

RANCANG BANGUN PENGISI DAYA UNTUK BATERAI *LITHIUM-POLYMER* DENGAN MEMPERTIMBANGKAN KOMPENSASI RESISTANSI

Rizki Nurilyas Ahmad^{1*)}, Heri Suryoatmojo²⁾ dan Dedet C. Riawan²⁾

¹ Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Surakarta
Jl. Ahmad Yani, Pabelan, Kartasura, Sukoharjo 57169, Indonesia

² Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111, Indonesia

*) E-mail : rna924@ums.ac.id

Abstrak

Baterai *lithium-ion-polymer* atau *lithium-polymer* merupakan salah satu jenis dari baterai berbasis *lithium-ion*. Saat ini, baterai berbasis *Lithium-ion* banyak digunakan pada berbagai macam perangkat portabel hingga kendaraan listrik. Pengisi daya atau *charger* untuk baterai berbasis *Lithium-ion* yang umum digunakan saat ini menggunakan metode *constant current – constant voltage* (CC-CV). Metode ini dianggap efektif untuk menghindari *undercharging* dan *overcharging*. Pada *battery pack* terdapat akumulasi resistansi yang dapat menyebabkan penurunan tegangan pada *cell* baterai, dan dapat mempercepat proses transisi dari mode CC menjadi mode CV. Percepatan transisi tersebut dapat mengakibatkan proses pengisian daya berlangsung lebih lama. Pada penelitian ini dibahas bagaimana proses kompensasi resistansi pada *charger* dengan topologi PLL, untuk mengompensasi akumulasi resistansi pada *battery pack* pada saat proses pengisian daya berlangsung. Pada simulasi didapatkan hasil bahwa pengisi daya dengan kompensasi resistansi menghasilkan waktu pengisian daya 17.82% lebih cepat, sedangkan pada uji coba alat didapatkan waktu pengisian daya 15.58% lebih cepat, kedua hasil tersebut jika dibandingkan dengan pengisi daya dengan topologi PLL tanpa kompensasi resistansi.

Kata kunci: Pengisi daya baterai Lithium-polymer, Metode pengisian daya constant current – constant voltage, Kompensasi Resistansi

Abstract

Lithium-ion-polymer or lithium-polymer battery is a type of lithium-ion based battery. Currently, lithium-ion based batteries are widely used in a variety of portable devices to electric vehicles. The charger for the lithium-ion based battery that is commonly used today uses the constant current – constant voltage (CC-CV) method. This method is considered effective in avoiding undercharging and overcharging. The battery pack has an accumulation of resistance which can cause a decrease in the voltage on the battery cells and can speed up the transition process from CC mode to CV mode. The acceleration of the transition can result in longer charging process. This research discusses how to compensate the resistance of the charger with a PLL topology to compensate the accumulation of resistance in the battery pack during the charging process. In the simulation, it was found that the charger with resistance compensation resulted in a 17.82% faster charging time, while in testing the device, the charging time was 15.58% faster, both results are when compared to charger with a PLL topology without resistance compensation.

Keywords: Lithium-ion based battery charger, Constant current – constant voltage charging method, Resistance compensation

1. Pendahuluan

Dewasa ini, perkembangan perangkat portabel sangatlah pesat, dan perangkat tersebut tentunya membutuhkan suplai daya listrik yang juga bersifat portabel. Saat ini, ada beberapa jenis baterai yang digunakan sebagai sumber daya untuk berbagai macam perangkat portabel, salah satu diantaranya adalah baterai jenis *Lithium-based* (*Lithium ion* maupun *Lithium polymer*). Baterai jenis ini sangat

mudah ditemukan pada berbagai perangkat portabel sehari-hari, maupun pada teknologi yang lebih canggih lainnya, seperti pada kendaraan listrik [1]–[3]

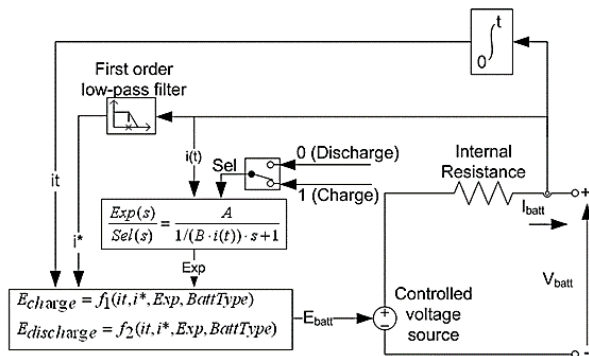
Sebagai salah satu sumber daya listrik, baterai berbasis *lithium* memiliki kemampuan untuk dapat diisi ulang (*recharge*) ketika dayanya sudah habis, dengan batasan *life-cycle* tertentu. Ada beberapa metode pengisian daya atau *charging* yang digunakan untuk mengisi daya baterai jenis *lithium-based* di antaranya yaitu, *constant trickle*

(CTC), constant current (CC), constant voltage (CV), dan constant current – constant voltage (CC-CV) [4], [5]. Dimana metode CC-CV lebih banyak digunakan karena keunggulannya dalam meminimalkan resiko terjadinya *undercharging* dan *overcharging* yang dapat mempengaruhi *life-cycle* atau masa pakai baterai [6]. *Undercharging* dapat menyebabkan kapasitas baterai tidak terisi penuh, sedangkan *overcharging* dapat meningkatkan resiko terjadinya kerusakan pada komponen fisik dari baterai itu sendiri, karena terisi muatan yang melebihi kapasitasnya. Transisi dari metode constant current menuju metode constant voltage pada metode CC-CV dapat terpengaruh oleh akumulasi resistansi pada battery pack [7]. Salah satu cara yang bisa dilakukan untuk mengompensasi akumulasi resistansi tersebut yaitu dengan menambahkan tegangan referensi berdasarkan nilai akumulasi resistansinya.

2. Pengisian Daya Baterai

2.1. Model Baterai Lithium-ion based

Baterai *Lithium-ion-polymer* atau biasa hanya disebut dengan *Lithium-polymer* (Li-po) merupakan jenis baterai yang bisa diisi ulang. Penelitian ini menggunakan perangkat lunak simulink (Matlab) untuk melakukan simulasi proses pengisian daya, sehingga disajikan model baterai pada software simulink seperti yang dapat dilihat pada gambar 1.



