

PENGARUH METODE PENGISIAN DAYA BATERAI *CONSTANT CURRENT-CONSTANT VOLTAGE (CC-CV)* DAN *MULTI STAGE CONSTANT CURRENT (MSCC)* TERHADAP *STATE OF HEALTH (SOH)* BATERAI *LITHIUM-ION (LI-ION)*

Skripsi

Oleh

**GILANG MUHAMMAD FARHAN
1815031011**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

PENGARUH METODE PENGISIAN DAYA BATERAI *CONSTANT CURRENT-CONSTANT VOLTAGE (CC-CV)* DAN *MULTI STAGE CONSTANT CURRENT (MSCC)* TERHADAP *STATE OF HEALTH (SOH)* BATERAI *LITHIUM-ION (LI-ION)*

Oleh

GILANG MUHAMMAD FARHAN

1815031011

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK**

Pada

**Jurusan Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2025**

ABSTRAK

PENGARUH METODE PENGISIAN DAYA BATERAI *CONSTANT CURRENT-CONSTANT VOLTAGE (CC-CV)* DAN *MULTI STAGE CONSTANT CURRENT (MSCC)* TERHADAP *STATE OF HEALTH (SOH)* BATERAI *LITHIUM-ION (LI-ION)*

Oleh

Gilang Muhammad Farhan

Baterai *Lithium-Ion (Li-Ion)* telah menjadi komponen penting dalam berbagai aplikasi modern karena keunggulannya dalam kepadatan energi dan daya tahan. Namun, penggunaan yang berkelanjutan, terutama proses pengisian dan pengosongan, dapat memengaruhi kondisi kesehatan baterai (*State of Health - SoH*). Penelitian ini bertujuan untuk merancang sistem pengisian dan menganalisis pengaruh dua metode pengisian daya, yaitu *Constant Current-Constant Voltage (CC-CV)* dan *Multi Stage Constant Current (MSCC)*, terhadap *SoH* baterai. Pengujian dilakukan pada dua sampel baterai Li-Ion model EVE-ICR18650/20P selama 20 siklus pengisian-pengosongan untuk masing-masing metode (*CC-CV* dan *MSCC*). *SoH* baterai diestimasi dengan membandingkan kapasitas total pada akhir setiap siklus terhadap kapasitas awal. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem yang dirancang berfungsi dengan baik, didukung oleh validasi sensor arus INA219 dengan akurasi rata-rata 99,074% dan presisi 99,465%, serta sensor tegangan dengan akurasi rata-rata 99,861% dan presisi 99,989%. Metode pengisian *MSCC* menunjukkan pengaruh yang lebih baik terhadap *SoH* baterai, dengan penurunan *SoH* rata-rata per siklus sebesar 0,041% untuk kedua sampel. Sementara itu, metode *CC-CV* menyebabkan penurunan *SoH* rata-rata per siklus yang lebih tinggi, yaitu 0,069% untuk kedua sampel.

Kata kunci : *Lithium-Ion, State of Health, CC-CV, MSCC, Buck Converter*

ABSTRACT

THE EFFECT OF CONSTANT CURRENT-CONSTANT VOLTAGE (CC-CV) AND MULTI STAGE CONSTANT CURRENT (MSCC) BATTERY CHARGING METHODS ON THE STATE OF HEALTH (SOH) OF LITHIUM-ION (LI-ION) BATTERIES

By

Gilang Muhammad Farhan

Lithium-ion (Li-ion) batteries have become an important component in various modern applications due to their advantages in energy density and durability. However, continuous use, especially the charging and discharging processes, can affect the battery's state of health (SoH). This study aims to design a charging system and analyze the impact of two charging methods Constant Current-Constant Voltage (CC-CV) and Multi Stage Constant Current (MSCC) on battery SoH. Testing was conducted on two samples of Li-Ion batteries, model EVE-ICR18650/20P, over 20 charge-discharge cycles for each method (CC-CV and MSCC). The battery's SoH was estimated by comparing the total capacity at the end of each cycle to the initial capacity. The test results showed that the designed system functioned well, supported by validation of the INA219 current sensor with an average accuracy of 99.074% and precision of 99.465%, as well as the voltage sensor with an average accuracy of 99.861% and precision of 99.989%. The MSCC charging method showed a better effect on battery SoH, with an average SoH decrease per cycle of 0.041% for both samples. Meanwhile, the CC-CV method caused a higher average SoH decrease per cycle, namely 0.069% for both samples.

Keywords: Lithium-Ion, State of Health, CC-CV, MSCC, Buck Converter

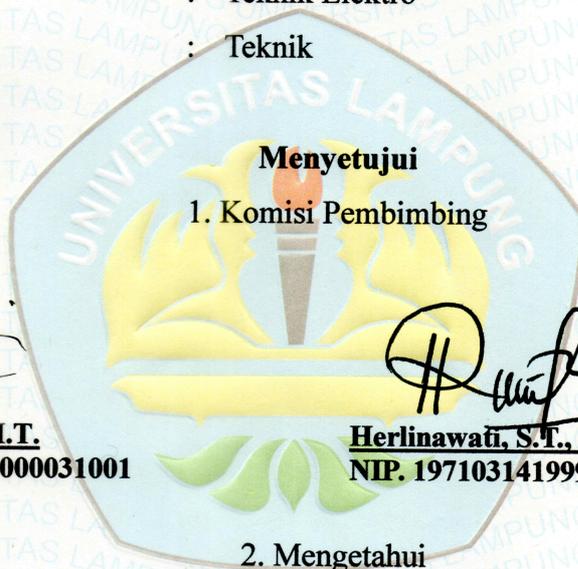
Judul Skripsi : **PENGARUH METODE PENGISIAN DAYA BATERAI *CONSTANT CURRENT-CONSTANT VOLTAGE (CC-CV)* DAN *MULTI STAGE CONSTANT CURRENT (MSCC)* TERHADAP *STATE OF HEALTH (SOH)* BATERAI *LITHIUM-ION (LI-ION)***

Nama Mahasiswa : **Gilang Muhammad Farhan**

Nomor Pokok Mahasiswa : 1815031011

Jurusan : Teknik Elektro

Fakultas : Teknik




Sumadi, S.T., M.T.
NIP. 197311042000031001


Herlinawati, S.T., M.T.
NIP. 197103141999032001

2. Mengetahui

Ketua Jurusan
Teknik Elektro

Ketua Program Studi S1
Teknik Elektro


Herlinawati, S.T., M.T.
NIP. 197103141999032001


Sumadi, S.T., M.T.
NIP. 197311042000031001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

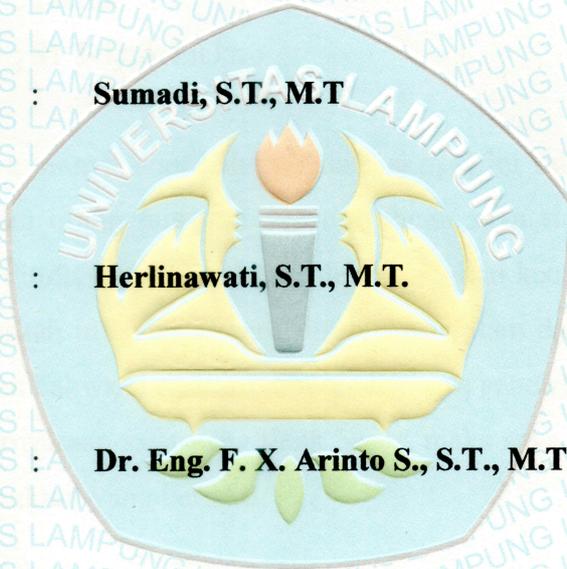
Ketua : Sumadi, S.T., M.T



Sekretaris : Herlinawati, S.T., M.T.



Penguji : Dr. Eng. F. X. Arinto S., S.T., M.T.



2. Dekan Fakultas Teknik

Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc. }
NIP 19750928 200112 1 002



Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 12 Juni 2025

SURAT PERNYATAAN

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Gilang Muhammad Farhan

NPM : 1815031011

Fakultas : Teknik

Program Studi : S1 Teknik Elektro

Dengan ini saya menyatakan bahwa dalam skripsi ini tidak terdapat karya yang pernah dilakukan orang lain dan sepengetahuan saya tidak ada karya maupun pendapat yang ditulis atau diterbitkan oleh orang lain kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini sebagaimana disebutkan dalam daftar pustaka. Selain itu, saya menyatakan bahwa skripsi ini dibuat oleh saya sendiri.

Apabila ada pernyataan saya yang tidak benar, maka saya bersedia dikenai sanksi sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, 18 Juni 2025



Gilang
Gilang Muhammad Farhan

NPM. 1815031011

PERSEMBAHAN

Kupersembahkan karya kecil ini dengan penuh rasa hormat, cinta, dan kasih sayang kepada :

Kedua orang tuaku tercinta,
Bapak Slamet dan Ibu Suginah

Adikku tersayang,
Galih Firnanda

Kakek dan nenekku yang sangat aku cintai,
Alm. Mbah Kadeni, Almh. Mbah Tukiye, Mbah Bero, dan Mbah Jumikem

Paman, tante, adik sepupu, dan adik keponakan yang selalu aku banggakan dan aku sayangi.

Sahabat dan rekan-rekan seperjuangan Teknik Elektro Universitas Lampung angkatan 2018

Serta almamaterku tercinta **“UNIVERSITAS LAMPUNG”**

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama Gilang Muhammad Farhan, dilahirkan di Notoharjo, 10 Maret 2000, anak pertama dari dua bersaudara dari pasangan Bapak Slamet dan Ibu Suginah. Pendidikan formal penulis dimulai pada Pendidikan Taman Kanak - Kanak (TK) Dharma Wanita II yang diselesaikan pada tahun 2006, Sekolah Dasar (SD) diselesaikan di SD Negeri 2 Notoharjo pada tahun 2012, dilanjutkan Sekolah Menengah Pertama (SMP) di SMP Negeri 1 Trimurjo dan lulus pada tahun 2015, dilanjutkan Sekolah Menengah Akhir (SMA) di SMA Negeri 1 Trimurjo dan lulus pada tahun 2018. Penulis terdaftar sebagai mahasiswa Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung melalui jalur Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri (SNMPTN) pada tahun 2018. Selama menjadi mahasiswa Penulis aktif di Organisasi Kemahasiswaan dengan salah satu pencapaian sebagai kepala Divisi Sosial, Departemen Sosial dan Kewirausahaan, Himpunan Mahasiswa Teknik Elektro Universitas Lampung (HIMATRO) Periode 2019 – 2020. Penulis memilih konsentrasi Elektronika dan Kendali sebagai fokus dalam perkuliahan dan penelitian. Pada tahun 2021, penulis mengikuti program Magang dan Studi Independen (MSIB) yang diselenggarakan oleh Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset dan Teknologi Republik Indonesia (Kemendikbud-Ristek RI) di PT. Microsoft Indonesia yang berkolaborasi dengan Mari Belajar dengan *Learning Track Data and Artificial Intelligence*, dan kemudian dilanjutkan pada tahun 2022 di PT. Great Giant Pineapple (GGP).

SANWACANA

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas limpahan rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan skripsi ini yang berjudul: “Pengaruh Metode Pengisian Daya Baterai *Constant Current-Constant Voltage (CC-CV)* dan *Multi Stage Constant Current (MSCC)* terhadap *State of Health (SOH)* Baterai *Lithium-Ion (Li-ion)*” yang merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik (S.T.) di Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung.

Skripsi ini hadir sebagai upaya untuk memberikan kontribusi ilmiah terhadap pemahaman bagaimana dua metode pengisian baterai, yaitu *CC-CV* dan *MSCC*, memengaruhi *State of Health (SOH)* baterai *Lithium-ion* dalam jangka waktu tertentu. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi rujukan dalam pengembangan sistem manajemen baterai yang lebih efisien, aman, dan berkelanjutan.

Penulis menyadari bahwa penyusunan skripsi ini tidak lepas dari dukungan, bantuan, dan bimbingan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Sumadi, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing Utama yang telah memberikan bimbingan, arahan, masukan, dan motivasi kepada penulis di setiap kesempatan.
2. Ibu Herlinawati, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing Pendamping yang telah memberikan bimbingan, arahan, masukan, dan motivasi kepada penulis di setiap kesempatan.
3. Dr. Eng. F.X. Arinto S., S.T., M.T. selaku Dosen Penguji yang telah memberikan kritik, saran, dan motivasi yang membangun kepada penulis.

4. Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Lampung yang telah memberikan ilmu yang bermanfaat kepada penulis selama menempuh pendidikan perkuliahan.
5. Kedua Orang Tua saya yang sangat saya sayangi, dan adik yang sangat saya banggakan serta semua keluarga yang telah mendukung penuh sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi ini.
6. Mahasiswi pemilik NPM 1815011066 yang telah memberi dan menjadi sumber ide, semangat, serta motivasi.
7. Teman-teman Jurusan Teknik Elektro Universitas Lampung angkatan 2018, atas semangat dan kebersamaannya selama menempuh pendidikan.
8. Seluruh pihak yang telah membantu penulis menyelesaikan skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan dalam penulisan skripsi ini. Penulis mengharapkan adanya kritik dan saran yang membangun dari berbagai pihak demi kemajuan bersama. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi penulis dan pembaca.

