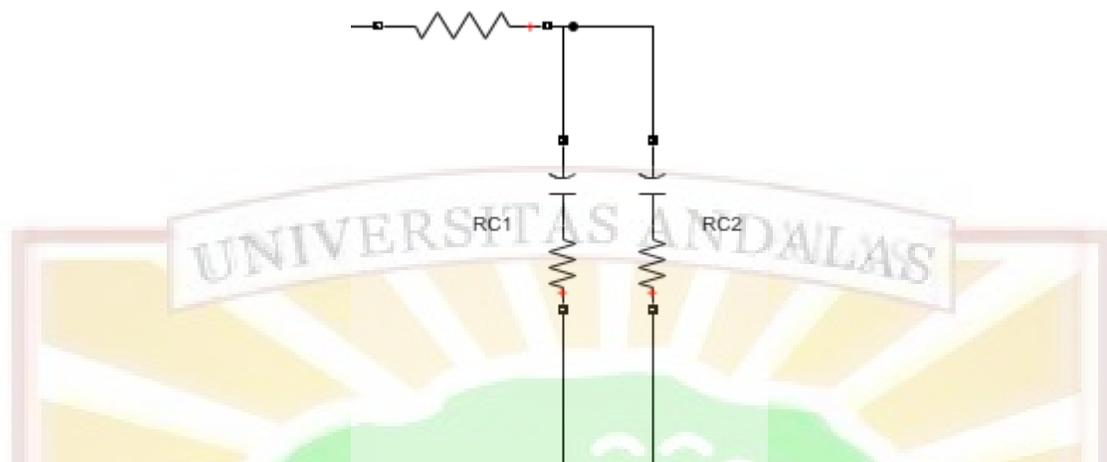


Gambar 4. 25 Perbandingan antara Impedansi terhitung dan terukur dalam pengujian beban induktansi

Berdasarkan hasil yang didapatkan, dapat disimpulkan bahwa konverter dan sistem kendalinya mampu mendapatkan nilai impedansi RL dengan persen error dibawah 5%

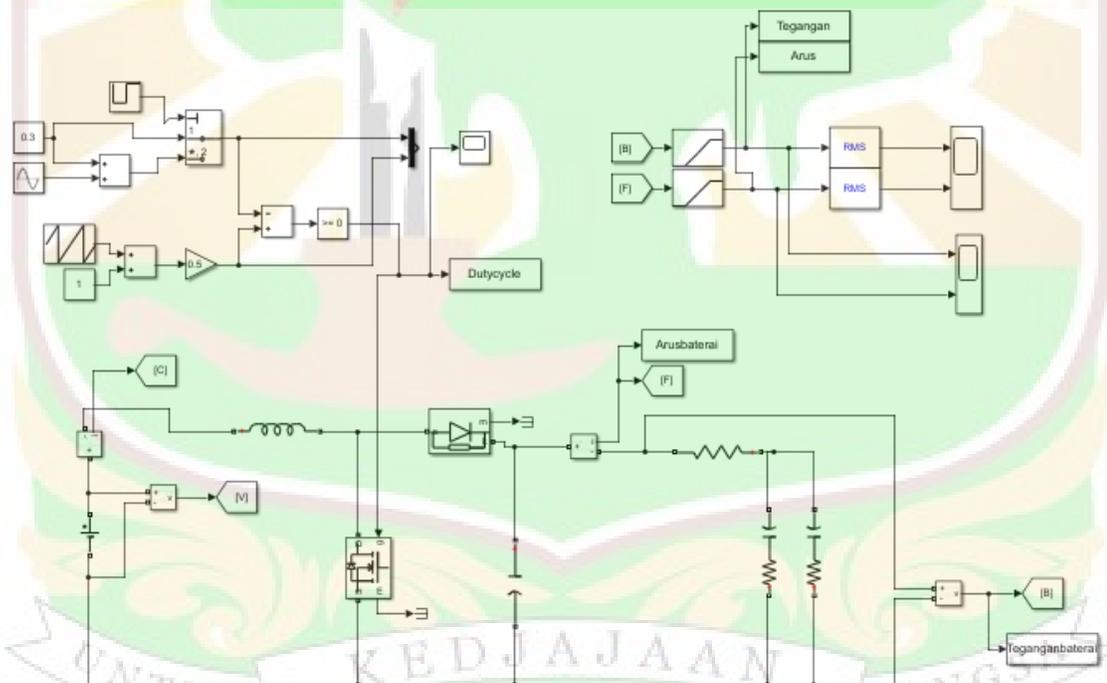
c. Pengujian pada model baterai sebagai rangkaian RC

Selanjutnya dilakukan pengujian beban impedansi RC. Untuk melakukan hal itu, konverter dihubungkan pada sumber DC tetap dan beban yang terdiri dari resistor dan kapasitor. Pada pengujian ini, model beban yang digunakan merupakan bentuk sebuah model baterai yang dikemukakan oleh T. O. Tin []. Model terdiri dari resistor dan 2 buah beban RC secara paralel. Beban RC ini diberi nama RC1 ($Z_{RC1} = 0.001\Omega$) dan RC2 ($Z_{RC2} = 0.001\Omega$), dengan kapasitansi RC2 yang lebih besar ($80 \times 10^3 F$). Gambar 4. 27 adalah gambar rangkaian beban impedansi yang digunakan.



Gambar 4. 27 Rangkaian beban berdasarkan model baterai T. O. Tin

Diagram simulasi simulink matlab yang digunakan terlihat pada gambar 4. 28.



Gambar 4. 28 Rangkaian konverter dengan beban impedansi RC

Untuk menghitung besar impedansi pada beban diatas, dapat menggunakan rumus

:

$$Z_{total} = R + (Z_{RC1} // Z_{RC2})$$

$$Z_{total} = R + \left(\sqrt{R_1^2 + \left(\frac{1}{\omega C_1}\right)^2} // \sqrt{R_2^2 + \left(\frac{1}{\omega C_2}\right)^2} \right)$$

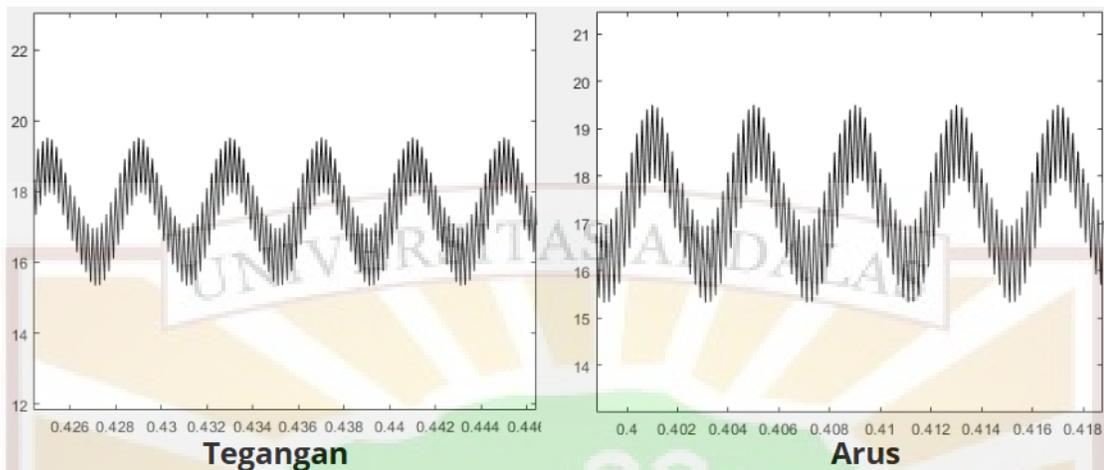
$$Z_{total} = R + \left(\sqrt{R_1^2 + \left(\frac{1}{\omega C_1}\right)^2} // \sqrt{R_2^2 + \left(\frac{1}{\omega C_2}\right)^2} \right)$$