Gambar 1. Model baterai software simulink [8]

dimana untuk model baterai *lithium-ion*, persamaannya adalah sebagai berikut [8]:

Discharge Model ($i^* > 0$)

$$f_1(it, i^*, i) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q-it} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q-it} \cdot it + A \cdot \exp(-B \cdot it) \quad (1)$$

Charge Model ($i^* < 0$)

$$f_2(it, i^*, i) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{it+0.1 \cdot Q} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q-it} \cdot it + A \cdot \exp(-B \cdot it) \quad (2)$$

dimana [8],

E_{Batt} = Tegangan non-linier (V)

E_0 = Tegangan konstan (V)

Exp(s) = Exponential zone dynamics (V)

Sel(s) = Menggambarkan mode baterai. Sel(s) = 0 saat baterai *discharging*, Sel(s) = 1 saat baterai *charging*.

K = Konstanta polarisasi (Ah⁻¹) atau Polarization resistance (Ohms)

i^* = Low frequency current dynamics (A)

I = Arus baterai (A)

it = Extracted capacity (Ah)

Q = Kapasitas maksimal baterai (Ah)

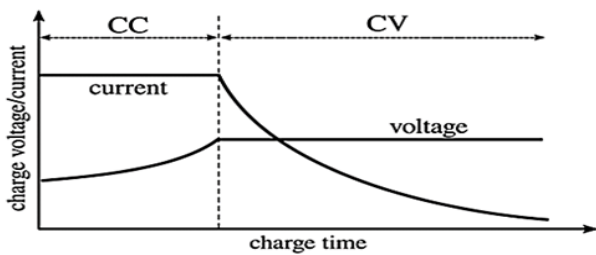
A = Exponential voltage (V)

B = Exponential capacity (Ah)⁻¹

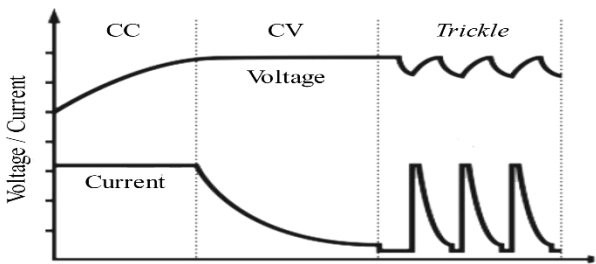
Saat akan melakukan simulasi, pada *dialog box* yang muncul perlu memasukan beberapa parameter yang bisa di dapatkan dari *datasheet* baterai, yaitu: Tegangan nominal baterai, kapasitas *rating* baterai, SOC awal, *response time* baterai, kapasitas maksimal baterai (umumnya 105% dari *rating* kapasitas), tegangan *charging* maksimal, arus *discharge* nominal, resistansi internal, kapasitas pada tegangan nominal, dan zona eksponensial [8].

2.2. Pengisian Daya pada Baterai

Battery Charger atau pengisi daya baterai, digunakan untuk mengisi ulang (*recharge*) daya baterai yang berkurang atau habis setelah digunakan, sehingga daya baterai tersebut kembali terisi penuh sesuai kapasitasnya. Beberapa metode yang umumnya digunakan dalam proses pengisian daya baterai, yaitu *constant trickle* (CTC), *constant current* (CC), *constant voltage* (CV), dan *constant current – constant voltage* (CC-CV) [6]. Metode yang banyak digunakan adalah metode CC-CV, yaitu dengan memberikan suplai arus konstan di awal proses pengisian daya dan pada kondisi tertentu berganti dengan memberikan suplai tegangan konstan. Metode ini banyak digunakan karena efektif dalam mengatasi *overcharging* dan menghasilkan kapasitas baterai yang terisi mencapai hampir 100%. Beberapa metode kontrol untuk menghasilkan *charger* yang berkualitas baik dan mengadopsi sistem kecerdasan buatan, terus dikembangkan, misalnya menggunakan metode atau topologi *phase-locked loop* (PLL), *fuzzy*, *genetic*, *grey*, dan *ant colony* [9]. Gambaran proses pengisian daya (*charging*) menggunakan metode CC-CV dapat dilihat pada gambar 2, dan gambaran metode pengisian daya metode CC-CV-*trickle* dapat dilihat pada gambar 3.



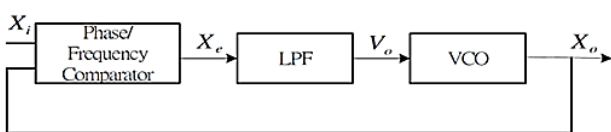
Gambar 2. Proses pengisian daya CC-CV [10]



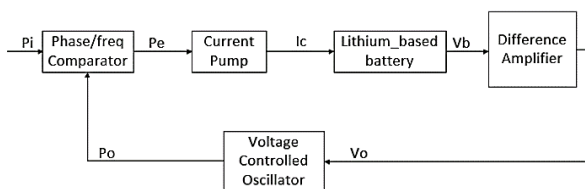
Gambar 3. Proses pengisian daya CC-CV-Trickle [11]

2.3. Phase-Locked Battery Charger (PLBC)

Phase/Frequency-Locked Loop (PLL) merupakan sebuah sistem loop, atau memiliki umpan balik, dengan sinyal referensi masukan berupa frekuensi. Komponen utama pada PLL ini berupa VCO (Voltage Controlled Oscillator), Phase/Frequency Comparator, dan Low-pass filter (LPF). Keluaran dari VCO merupakan sinyal osilasi yang nilai frekuensinya dapat dikontrol menggunakan tegangan. Diagram blok PLL dapat dilihat pada gambar 4. Dengan mengadopsi topologi PLL tersebut, dapat dibuat sebuah topologi battery charger [10], [12], [13], yang dapat dilihat pada gambar 5 dan gambar 6.