Bandar Lampung, 18 Juni 2025

Penulis,

Gilang Muhammad Farhan

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	iv
SURAT PERNYATAAN	vii
PERSEMBAHAN.....	viii
RIWAYAT HIDUP	ix
SANWACANA	x
DAFTAR ISI.....	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xiv
DAFTAR TABEL	xvi
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Tujuan Penelitian	2
1.3 Perumusan Masalah.....	3
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
1.6 Hipotesis	3
1.7 Sistematika Penulisan	4
II. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Penelitian Terdahulu	5
2.2 Baterai <i>Lithium-Ion</i>	7
2.2.1 Estimasi <i>State of Health (SoH)</i> Baterai	9
2.3 Metode Pengisian Daya Baterai	10
2.3.1 Metode <i>Constant Current-Constant Voltage</i>	10
2.3.2 Metode <i>Multi-Stage Constant Current (MSCC)</i>	11
2.4 DC-DC Converter	13
2.5 Buck Converter	15
2.6 Perangkat Keras.....	18
2.6.1 Arduino Nano.....	18
2.6.2 MOSFET	20
2.6.3 INA219.....	22
2.6.4 Sensor Tegangan	23

2.6.5 LCD.....	24
2.7 Perangkat lunak	25
2.7.1 Arduino IDE.....	25
2.7.2 EasyEDA.....	26
III. METODE PENELITIAN.....	27
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	27
3.2 Alat dan Bahan	27
3.3 Tahapan Penelitian.....	28
3.4 Rangkaian Arduino Nano dengan INA219.....	30
3.5 Rangkaian Arduino Nano dengan modul LCD 2x16.....	31
3.6 Rangkaian Sensor Tegangan dengan Arduino Nano	32
3.7 Perancangan Rangkaian Sistem.....	33
3.7.1 Sistem Pengisian Daya Baterai	33
3.7.2 Sistem Pengosongan Daya Baterai.....	35
3.8 Pembuatan Program.....	37
3.9 Prosedur Pengujian Sensor	40
3.9.1 Pengujian Sensor Arus INA219	40
3.9.2 Pengujian Sensor Tegangan	41
3.10 Pengujian <i>MSCC</i> dan <i>CC-CV</i> Terhadap Kapasitas Baterai	42
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN.....	44
4.1 Hasil Realisasi Perancangan Sistem	44
4.1.1 Hasil Realisasi Rangkaian Sistem Pengisian Daya Baterai	44
4.1.2 Hasil Realisasi Rangkaian Sistem Pengosongan Daya Baterai ..	45
4.2 Data Hasil Pengujian Sensor	47
4.2.1 Data Hasil Pengujian Sensor Arus INA219	47
4.2.2 Data Hasil Pengujian Sensor Tegangan	50
4.3 Data Hasil Pengujian Baterai dengan Metode Pengisian <i>CC-CV</i>	52
4.4 Data Hasil Pengujian Baterai dengan Metode Pengisian <i>MSCC</i>	54
4.5 Pengaruh <i>CC-CV</i> dan <i>MSCC</i> Terhadap Kapasitas Total Baterai	56
V. KESIMPULAN DAN SARAN.....	58
5.1 Kesimpulan.....	58
5.2 Saran	59
DAFTAR PUSTAKA	60
LAMPIRAN.....	63

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 Tampilan fisik baterai <i>Lithium-Ion</i>	8
Gambar 2.2 Strategi pengisian daya <i>CC-CV</i>	11
Gambar 2.3 Strategi pengisian daya baterai metode <i>MSCC</i>	11
Gambar 2.4 Tipe-tipe acuan transisi metode pengisian daya <i>MSCC</i>	12
Gambar 2.5 Rangkaian dasar <i>Buck Converter</i>	15
Gambar 2.6 Tampilan fisik Arduino Nano dan pin keluarannya.....	19
Gambar 2.7 MOSFET sebagai, <i>High-side switch</i> dan <i>Low-side switch</i>	21
Gambar 2.8 Tampilan fisik MOSFET IRF9540N	21
Gambar 2.9 Tampilan fisik modul INA219.	22
Gambar 2.10 Rangkaian pembagi tegangan sebagai sensor tegangan.	23
Gambar 2.11 Tampilan fisik modul LCD 2x16.....	24
Gambar 2.12 Lingkungan kerja Arduino IDE v2.2.1.....	25
Gambar 2.13 Tampilan antarmuka pengguna EasyEDA.	26
Gambar 3.1 Diagram alir tahap-tahap penelitian.	29
Gambar 3.2 Rangkaian Arduino Nano dengan INA219.	30
Gambar 3.3 Rangkaian Arduino Nano dengan LCD 2x16.	31
Gambar 3.4 Rangkaian sensor tegangan dengan Arduino nano.....	32
Gambar 3.5 Diagram blok sistem pengisian daya baterai.....	33
Gambar 3.6 Rangkaian keseluruhan sistem pengisi daya baterai.	34
Gambar 3.7 Diagram blok sistem pengisian daya baterai.....	35
Gambar 3.8 Rangkaian keseluruhan sistem pengosongan daya baterai.....	36
Gambar 3.9 Diagram alir program pengisian daya baterai metode <i>CC-CV</i>	37
Gambar 3.10 Diagram alir program pengisian daya baterai metode <i>MSCC</i>	38
Gambar 3.11 Diagram alir program pengosongan daya baterai.....	39

Gambar 3.12 Format tabel pengujian sensor arus	41
Gambar 3.13 Format tabel pengujian sensor tegangan	41
Gambar 3.14 Format tabel pengujian pengaruh <i>CC-CV</i> terhadap <i>SoH</i> Baterai	43
Gambar 3.15 Format tabel pengujian pengaruh <i>MSCC</i> terhadap <i>SoH</i> Baterai	43
Gambar 4.1 Realisasi rangkaian sistem pengisian daya baterai.....	44
Gambar 4.2 Rangkaian sistem pengosongan daya baterai	46
Gambar 4.3 Grafik perbandingan kapasitas total <i>CC-CV</i> dan <i>MSCC</i>	56

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Spesifikasi baterai <i>Li-Ion</i> model EVE-ICR18650/20P	9
Tabel 2.2 Macam jenis DC-DC <i>Converter</i>	14
Tabel 2.3 Spesifikasi Arduino Nano.....	20
Tabel 2.4 Spesifikasi IRF9540N	22
Tabel 3.1 Alat dan Bahan penelitian	27
Tabel 3.2 Koneksi pin Arduino Nano dengan pin INA219	31
Tabel 3.3 Koneksi pin Arduino Nano dengan pin LCD 2x16.....	32
Tabel 4.1 Data hasil pengujian pada pengukuran sensor INA219	47
Tabel 4.2 Data hasil perhitungan akurasi sensor INA219.....	48
Tabel 4.3 Data hasil perhitungan akurasi sensor INA219	49
Tabel 4.4 Data hasil pengujian pada pengukuran sensor tegangan	50
Tabel 4.5 Data hasil perhitungan nilai akurasi sensor tegangan	51
Tabel 4.6 Data hasil Perhitungan Nilai Presisi Sensor Tegangan	52
Tabel 4.7 Pengujian baterai dengan metode pengisian <i>CC-CV</i>	53
Tabel 4.8 Pengujian baterai dengan metode pengisian <i>MSCC</i>	54

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sejarah penemuan baterai (*Battery*) dimulai pada abad ke-18 ketika Alessandro Volta menemukan “elemen baterai” pada tahun 1799, yang terdiri dari tumpukan disk tembaga (*Cu*) dan seng (*Zn*) yang dipisahkan oleh kain yang direndam dalam larutan garam *Sodium Chloride* (*NaCl*). Pada tahun 1859, Gaston Planté menciptakan baterai asam-timbal (*Lead-Acid*), menjadi baterai isi ulang pertama yang digunakan secara praktis dalam aplikasi telegraf. Perkembangan baterai terus berlanjut dengan penemuan baterai *Nickel-Cadmium* (*Ni-Cd*) oleh Waldemar Jungner pada tahun 1899, yang memberikan solusi yang praktis untuk penggunaan rumah tangga dan industri. Penemuan yang paling berdampak dalam sejarah baterai adalah penemuan baterai *lithium-ion* (*Li-Ion*) pada tahun 1980-an oleh John B. Goodenough, Stanley Whittingham, dan Akira Yoshino, yang mengubah paradigma masyarakat mengenai teknologi baterai dengan memberikan daya tahan yang tinggi, ukuran yang lebih kecil, dan performa yang lebih baik.

Sejak pertama kali ditemukan, baterai telah menjadi komponen penting dalam berbagai aplikasi modern sebagai alat untuk menyimpan energi dan *supply* daya. Pengembangan teknologi baterai terus berlanjut untuk meningkatkan kapasitas, daya tahan, dan efisiensi. Pada beberapa dekade terakhir ini produksi dan konsumsi baterai dunia terus menerus mengalami peningkatan. Saat ini permintaan pasar untuk baterai *lithium-ion* di sektor kendaraan ringan mengalami pertumbuhan sekitar 40% dibandingkan tahun sebelumnya, dari 507 GWh naik menjadi 712 GWh pada tahun 2023 [1]. Pemerintah Indonesia juga menargetkan memiliki setidaknya 140 GWh kapasitas produksi sel pada

akhir dekade ini, dan sedang melakukan negosiasi dengan beberapa perusahaan lain untuk melakukan investasi pada *value chain* baterai [2]. China, salah satu produsen dan pengguna utama baterai daya (*Power battery*) di dunia, dihadapkan pada lonjakan penonaktifan (*decommissioning*) baterai dalam beberapa tahun terakhir, sekitar 277.000 ton baterai daya dinonaktifkan pada 2022, jumlahnya diperkirakan akan meningkat menjadi 1 juta ton per tahun setelah 2025 [3].

Penggunaan baterai sekunder yang dilakukan secara terus menerus tentunya akan berdampak pada umur baterai. Hal ini juga dikarenakan umur baterai yang bergantung pada siklus pengisian dan pengosongan dari baterai itu sendiri. *State of Health (SoH)* merupakan keadaan kesehatan baterai yang dihasilkan dari perbandingan kondisi baterai pakai dan kondisi ideal. Satuan *SoH* adalah persentase. Pada umumnya, *SoH* baterai akan 100% pada saat pembuatan dan akan berkurang seiring waktu dan penggunaan [4].

Berdasarkan latar belakang tersebut, di mana produksi dan konsumsi baterai dunia terus menerus mengalami peningkatan sehingga berdampak pada melonjaknya jumlah baterai non-aktif yang kemudian akan menjadi limbah lingkungan. Penurunan kondisi kesehatan baterai sampai tidak layak guna sering kali dipengaruhi oleh proses pengisian maupun pengosongan daya yang kurang baik. Pada penelitian ini akan dilakukan perancangan dan analisis pada metode pengisian daya baterai *Constant Current-Constant Voltage (CC-CV)* dan metode pengisian daya baterai *Multi Stage Constant Current (MSCC)*.

1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah:

1. Merancang dan membangun sistem pengisian daya baterai dengan metode *Constant Current-Constant Voltage (CC-CV)* dan *Multi Stage Constant Current (MSCC)*

2. Melakukan analisis pengaruh metode pengisian daya baterai *CC-CV* dan *MSCC* terhadap *State of Health (SoH)* baterai *Lithium-Ion (Li-Ion)*.

1.3 Perumusan Masalah

1. Bagaimana cara merancang dan membangun sistem pengisian daya baterai *Li-Ion* ?
2. Bagaimana pengaruh pengisian daya baterai menggunakan metode *CC-CV* dan *MSCC* terhadap kesehatan baterai *Li-Ion* ?

1.4 Batasan Masalah

1. Ruang lingkup penelitian ini adalah merancang, membangun, menguji, dan menganalisis sistem pengisian daya baterai.
2. Metode pengisian daya baterai yang digunakan yaitu *Constant Current-Constant Voltage (CC-CV)* dan *Multi-Stage Constant Current (MSCC)*.
3. Rangkaian pengisian daya baterai yang digunakan adalah DC-DC Converter tipe *switching* jenis *Buck Converter*

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah pengoptimalan proses pengisian daya baterai sehingga kondisi kesehatan atau *State of Health (SoH)* baterai dapat dijaga dan memperpanjang umur pakai baterai.

1.6 Hipotesis

Sistem pengisian daya baterai yang dibuat dengan menerapkan metode pengisian daya baterai *Constant Current-Constant Voltage* akan memberikan pengaruh yang lebih baik yaitu penurunan atau degradasi *State of Health (SoH)* baterai *Li-Ion* yang lebih sedikit.

1.7 Sistematika Penulisan

Untuk memudahkan penulisan dan pemahaman mengenai materi dari skripsi ini, maka skripsi ini dibagi menjadi 5 bab yang terdiri dari:

BAB I. PENDAHULUAN

Berisikan latar belakang, tujuan penelitian, manfaat penelitian, perumusan masalah, batasan masalah, hipotesis, dan sistematika penulisan.

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

Berisikan teori-teori mengenai sistem pengisian daya pada baterai *Li-Ion*

BAB III. METODE PENELITIAN

Berisikan waktu, tempat, alat dan bahan yang digunakan dan prosedur pengujian dan pengambilan data uji yang diusulkan pada penelitian yang akan dilakukan.

BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berisikan hasil dari penelitian berupa pembahasan dan perhitungan yang dilakukan dalam penelitian.

BAB V. SIMPULAN DAN SARAN

Berisikan kesimpulan dari penelitian dan saran untuk penelitian selanjutnya.

DAFTAR PUSTAKA

Berisikan daftar pustaka yang digunakan pada penulisan.

LAMPIRAN

Berisikan lampiran data hasil pemantauan dan program alat.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Beberapa penelitian yang telah dilakukan oleh peneliti sebelumnya yang digunakan sebagai referensi dalam proses penelitian ini antara lain :

1. Penelitian yang dilakukan oleh Abdul Basit Khan, Van-Long Pham, Thanh-Tung Nguyen, dan Woojin Choi dengan judul “*Multistage Constant-Current Charging Method for Li-ion Batteries*”. Penelitian ini dilakukan pada tahun 2016 di Soongsil University. Penelitian ini mengusulkan metode baru untuk menemukan pola pengisian optimal (*Optimal Charge Pattern* atau *OCP*) dari *MSCC* menggunakan model sirkuit ekuivalen berbasis RC untuk baterai Li-Ion. Metode ini membahas metode *MSCCC* berbasis 3 dan 5 tahap. Hasil dari penelitian ini adalah metode yang diusulkan dapat menemukan *OCP* hanya dengan satu eksperimen pada baterai. Metode yang diusulkan diaplikasikan pada baterai *Li-Ion* berkapasitas 2.6 Ah, hasil pengaplikasian didapatkan bahwa pengoptimalan metode pengisian daya baterai *MSCC* mampu mengisi daya baterai hingga kapasitas 100% dengan waktu 12% lebih singkat daripada metode pengisian *CC-CV* konvensional. Pengisian daya *MSCC* dengan pola pengisian yang sudah dioptimalkan memberikan efisiensi pengisian sebesar 0.54% lebih tinggi dibandingkan metode *MSCC* [5].
2. Penelitian yang dilakukan oleh Bhaskara Wisnu Ardli Mahardika, Trias Andromeda, dan Sudjaji dengan judul “Perancangan Sistem *Charging* Baterai Menggunakan DC-DC *Buck Converter* Metode *Constant Current (CC)* Dan *Constant Voltage (CV)*”. Penelitian ini dilakukan pada tahun 2020 di Universitas Diponegoro. Penelitian ini berfokus pada desain dan

perancangan sistem pengisian baterai menggunakan DC-DC *Buck Converter* dengan metode *Constant Current (CC)* dan *Constant Voltage (CV)* yang dikendalikan oleh *microcontroller* Arduino Nano. Sistem yang dirancang ini menggunakan umpan balik berupa sensor arus dan tegangan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem pengisian baterai yang dirancang dapat diatur untuk mengisi dengan arus konstan (CC) antara 0 A hingga 5 A dan tegangan konstan (CV) antara 0 VDC hingga 15 VDC. Selain itu, pengujian tanpa umpan balik menunjukkan bahwa efisiensi rata-rata DC-DC *Buck Converter* adalah 86,0[6].