$$Z_{total} = 1 + \left(\sqrt{0.001^2 + \left(\frac{1}{2 \times \pi \times 250 \times 80}\right)^2} // \sqrt{0.001^2 + \left(\frac{1}{2 \times \pi \times 250 \times 88000}\right)^2} \right)$$

$$Z_{total} = 1 + (0.001 // 0.001)$$

$$Z_{total} = 1.0005 \Omega$$

Pada saat simulasi, akibat sinyal gangguan sinusoidal dutycycle, konverter membangkitkan tegangan DC yang mengandung komponen sinusoidal. Tegangan yang dihasilkan digunakan untuk diteruskan ke beban impedansi RC sehingga muncul arus beban I_{RC} yang memiliki pola sama dengan V_{DC} . tegangan dan arus diukur menggunakan scope untuk menampilkan bentuk gelombangnya. Gambar 4.27 adalah gelombang tegangan dan arus keluaran konverter yang diperoleh.



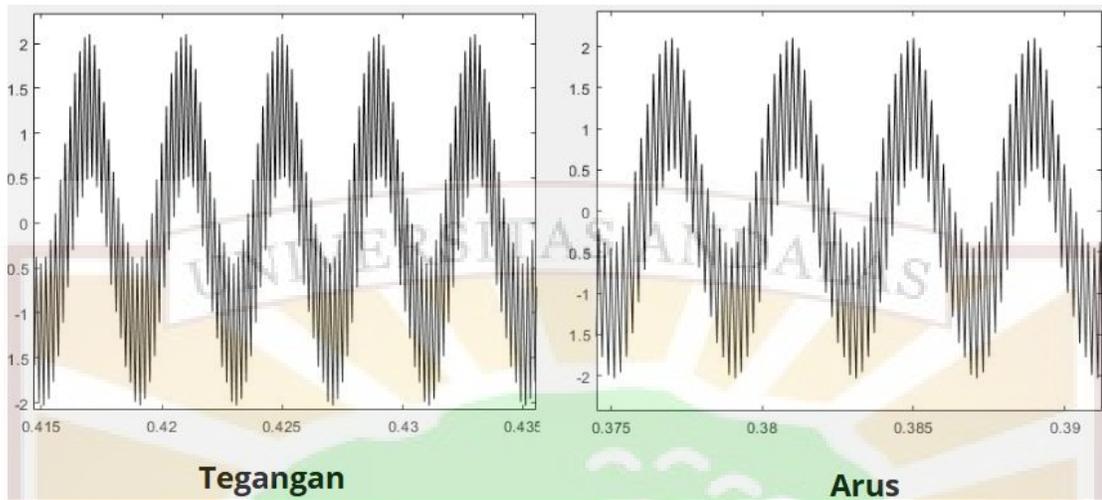
Gambar 4. 26 Gelombang tegangan dan arus keluaran konverter

Semua informasi mengenai gelombang tegangan dan arus keluaran konverter diperlihatkan pada tabel 4. 9.

Tabel 4. 9 Karakteristik gelombang tegangan dan arus keluaran konverter

Parameter	Frekuensi gelombang sinusoidal (Hz)	Persamaan sinyal yang mengandung sinusoidal	Nilai puncak gelombang	THD (%)
Tegangan	250	$17.435 + 2.095\sin 500\pi t$	19.53 dan 15,34	51,74
Arus		$17.415 + 2.095\sin 500\pi t$	19.51 dan 15,32	51,74

Setelah data gelombang tegangan dan arus keluaran dari konverter diperoleh, langkah berikutnya adalah memproses kedua gelombang tersebut menggunakan filter high-pass. Gambar 4. 28 adalah gelombang tegangan dan arus hasil filter yang diperoleh.



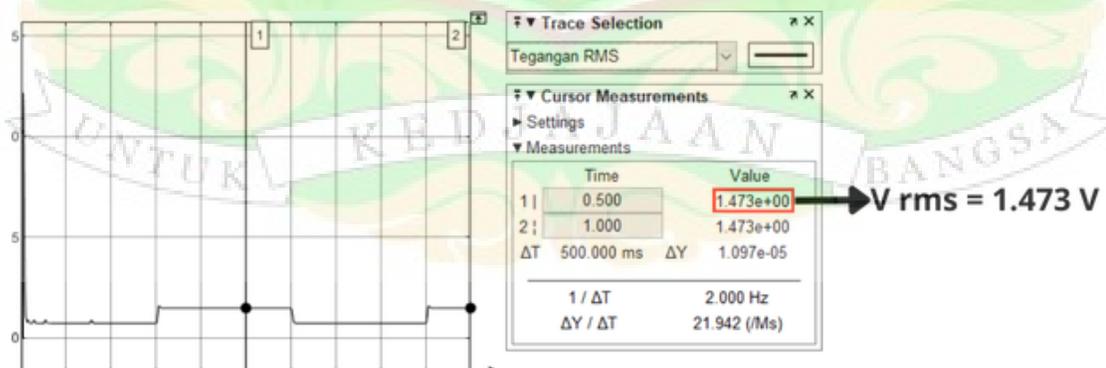
Gambar 4. 27 Gelombang tegangan dan arus hasil high-pass filter

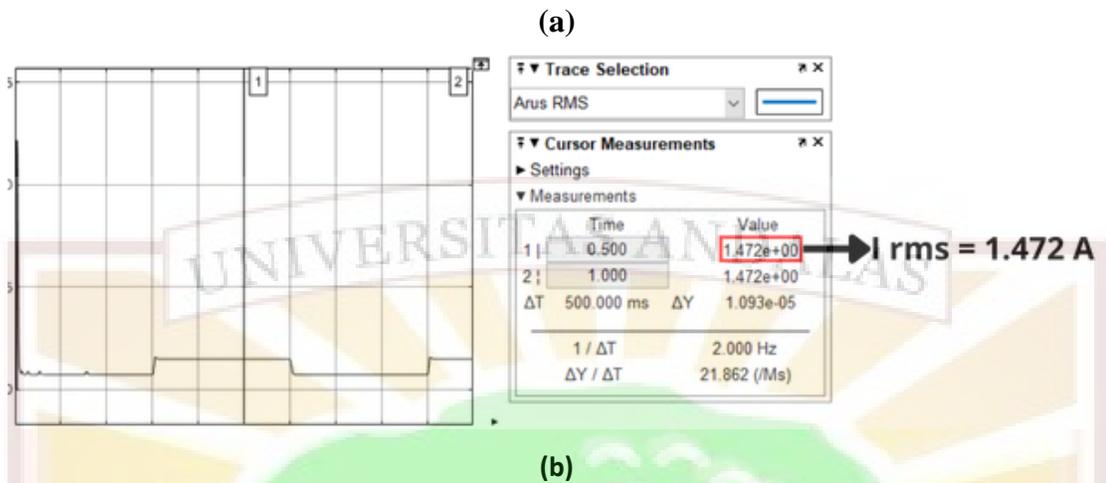
Persamaan gelombang tegangan dan arus hasil filter diperlihatkan pada tabel 4. 10