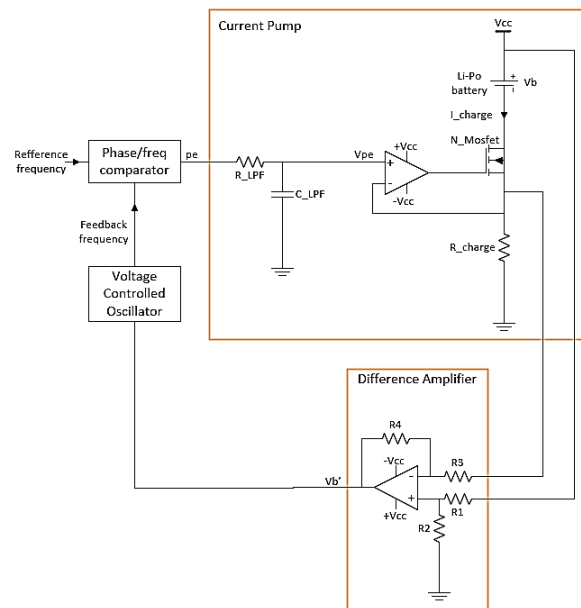
Gambar 4. Diagram blok phase/frequency-locked loop [14]



Gambar 5. Diagram blok phase-locked battery charger (PLBC) [10]

Pada gambar 6 dapat dilihat bahwa current pump disusun oleh sebuah operational amplifier (op-amp), sebuah transistor N-MOSFET, dua buah resistor, dan sebuah kapasitor. Sedangkan difference amplifier disusun oleh sebuah operational amplifier (op-amp) dan empat buah

resistor. Serta terdapat juga komponen voltage controlled oscillator (VCO) dan phase/frequency comparator (PC).



Gambar 6. Rangkaian phase-locked battery charger [10]

Current Pump berfungsi untuk mengonversi sinyal tegangan DC keluaran phase comparator menjadi constant current maupun constant voltage (variable current). Pada bagian current pump terdapat sebuah lowpass filter yang bertujuan untuk menghilangkan noise pada sinyal eror keluaran phase comparator, sehingga sinyal yang masuk pada komparator current pump merupakan sinyal tegangan DC murni. Besarnya arus constant current dapat dihitung berdasarkan persamaan berikut ini [10]:

$$I_{charge} = \frac{V_{pe}}{R_{charge}} \quad (3)$$

dimana,

- I_{charge} = arus pengisian daya constant-current (A)
- V_{pe} = sinyal DC keluaran phase comparator (V)
- R_{charge} = resistor current pump (Ω)

Difference amplifier berfungsi untuk mengukur besarnya tegangan di terminal baterai. Difference amplifier bekerja dengan persamaan sebagai berikut [15]:

$$V_o = \left(\frac{R_4}{R_3} + 1\right) \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \times V_{in+}\right) - \left(\frac{R_4}{R_3} \times V_{in-}\right) \quad (4)$$

Jika pada persamaan (4) diatur sedemikian hingga,

$$\frac{R_3}{R_1} = \frac{R_4}{R_2}$$

maka,

$$V_o = \frac{R_4}{R_3} (V_{in+} - V_{in-}) \quad (5)$$

dimana,

V_{in+} = tegangan masukan positif *difference amplifier*

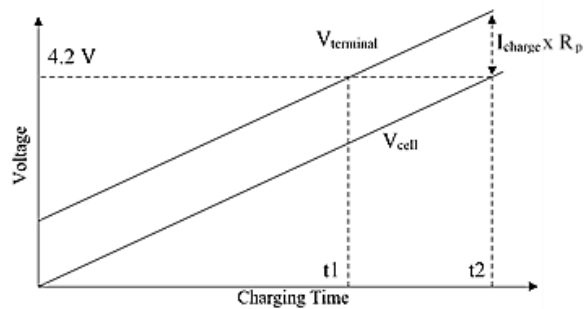
V_{in-} = tegangan masukan negatif *difference amplifier*

V_o = tegangan keluaran *difference amplifie*

2.4. Kompensasi Resistansi

Kebutuhan baterai berbasis *lithium-ion* masih sangat besar, didorong oleh perkembangan teknologi perangkat portabel dan juga perkembangan kendaraan listrik yang pesat. Hal tersebut memicu munculnya kebutuhan untuk dapat mengisi ulang daya baterai *lithium-ion* dalam waktu yang singkat. Pengisian daya menggunakan arus yang besar dapat mempengaruhi kondisi baterai *lithium-ion* itu sendiri, seperti menurunnya efisiensi, penurunan kapasitas, masa pakai baterai yang berkaitan dengan degradasi material, dan sebagainya. Sehingga perlu adanya penelitian lebih lanjut yang dapat menghasilkan baterai dengan ketahanan yang lebih tinggi ketika diisi dayanya dengan arus yang besar. [16], [17]

Pada pengisian daya baterai metode CC-CV, akumulasi resistansi dalam *battery pack* dapat mempercepat proses peralihan dari *constant current* menuju *constant voltage* [7]. Kondisi *constant current* menjadi lebih pendek, sedangkan kondisi *constant voltage* menjadi lebih panjang, sehingga proses pengisian daya baterai akan memakan waktu yang lebih lama [18], [19]. Hal tersebut dapat terjadi karena pada saat proses pengisian daya, semakin besar nilai akumulasi resistansi akan menyebabkan tegangan terminal baterai menjadi lebih tinggi, sehingga sensor tegangan yang mengatur perpindahan antara metode constant current menjadi constant voltage mengirimkan sinyal pergantian metode yang lebih cepat dari seharusnya. Kompensasi resistansi dapat dilakukan dengan cara mengurangi tegangan terminal baterai dengan tegangan akibat adanya akumulasi resistansi pada *battery pack*, sehingga tegangan umpan balik yang mengontrol VCO pada topologi PLL dengan kompensasi resistansi, merupakan tegangan terminal baterai yang dikurangi dengan tegangan *battery pack*. Untuk itu, ketika menggunakan metode kompensasi resistansi ini, maka terlebih dahulu harus mengetahui berapa besarnya akumulasi resistansi pada *battery pack* (*pack resistance*), baik dengan cara pengukuran maupun dengan mengacu pada *datasheet* baterai. Pada metode kompensasi resistansi ini, baterai tetap diisi ulang sesuai dengan arus nominal berdasarkan *datasheet*, sehingga aman bagi kondisi baterai itu sendiri. Ilustrasi tegangan terminal baterai ($V_{terminal}$) dengan tegangan hasil kompensasi (V_{cell}) dapat dilihat pada gambar 7.