3. Penelitian yang dilakukan oleh Irianto, Diah Septi Yanaratri, dan Faris Rahmatullah dengan judul “Desain dan Simulasi *Battery Charger* Metode *CC-CV (Constant Current-Constant Voltage)* dengan Kontrol Logika Fuzzy Menggunakan MATLAB”. Penelitian ini dilakukan pada tahun 2021 di Politeknik Elektronika Negeri Surabaya. Pada penelitian ini digunakan kontrol logika fuzzy yang digunakan untuk mengatur *duty cycle* pada rangkaian DC-DC *Buck Converter*, sehingga kondisi arus pengisian konstan dan tegangan pengisian konstan dapat terpenuhi. Hasil penelitian ini berupa hasil simulasi menggunakan MATLAB dengan metode CC-CV ketika kondisi CC diperoleh nilai arus sebesar 3.3A pada *duty cycle* 42,6% dan terjadi transisi menuju kondisi CV ketika *State of Charge (SoC)* 80,02% dengan nilai tegangan sebesar 14,4 V pada *duty cycle* 41,2%. Pengisian daya dan peningkatan *SoC* pada metode *CC-CV* lebih cepat 0.15 detik dibandingkan metode *CC* dan 0.25 detik dibandingkan metode *CV* [7].

Ide dari penelitian ini dengan judul “Pengaruh Metode Pengisian Daya Baterai *Constant Current-Constant Voltage (CC-CV)* Dan *Multi Stage Constant Current (MSCC)* Terhadap *State of Health (SoH)* Baterai Lithium-Ion (Li-Ion)” merupakan kombinasi dari ketiga referensi. Referensi pertama merupakan penelitian yang berkaitan dengan metode *Multi Stage Constant Current*, sedangkan referensi kedua dan ketiga berkaitan pada metode

Constant Current-Constant Voltage. Hal utama yang menjadi pembeda pada penelitian ini adalah fokus penelitian ini dalam melihat pengaruh dua metode pengisian daya yang berbeda terhadap kondisi kesehatan baterai, sedangkan ketiga penelitian berfokus pada performa dan keandalan masing-masing metode.

2.2 Baterai *Lithium-Ion*

Baterai *Lithium Ion (Li-Ion)* merupakan baterai yang memanfaatkan senyawa litium sebagai bahan dari elektrode positif dan negatif. Pada baterai ini, ion litium bergerak dari elektrode negatif ke elektrode positif saat digunakan, dan kembali saat diisi ulang. Baterai *Li-Ion* umum ditemukan pada barang-barang elektronik sehari-hari. Baterai ini memiliki banyak kelebihan seperti kepadatan energi yang baik, tidak ada efek memori, dan isinya tidak cepat terkuras saat tidak digunakan[4]. Elektrode (anode dan katode) adalah bahan reaktan dalam reaksi elektrokimia di baterai Li-ion. Ketika sedang diisi, elektron ditransfer dari elektrode positif (katode) ke elektrode negatif (anode) melalui lintasan eksternal, menyampaikan energi listrik ke sepanjang lintasan. Energi listrik ini disimpan sebagai energi kimia dalam sel. Ion litium bermigrasi ke elektrolit dan pemisah (*separator*), yang berfungsi sebagai medium penghantar tetapi tidak terlibat dalam reaksi elektrokimia sel. Ion litium dapat masuk dan keluar dari struktur kedua elektrode melalui proses yang dikenal sebagai penambahan (*intercalation*) atau ekstraksi (*deintercalation*) [8].



Gambar 2.1 Tampilan fisik baterai *Lithium-Ion*.

Saat ini beberapa material yang umum digunakan sebagai bahan penyusun baterai *lithium-ion* yaitu

1. *Lithium Manganese Oxide* (LiMn_2O_4), *Vanadium Oxide* (V_2O_5), *Lithium Cobalt Oxide* (LiCoO_2), dan *Iron Pyrite* (FeS_2) umum digunakan sebagai katode[8].
2. *Metallic Lithium*, *Hard Carbon*, *Lithium Titanate*, *Tin-Based Alloys* dan *Silicon Based Materials*, umum digunakan sebagai bahan anode[8].
3. *Lithium hexafluoro phosphate* (LiPF_6), *Lithium Perchlorate* (LiClO_4), *Lithium hexafluoro arsenate* (LiAsF_6), dan *Lithium trifluoromethanesulfonate* (LiCF_3SO_3) umumnya digunakan sebagai bahan elektrolit [8].

Pada penelitian ini baterai yang akan digunakan adalah baterai *Li-Ion* model EVE-ICR18650/20P dengan spesifikasi baterai [9] ditunjukkan pada tabel 2.1.

Tabel 2.1 Spesifikasi baterai *Li-Ion* model EVE-ICR18650/20P

No	Parameter	Keterangan
1	<i>Typical Discharge Capacity</i>	2000mAh
2	<i>Voltage Range</i>	4.2 V~2.50 V
3	<i>Standard Charge</i>	1 A, (4.20V ±0.05V, 100mA cut off)
4	<i>Rapid Charge</i>	4 A, (4.20V ±0.05V, 100mA cut off)
5	<i>Standard Discharge</i>	DC 0.4 A, (2.50 V cut off)
6	<i>Max. Instantaneous Discharge</i>	DC 30 A , (2.50 V cut off)

2.2.1 Estimasi *State of Health (SoH)* Baterai

Secara umum, *State of Health (SoH)* atau kondisi kesehatan baterai adalah indikator kritis untuk mengevaluasi tingkat penuaan atau degradasi. *SoH* juga didefinisikan sebagai rasio kapasitas total yang tersedia saat ini terhadap kapasitas awal. Kapasitas baterai terdegradasi seiring waktu menjadi 70–80% dari kapasitas yang biasanya tercantum pada *datasheet*. Pada akhirnya baterai yang mengalami degradasi kapasitas akan perlu digantikan, karena kinerjanya tidak lagi memenuhi kebutuhan [10].

Perhitungan nilai *SoH* dapat dilakukan dengan cara membandingkan nilai kapasitas total saat ini (mAh) dengan kapasitas awal baterai / *Beginning Of Life Capacity* (BOL Capacity)[4].

$$SoH = \frac{Q_{Tot}}{Q_{BOL}} \cdot 100 \quad (2.1)$$

Di mana:

SoH = *State of Health* Baterai (%)

Q_{Tot} = Kapasitas total baterai saat ini (Ah)

Q_{BOL} = Kapasitas awal baterai (Ah)

Kapasitas total baterai saat ini dapat diketahui dengan menghitung kapasitas baterai yang hilang selama pengosongan, sehingga :

$$Q_{Tot} = \frac{1}{3600} \cdot \int_{t_0}^t I(t) dt \cdot \quad (2.2)$$

di mana:

I = arus pengosongan (A)

t = waktu pengosongan (s)

Perhitungan kapasitas baterai yang hilang harus dilakukan secara berkala karena arus dan tegangan pengosongan baterai akan berubah seiring berkurangnya kapasitas baterai saat beban pengosongan tetap.

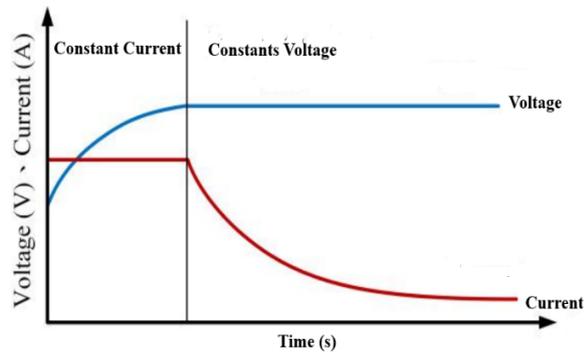
2.3 Metode Pengisian Daya Baterai

Terdapat beberapa metode pengisian daya baterai yang umum digunakan untuk baterai *Li-Ion*, pada penelitian ini akan digunakan dua metode pengisian daya baterai yaitu *CC-CV* dan *MSCC*.

2.3.1 Metode *Constant Current-Constant Voltage*

Metode pengisian daya baterai yang paling umum digunakan saat ini adalah metode *Constant Current-Constant Voltage (CC-CV)*. Dalam metode pengisian *CC-CV*, dua fase pengisian digunakan. Awalnya, baterai diisi menggunakan mode arus konstan (*CC*) (misalnya, 1 A). Selama fase (*CC*) ini tegangan baterai akan mulai naik. Saat tegangan baterai mencapai batas atas tegangan tetap (misalnya, 4,2 V), mode pengisian akan beralih ke mode tegangan konstan (*CV*). Selama mode (*CV*), arus pengisian mulai menurun. Ketika arus pengisian turun menjadi nilai arus minimum tertentu (misalnya, 0,05 A) menandakan proses pengisian selesai dan proses pengisian akan dihentikan. Meskipun cukup efektif metode ini akan menyebabkan kenaikan

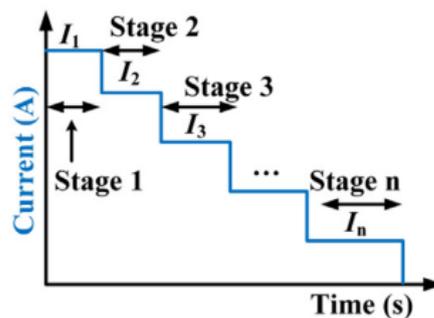
suhu yang signifikan selama mode arus konstan dan perlu waktu pengisian yang lebih lama selama mode tegangan konstan[11].



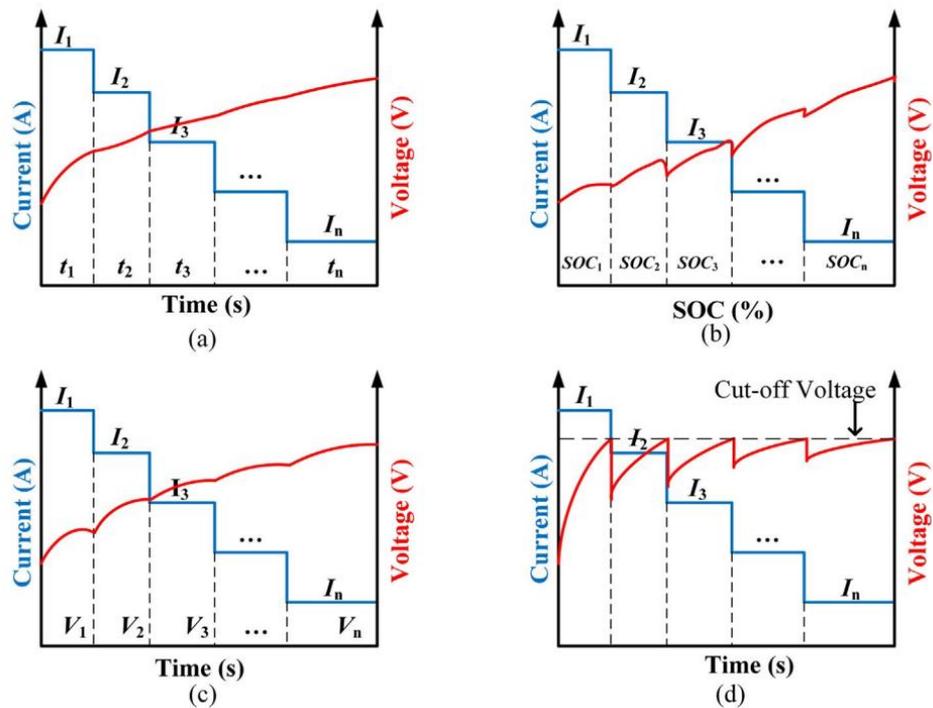
Gambar 2.2 Strategi pengisian daya *CC-CV*.

2.3.2 Metode *Multi-Stage Constant Current (MSCC)*

Metode *MSCC* bekerja dengan cara membagi laju arus pengisian ke dalam beberapa tahap (*Stages*) seperti pada Gambar 2.3, perpindahan satu tahap ke tahap selanjutnya akan bergantung pada beberapa kriteria atau acuan yang telah ditetapkan.



Gambar 2.3 Strategi pengisian daya baterai metode *MSCC* .



Gambar 2.4 Tipe-tipe acuan transisi metode pengisian daya *MSCC*.

Beberapa kriteria atau acuan yang sering digunakan untuk melakukan transisi arus pengisian dari satu tahap ke tahap selanjutnya berdasarkan beberapa referensi antara lain:

a. Transisi Berbasis Waktu

Waktu merupakan salah satu parameter untuk beralih dari satu tahap ke tahap selanjutnya, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.4(a). Transisi berbasis waktu mudah diimplementasikan tetapi belum ada standar metode untuk menentukan seberapa lama waktu atau kapan tahap dipindahkan dari satu tahap ke tahap selanjutnya. Salah satu referensi, melakukan percobaan dengan hasil terbaik yaitu 10, 12, dan 14 menit untuk tiga tahap dengan *SoC* setiap tahap 0%-30%, 30-60%, dan 60-80% [12].

b. Transisi Berbasis *SoC*

Kondisi muatan baterai atau *State of Charge (SoC)* juga dapat dijadikan sebagai parameter acuan, untuk berpindah tahap dari satu tahap ke tahap selanjutnya seperti terlihat pada Gambar 2.4(b). Kekurangan jenis transisi

ini adalah melakukan estimasi *SoC* yang akurat. Terdapat beberapa parameter pada baterai yang mempengaruhi estimasi *SoC* seperti tegangan, arus, dan suhu operasional [13].

c. Transisi Berbasis Ambang Batas Tegangan

Ambang batas tegangan dapat digunakan sebagai parameter untuk melakukan transisi pengisian daya dari satu tahap ke tahap selanjutnya. Ambang batas tegangan yang berbeda dipilih untuk memodifikasi tahap dan nilai arus pengisian, seperti yang ditunjukkan Gambar 2.4(c). Tidak ada metode khusus yang digunakan untuk menentukan ambang batas tegangan pada setiap tahap, namun demikian teknik transisi ini lebih mudah diimplementasikan dibandingkan transisi berbasis *SoC* [13].

d. Transisi Berbasis Tegangan *Cut-Off*

Dalam metode ini saat pengisian daya mencapai tegangan *cut-off* arus pengisian akan dikurangi (tahap transisi), kemudian pengisian akan dilanjutkan dengan arus yang sudah berkurang sampai pada tegangan *cut-off* tercapai lagi [13]. Prosedur ini akan terus diulangi sampai jumlah tahap yang telah ditentukan tercapai seperti terlihat pada Gambar 2.4(d). Jenis transisi ini cukup mudah diimplementasikan jika dibandingkan dengan jenis transisi lain sebelumnya.