Tabel 4. 10 Persamaan gelombang tegangan dan arus hasil filter

Parameter	Frekuensi gelombang sinusoidal (Hz)	Persamaan sinyal yang mengandung sinusoidal	THD (%)
Tegangan	250	$2.095\sin 500\pi t$	52,38
Arus		$2.095\sin 500\pi t$	52,38

Setelah memperoleh data tegangan dan arus pada filter, langkah selanjutnya adalah menghitung nilai Root Mean Square (RMS) dari tegangan dan arus tersebut. Tegangan dan arus akan diteruskan ke blok RMS untuk mendapatkan tegangan dan arus RMS. Gambar 4. 29 adalah gambar grafik tegangan dan arus RMS yang merupakan output dari blok RMS





Gambar 4. 28 Grafik tegangan(a) dan arus(b) RMS

Dari grafik diatas, didapatkan nilai tegangan dan arus RMS dengan besar $V_{RMS} = 1.473$ V dan $I_{RMS} = 1.472$ A

Setelah memperoleh data tegangan dan arus RMS, langkah berikutnya adalah menghitung nilai impedansi beban. Perhitungan impedansi beban menggunakan rumus berikut :

$$Z = \frac{V_{RMS}}{I_{RMS}}$$

Menggunakan rumus diatas, maka didapatkan :

$$Z = \frac{1.473}{1.472} = 1\Omega$$

Kemudian kita hitung persen error dari data impedansi terhitung dan data impedansi terukur menggunakan rumus berikut :

$$\text{Persentase Error} = \frac{|X_{terukur} - X_{terhitung}|}{|X_{terhitung}|} \times 100\%$$

Menggunakan rumus diatas, maka didapatkan :

$$\text{Persentase Error} = \frac{|1 - 1|}{|1|} \times 100\%$$

$$\text{Persentase Error} = 0 \%$$

Untuk mengetahui apakah konverter dan sistem kendalinya mampu mendapatkan nilai impedansi dari besar kapasitansi yang beragam, maka dilakukan pengujian dengan kondisi nilai kapasitansi pada RC_2 sebesar 5×10^4 dan 1×10^5 .

Selanjutnya adalah pengujian pada kondisi kapasitansi RC_2 sebesar 5×10^4 F dan 1×10^5 F. Dengan langkah yang sama seperti pengujian sebelumnya, maka didapatkanlah hasil dari konverter yang dapat dilihat pada tabel 4. 11

Tabel 4. 11 Perbandingan nilai impedansi untuk setiap nilai kapasitansi

Resistansi (Ω)	Kapasitansi (F)	Impedansi terhitung (Ω)	Impedansi terukur (Ω)	Error (%)
1	88×10^3	1	1	0
	5×10^4	1	1	0
	1×10^5	1	1	0



Gambar 4. 29 Perbandingan antara Impedansi terhitung dan terukur dalam pengujian beban kapasitansi

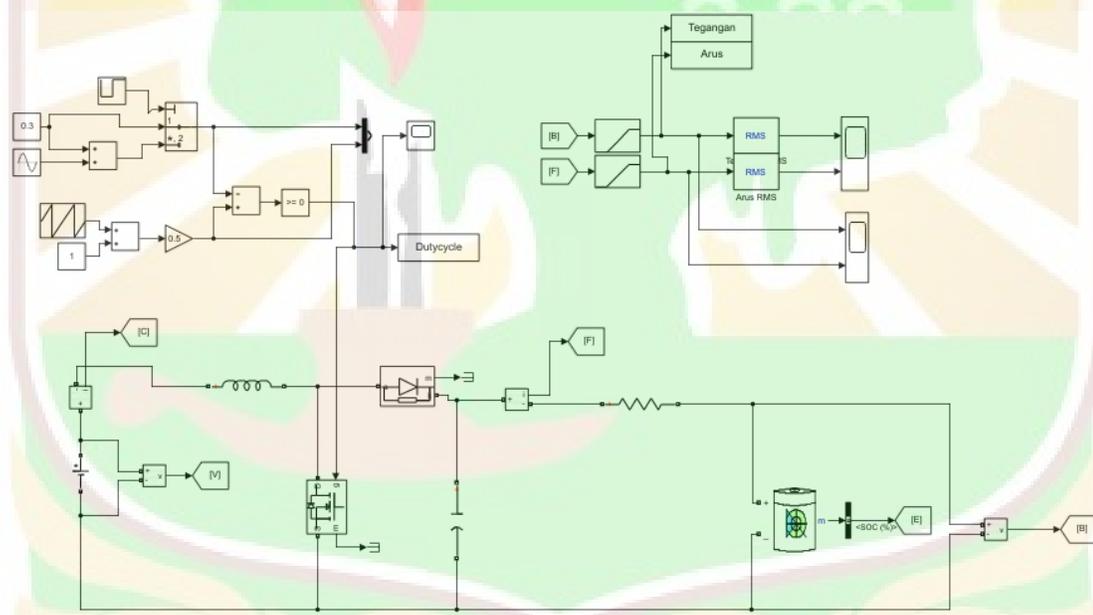
Berdasarkan hasil percobaan menggunakan model baterai T. O. Tin dengan beban RC, dapat disimpulkan bahwa konverter beserta sistem kendalinya mampu

menentukan nilai impedansi beban RC secara akurat, dengan persentase kesalahan sebesar 0%.

Setelah serangkaian percobaan yang dilakukan dengan berbagai jenis beban, konverter menunjukkan kemampuan dalam menentukan besar impedansi untuk setiap beban dengan persentase kesalahan di bawah 5%. Hal ini menunjukkan bahwa sistem konverter beserta kendalinya mampu mengestimasi impedansi Z secara akurat

4.3 Penentuan impedansi Z baterai

Setelah konverter dan sistem kendalinya diuji menggunakan beban impedansi, dan telah diketahui keakuratannya, langkah selanjutnya adalah menerapkan konverter dengan kemampuan deteksi Z ini pada model baterai dari library simulink. Gambar 4.31 adalah rangkaian simulasi konverter untuk deteksi Z baterai



Gambar 4. 30 Rangkaian simulasi pengisian baterai

Pada tahap pertama, model baterai dari simulink diuji untuk mengetahui hubungan antara SoC baterai dengan impedansinya. Hasil pengujian ditampilkan pada gambar 4.32. Data selengkapnya terdapat di lampiran.