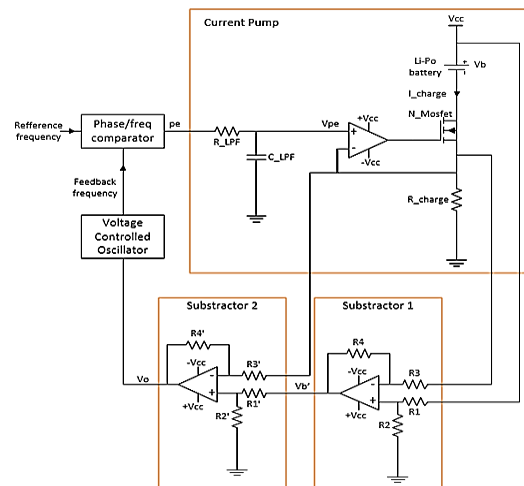


Gambar 7. Ilustrasi Kompensasi Resistansi

3. Metode

3.1. Desain Phase/frequency Locked Battery Charger (PLBC) Dengan Kompensasi Resistansi

Kompensasi resistansi pada PLBC dapat dilakukan dengan menambahkan sebuah *subtractor* tambahan, sehingga terdapat dua buah *subtractor*. *Subtractor* pertama berfungsi untuk mengukur tegangan terminal baterai sedangkan *subtractor* kedua berfungsi sebagai kompensator yaitu mengurangi tegangan terminal baterai dengan tegangan akibat adanya *pack resistance*, sebagaimana dapat dilihat pada gambar 8.



Gambar 8. Skematik Rangkaian PLBC dengan kompensasi resistansi [9]

Parameter PLBC dengan kompensasi resistansi ditentukan sebagai berikut, pada tabel 1:

Tabel 1. Spesifikasi charger

Parameter	Value
Constant Voltage	4.2 V
Constant Current	500 mA
Battery cell	1

Penentuan parameter dan nilai-nilai komponennya sebagai berikut:

Phase/frequency Comparator dan VCO

Komparator yang dipilih yaitu komparator dengan keluaran 0V pada kondisi *low* dan 5V pada kondisi *high*. Sedangkan VCO yang dipilih yaitu VCO dengan rentang tegangan masukan yang dapat disesuaikan dengan rentang tegangan keluaran substractor. Selain itu juga rentang frekuensi sinyal keluaran VCO harus masih di dalam rentang frekuensi komparator. Berdasarkan hal tersebut, maka dipilih ic PLL CD4046, dimana di dalam ic tersebut sudah terdapat komparator dan VCO. Pada desain ini, VCO diatur dengan frekuensi tengah sekitar 200kHz.

Current Pump

Diharapkan $R_{LPF} \times C_{LPF} \gg 1/f_i$, supaya tegangan yang sampai di komparator *current pump* berupa tegangan DC [9]. Sehingga dipilih $R_{LPF} = 10k\Omega$ dan $C_{LPF} = 33\mu F$. Dengan persamaan 3, untuk menghasilkan arus *constant current* sebesar 500mA diperlukan resistor R_{charge} sebesar,

$$R_{charge} = \frac{V_{pe}}{I_{charge}} = \frac{5}{0.5} = 10 \Omega$$

Untuk op-amp yang digunakan yaitu ic TL074, sedangkan transistor yang digunakan merupakan N-mosfet irf1404.

Substractor 1

Substractor 1 dirancang dengan *gain* = 1, sehingga nilai atau parameter komponennya dapat dihitung menggunakan persamaan 5 sebagai berikut:

Dengan syarat,

$$\frac{R_3}{R_1} = \frac{R_4}{R_2}$$

maka, dengan persamaan 5,

$$V_o = \frac{R_4}{R_3} (V_{in+} - V_{in-})$$

didesain dengan *gain* = 1, sehingga,

$$V_o = \text{tegangan terminal baterai}$$

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R, \text{ dipilih } R = 10 \text{ k}\Omega$$

Substractor 2

Nilai atau parameter komponen *substractor 2* dapat dihitung menggunakan persamaan 4 sebagai berikut:

$$V_o = \left(\frac{R'_4}{R'_3} + 1 \right) \left(\frac{R'_2}{R'_1 + R'_2} \times V'_{in+} \right) - \left(\frac{R'_4}{R'_3} \times V'_{in-} \right)$$

$$V_o = \left(\frac{R_4}{R_3} + 1 \right) \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \times V_b \right) - \left(\frac{R_4}{R_3} \times R_{charge} I_{charge} \right)$$

persamaan yang dikehendaki adalah,

$$V_o = V_b - R_p I_{charge}$$

sehingga,

$$\left(\frac{R'_4}{R'_3} + 1 \right) \left(\frac{R'_2}{R'_1 + R'_2} \right) = 1$$

$$\left(\frac{R'_4}{R'_3} + 1 \right) = \frac{1}{\left(\frac{R'_2}{R'_1 + R'_2} \right)}$$

$$\left(\frac{R'_4}{R'_3} + 1 \right) = \left(\frac{R'_1 + R'_2}{R'_2} \right) = \left(\frac{R'_1}{R'_2} + 1 \right)$$

$$\left(\frac{R'_4}{R'_3} \right) = \left(\frac{R'_1}{R'_2} \right)$$

dan,

$$\frac{R'_4}{R'_3} \times R_{charge} = R_p$$

Dari hasil pengukuran, rata-rata nilai *pack resistance* (R_p) sekitar 225m Ω , sehingga:

$$\frac{R'_4}{R'_3} = \frac{R_p}{R_{charge}} = \frac{0.225}{10} = 0.0225$$

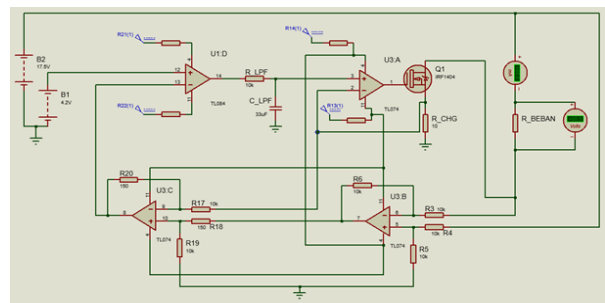
sehingga dipilih,

$R'_1 = R'_4 = 220\Omega$ (menyesuaikan nilai yang ada di pasaran)

$R'_2 = R'_3 = 10k\Omega$

3.2. Simulasi Constant Current - Constant Voltage (CC-CV)

Simulasi dilakukan untuk memeriksa apakah rangkaian dapat menghasilkan arus konstan pada metode *constant current* dan tegangan konstan pada metode *constant voltage*, dilakukan menggunakan perangkat lunak proteus. Untuk simulasi, komparator fasa diganti menggunakan komparator tegangan karena keterbatasan perangkat lunak. Beban yang digunakan berupa sebuah resistor, dimana nilai resistor disesuaikan untuk masing-masing metode. Rangkaian simulasi CC-CV dapat dilihat pada gambar 9.