2.4 DC-DC Converter

DC-DC Converter atau dapat disebut DC *chopper* adalah rangkaian elektronik atau piranti elektro mekanik yang menggunakan penyakralan elektronik (seperti MOSFET, IGBT, Thyristor dan lain-lain) untuk mengkonversi sumber tegangan DC dari satu level tegangan ke level tegangan yang lain. Level tegangan yang mampu dikonversi oleh *converter* DC-DC berkisar dari tegangan yang sangat rendah (baterai kecil) sampai dengan tegangan yang sangat tinggi (transmisi daya tegangan tinggi). Sumber tegangan masukan dapat berupa sumber tegangan yang tetap atau sumber tegangan yang dapat diatur level tegangannya (variabel). Demikian pula

keluaran DC yang dihasilkan dapat ditujukan untuk level tegangan DC konstan ataupun tegangan DC variabel[14]. Beberapa jenis DC-DC *converter* yang sering digunakan termuat dalam tabel 2.2.

Tabel 2.2 Macam jenis DC-DC *Converter*

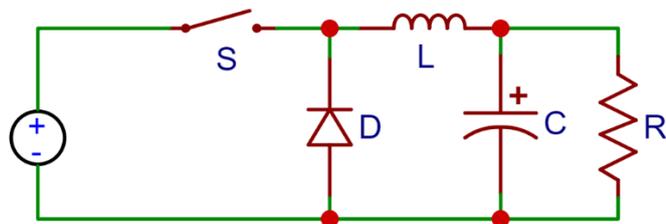
No	Jenis	Jenis Isolasi
1	<i>Buck Converter</i>	<i>Non-Isolated</i>
2	<i>Boost Converter</i>	<i>Non-Isolated</i>
3	<i>Buck-Boost Converter</i>	<i>Non-Isolated</i>
4	<i>Single Ended Primary Inductor Converter (SEPIC)</i>	<i>Non-Isolated/Isolated</i>
5	<i>Cuk Converter</i>	<i>Non-Isolated/Isolated</i>
6	<i>Flyback Converter</i>	<i>Isolated</i>
7	<i>Forward Converter</i>	<i>Isolated</i>
8	<i>Half-Bridge Converter</i>	<i>Isolated</i>
9	<i>Full-Bridge Converter</i>	<i>Isolated</i>
10	<i>Push-Pull Converter</i>	<i>Isolated</i>

DC-DC *Converter* memiliki dua jenis pengolahan daya yaitu linier dan peralihan (*switching*). *Converter* linier mampu menghasilkan tegangan keluaran dengan tingkat *ripple* dan *noise* yang rendah, cocok untuk rangkaian berdaya rendah. Namun, penggunaan *converter* linier pada daya besar tidak efisien karena dapat menghasilkan panas yang sebanding dengan arus yang keluar saat terjadi penurunan tegangan besar. Sebaliknya, *converter switching* mengubah tegangan DC dengan menyimpan sementara energi masukan, kemudian melepaskannya pada tegangan keluaran yang berbeda. Energi disimpan dalam komponen penyimpanan medan magnet seperti induktor, dan transformator, atau dalam komponen penyimpan medan listrik seperti kapasitor. Tipe peralihan umumnya memiliki efisiensi daya di atas 70%, lebih efisien dibandingkan dengan tipe linier yang hanya mengubah sebagian besar daya menjadi panas. Dengan adanya keuntungan efisiensi daya pada

converter DC-DC tipe *switching*, pada penelitian ini akan digunakan DC-DC converter tipe *switching* jenis *Buck Converter*.

2.5 *Buck Converter*

DC *Chopper* tipe *buck* atau yang biasa disebut *Buck Converter* merupakan salah satu regulator DC yang dapat memenuhi kebutuhan akan sebuah sumber tegangan DC dengan tegangan keluaran yang variabel. Dengan *Buck Converter*, nilai tegangan keluaran dapat diatur agar lebih kecil atau sama dengan nilai tegangan masukannya dengan mengatur besar lebar pulsa (*duty cycle*) dari rangkaian kontrol *PWM (Pulse Width Modulation)* [15].



Gambar 2.5 Rangkaian dasar *Buck Converter*.

PWM (Pulse Width Modulation) adalah sebuah teknik modulasi lebar pulsa dalam satu periode gelombang, besarnya lebar pulsa biasa disebut siklus kerja (*duty cycle*). *Duty cycle* merupakan suatu ukuran yang menggambarkan lama waktu pulsa dalam satu periode berada dalam keadaan aktif (t_{on}) dibandingkan dengan total durasi periode gelombang pulsa tersebut (T) yang dinyatakan dalam persentase (%). Secara matematis, *duty cycle (D)* dapat dihitung menggunakan rumus:

$$D = \frac{t_{on}}{t_{off} + t_{on}} = \frac{t_{on}}{T} \quad (2.3)$$

di mana:

$D = \text{duty cycle (\%)}$

t_{on} = waktu pulsa aktif (s)

t_{off} = waktu pulsa mati (s)

T = periode pulsa (s)

Besar tegangan keluaran rata-rata *Buck Converter* dapat diatur dengan melakukan kendali pada nilai *duty cycle* pada komponen saklar (*switch*) dalam rangkaian *Buck Converter*. Jika diasumsikan terdapat sebuah rangkaian *Buck Converter* ideal atau tanpa rugi-rugi daya (*lossless*) maka, hubungan antara *duty cycle* (D), tegangan keluaran (V_o) dan tegangan masukan (V_i) adalah:

$$V_o = V_i \cdot D \quad (2.4)$$

di mana:

V_i = tegangan masukan (V)

V_o = tegangan keluaran (V)

D = *duty cycle* (%)

Buck Converter memiliki dua siklus kerja, yang pertama adalah saat saklar (S) dalam kondisi tertutup sehingga pada diode (D) terjadi *reverse bias*. Pada siklus ini arus akan mengalir dari sumber tegangan (V_i) menuju beban (R) melalui induktor (L). Bersamaan dengan siklus pertama ini, akan terjadi penyimpanan energi dalam induktor (L) dan kapasitor (C). Siklus kedua adalah di mana saat saklar (S) dalam kondisi terbuka, arus yang mengalir melalui induktor akan terputus sehingga induktor akan mengalirkan arus yang berasal dari simpanan energi dalam diri dengan polaritas yang terbalik dari sebelumnya, oleh karena itu pada diode (D) akan terjadi *forward bias* dan diode (D) akan mengalirkan arus menuju beban, proses ini yang mengakibatkan tegangan keluaran (V_o) selalu lebih kecil atau sama dengan (V_i).

Proses terbuka dan tertutupnya saklar pada rangkaian *Buck Converter* menyebabkan tegangan keluaran (V_o) tidak selalu stabil dan terdapat riak tegangan (*Ripple*). Besar *Ripple* tegangan dipengaruhi oleh besarnya nilai induktansi induktor yang dinyatakan dalam *Henry*(H) dan nilai kapasitas kapasitor yang dinyatakan dalam *Farad*(F). Untuk meminimalkan besar *Ripple* dapat dilakukan pemilihan nilai induktor dan kapasitor yang tepat. Nilai induktor ditentukan oleh besarnya riak arus maksimum yang dikehendaki, sehingga nilai induktansi induktor yang optimal dapat diperhitungkan dengan rumus [16] :

$$V_o = L \cdot \frac{di_L}{dt} \quad (2.5)$$

Laju perubahan arus induktor terhadap waktu merupakan perubahan arus yang terjadi saat siklus saklar tertutup dalam satu periode sehingga:

$$V_o = L \cdot \frac{\Delta I_L}{(1-D) \cdot T_{sw}} \quad (2.6)$$

$$L = \frac{V_o(1-D)}{f_{sw} \cdot \Delta I_L} \quad (2.7)$$

di mana :

V_o = tegangan output (V)

L = nilai induktansi induktor (H)

ΔI_L = riak arus (A)

T_{sw} = periode *switching* (s)

f_{sw} = frekuensi *switching* (Hz)

Kapasitor pada bagian keluaran rangkaian (C_{out}) berfungsi sebagai filter riak arus dari induktor untuk menstabilkan tegangan keluaran (V_o). Untuk memperhitungkan besar nilai kapasitas minimal kapasitor keluaran (C_{out}) berdasarkan nilai induktor untuk fase n [16] adalah:

$$\Delta I_{Cout} = \frac{V_{out} \cdot (1-D)}{n \cdot f_{sw} \cdot L} \quad (2.8)$$

perubahan muatan pada kapasitor keluaran mengakibatkan riak tegangan sehingga:

$$\Delta Q_{Cout} = \frac{T_{sw}}{n \cdot 2} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta I_{Cout}}{2} = \frac{\Delta I_{Cout}}{8 \cdot n \cdot f_{sw}} \quad (2.9)$$

tegangan pada kapasitor keluaran berubah seiring perubahan muatan, maka:

$$\Delta V_{Cout} = \frac{\Delta Q_{Cout}}{C_{out}} = \frac{\Delta I_{Cout}}{C_{out} \cdot 8 \cdot n \cdot f_{sw}} = \frac{V_{out} \cdot (1-D)}{C_{out} \cdot 8 \cdot L \cdot (n \cdot f_{sw})^2} \quad (2.10)$$

$$C_{out} = \frac{1-D}{\frac{\Delta V_{Cout}}{V_{out}} \cdot 8 \cdot L \cdot (n \cdot f_{sw})^2} \quad (2.11)$$

di mana:

ΔI_{Cout} = riak arus kapasitor keluaran (A)

ΔQ_{Cout} = perubahan muatan kapasitor (C)

C_{out} = kapasitas kapasitor keluaran (F)

T_{sw} = periode *switching* (s)

f_{sw} = frekuensi *switching* (Hz)

ΔV_{Cout} = riak tegangan kapasitor keluaran (V)

D = *duty cycle* (%)

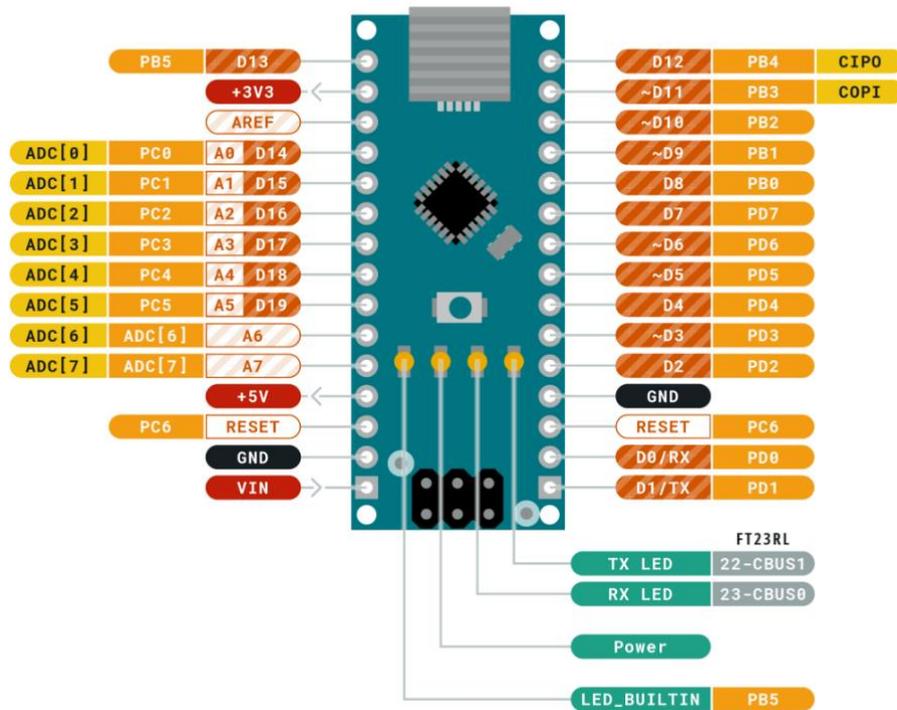
2.6 Perangkat Keras

Penelitian ini menggunakan beberapa komponen untuk membangun sistem pengisian baterai, yaitu Arduino nano, sensor arus INA219, MOSFET, resistor sebagai sensor tegangan, kapasitor, induktor, diode, dan LCD 2x16.

2.6.1 Arduino Nano

Arduino Nano adalah *development board* yang dibuat untuk mempercepat pembuatan prototipe dengan dimensi yang kecil. Arduino Nano merupakan anggota tertua dari keluarga Nano, menyediakan antarmuka yang memadai untuk aplikasi yang mudah dengan *beardboard*. Pada Arduino Nano terdapat

microcontroller ATmega328 yang berjalan pada frekuensi *clock* 16 MHz dan memiliki fungsionalitas yang hampir sama dengan Arduino Duemilanove [17].



Gambar 2.6 Tampilan fisik Arduino Nano dan pin keluarannya

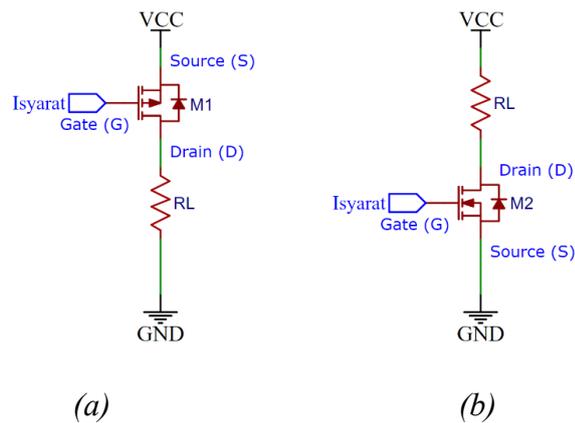
Prosesor utama *board* Arduino Nano adalah *microcontroller* ATmega328 8-bit berkinerja tinggi dan hemat daya yang berjalan pada frekuensi *clock* 16 MHz. Kemampuan untuk menghubungkan perangkat eksternal melalui komunikasi serial didukung oleh *chip* dengan UART (*Universal Asynchronous Receiver/Transmitter*), I2C (*Inter-Integrated Circuit*), dan SPI (*Serial Peripheral Interface*). Arduino Nano dapat diprogram dengan perangkat lunak Arduino IDE yang mengurangi kesulitan bagi pengguna baru. Spesifikasi lengkap Arduino Nano dapat dilihat pada tabel 2.3.