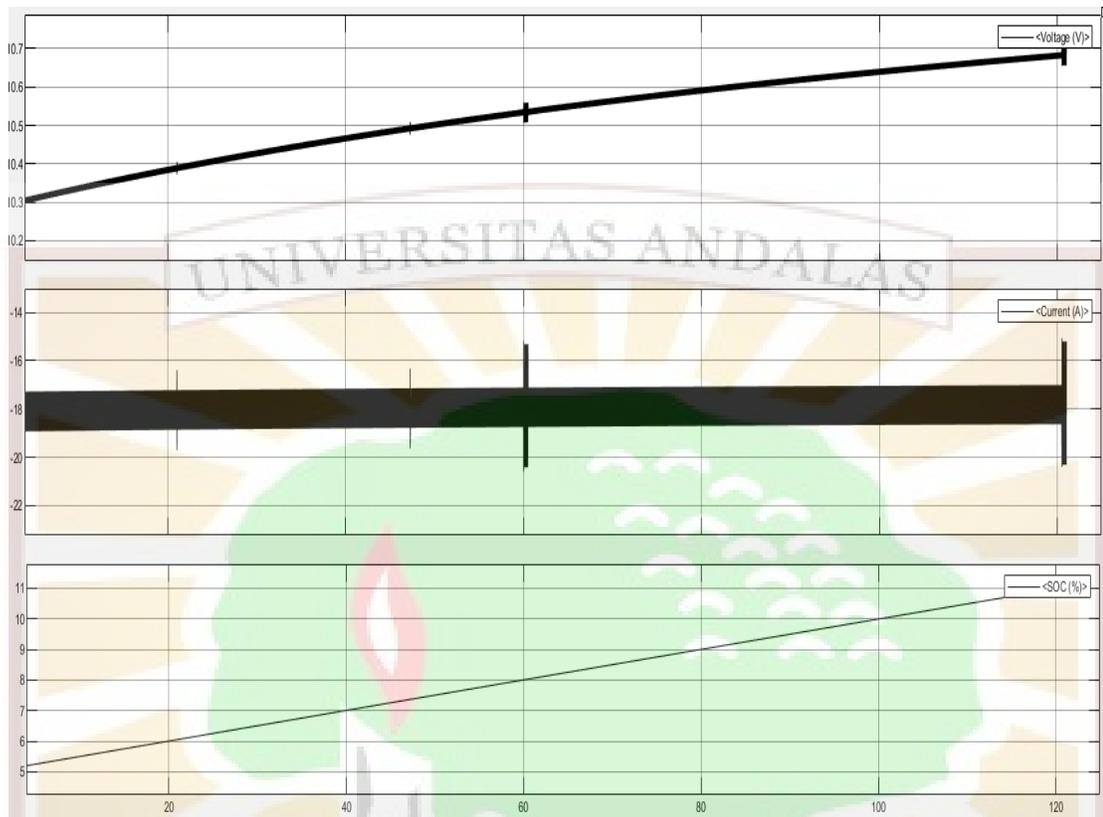


Gambar 4. 31 Grafik hubungan SoC vs impedansi model baterai dari simulink

Berdasarkan grafik di atas, dapat diamati bahwa terdapat hubungan berbanding terbalik antara persentase SoC baterai dan impedansi internalnya. Semakin rendah persentase SoC, nilai impedansi internal baterai cenderung meningkat secara signifikan

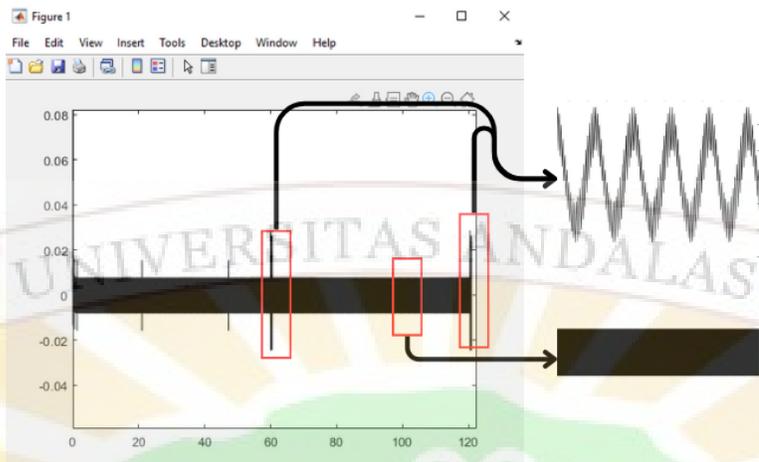
Selanjutnya baterai yang sama disimulasikan mengalami proses pengisian menggunakan konverter dengan kemampuan deteksi impedansi Z. proses pengisian real time disimulasikan dengan simulink

Dalam simulasi ini, tegangan input yang digunakan adalah sebesar 15 V. Sistem kendali pembangkit sinyal duty cycle dirancang untuk menghasilkan sinyal gangguan sinusoidal dengan durasi 0,5 detik setiap 1 menit pada saklar konverter. Pengaturan ini memungkinkan pemantauan kondisi impedansi internal baterai dan nilai SoC setiap 1 menit sekali. Gambar 4. 32 dan 4. 33 adalah grafik proses pengisian baterai

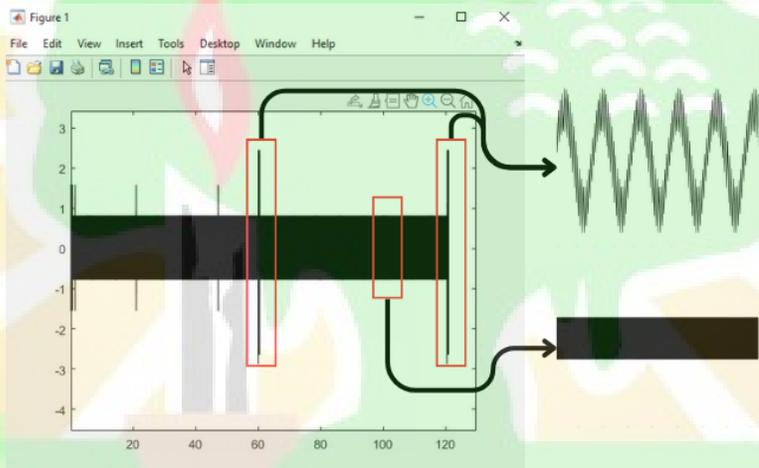


Gambar 4. 32 Grafik tegangan, arus dan SoC baterai saat proses pengisian

Berdasarkan grafik di atas, terlihat bahwa tegangan dan arus baterai mengandung komponen sinusoidal pada waktu 60 detik dan 120 detik dengan durasi sekitar 0,5 detik. Komponen sinusoidal ini kemudian difilter menggunakan high-pass filter untuk menghilangkan komponen DC nya, sehingga hanya didapatkan komponen AC. Gambar 4. 34 adalah grafik hasil filter tegangan dan arus baterai.