Gambar 9. Rangkaian simulasi CC-CV

Untuk melakukan simulasi *constant current*, beban resistor dipilih sehingga tegangannya saat dialiri arus pengisian daya tidak lebih dari 4.2V ($I_{charge} \times R_{beban} < 4.2V$). Karena arus pengisian daya diatur sebesar 500mA, maka nilai R yang dipilih yaitu 2.5Ω, 5Ω, dan 7.5Ω. Hasil simulasinya dapat dilihat pada tabel 2. Dari tabel 2 tersebut, dapat dilihat bahwa rangkaian simulasi yang digunakan bisa menghasilkan arus *constant current* sebesar 500mA.

Tabel 2. Hasil simulasi *constant current* (CC)

Load Resistance (Ω)	Current (mA)	Voltage (V)
2.5	500	1.25
5	500	2.5
7.5	500	3.75

Untuk melakukan simulasi *constant voltage*, beban resistor dipilih sehingga tegangannya saat dialiri arus pengisian daya akan lebih dari 4.2V ($I_{charge} \times R_{beban} > 4.2V$). Karena arus pengisian daya diatur sebesar 500mA, maka nilai R yang dipilih yaitu 10Ω, 12.5Ω, dan 15Ω. *Subtractor 2*, sebagai kompensator, harus dilepas agar tegangan beban resistor terkunci pada 4.2V. Dari tabel 3, dapat dilihat bahwa rangkaian simulasi tersebut dapat menghasilkan tegangan *constant voltage* sebesar 4.2V.

Tabel 3. Hasil simulasi *constant voltage* (CV)

Load Resistance (Ω)	Current (mA)	Voltage (V)
10	420	4.2
12.5	336	4.2
15	280	4.2

3.3. Simulasi *Subtractor 1* dan *Subtractor 2*

Simulasi *subtractor* dilakukan pada kondisi beban berupa resistansi dengan nilai 2.5Ω, 5Ω, dan 7.5Ω, seperti pada simulasi *constant current*. Hasil simulasi dapat dilihat pada tabel 4. Dari hasil simulasi, terdapat sedikit selisih dengan teori, hasil tersebut dapat terjadi karena perangkat lunak proteus menggunakan komponen simulasi yang tidak ideal.

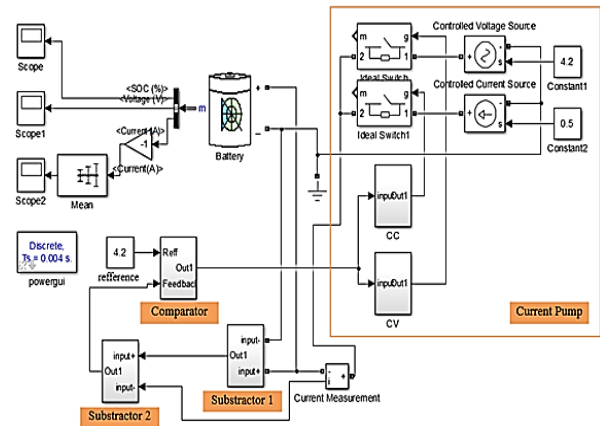
Tabel 4. Hasil simulasi tegangan keluaran *subtractor 1* dan *subtractor 2*

Load Resistance (Ω)	Subtractor 1's voltage (V)	Subtractor 2's voltage (V)
2.5	1.24	1.16
5	2.49	2.41
7.5	3.74	3.66

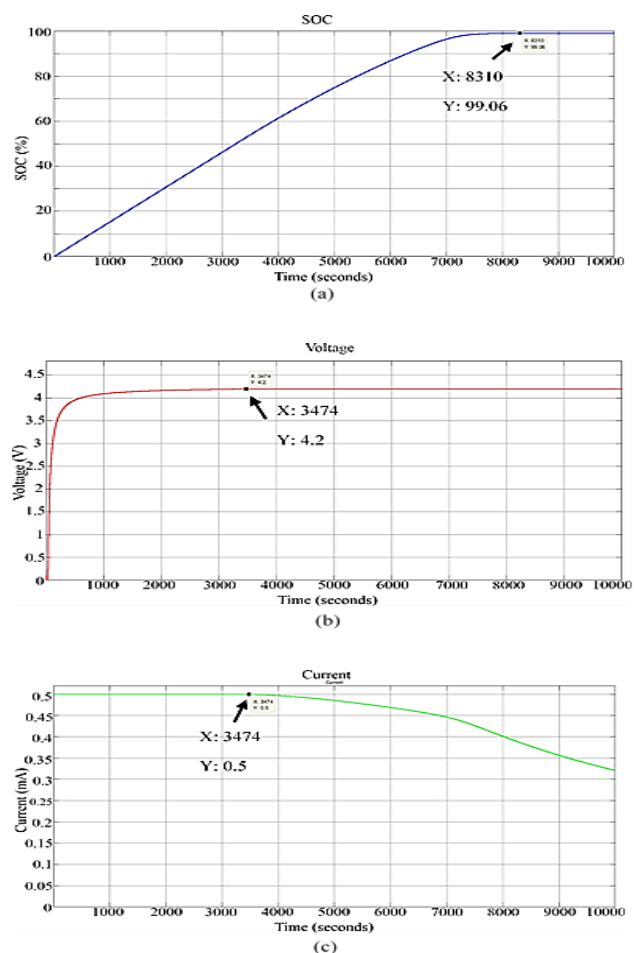
3.4. Simulasi Pengisian Daya Baterai

Simulasi proses pengisian daya baterai dilakukan menggunakan perangkat lunak simulink/matlab. Parameter baterai seperti kapasitas *rating*, tegangan nominal, tegangan pengisian daya, dan arus pengisian daya nominal diisikan sesuai *datasheet* baterai, SOCnya diatur mulai dari nol, sedangkan resistansi internal diisi dengan rata-rata *pack resistance* hasil pengukuran (225mΩ), dan parameter

lainnya diatur *default*. Rangkaian yang digunakan pada saat simulasi dapat dilihat pada gambar 10.