Tabel 2.3 Spesifikasi Arduino Nano

No	Fitur	Keterangan
1	<i>Microcontroller</i>	Atmega 328p
2	Tegangan masukan	7-15V (pin 30) <i>unregulated external power supply</i> 5V (pin 27) <i>regulated external power supply</i>
3	Keluaran/Masukan digital	20 pin
4	Keluaran/Masukan analog	8 pin
5	Keluaran <i>PWM</i>	6 pin
6	<i>Flash memory</i>	32 KB
7	SRAM	1 KB
10	EEPROM	1 KB

2.6.2 MOSFET

MOSFET (*Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor*) adalah jenis lain dari transistor efek medan. MOSFET, tidak memiliki struktur *junction pn* dan *gate* dari MOSFET diisolasi dari kanal oleh lapisan *silicon dioxide* (SiO_2). Ada dua jenis MOSFET yaitu penguatan atau *Enhancement(E)* dan pengurangan atau *Depletion(D)*. MOSFET jenis penguatan lebih banyak digunakan. Karena bahan *gate* sekarang menggunakan *silikon polikristalin* daripada logam, perangkat ini kadang disebut IGFET (*Insulated-Gate Field Effect Transistor*)[18]. Terminal *gate* berfungsi sebagai elemen pengontrol pada MOSFET. *Enhancement* MOSFET memiliki dua tipe yaitu N-MOSFET dan P-MOSFET[19]. MOSFET sebagai saklar atau *switch* terbagi menjadi dua konfigurasi yaitu *High-side switch* dan *Low-side switch*. Sebagai *High-side switch* tipe MOSFET yang umum digunakan adalah P-MOSFET, sedangkan untuk *Low-side switch* adalah N-MOSFET.



Gambar 2.7 MOSFET sebagai, *High-side switch* dan *Low-side switch*.

Pada umumnya tipe MOSFET yang digunakan sebagai *High-side switch* adalah MOSFET kanal-p (*p-channel*) seperti terlihat pada Gambar 2.8 (a), M1 adalah MOSFET tipe kanal-p di mana terminal *source (s)* terhubung dengan (VCC) atau terminal positif dari sumber tegangan sedangkan terminal *drain (d)* pada MOSFET M1 terhubung dengan beban RL yang menuju *ground (GND)*. Sebaliknya tipe MOSFET yang umum digunakan sebagai *Low-side switch* adalah tipe kanal-n (*n-channel*) seperti yang terlihat pada Gambar 2.8 (b), M2 adalah MOSFET tipe kanal-n di mana terminal (d) akan terhubung pada beban RL dan terminal (s) terhubung pada *ground (GND)*.

Pada penelitian ini akan digunakan MOSFET IRF9540N, yang merupakan tipe MOSFET kanal-P, sebagai sakelar *Low-side switch*. Spesifikasi IRF9540N dapat dilihat pada tabel 2.3



Gambar 2.8 Tampilan fisik MOSFET IRF9540N.

Tabel 2.4 Spesifikasi IRF9540N

Parameter	Min	Max	Units
Continuous Drain Current (I_D) pada suhu (T_C) = 25° dan tegangan gate-to-source (V_{GS}) = -10V	—	-23	A
Tegangan gate-to-source (V_{GS})	—	20	V
Tegangan ambang-batas gate-to-source ($V_{GS(th)}$)	-2	-4	V
Tegangan breakdown drain-to-source ($V_{(BR)DSS}$)	-	—	V
	100		
Total gate charge (Q_g)	—	97	nC
Static drain-to-source on-resistance ($R_{DS(on)}$)	—	0.117	Ohm

2.6.3 INA219

INA219 adalah sensor pemantau arus dan daya digital (digital *current/power monitor*) yang mampu melakukan pengukuran arus, tegangan, dan daya secara langsung dan akurat. Sensor ini menggunakan komunikasi digital I^2C atau *SMBus*, sehingga dapat dengan mudah terhubung ke mikrokontroler seperti Arduino, ESP32, dan lainnya.

Pengukuran arus pada sensor ini dilakukan dengan mengukur tegangan diferensial (drop tegangan) pada resistor *shunt* yang dipasang secara seri dengan beban.

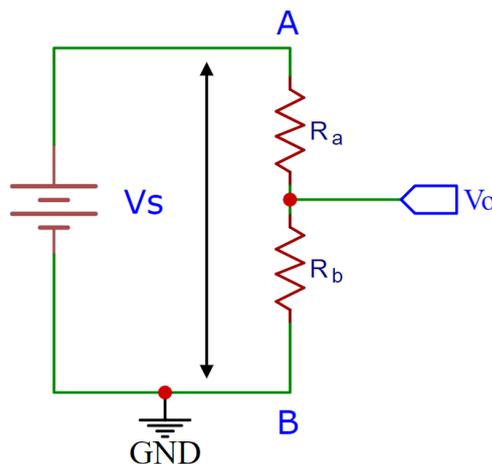


Gambar 2.9 Tampilan fisik modul INA219.

Sensor INA219 adalah modul pengukur arus, tegangan, dan daya yang terhubung melalui antarmuka *I²C*. Sensor ini mampu mengukur arus dengan akurasi tinggi mencapai 0,5%. Dilengkapi dengan penguat internal (*PGA*) untuk mendeteksi tegangan *shunt* kecil hingga 320 mV, serta memiliki resolusi pengukuran 12-bit. Sensor ini bekerja pada tegangan 3V hingga 5,5V dan hanya membutuhkan daya sekitar 1 mA, menjadikannya efisien dan cocok untuk sistem *monitoring* daya berbasis *mikrokontroler*[20].

2.6.4 Sensor Tegangan

Sensor tegangan pada penelitian ini dibangun berdasarkan rangkaian pembagi tegangan seperti terlihat pada Gambar 2.10



Gambar 2.10 Rangkaian pembagi tegangan sebagai sensor tegangan.

Pada Gambar 2.11 resistor (R_a) dan (R_b) yang terhubung secara seri digunakan untuk mengukur besar tegangan pada terminal (A) dan (B) yang besarnya sama dengan tegangan baterai (V_s), sedangkan (V_o) adalah terminal keluaran dari rangkaian sensor tegangan ini, yang akan menjadi masukan bagi ADC untuk di proses dalam Arduino Nano, besar tegangan (V_o) dapat diketahui melalui rumus pembagi tegangan, yaitu.

$$V_o = V_s \cdot \frac{R_a}{R_a + R_b} \quad (2.12)$$

Sehingga tegangan pada baterai V_s juga dapat diketahui melalui besarnya V_o dengan persamaan berikut.

$$V_s = V_o \cdot \frac{R_a + R_b}{R_b} \quad (2.13)$$

di mana:

V_s = tegangan yang diukur pada baterai (V)

V_o = tegangan keluaran sensor (V)

2.6.5 LCD

LCD (*Liquid Crystal Display*) adalah jenis layar datar yang memanfaatkan sifat-sifat kristal cair untuk mengontrol cahaya yang masuk melalui layar tersebut. LCD terdiri dari susunan piksel, dimana setiap piksel nya terdiri dari sepasang elektrode dan filter *polarizer* yang menjepit kolom kristal cair [21]. Pada penelitian ini digunakan LCD 2x16 yang memiliki 2 baris dengan masing-masing baris berisikan 16 kolom yang dapat menampilkan satu karakter per kolom.



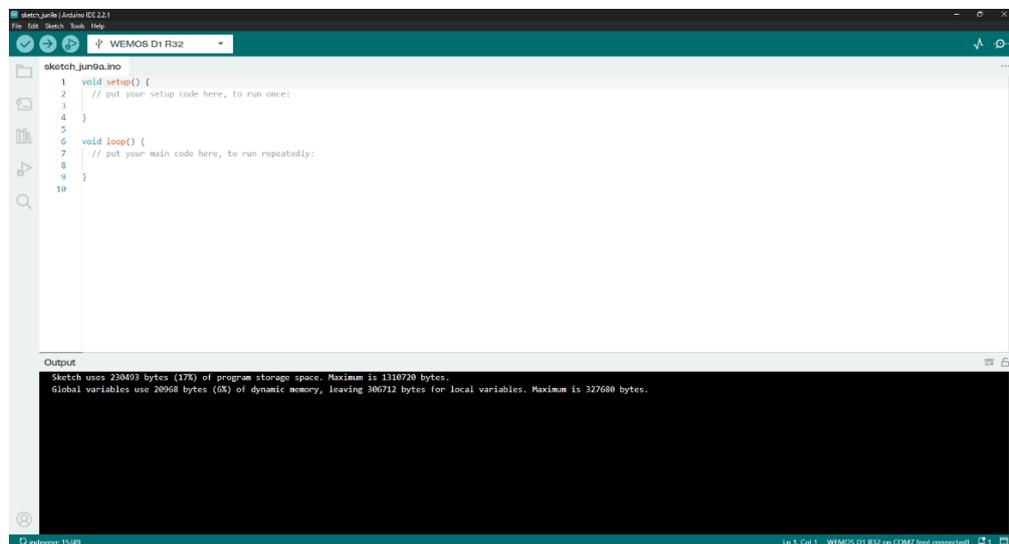
Gambar 2.11 Tampilan fisik modul LCD 2x16.

2.7 Perangkat lunak

Dalam perancangan sistem pengisian daya baterai pada penelitian, dibutuhkan beberapa perangkat lunak yang akan digunakan, yaitu Arduino IDE untuk menulis, mengedit, dan mengunggah program ke *microcontroller* Arduino Nano, dan EasyEDA untuk membuat skema rangkaian maupun mendesain *Printed Circuit Board* (PCB) rangkaian.

2.7.1 Arduino IDE

Arduino *Integrated Development Environment* (IDE), adalah perangkat lunak berupa lingkungan kerja atau lembar kerja terintegrasi yang dapat digunakan untuk menulis, mengedit, mengunggah, ataupun memantau kode program yang sedang berjalan pada *board microcontroller* [22]. Beberapa *board microcontroller* yang didukung Arduino IDE adalah dari keluarga Arduino ataupun jenis *board microcontroller* lain seperti ESP32, STM32, Raspberry Pi Pico w, dan lain sebagainya.



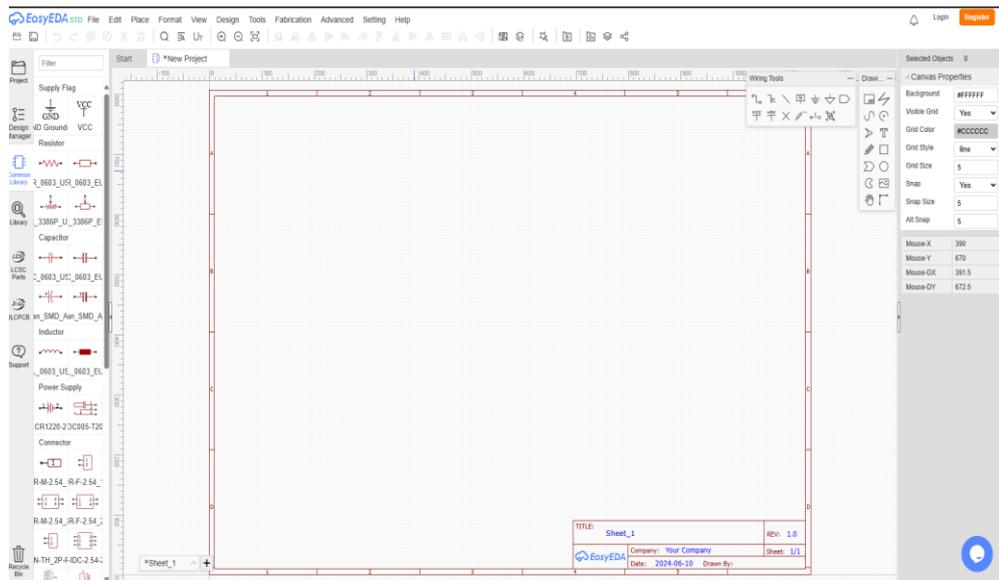
Gambar 2.12 Lingkungan kerja Arduino IDE v2.2.1.

Program yang ditulis pada Arduino IDE disebut *sketches*. *Sketches* akan ditulis di dalam teks editor dan dapat disimpan dengan ekstensi (*.ino*). Bahasa

pemrograman yang digunakan pada Arduino IDE didasarkan pada bahasa program C dan C++.

2.7.2 EasyEDA

EasyEDA adalah *platform* desain rangkaian elektronika berbasis *website* dengan fitur simulasi rangkaian sekaligus desain PCB [23]. EasyEDA memiliki sebagian besar pustaka yang bersifat *open source* sehingga memungkinkan siapa pun untuk membuat, dan menggunakan pustaka yang dapat diakses secara daring, pustaka yang dimaksud adalah simbol komponen, *footprint* komponen, dan 3D model komponen. EasyEDA juga terintegrasi dengan JLCPCB yang merupakan perusahaan manufaktur PCB (*Printed Circuit Board*).



Gambar 2.13 Tampilan antarmuka pengguna EasyEDA.

III. METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dimulai pada Juli 2024 sampai dengan September 2024. Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Terpadu Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung.

3.2 Alat dan Bahan

Adapun alat dan bahan yang akan digunakan dalam penelitian ini diuraikan dalam tabel 3.2.