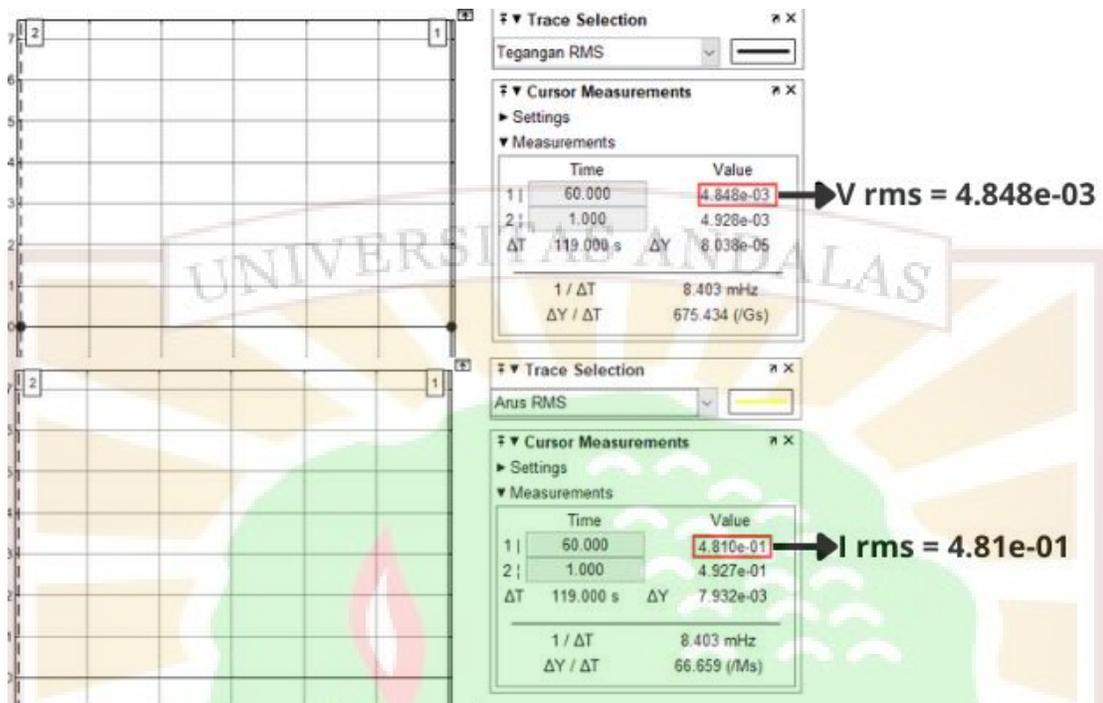
(a)



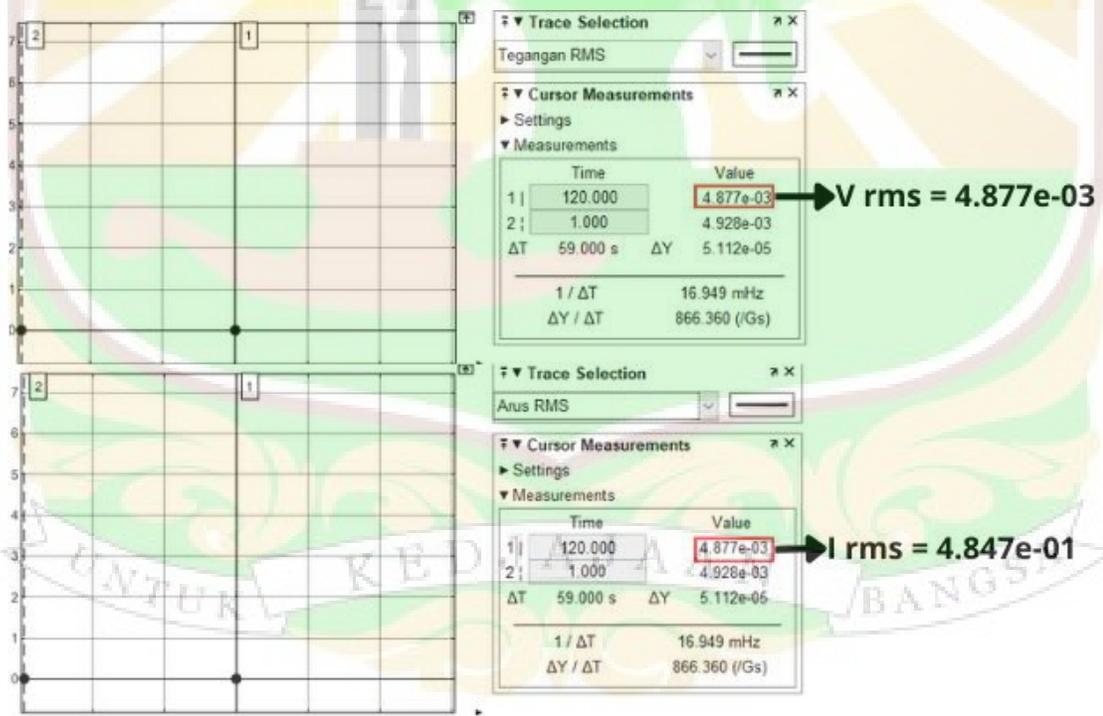
(b)

Gambar 4. 33 Gelombang tegangan(a) dan arus(b) hasil filter

Setelah proses penyaringan tegangan dan arus baterai menggunakan high-pass filter, dilakukan perhitungan nilai RMS (Root Mean Square) pada tegangan dan arus baterai yang mengandung komponen sinusoidal. Pada gambar 4.35 merupakan tegangan dan arus RMS saat $t = 60$ detik dan gambar 4.36 merupakan tegangan dan arus RMS saat $t = 120$ detik