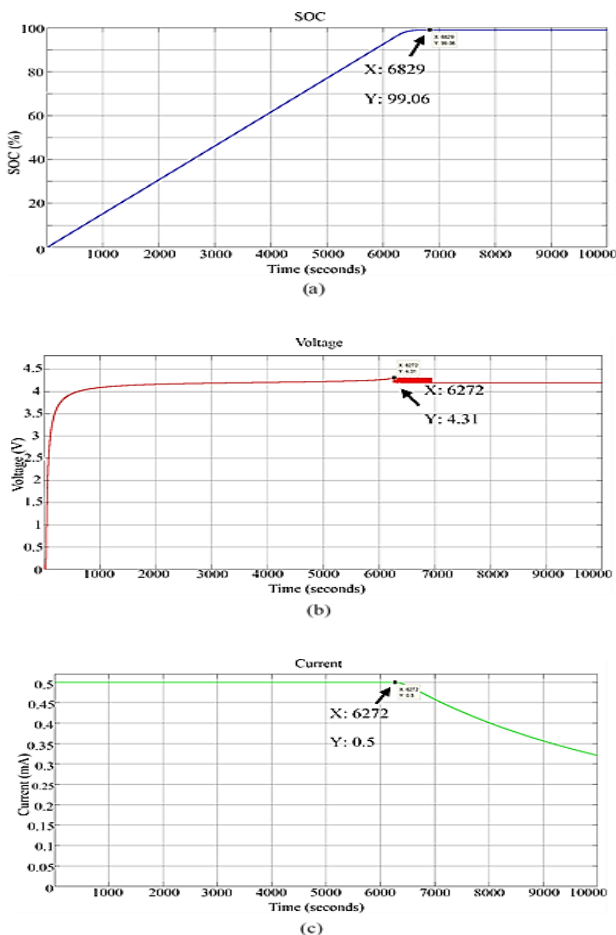
Gambar 10. Rangkaian simulasi *charging* baterai



Gambar 11. Hasil simulasi pengisian daya tanpa kompensasi (a) SOC (b) Voltage (c) Current

Dari hasil simulasi pengisian daya tanpa kompensasi pada gambar 11.a, 11.b, 11.c, dapat dilihat bahwa pergantian

metode *constant current* menuju metode *constant voltage* pada rangkaian pengisi daya tanpa kompensasi, terjadi pada detik ke 3474 dan pada tegangan 4.2V. Pada gambar 12.a, 12.b, 12.c, dapat dilihat bahwa pergantian metode *constant current* menuju metode *constant voltage* pada rangkaian pengisi daya dengan kompensasi, terjadi pada detik ke 6272 dan pada tegangan 4.31V. Untuk waktu pengisian daya baterai, pada rangkaian pengisi daya tanpa kompensasi membutuhkan waktu 8310 detik hingga mencapai SOC 99.06%, sedangkan pada rangkaian pengisi daya dengan kompensasi membutuhkan waktu 6829 detik untuk mencapai SOC 99.06%. Sehingga dapat dihitung bahwa waktu pengisian daya baterai menggunakan rangkaian pengisi daya dengan kompensasi 17.82% lebih cepat daripada menggunakan rangkaian pengisi daya tanpa kompensasi, hingga SOC 99.06%.



Gambar 12. Hasil simulasi pengisian daya dengan kompensasi (a) SOC (b) Voltage (c) Current

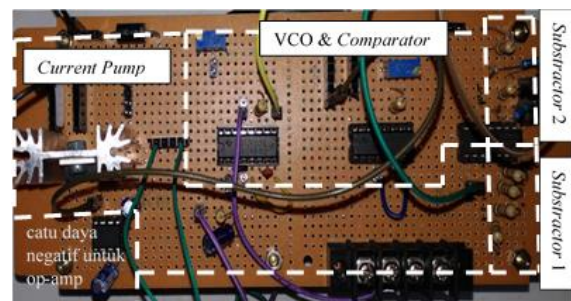
3.5. Implementasi Pengisi Daya

Berdasarkan hasil desain pada subbab-subbab sebelumnya, maka komponen yang diperlukan dalam implementasi pengisi daya dengan kompensasi resistansi tertulis pada tabel 5. Hasil implementasi pengisi daya dapat dilihat pada gambar 13. Setiap komponen tentunya memiliki nilai eror

maupun toleransi masing-masing yang mana masih bisa diterima apabila nilainya tidak signifikan. Komponen yang digunakan juga disesuaikan dengan yang ada di pasaran namun dengan fungsi dan spesifikasi yang sesuai dengan hasil desain.

Tabel 5. Komponen implementasi pengisi daya dengan kompensasi resistansi

Component	Value
Resistor R_{charge}	10 Ω
Resistor $R_{ipf}, R_1, R_2, R_3, R_4$	10 k Ω
Resistor R'_1, R'_4	150 Ω
Resistor R'_2, R'_3	10 k Ω
Kapasitor C_{ipf}	33 μF
Op-amp	TL 074
N-Mosfet	IRF 1404
ic PLL	CD 4046



Gambar 13. Hasil implementasi pengisi daya

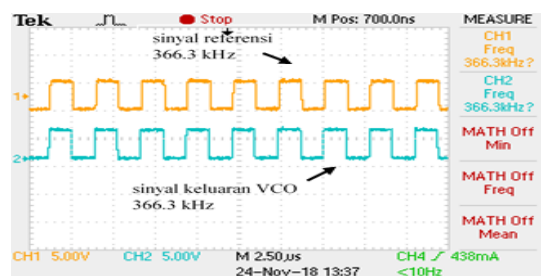
4. Hasil dan Analisa

4.1. Pengujian VCO dan Phase/Frequency Comparator

Hasil pengukuran frekuensi tengah VCO dan tegangan keluaran komparator disajikan pada tabel 6, sedangkan pada gambar 14 dapat dilihat gambar sinyal referensi dan sinyal keluaran *voltage controlled oscillator* (VCO) saat kondisi *locked* (terkunci). Dari hasil pengujian tersebut dapat disimpulkan bahwa VCO dan *phase/frequency comparator* sudah sesuai dengan desain.