Tabel 3.1 Alat dan bahan penelitian

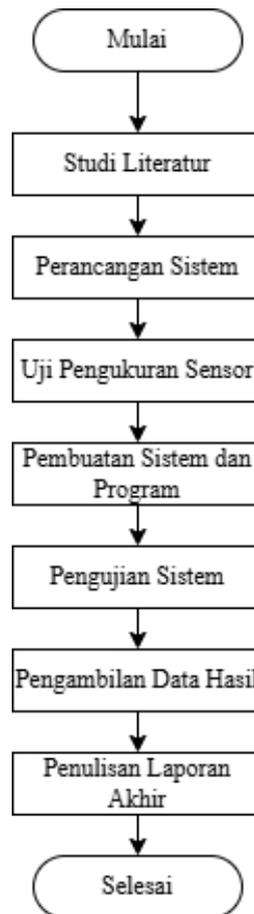
No.	Alat dan Bahan	Keterangan	Jumlah
1	Laptop Acer Aspire A514-53. Intel Core i3 1005G1 12GB RAM	Digunakan untuk menulis dan mengunggah program pada Arduino Nano, merancang skema rangkaian, menyimulasikan rangkaian, membuat desain PCB, menyimpan dan menganalisis data hasil.	1
2	Sensor arus INA219	Digunakan untuk mengukur arus pengisian daya pada baterai, keluaran sensor akan digunakan sebagai umpan balik pada kendali MOSFET	4

Tabel 3.1 (lanjutan)

No.	Alat dan Bahan	Keterangan	Jumlah
3	AMS117 5.0	Digunakan sebagai masukan pin referensi tegangan analog guna meningkatkan kestabilan pembacaan pin analog.	
4	Arduino Nano	Digunakan sebagai pembangkit isyarat PWM untuk mengatur <i>duty cycle</i> .	4
5	Induktor dan Kapasitor	Digunakan sebagai filter riak tegangan pada keluaran rangkaian pengisi daya baterai.	4
6	Resistor	Digunakan untuk membuat sensor arus serta beban pengosongan saat mengestimasi <i>SoH</i> baterai.	10
7	Multimeter	Digunakan untuk mengukur besaran elektrik.	1
8	<i>Power supply</i>	Sebagai sumber tegangan keseluruhan sistem pengisi daya baterai.	1
9	Osiloskop	Digunakan untuk melihat gelombang PWM yang dihasilkan Arduino Nano	1
10	MOSFET IRF9540	Digunakan sebagai komponen saklar pada rangkaian pengisi daya baterai.	4
11	Diode HER508	Digunakan sebagai <i>freewheeling</i> diode pada rangkaian pengisi daya baterai.	2
12	Modul LCD 2x16	Digunakan untuk menampilkan data proses pengisian dan pengosongan daya baterai.	4

3.3 Tahapan Penelitian

Pada penelitian ini penulis membagi proses penelitian menjadi beberapa tahapan, adapun tahap-tahap penelitian yang akan dilaksanakan ditunjukkan pada Gambar 3.1.



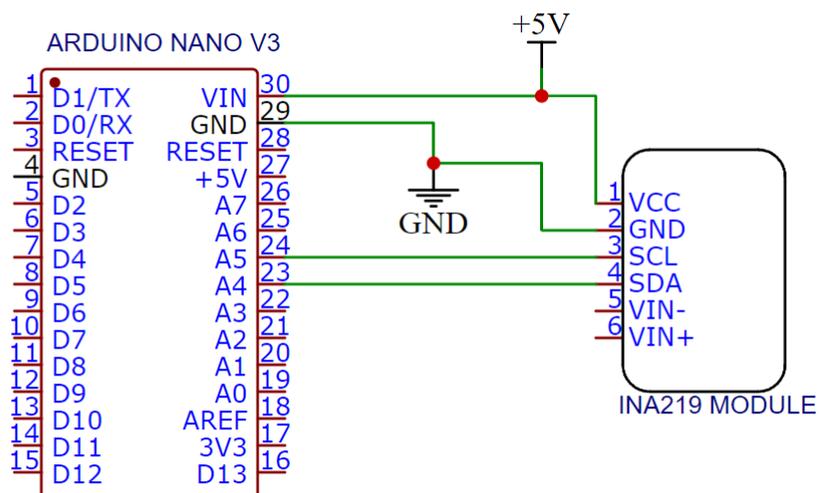
Gambar 3.1 Diagram alir tahap-tahap penelitian.

Gambar 3.1 Penelitian ini dilaksanakan melalui beberapa tahapan yang sistematis. Tahap pertama adalah studi literatur yang bertujuan untuk mengkaji berbagai referensi terkait sistem pengisian daya baterai, khususnya mengenai metode *CC-CV* dan *MSCC*, serta konsep estimasi *State of Health (SoH)* baterai. Tahap kedua adalah perancangan sistem, yang mencakup pembuatan skema rangkaian, pemahaman terhadap prinsip kerja masing-masing komponen yang akan digunakan, serta analisis probabilitas kegagalan sistem untuk meminimalkan kesalahan dalam implementasi. Tahap ketiga adalah pengujian sensor, yaitu melakukan verifikasi akurasi sensor yang digunakan dengan cara membandingkan hasil pembacaan sensor terhadap alat ukur standar yang umum dipakai di laboratorium atau industri. Tahap keempat adalah pembuatan alat, yang meliputi pembuatan rangkaian

pengisian daya baterai dengan penerapan metode CC-CV dan MSCC, serta pembuatan rangkaian pengosongan daya baterai yang berfungsi sebagai alat bantu dalam proses estimasi SoH baterai. Tahap kelima adalah pengujian kinerja alat yang telah dibuat untuk memastikan bahwa alat berfungsi sesuai dengan rancangan dan mampu melaksanakan tugas sesuai spesifikasi. Tahap terakhir adalah pengambilan dan analisis data, yang bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh metode pengisian daya baterai (CC-CV dan MSCC) terhadap nilai SoH baterai berdasarkan data hasil pengujian yang telah diperoleh.

3.4 Rangkaian Arduino Nano dengan INA219

Pada penelitian ini, INA219 digunakan untuk melakukan pengukuran arus. INA219 memiliki empat pin yang digunakan agar dapat berkerja dengan Arduino Nano. Pin VDD dan GND yang merupakan pin *power supply*, pin SCL dan SDA yang digunakan untuk berkomunikasi mengirim data pengukuran sensor ke Arduino Nano. Rangkaian dan koneksi antara pin INA219 dengan pin Arduino Nano ditunjukkan pada Gambar 3.2 dan Tabel 3.2.



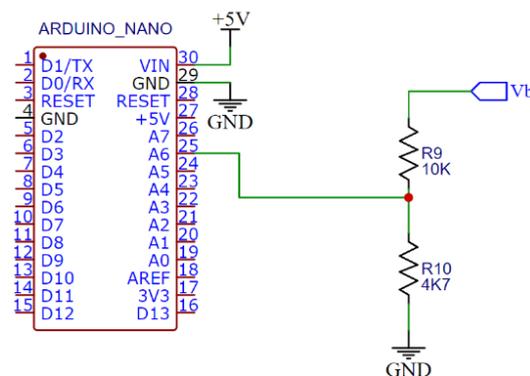
Gambar 3.2 Rangkaian Arduino Nano dengan INA219.

Tabel 3.3 Koneksi pin Arduino Nano dengan pin LCD 2x16

No.	Pin Arduino Nano	Pin LCD 2x16	Power Supply
1	VIN	VDD	VCC
2	D2	DB7	
3	D3	DB6	
4	D4	DB5	
5	D5	DB4	
6		VSS	GND
7		RS	GND
8		VO	VCC
9		A	VCC
10		K	GND

3.6 Rangkaian Sensor Tegangan dengan Arduino Nano

Pada penelitian sensor yang digunakan untuk melakukan pengukuran tegangan pengisian maupun pengosongan daya baterai dibuat berdasarkan konsep rangkaian pembagi tegangan. Nilai keluaran analog dari sensor tegangan akan di proses pada Arduino Nano. Rangkaian dan koneksi sensor tegangan dengan pin Arduino Nano ditunjukkan pada Gambar 3.4.



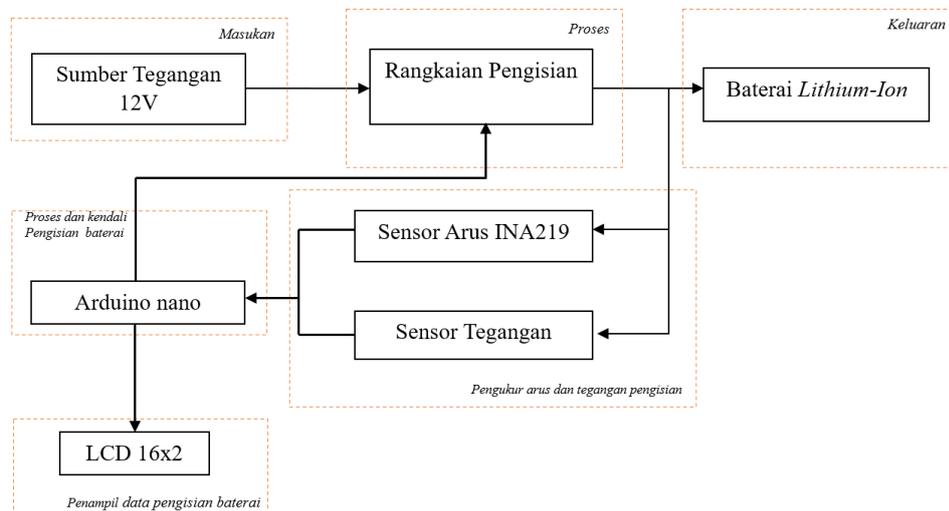
Gambar 3.4 Rangkaian sensor tegangan dengan Arduino nano.

3.7 Perancangan Rangkaian Sistem

Pada penelitian ini perancangan rangkaian sistem terbagi menjadi dua, yaitu perangkat rangkaian sistem pengisian daya yang akan digunakan untuk menerapkan metode pengisian daya baterai *CC-CV* dan *MSCC*, dan perancangan rangkaian sistem pengosongan daya baterai untuk mengestimasi (*SoH*) baterai.

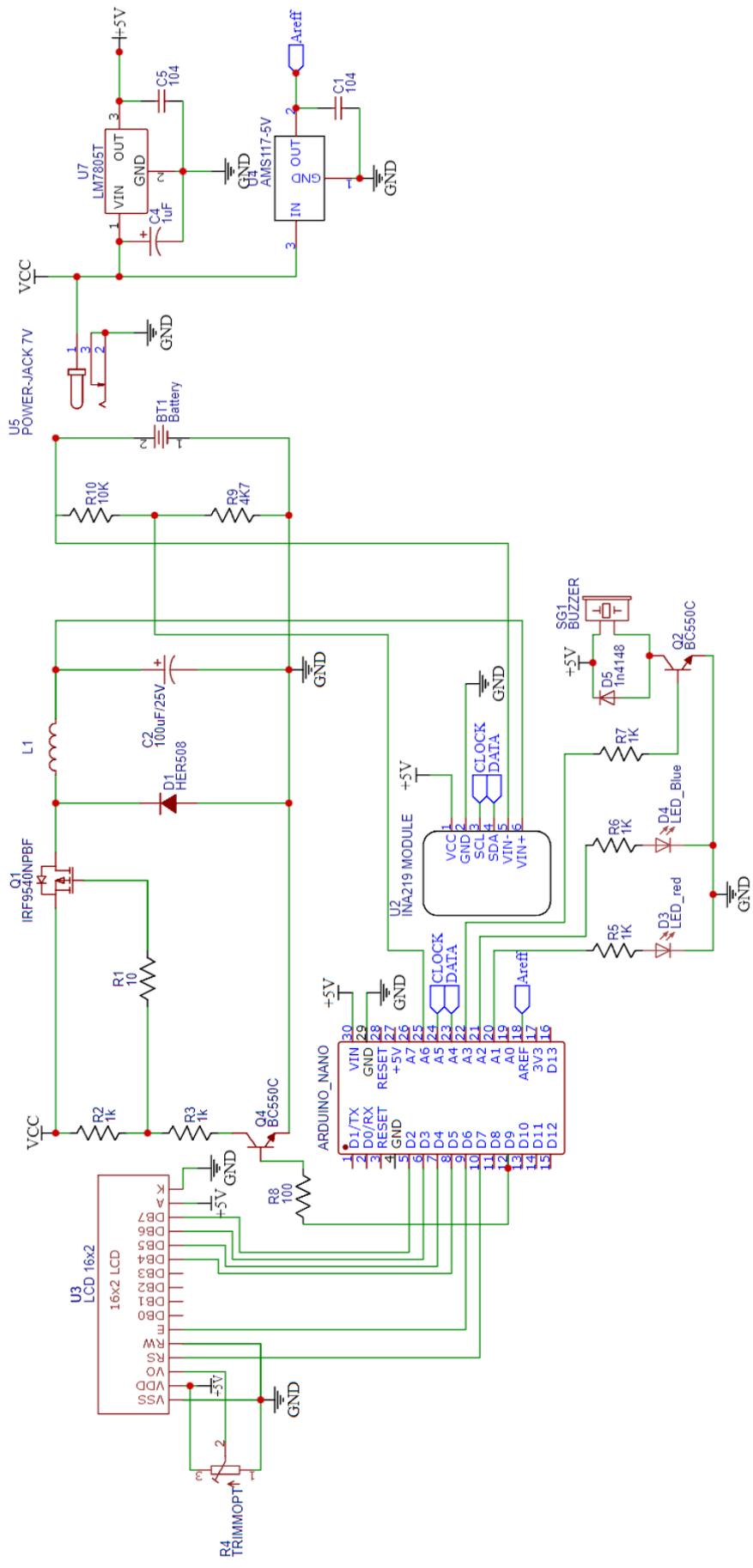
3.7.1 Sistem Pengisian Daya Baterai

Alur kerja sistem pengisian daya baterai yang dirancang pada penelitian ini ditunjukkan oleh Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Diagram blok sistem pengisian daya baterai.

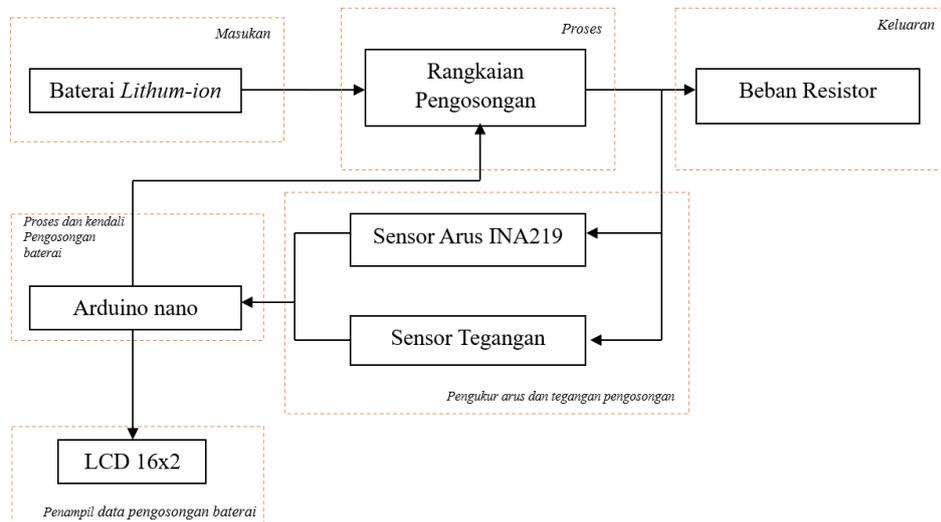
Berdasarkan alur kerja sistem yang dirancang seperti terlihat pada Gambar 3.5, sistem pengisian daya baterai menggunakan dengan Arduino Nano sebagai pemroses data yang didapatkan dari umpan balik sensor arus INA219 dan sensor tegangan. Nilai dari umpan balik akan digunakan mengatur *duty cycle* pada rangkaian DC-DC *Buck Converter*. Pada penelitian ini dalam rangkaian sistem akan diterapkan dua metode pengisian daya baterai yaitu *CC-CV* dan *MSCC* berbasis tegangan *cut-off*. Rangkaian sistem pengisi daya baterai secara keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6 Rangkaian keseluruhan sistem pengisi daya baterai.