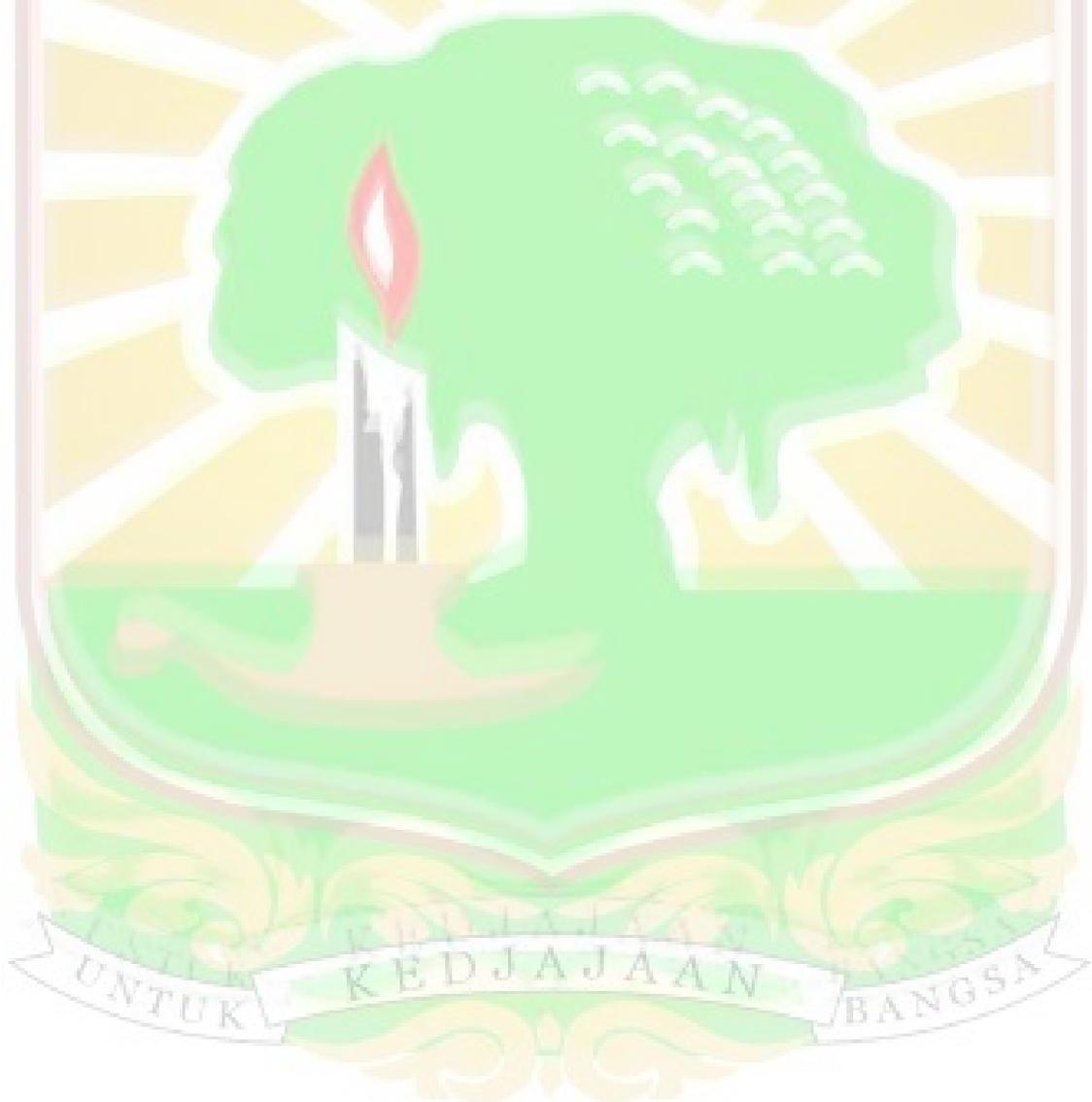


Gambar 4. 34 Nilai RMS komponen AC dalam tegangan dan arus DC baterai saat $t = 60$ s



Gambar 4. 35 Nilai RMS komponen AC dalam tegangan dan arus DC baterai saat $t = 120$ s

Langkah selanjutnya menghitung nilai impedansi baterai pada waktu $t = 60$ s dan $t = 120$ s. Perhitungan ini dilakukan dengan membagi nilai tegangan RMS dengan nilai arus RMS pada kedua waktu tersebut. Didapatkan impedansi baterai saat $t = 60$ s adalah 0.0100790021Ω dan saat $t = 120$ s adalah 0.010061894Ω . Jika kita lihat pada grafik hubungan antara SoC dengan Impedansi internal baterai, saat impedansi bernilai 0.0100790021Ω SoC mendekati 8% dan impedansi 0.010061894Ω mendekati 11%. Hal ini sesuai dengan tabel hubungan antara SoC dan impedansi internal baterai.



BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengujian pada sistem konverter dalam mendapatkan impedansi internal baterai, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Tegangan output konverter yang mengandung komponen sinusoidal dapat dihasilkan dari sinyal gate yang memiliki pola sinusoidal. Sinyal gate tersebut dihasilkan dari proses modulasi sinyal. Pola sinusoidal dari sinyal gate yang stabil (nilai *Total Harmonic Distortion*-nya rendah) berada pada nilai Duty cycle DC 0.7 dengan frekuensi modulasi 5000 Hz
2. Tegangan dan arus output konverter yang mengandung komponen sinusoidal diinjeksikan ke baterai. Kemudian Respon dari baterai yang berupa tegangan dan arus baterai digunakan untuk menghitung impedansi internal baterai
Tegangan dan arus baterai yang mengandung komponen sinusoidal difilter menggunakan *High-pass Filter* untuk menghilangkan komponen DC-nya (dari $17.45 + 2.11\sin 500\pi t$ menjadi $2.11\sin 500\pi t$). Kemudian sinyal hasil filter ini dihitung tegangan dan arus RMS nya. Dengan membagi nilai tegangan RMS dengan arus RMS, diperoleh nilai impedansi baterai
3. Hubungan antara State of Charge (SoC) baterai dan nilai impedansi internal baterai diperoleh dengan menghitung impedansi baterai pada setiap nilai SoC. Seluruh hasil perhitungan kemudian dipetakan dalam bentuk grafik, sehingga hubungan antara impedansi internal dan SoC baterai dapat dianalisis
4. Pada proses simulasi pengisian baterai, konverter dan sistem kendalinya berhasil mengestimasi *State of Charge* (SoC) baterai secara real-time dengan memanfaatkan nilai impedansi internal baterai

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian ini, terdapat beberapa rekomendasi yang dapat disampaikan, antara lain

1. Penelitian lebih lanjut disarankan untuk mengeksplorasi parameter induktansi dan kapasitansi pada konverter yang lebih kompatibel dengan sinyal duty cycle bernilai sinusoidal. Hal ini bertujuan untuk meningkatkan kualitas output konverter, sehingga menghasilkan sinyal yang lebih halus dan mendekati bentuk gelombang sinusoidal yang diinginkan.
2. Pada penelitian ini, frekuensi gelombang output konverter yang mengandung komponen sinusoidal adalah sebesar 250 Hz. Namun, terdapat kemungkinan bahwa penggunaan frekuensi lain yang berbeda dapat menghasilkan output konverter dengan kualitas yang lebih halus. Oleh karena itu, penelitian lebih lanjut dapat dilakukan untuk menguji berbagai frekuensi operasional guna mengevaluasi dampaknya terhadap kestabilan sinyal output konverter.
3. Penelitian ini dibatasi pada satu jenis baterai dengan spesifikasi yang sama seperti yang digunakan dalam pengujian. Oleh karena itu, jika dilakukan estimasi SoC menggunakan baterai dengan jenis atau spesifikasi yang berbeda, hasil estimasi tersebut tidak dapat dijamin akurat. Hal ini disebabkan oleh perbedaan karakteristik elektrokimia, parameter internal, dan perilaku operasional yang memengaruhi metode estimasi SoC. Disarankan agar penelitian lebih lanjut dilakukan dengan memperluas jenis baterai dan spesifikasinya untuk meningkatkan generalisasi dan keandalan metode yang diusulkan.