Tabel 6. Hasil pengukuran VCO dan phase comparator

Parameter	Value
VCO	f_o 196.5 kHz
Comparator	Output low -0.05 V
	Output high 5 V



Gambar 14. Sinyal *locked* (terkunci)

4.2. Pengujian Constant Current – Constant Voltage (CC-CV)

Pengujian *constant current* dilakukan dengan memberikan beban berupa beberapa resistor dengan nilai yang berbeda. Agar pengisi daya berada pada kondisi *constant current*, maka resistor yang dipilih adalah resistor yang tegangannya saat dialiri arus konstan 0.5A adalah kurang dari 4.2V. Resistor yang dipilih yaitu 2.5Ω, 5Ω, dan 7.5Ω. Hasil pengukuran *constant current* dapat dilihat pada tabel 7. Dari hasil pengujian, pengisi daya mampu menghasilkan arus konstan meskipun terdapat selisih terhadap desain serta perhitungan, namun dapat diterima.

Tabel 7. Hasil pengukuran *constant current* (CC)

Load Resistance (Ω)	Readable Current (mA)	Readable Voltage (V)
2.5	497	1.225
5	498	2.385
7.5	496	3.526

Pengujian *constant voltage* dilakukan dengan memberikan beban berupa beberapa resistor dengan nilai yang berbeda. Agar pengisi daya berada pada kondisi *constant voltage*, maka resistor yang dipilih adalah resistor yang tegangannya saat dialiri arus konstan 0.5A adalah lebih dari atau sama dengan 4.2V. Resistor yang dipilih yaitu 10Ω, 12.5Ω, dan 15Ω. Untuk mendapatkan hasil tegangan terkunci pada 4.2V, maka pada pengujian ini *subtractor 2* harus dilepas. Hasil pengukuran *constant voltage* dapat dilihat pada tabel 8. Dari hasil pengujian, pengisi daya mampu menghasilkan tegangan konstan 4.2V.

Tabel 8. Hasil pengukuran *constant voltage* (CV)

Load Resistance (Ω)	Readable Current (mA)	Readable Voltage (V)
10	415	4.2
12.5	326	4.2
15	271	4.2

4.3. Pengujian Subtractor

Tegangan keluaran *subtractor 1* dan *subtractor 2* diukur pada saat pengujian *constant current* dilakukan, dan data hasil pengukuran dapat dilihat pada tabel 9. Dari data hasil pengukuran tegangan *subtractor*, dapat dilihat bahwa kedua *subtractor* berfungsi dengan baik, sesuai dengan desain yang telah ditentukan meskipun terdapat sedikit perbedaan karena komponen yang tidak ideal.

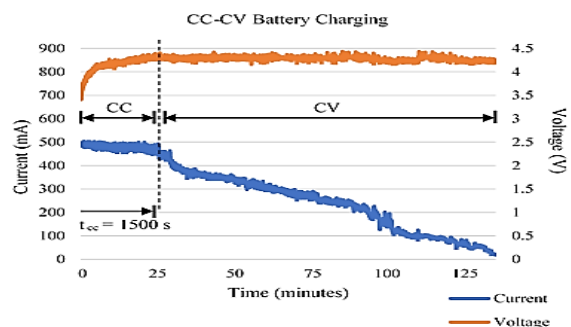
Tabel 9. Hasil pengukuran *subtractor*

Load Resistance (Ω)	Subtractor 1's voltage (V)	Subtractor 2's voltage (V)
2.5	1.221	1.155
5	2.383	2.315
7.5	3.525	3.454

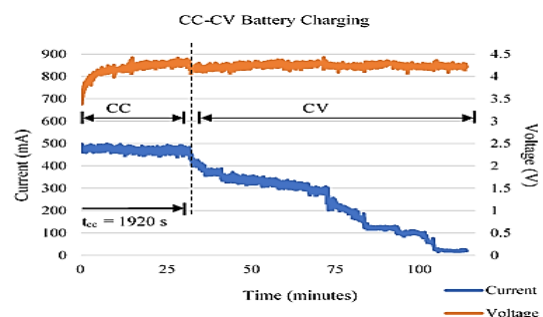
4.4. Pengujian Pengisian Daya Baterai

Pengujian pengisian daya ini menggunakan beban berupa baterai *lithium-polymer* tipe 063443, 3.7V/4.2V, 900mAh. Pengujian dilakukan sebanyak dua kali, yang pertama adalah pengujian pengisian daya tanpa kompensasi (*subtractor 2* dilepas), dan yang kedua adalah pengujian pengisian daya dengan kompensasi (*subtractor 2* dipasang). Data hasil pengujian dapat dilihat pada gambar 15 (tanpa kompensasi) dan gambar 16 (dengan kompensasi).

Dari hasil pengujian dapat dilihat bahwa pada proses pengisian daya tanpa kompensasi, pergantian mode *constant current* menuju *constant voltage* terjadi lebih cepat yaitu pada sekitar detik ke 1500 sedangkan pada proses pengisian daya dengan kompensasi terjadi pada sekitar detik ke 1920. Dan proses pengisian daya dengan kompensasi berlangsung lebih cepat yaitu sekitar 6833 detik atau sekitar 1jam 54menit, sedangkan proses pengisian daya tanpa kompensasi berlangsung sekitar 8094 detik atau sekitar 2jam 15menit. Dari hasil tersebut dapat dihitung bahwa proses pengisian daya dengan kompensasi berlangsung sekitar 15.58% lebih cepat dibandingkan proses pengisian daya tanpa kompensasi.