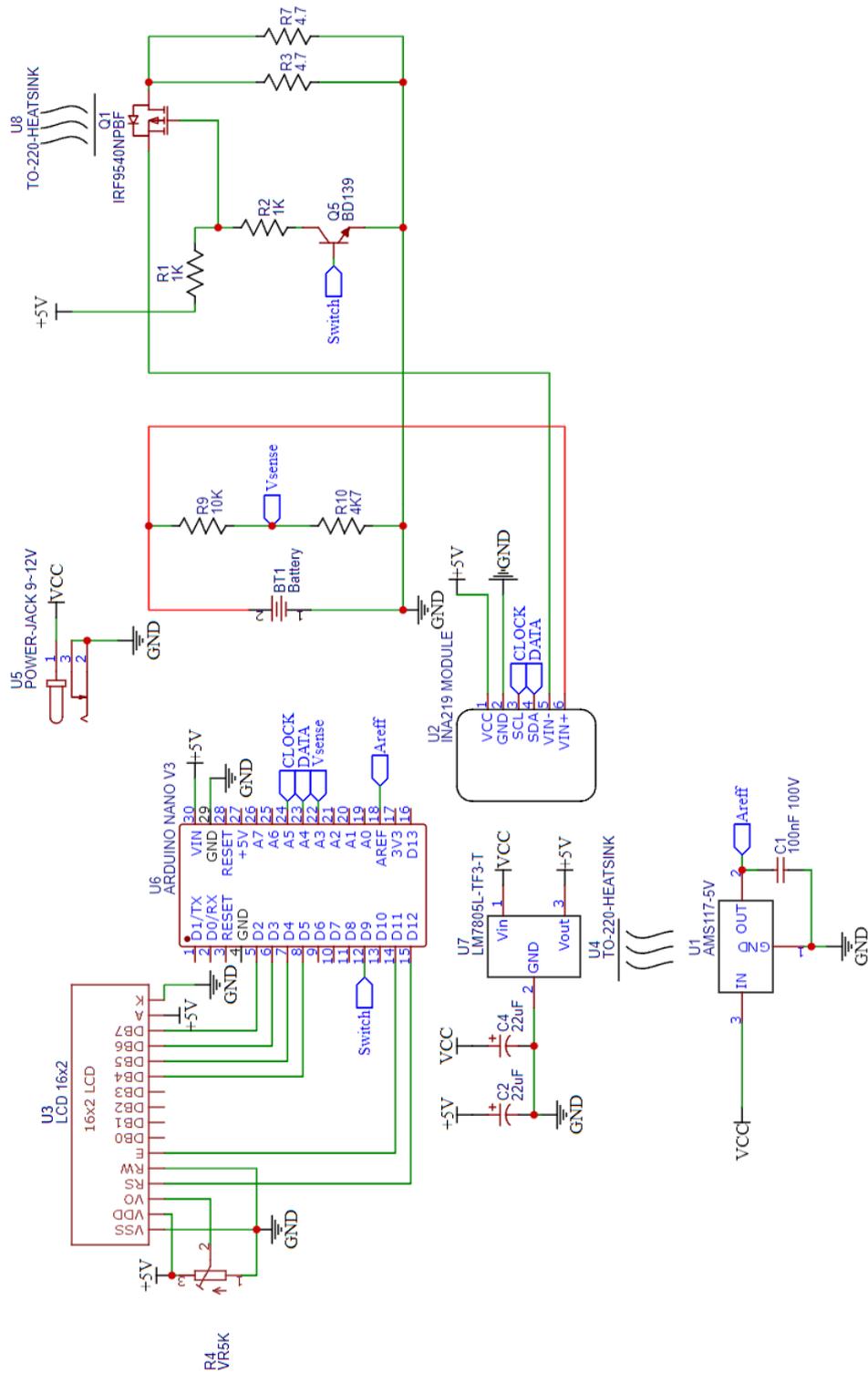
3.7.2 Sistem Pengosongan Daya Baterai

Alur kerja sistem pengosongan daya baterai yang dirancang pada penelitian ini ditunjukkan oleh Gambar 3.7.



Gambar 3.7 Diagram blok sistem pengisian daya baterai.

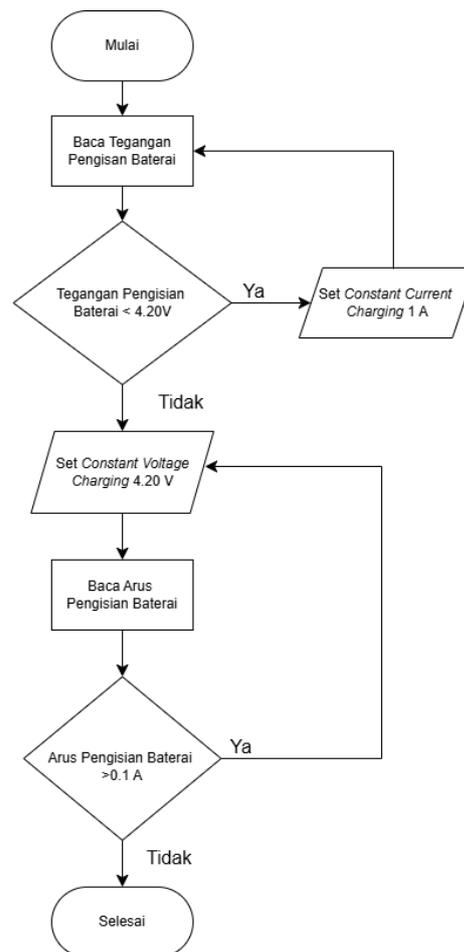
Berdasarkan alur kerja sistem yang dirancang seperti terlihat pada Gambar 3.7, sistem pengosongan daya baterai menggunakan Arduino Nano sebagai pemroses data yang didapatkan dari pengukuran sensor arus INA219 dan sensor tegangan. Data yang didapatkan akan digunakan untuk mengetahui kapasitas total baterai setelah proses pengosongan daya baterai selesai. Kapasitas total baterai setelah pengosongan akan digunakan untuk mengestimasi *SoH* baterai. Beban resistor akan digunakan untuk mengosongkan daya baterai. Arduino Nano juga berperan sebagai pengendali untuk memulai atau menghentikan proses pengosongan baterai. Rangkaian sistem pengosongan daya baterai secara keseluruhan ditunjukkan pada Gambar 3.8.



Gambar 3.8 Rangkaian keseluruhan sistem pengosongan daya baterai.

3.8 Pembuatan Program

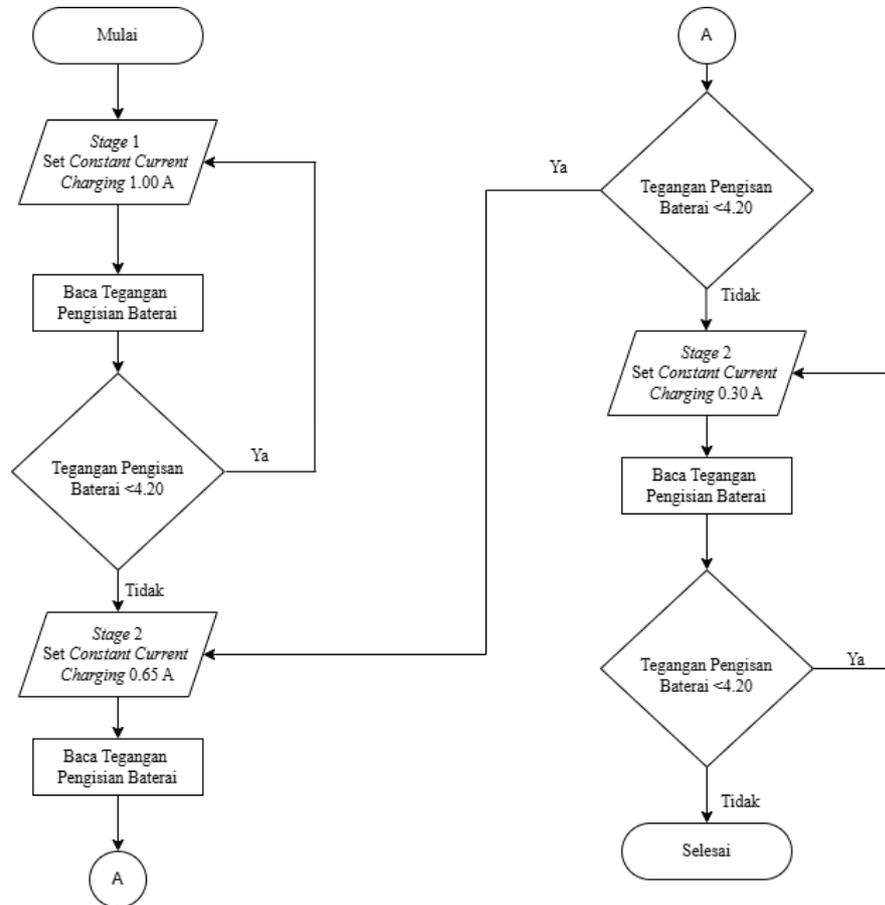
Terdapat tiga program yang akan dibuat pada penelitian ini yaitu, program pada Arduino Nano yang akan digunakan untuk melakukan pengisian daya *CC-CV*, *MSCC*, dan program yang akan digunakan saat pengosongan baterai untuk mengestimasi *SoH* baterai. Pertama, program pada Arduino Nano yang akan digunakan untuk melakukan pengisian daya baterai dengan metode *CC-CV* ditunjukkan pada Gambar 3.9.



Gambar 3.9 Diagram alir program pengisian daya baterai metode *CC-CV*.

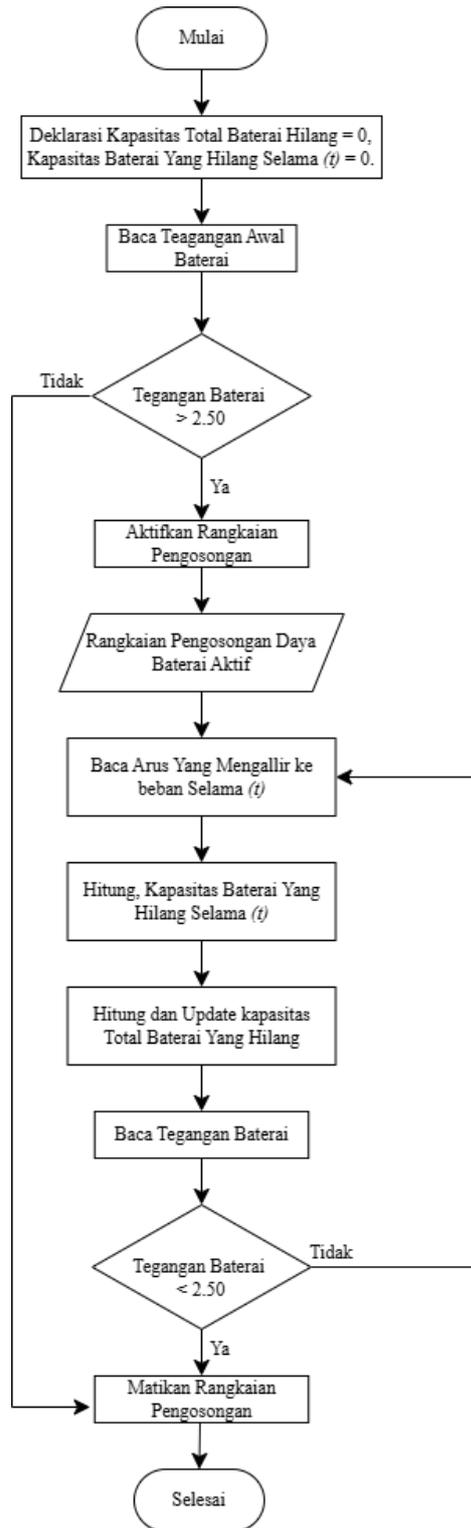
Gambar 3.9 menunjukkan rancangan program pengisian daya baterai dengan metode *CC-CV*. Pengisian dimulai dengan pembacaan tegangan baterai, jika tegangan terukur kurang dari 4,20 V, sistem akan mengatur mode pengisian dengan arus konstan sebesar 1 A. Setelah tegangan mencapai 4,20 V, sistem

beralih ke mode pengisian dengan tegangan konstan 4,20 V, proses pengisian akan terus berlangsung hingga arus pengisian mengalami penurunan sesuai karakteristik baterai dan mencapai 0,10 A.



Gambar 3.10 Diagram alir program pengisian daya baterai metode MSCC.

Gambar 3.10 menunjukkan rancangan program pengisian baterai MSCC, pertama pada *stage 1* sistem akan menjaga arus pengisian tetap konstan sebesar 1,00 A selama tegangan baterai kurang dari 4,20 V. Setelah tegangan baterai mencapai 4,20 V pada *Stage 1*, sistem berpindah ke *Stage 2* dengan menerapkan arus pengisian konstan 0,65A, saat terjadi penurunan arus maka tegangan baterai juga akan mengalami penurunan, saat tegangan baterai kembali mencapai 4,20 V maka sistem akan beralih ke *stage 3*. Proses pada *stage 3* akan menurunkan kemudian menjaga arus pengisian konstan 0,30 A sampai tegangan pengisian baterai kembali mencapai 4,20 V.



Gambar 3.11 Diagram alir program pengosongan daya baterai.