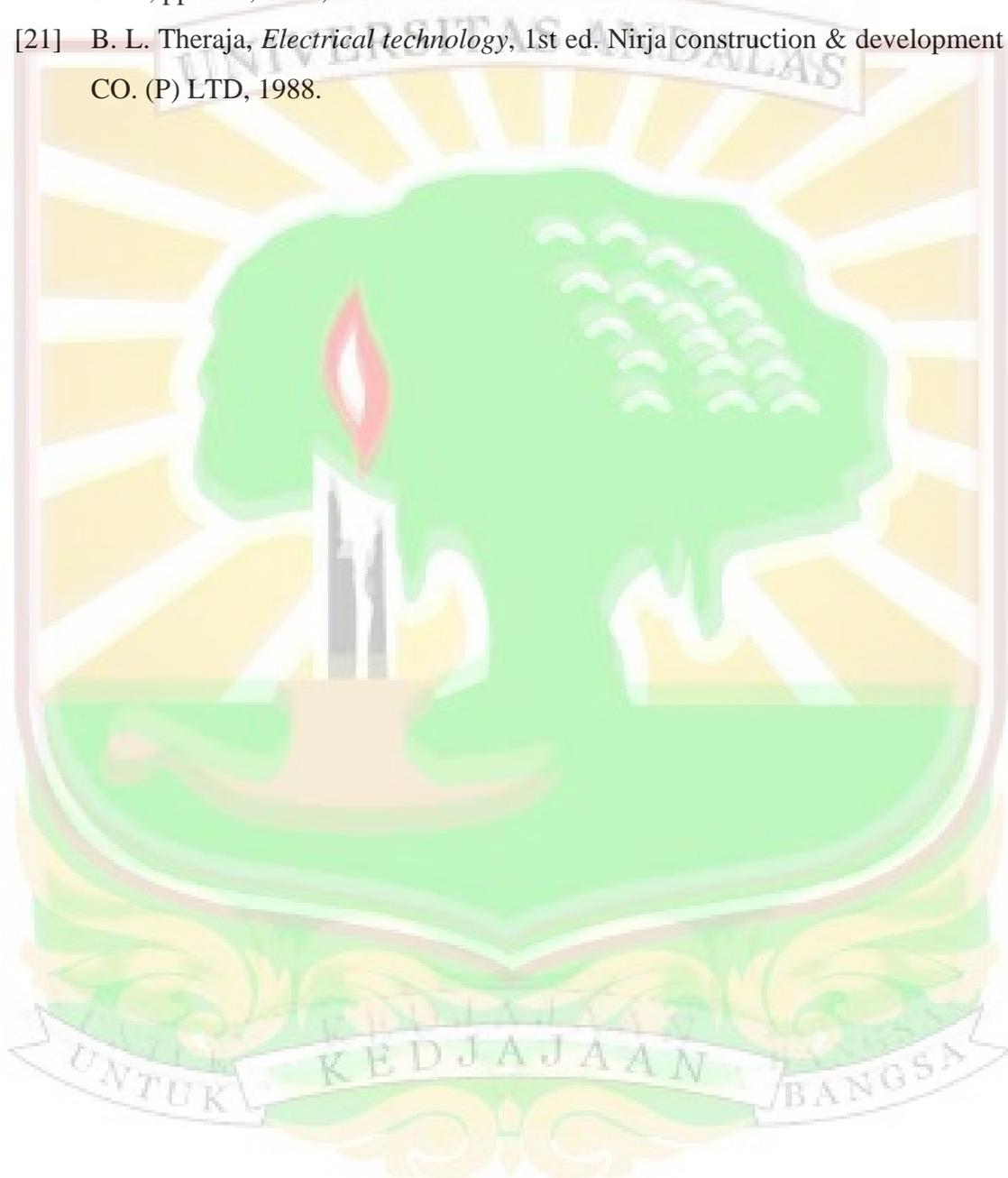
DAFTAR PUSTAKA

- [1] U. Wahid, "Prosiding SNST ke-9 Tahun 2018 Fakultas Teknik Universitas Wahid Hasyim 179," pp. 179–191, 2018.
- [2] A. D. Dwipayana, R. R. O. Sasue, and N. L. Darmayanti, "Analisis Faktor Pembebanan terhadap Efisiensi dan Termal pada Baterai Lithium Ion 60 Volt/ 23 Ah Sepeda Motor Listrik yang dirancang bangun dengan daya 3000 Watt," *Eng. Technol. Int. J.*, vol. 5, no. 02, pp. 190–197, 2023, doi: 10.55642/eatij.v5i02.365.
- [3] M. R. Agsa and A. Fatoni, "Estimasi State of Charge Baterai dengan Kalman Filter untuk Energy Management System," vol. 12, no. 2, 2023.
- [4] R. S. Bhat, K. B. G, and R. P. Rao, "Implementing Fuzzy Logic to Improve the Accuracy of SoC Estimation for Li-ion Battery," *Int. J. Eng. Res. Technol.*, vol. 9, no. 09, pp. 937–941, 2020, [Online]. Available: www.ijert.org
- [5] R. Zhang, B. Xia, B. Li, L. Cao, Y. Lai, and W. Zheng, "State of the Art of Lithium-Ion Battery SOC Estimation for Electrical Vehicles," 2018, doi: 10.3390/en11071820.
- [6] B. Sumantri, A. Abimayu, and N. Tamami, "Sistem Portable Dashboard Berbasis Android untuk Mobil Listrik," *J. Rekayasa Elektr.*, vol. 14, no. 3, 2018, doi: 10.17529/jre.v14i3.11826.
- [7] Zhaowei Zhang, C. Monitoring, "SOC Estimation Methods for Lithium-Ion Batteries without Current Monitoring," 2023.
- [8] W. Huang and J. A. Qahouq, "An online battery impedance measurement method using DC-DC power converter control," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 61, no. 11, pp. 5987–5995, 2014, doi: 10.1109/TIE.2014.2311389.
- [9] T. O. Ting, K. L. Man, N. Zhang, C. U. Lei, and C. Lu, "State-space battery modeling for smart Battery Management System," *Lect. Notes Eng. Comput. Sci.*, vol. 2210, no. January, pp. 12–15, 2014.
- [10] C. Zhu, X. Li, L. Song, and L. Xiang, "Development of a theoretically based

- thermal model for lithium ion battery pack,” *J. Power Sources*, vol. 223, pp. 155–164, 2013, doi: 10.1016/j.jpowsour.2012.09.035.
- [11] L. H. Saw, K. Somasundaram, Y. Ye, and A. A. O. Tay, “Electro-thermal analysis of Lithium Iron Phosphate battery for electric vehicles,” *J. Power Sources*, vol. 249, pp. 231–238, 2014, doi: 10.1016/j.jpowsour.2013.10.052.
- [12] O. Tremblay and L. A. Dessaint, “Experimental validation of a battery dynamic model for EV applications,” *24th Int. Batter. Hybrid Fuel Cell Electr. Veh. Symp. Exhib. 2009, EVS 24*, vol. 2, pp. 930–939, 2009.
- [13] N. Omar *et al.*, “Lithium iron phosphate based battery - Assessment of the aging parameters and development of cycle life model,” *Appl. Energy*, vol. 113, pp. 1575–1585, 2014, doi: 10.1016/j.apenergy.2013.09.003.
- [14] S. Sharma, A. K. Panwar, and M. M. Tripathi, “ScienceDirect Storage technologies for electric vehicles,” *J. Traffic Transp. Eng. (English Ed.)*, vol. 7, no. 3, pp. 340–361, 2019, doi: 10.1016/j.jtte.2020.04.004.
- [15] T. Sutikno and H. Satrian Purnama, *KONVERTER DC-DC Prinsip & Aplikasi*, vol. 1. 2020.
- [16] N. N. Karaburun, S. ARIK HATIPOĞLU, and M. KONAR, “SOC Estimation of Li-Po Battery Using Machine Learning and Deep Learning Methods,” *J. Aviat.*, vol. 8, no. 1, pp. 26–31, 2024, doi: 10.30518/jav.1425676.
- [17] Y. Zheng, M. Ouyang, X. Han, L. Lu, and J. Li, “Investigating the error sources of the online state of charge estimation methods for lithium-ion batteries in electric vehicles,” *J. Power Sources*, vol. 377, no. November 2017, pp. 161–188, 2018, doi: 10.1016/j.jpowsour.2017.11.094.
- [18] P. A. Lindahl, M. A. Cornachione, and S. R. Shaw, “A time-domain least squares approach to electrochemical impedance spectroscopy,” *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 61, no. 12, pp. 3303–3311, 2012, doi: 10.1109/TIM.2012.2210457.
- [19] J. P. Christophersen, D. F. Glenn, C. G. Motloch, R. B. Wright, C. D. Ho, and V. S. Battaglia, “Electrochemical impedance spectroscopy testing on the advanced technology development program lithium-ion cells,” *IEEE Veh. Technol. Conf.*, vol. 56, no. 3, pp. 1851–1855, 2002, doi:

10.1109/vetecf.2002.1040537.