Gambar 15. Hasil pengujian *charging* tanpa kompensasi



Gambar 16. Hasil pengujian *charging* dengan kompensasi

4. Kesimpulan

Dari hasil simulasi serta pengujian alat, dapat ditarik beberapa kesimpulan. Topologi *phase-locked loop* (PLL) dapat diadaptasi sebagai pengisi daya baterai *lithium-*

polymer dengan metode pengisian daya *constant current* – *constant voltage* (CC-CV). Pada pengisi daya dengan topologi PLL, untuk mendapatkan arus *constant current* dengan nilai tertentu, perlu mengatur nilai resistor R_{charge} yang sesuai, dan untuk mendapatkan tegangan *constant voltage* dengan nilai tertentu, perlu mengatur besarnya frekuensi sinyal referensi yang sesuai. Secara teori, pengisi daya dengan topologi PLL pada penelitian ini dapat digunakan untuk mengisi daya baterai multi-cell dengan mengatur *gain* dari *subtractor 1* dan *subtractor 2*, serta menyesuaikan *supply* tegangan, namun tidak direkomendasikan karena tidak terdapat perangkat penyeimbang atau *balancer*, sehingga dikhawatirkan proses pengisian daya pada masing-masing battery cell tidak seimbang. Kompensasi resistansi dapat diaplikasikan pada pengisi daya dengan topologi PLL, dengan menambahkan *subtractor 2*. *Pack resistance* dapat mempercepat pergantian proses pengisian daya dari metode *constant current* menjadi metode *constant voltage* sehingga proses pengisian daya tanpa kompensasi berlangsung lebih lama. Kompensasi resistansi yang dilakukan dapat berfungsi dengan baik, menghasilkan proses pengisian daya yang lebih cepat 17.82% pada saat simulasi, dan 15.58% pada saat pengujian alat. Untuk pengembangan selanjutnya, penulis memiliki saran untuk mengembangkan *current pump* yang lebih efisien.

Referensi

- [1]. H. Suryoatmojo, "Design Li-Po Battery Charger with Buck Converter under Partially CC-CV Method," *Proceedings - 2020 International Seminar on Intelligent Technology and Its Application: Humanification of Reliable Intelligent Systems, ISITIA 2020*, pp. 101–106, Jul. 2020, doi: 10.1109/ISITIA49792.2020.9163754.
- [2]. Z. Shafiq and W. Egger, "Study of Charging Strategies of Lithium Batteries and their Effect on the Batteries Technologies," *2022 IEEE 13th Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference, IEMCON 2022*, pp. 540–545, 2022, doi: 10.1109/IEMCON56893.2022.9946511.
- [3]. P. N. Perez, F. Veirano, and F. Silveira, "A Compact Lithium-Ion Battery Charger for Low-Power Applications," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 69, no. 3, pp. 669–673, Mar. 2022, doi: 10.1109/TCSII.2022.3141701.
- [4]. L. R. Dung, C. E. Chen, and H. F. Yuan, "A robust, intelligent CC-CV fast charger for aging lithium batteries," *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, vol. 2016–November, pp. 268–273, Nov. 2016, doi: 10.1109/ISIE.2016.7744901.
- [5]. A. L. Eshkeviri and M. Zare, "Quasi-resonant switch-mode isolated lithium-ion battery charger with CC-CV modes of operations using secondary side controller," *2017 25th Iranian Conference on Electrical Engineering, ICEE 2017*, pp. 1101–1106, Jul. 2017, doi: 10.1109/IRANIANCEE.2017.7985205.
- [6]. S. Y. Tseng, T. C. Shih, S. Y. Fan, and G. K. Chang, "Design and implementation of lithium-ion/lithium-polymer battery charger with impedance compensation," *Proceedings of the International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, pp. 866–870, 2009, doi: 10.1109/PEDS.2009.5385827.
- [7]. C. H. Lin, C. Y. Hsieh, and K. H. Chen, "A Li-ion battery charger with smooth control circuit and built-in resistance compensator for achieving stable and fast charging," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 57, no. 2, pp. 506–517, 2010, doi: 10.1109/TCSI.2009.2023830.
- [8]. MathWorks inc., "Battery." MathWorks inc., 2008.
- [9]. L. R. Chen, C. S. Liu, and J. J. Chen, "Improving phase-locked battery charger speed by using resistance-compensated technique," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 4, pp. 1205–1211, 2009, doi: 10.1109/TIE.2008.2008342.
- [10]. L. R. Chen, "PLL-based battery charge circuit topology," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 51, no. 6, pp. 1344–1346, Dec. 2004, doi: 10.1109/TIE.2004.837891.
- [11]. Colorado University, *Lecture: Lead-acid batteries*. colorado.edu. Accessed: Mar. 25, 2023. [Online]. Available: <https://dokumen.tips/documents/lecture-lead-acid-batterieseceecoloradoeducen4517materialsbattery.pdf?df.html?page=1>
- [12]. T. Thanakam and Y. Kumsuwan, "A Developed PLL Control Technique for Distorted and Unbalanced Grid Voltages with a Three-Level NPC Converter-Based Off-Board Battery Charger," *Proceedings of the 2022 International Electrical Engineering Congress, iEECON 2022*, 2022, doi: 10.1109/IEECON53204.2022.9741651.
- [13]. E. Asa, K. Colak, D. Czarkowski, F. De Leon, and I. Sefa, "PLL control technique of LLC resonant converter for EVs battery charger," *International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, pp. 1382–1386, 2013, doi: 10.1109/POWERENG.2013.6635816.
- [14]. L. R. Chen, J. Y. Han, J. L. Jaw, C. P. Chou, and C. S. Liu, "A resistance-compensated phase-locked battery charger," *2006 1st IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, 2006, doi: 10.1109/ICIEA.2006.257277.
- [15]. Pujiono, *Rangkaian Elektronika Analog*. Yogyakarta: Graha Ilmu, 2012.
- [16]. A. Tomaszewska *et al.*, "Lithium-ion battery fast charging: A review," *eTransportation*, vol. 1, p. 100011, Aug. 2019, doi: 10.1016/J.ETRAN.2019.100011.
- [17]. Y. Liu, Y. Zhu, and Y. Cui, "Challenges and opportunities towards fast-charging battery materials," *Nature Energy* 2019 4:7, vol. 4, no. 7, pp. 540–550, Jun. 2019, doi: 10.1038/s41560-019-0405-3.

- [18]. A. B. Khan and W. Choi, "Optimal Charge Pattern for the High-Performance Multistage Constant Current Charge Method for the Li-Ion Batteries," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 33, no. 3, pp. 1132–1140, Sep. 2018, doi: 10.1109/TEC.2018.2801381.
- [19]. S. O. Yong, N. A. Rahim, B. M. Eid, and B. Tankut, "Multi-Stage Fast Charging Technique for Lithium Battery in Photovoltaic systems," *2022 IEEE 7th International conference for Convergence in Technology, I2CT 2022*, 2022, doi: 10.1109/I2CT54291.2022.9824535.