Gambar 3.11 menunjukkan proses pengukuran kapasitas baterai yang hilang selama pengosongan dimulai dengan inisialisasi variabel, yaitu menetapkan nilai awal untuk kapasitas total baterai yang hilang dan kapasitas baterai yang hilang dalam selang waktu pengamatan (t). Langkah selanjutnya adalah pembacaan tegangan awal baterai untuk menentukan kondisi awal sebelum dilakukan pengosongan. Jika tegangan baterai melebihi ambang batas 2,50 V, maka sistem akan melanjutkan ke proses pengosongan dengan mengaktifkan rangkaian pengosongan daya. Selama rangkaian pengosongan aktif, sistem akan memonitor arus yang mengalir ke beban dalam selang waktu tertentu (t). Dengan informasi arus dan waktu (t), kapasitas yang hilang dalam waktu tersebut dapat dihitung dengan menerapkan persamaan (2.2). Nilai kapasitas ini kemudian diakumulasikan untuk memperbarui kapasitas total baterai yang hilang selama pengosongan. Saat tegangan baterai turun hingga kurang dari 2,50 V, maka sistem akan menghentikan proses dengan mematikan rangkaian pengosongan.

3.9 Prosedur Pengujian Sensor

Pengujian pada sensor yang telah dibuat bertujuan untuk melihat seberapa andal sensor saat melakukan pengukuran. Pengujian dilakukan dengan cara membandingkan hasil pengukuran sensor yang akan digunakan dengan instrumen pengukuran standar. Beberapa aspek yang dapat diujikan adalah, akurasi, dan presisi dari sensor yang digunakan. Terdapat dua sensor yang akan diuji pada penelitian ini, yaitu sensor arus INA219 dan sensor tegangan.

3.9.1 Pengujian Sensor Arus INA219

Pengujian sensor arus INA219 dilakukan untuk memastikan keandalan sensor ketika digunakan dalam suatu sistem. Tingkat presisi, akurasi, dan besar galat sensor akan diuji dengan melakukan pengukuran pada suatu rangkaian sumber tegangan yang terhubung dengan beban resistor secara seri melalui sensor arus INA219 dan instrumen pengukuran standar. Pengukuran

dilakukan sebanyak 10 kali pada setiap besaran arus. Data pengujian sensor arus INA219 akan dimuat dalam tabel dengan format seperti Gambar 3.12.

Pengukuran ke-n	Besaran arus (A)				
	0,100	0,400	0,700	1,000	1,300
1					
2					
...					
Dst.					
Rata-rata					

Gambar 3.12 Format tabel pengujian sensor arus.

3.9.2 Pengujian Sensor Tegangan

Pengujian sensor tegangan dilakukan untuk memastikan keandalan sensor ketika digunakan dalam suatu sistem. Tingkat presisi, dan akurasi sensor akan diuji dengan melakukan pengukuran pada suatu sumber tegangan yang dihubungkan secara paralel dengan sensor tegangan dan instrumen pengukuran standar. Pengukuran dilakukan sebanyak 10 kali pada setiap besaran tegangan. Data pengujian sensor tegangan akan dimuat dalam tabel dengan format seperti Gambar 3.13.

Pengukuran ke-n	Besaran Tegangan (V)					
	2,500	3,000	3,500	4,000	4,500	5,000
1						
2						
...						
Dst.						
Rata-rata						

Gambar 3.13 Format tabel pengujian sensor tegangan.

Berdasarkan referensi [24], data yang didapatkan setelah pengujian akan digunakan untuk menghitung tingkat akurasi, dan presisi dengan menggunakan persamaan (3.1), dan (3.2).

$$\%A = \left(1 - \left|\frac{Y_n - X_n}{Y_n}\right|\right) \times 100 \quad (3.1)$$

$$\%P = \left(1 - \left|\frac{X_n - \bar{X}_n}{\bar{X}_n}\right|\right) \times 100 \quad (3.2)$$

dimana:

$\%A$ = persentase akurasi (%)

$\%P$ = persentase presisi (%)

Y_n = nilai acuan

X_n = nilai yang terukur

\bar{X}_n = rata – rata nilai yang terukur

3.10 Pengujian *MSCC* dan *CC-CV* Terhadap Kapasitas Baterai

Pengujian pengaruh metode pengisian daya *MSCC* dan *CC-CV* akan dilakukan dengan melakukan pengisian daya hingga baterai penuh kemudian melakukan pengosongan daya baterai untuk mengestimasi kapasitas baterai yang hilang, kemudian kondisi kesehatan baterai akan diestimasi dengan menggunakan persamaan (2.2). Setiap metode pengisian daya akan diujikan pada dua buah sampel baterai yaitu sampel baterai A dan sampel baterai B, spesifikasi sampel baterai yang digunakan dapat dilihat pada tabel 2.1. Pengujian pada setiap sampel akan dilakukan 20 kali siklus pengosongan dan pengisian. Data pengujian pengaruh pengisian *MSCC* dan *CC-CV* akan dimuat pada tabel dengan format seperti pada Gambar 3.14 dan Gambar 3.15.

Siklus ke-n	Sampel Baterai			
	A		B	
	Kapasitas Total (mAh)	Persentase <i>SoH</i> Baterai(%)	Kapasitas Total (mAh)	Persentase <i>SoH</i> Baterai(%)
1				
2				
..				
Dst.				

Gambar 3.14 Format tabel pengujian pengaruh *CC-CV* terhadap *SoH* Baterai.

Siklus ke-n	Sampel Baterai			
	A		B	
	Kapasitas Total (mAh)	Persentase <i>SoH</i> Baterai(%)	Kapasitas Total (mAh)	Persentase <i>SoH</i> Baterai(%)
1				
2				
..				
Dst.				

Gambar 3.15 Format tabel pengujian pengaruh *MSCC* terhadap *SoH* Baterai.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang dapat diambil berdasarkan hasil penelitian dan pengujian sistem adalah sebagai berikut :

1. Sistem pengisian daya baterai dengan metode *Constant Current-Constant Voltage (CC-CV)* dan *Multi-Stage Constant Current (MSCC)* telah berhasil direalisasikan dan berfungsi dengan baik. Implementasi sensor arus INA219 serta sensor tegangan berbasis *voltage divider* memberikan hasil pengukuran yang andal. Sensor arus INA219 menunjukkan tingkat akurasi rata-rata pengukuran sebesar 99,074% dan presisi rata-rata sebesar 99,465%. Sensor tegangan menunjukkan akurasi rata-rata pengukuran sebesar 99,861% dan presisi rata-rata pengukuran mencapai 99,989%.
2. Pengisian daya baterai dengan metode *MSCC* memberikan hasil yang sedikit lebih baik dengan pengaruhnya terhadap *SoH* baterai yang hanya turun 0.96% pada sampel baterai A dan 0.80% pada baterai B dalam 20 siklus pengisian dan pengosongan dengan total rata-rata penurunan *SoH* per siklus adalah 0.041% pada kedua sampel Baterai . Sedangkan, pengisian daya baterai dengan metode *CC-CV* memberikan pengaruh terhadap *SoH* baterai yang turun 1,35% pada sampel baterai A dan 1,39% pada baterai B dalam 20 siklus pengisian dan pengosongan dengan total rata-rata penurunan *SoH* per siklus adalah 0.069% pada kedua sampel Baterai.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat penulis berikan untuk penelitian selanjutnya adalah:

1. Pembuatan rangkaian sistem pengisian dan pengosongan daya baterai otomatis yang terintegrasi, sehingga proses uji dapat berjalan secara efisien tanpa intervensi manual. Sistem ini diharapkan mampu beroperasi secara bergantian atau simultan sesuai kebutuhan pengujian, sehingga data yang diperoleh menjadi lebih lengkap, akurat, dan representatif terhadap performa baterai.
2. Menambah variasi jenis baterai yang diuji, terutama jenis-jenis baterai *lithium* generasi baru yang relevan, seperti *Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide (NMC)*, *Lithium Iron Phosphate (LiFePo₄)*, dan *Lithium Cobalt Oxide (LCO)*. Penambahan variasi ini bertujuan untuk meningkatkan relevansi hasil penelitian terhadap aplikasi nyata serta mengikuti perkembangan teknologi baterai yang digunakan secara luas di industri saat ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. Pontes, “Top 10 Battery Producers In The World — 2023 (Provisional Data),” *Cleantechnica*. Diakses: 11 Maret 2024. [Daring]. Tersedia pada: <https://cleantechnica.com/2024/01/19/top-10-battery-producers-in-the-world-2023-provisional-data/>
- [2] *Evmarketsreportscom.acc.teamexpedition.nl*, “Indonesia to lead SEA battery manufacturing by 2030,” *Evmarkersportscom*. Diakses: 21 Maret 2024. [Daring]. Tersedia pada: <https://evmarketsreports.com/indonesia-to-lead-sea-battery-manufacturing-by-2030/>
- [3] Xinhua, “Atasi limbah baterai bekas, China tingkatkan teknologi daur ulang,” *Antara*. Diakses: 11 Maret 2024. [Daring]. Tersedia pada: <https://www.antaraneews.com/berita/3651876/atasi-limbah-baterai-bekas-china-tingkatkan-teknologi-daur-ulang>
- [4] E. Nasrullah, Sumadi, S. Alam, dan A. Arif, “Perancangan Alat Ukur State Of Charge, Depth Of Distance Dan State Of Health Baterai Lithium-Ion (LI-ION) Dan Baterai Nickel-Metal Hydride (NI-MH) Menggunakan Arduino Nano,” 2019.
- [5] A. B. Khan, V. L. Pham, T. T. Nguyen, dan W. Choi, “Multistage constant-current charging method for Li-Ion batteries,” *2016 IEEE Transp. Electr. Conf. Expo, Asia-Pacific, ITEC Asia-Pacific 2016*, no. June, hal. 381–385, 2016, doi: 10.1109/ITEC-AP.2016.7512982.
- [6] B. W. A. Mahardika, T. Andromeda, dan S. Sudjadi, “Perancangan Sistem Charging Baterai Menggunakan Dc-Dc Buck Converter Metode Constant Current (CC) Dan Constant Voltage (CC),” *Transient J. Ilm. Tek. Elektro*,

vol. 9, no. 3, hal. 342–350, 2020, doi: 10.14710/transient.v9i3.342-350.

- [7] F. Rahmatullah, “Desain dan Simulasi Battery Charger Metode CC-CV (Constant Current-Constant Voltage) dengan Kontrol Logika Fuzzy Menggunakan MATLAB,” *Cyclotron*, vol. 4, no. 2, hal. 18–22, 2021, doi: 10.30651/cl.v4i2.8621.
- [8] K. T. Selvi, K. A. Mangai, J. A. Lett, I. Fatimah, dan S. Sagadevan, “Exploring the electrode materials for high-performance lithium-ion batteries for energy storage application,” *Journal of Energy Storage*, vol. 92. Elsevier Ltd, 2024. doi: 10.1016/j.est.2024.112208.
- [9] Walker, “Product specification Lithium-ion rechargeable cell for power tools Model: EVE-ICR18650/20P.” EVE Energy CO., LTD, hal. 1–17, 2019.
- [10] Y. Li, L. Luo, C. Zhang, dan H. Liu, “State of Health Assessment for Lithium-Ion Batteries Using Incremental Energy Analysis and Bidirectional Long Short-Term Memory,” *World Electr. Veh. J.*, vol. 14, no. 7, 2023, doi: 10.3390/wevj14070188.
- [11] G. J. Chen dan W. H. Chung, “Evaluation of Charging Methods for Lithium-Ion Batteries,” *Electron.*, vol. 12, no. 19, 2023, doi: 10.3390/electronics12194095.
- [12] F. An, R. Zhang, Z. Wei, dan P. Li, “Multi-stage constant-current charging protocol for a high-energy-density pouch cell based on a 622NCM/graphite system,” *RSC Adv.*, vol. 9, no. 37, hal. 21498–21506, 2019, doi: 10.1039/c9ra03629f.
- [13] M. Usman Tahir, A. Sangwongwanich, D. I. Stroe, dan F. Blaabjerg, “Overview of multi-stage charging strategies for Li-ion batteries,” *J. Energy Chem.*, vol. 84, hal. 228–241, 2023, doi: 10.1016/j.jechem.2023.05.023.
- [14] T. Sutikno dan H. Satrian Purnama, “Konverter DC-DC,” in *KONVERTER DC-DC Prinsip & Aplikasi*, vol. 1, Yogyakarta: UAD Press, 2020, hal. 3–5.

- [15] J. Setiawan, M. Facta, dan B. Winardi, “Perancangan Dc Konverter Arus Searah Tipe Buck Pada Mode Operasi Ccm Dan Dcm,” *Transient*, vol. 4, 2015.
- [16] J. Ejury, “Buck Converter Design Note,” *Buck Convert. Des.*, hal. 1–4, 2013.
- [17] “Arduino Nano Documentation.” Diakses: 1 Juni 2024. [Daring]. Tersedia pada: <https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000005-datasheet.pdf>
- [18] T. L. Floyd, *Elektronic Devices*, 9 ed. New Jersey: Pearson Publication, 2006.
- [19] N. E. Wijanarko, S. Pradana, dan E. Yadie, “Rancang Bangun Sistem Alat Praktikum MOSFET di Laboratorium Elektronika Daya,” *PoliGrid*, vol. 2, no. 2, hal. 62–63, 2021, doi: 10.46964/poligrid.v2i2.711.
- [20] T. Instrument, “INA219 Zero-Drift, Bidirectional Current/Power Monitor With I2C Interface,” no. Desember. Texas Instrument, 2015.
- [21] L. E. Hallum dan S. L. Cloherty, “Liquid-Crystal Display (LCD) of achromatic, mean-modulated flicker in clinical assessment and experimental studies of visual systems,” *PLoS One*, vol. 16, no. 3 March, hal. 1–19, 2021, doi: 10.1371/journal.pone.0248180.
- [22] U. Mahanin Tyas, A. Apri Buckhari, dan Pattasang, “Implementasi Aplikasi Arduino Ide Pada Mata Kuliah Sistem Digital,” *Tek. J. Pendidik. Teknol. Inf.*, vol. 1, no. 1, hal. 1–9, 2023.
- [23] S. Fuada *et al.*, “Studi EasyEDA sebagai Alternatif Simulator Rangkaian Listrik: Pengujian pada Rangkaian Mesh dan Pembuktiannya dengan Eksperimen Aktual,” *ALINIER J. Artif. Intell. Appl.*, vol. 4, no. 2, hal. 79–90, 2023, doi: 10.36040/alinier.v4i2.6935.
- [24] L. D. Jones dan A. F. Chin, “Introduction to Instrumentation,” in *Electronic instruments and measurements*, 2 ed., New Jersey: Prentice HALL, 1991, hal. 1–7.