- [20] R. G. Hoffmann, J. E. Slade, and J. L. Morrison, "Development and test of a real time battery impedance estimation system," *IEEE Aerosp. Conf. Proc.*, vol. 2006, pp. 1–8, 2006, doi: 10.1109/aero.2006.1656091.
- [21] B. L. Theraja, *Electrical technology*, 1st ed. Nirja construction & development CO. (P) LTD, 1988.



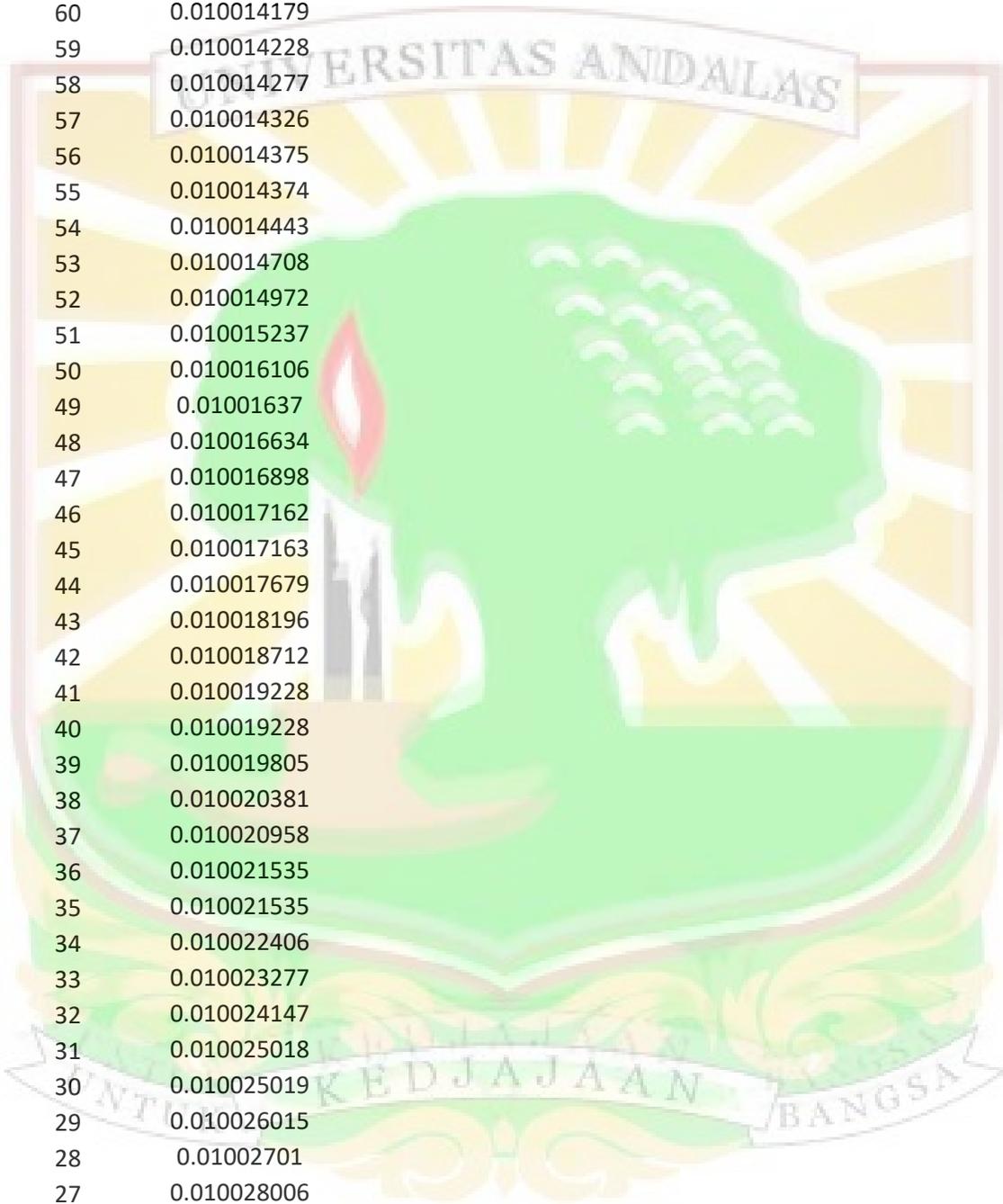
Lampiran

Tabel hubungan antara SoC dan nilai impedansi internal pada model baterai dari library simulink. Data ini diuji dengan

Lampiran 1 Tabel hubungan SoC dan nilai impedansi internal baterai

SoC	Impedansi
99	0.010009005
98	0.010009057
97	0.010009109
96	0.010009162
95	0.010009162
94	0.010009152
93	0.010009142
92	0.010009133
91	0.010009123
90	0.010009122
89	0.010008905
88	0.010008689
87	0.010008473
86	0.010008256
85	0.010008255
84	0.010008653
83	0.010009051
82	0.010009449
81	0.010009847
80	0.010009848
79	0.010010109
78	0.01001037
77	0.010010631
76	0.010010892
75	0.010010891
74	0.010011093
73	0.010011295
72	0.010011497
71	0.010011699
70	0.0100117
69	0.010011798
68	0.010011896
67	0.010011994
66	0.010012091
65	0.010012093

64	0.010012663
63	0.010013234
62	0.010013804
61	0.010013975
60	0.010014179
59	0.010014228
58	0.010014277
57	0.010014326
56	0.010014375
55	0.010014374
54	0.010014443
53	0.010014708
52	0.010014972
51	0.010015237
50	0.010016106
49	0.01001637
48	0.010016634
47	0.010016898
46	0.010017162
45	0.010017163
44	0.010017679
43	0.010018196
42	0.010018712
41	0.010019228
40	0.010019228
39	0.010019805
38	0.010020381
37	0.010020958
36	0.010021535
35	0.010021535
34	0.010022406
33	0.010023277
32	0.010024147
31	0.010025018
30	0.010025019
29	0.010026015
28	0.01002701
27	0.010028006
26	0.010029002
25	0.010029001
24	0.010030519



23	0.010032037
22	0.010033555
21	0.010035073
20	0.010036592
19	0.010038345
18	0.010040098
17	0.010041851
16	0.010043604
15	0.010045357
14	0.010049648
13	0.010053939
12	0.01005823
11	0.010062521
10	0.01006252
9	0.010069912
8	0.010077305
7	0.010084698
6	0.010092091
5	0.010099482
4	0.0101232
3	0.010146918
2	0.010170637
1	0.010194362



ORIGINALITY REPORT

3%

SIMILARITY INDEX

3%

INTERNET SOURCES

0%

PUBLICATIONS

%

STUDENT PAPERS

PRIMARY SOURCES

1

scholar.unand.ac.id

Internet Source

3%

Exclude quotes Off

Exclude matches < 3%

Exclude bibliography Off

