

Received : 25 May 2026

Revised : 02 June 2026

Published : 17 June 2026

Issued : 30 June 2026



## Rancang Bangun Sistem Balancing Empat Sel Baterai Lithium-Ion Berbasis Selective Charge Balancing dan Polynomial Regression

Muhammad Ridho Sani Arif<sup>1\*</sup>, Denny Irawan<sup>2</sup>

*Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Gresik, Jalan Sumatera No. 101, Gresik Kota Baru (GKB), Randuagung, Kecamatan Kebomas, Kabupaten Gresik, Jawa Timur 61121.*

\*Email: [saniarifmuhammadridho@gmail.com](mailto:saniarifmuhammadridho@gmail.com), [den2mas@umg.ac.id](mailto:den2mas@umg.ac.id)

### Abstrak

Penelitian ini membahas rancang bangun sistem balancing empat sel baterai lithium-ion berbasis selective charge balancing untuk mengatasi ketidakseimbangan tegangan antar sel. Sistem dikembangkan menggunakan ESP32, modul charging TP5100, sensor INA219, relay, serta rangkaian corrective pulse discharge balancing. Proses balancing dilakukan melalui selective charge balancing hingga tegangan 4,0 V, dilanjutkan rest verification selama 30 menit. Apabila masih terdapat ketidakseimbangan tegangan, sistem mengaktifkan corrective pulse discharge balancing atau selective recharge balancing sesuai besar selisih tegangan. Polynomial regression digunakan untuk memodelkan hubungan nonlinier antara kapasitas muatan dan Open Circuit Voltage (OCV) sebagai dasar estimasi kebutuhan kapasitas tambahan saat recharge balancing. Hasil pengujian menunjukkan bahwa setelah rest verification diperoleh selisih tegangan maksimum antar sel sebesar 0,010 V, lebih kecil dari batas toleransi balancing sebesar 0,040 V. Corrective pulse discharge balancing menghasilkan efektivitas pengurangan ketidakseimbangan tegangan sebesar 94,74%–95,65%, sedangkan selective recharge balancing memerlukan kapasitas tambahan maksimum 361 mAh dengan waktu recharge maksimum 23,7 menit. Model polynomial regression menghasilkan nilai  $R^2$  sebesar 0,996 dan RMSE sebesar 0,008 V. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem yang dikembangkan mampu meningkatkan keseragaman tegangan antar sel secara efektif.

**Kata-kunci:** Battery balancing, lithium-ion battery, selective charge balancing, polynomial regression

### Abstract

*This study presents the design and implementation of a four-cell lithium-ion battery balancing system based on selective charge balancing to overcome cell voltage imbalance. The system was developed using an ESP32 microcontroller, TP5100 charging modules, INA219 sensors, relays, and a corrective pulse discharge balancing circuit. The balancing process consists of selective charge balancing up to 4.0 V followed by a 30-minute rest verification period. If voltage imbalance remains, the system activates either corrective pulse discharge balancing or selective recharge balancing depending on the voltage difference. Polynomial regression is employed to model the nonlinear relationship between charge capacity and Open Circuit Voltage (OCV) for estimating the additional capacity required during recharge balancing. Experimental results show that the maximum cell voltage difference after rest verification was 0.010 V, which is below the balancing tolerance limit of 0.040 V. Corrective pulse discharge balancing achieved an imbalance reduction effectiveness of 94.74%–95.65%, while selective recharge balancing required a maximum additional capacity of 361 mAh with a maximum recharge time of 23.7 minutes. The polynomial regression model achieved an  $R^2$  value of 0.996 and an RMSE of 0.008 V, indicating high agreement with experimental data. The proposed system effectively improves voltage uniformity among lithium-ion battery cells.*

**Keywords:** *Battery balancing, lithium-ion battery, selective charge balancing, polynomial regression*

## **Pendahuluan**

Baterai lithium-ion banyak digunakan pada berbagai sistem elektronik portabel dan penyimpanan energi karena memiliki densitas energi yang tinggi, *self-discharge* rendah, serta performa siklus yang baik (Kurniawan et al., 2025). Penggunaan baterai lithium-ion dalam konfigurasi multi-sel dapat menyebabkan munculnya permasalahan ketidakseimbangan tegangan antar sel (cell imbalance) akibat perbedaan karakteristik internal sel, kapasitas aktual, resistansi internal, maupun perbedaan kondisi pengisian dan pelepasan muatan (Marlow et al., 2024).

Kondisi ketidakseimbangan tegangan antar sel dapat menyebabkan penurunan performa sistem baterai. Sel dengan tegangan lebih tinggi cenderung mencapai batas tegangan maksimum lebih cepat dibandingkan sel lainnya, sedangkan sel dengan tegangan lebih rendah membutuhkan waktu pengisian lebih lama. Ketidakseimbangan tersebut dapat memengaruhi efisiensi pengisian, kestabilan tegangan, umur pakai baterai, serta meningkatkan risiko *overcharge* maupun *undercharge* pada sel tertentu (Chen et al., 2022).

Untuk mengatasi permasalahan tersebut diperlukan sistem balancing baterai yang mampu menyamakan tegangan antar sel. Metode balancing konvensional umumnya menggunakan pendekatan *passive balancing* dengan membuang energi pada sel yang memiliki tegangan lebih tinggi melalui resistor *discharge*. Namun metode tersebut memiliki beberapa keterbatasan, seperti terjadinya pembuangan energi yang berlebih, peningkatan suhu pada resistor balancing, serta proses balancing yang cenderung kurang efisien apabila dilakukan secara terus-menerus (Safari et al., 2025).

Beberapa penelitian terdahulu telah mengembangkan berbagai metode battery balancing, baik menggunakan pendekatan *passive balancing* maupun *active balancing* berbasis transfer energi antar sel. (Uğurluoğlu & Karaarslan, 2024) mengembangkan metode *active balancing* menggunakan isolated CUK converter dan switch matrix untuk mempercepat proses transfer energi antar sel baterai. Meskipun metode *active balancing* mampu meningkatkan efisiensi energi dibandingkan *passive balancing*, implementasinya umumnya memerlukan rangkaian konverter tambahan, algoritma kontrol yang lebih kompleks, serta biaya implementasi yang lebih tinggi. Di sisi lain, metode *passive balancing* memiliki struktur yang sederhana namun masih menghasilkan kehilangan energi yang cukup besar akibat proses pembuangan energi pada sel dengan tegangan lebih tinggi. Selain itu, sebagian besar penelitian balancing berfokus pada penyamaan tegangan atau SOC tanpa mempertimbangkan estimasi kebutuhan kapasitas tambahan yang diperlukan untuk mengembalikan kondisi keseimbangan antar sel secara lebih terukur. Oleh karena itu, masih diperlukan pengembangan metode balancing yang

memiliki kompleksitas rendah, efisien dalam penggunaan energi, serta mampu menentukan kebutuhan pengisian tambahan berdasarkan karakteristik tegangan baterai.

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini mengembangkan sistem balancing empat sel lithium-ion berbasis *selective charge balancing* yang dikombinasikan dengan *corrective pulse discharge balancing* serta estimasi kapasitas berbasis hubungan OCV–kapasitas menggunakan *polynomial regression*. Berbeda dengan metode *passive balancing* konvensional yang membuang energi secara terus-menerus pada sel dengan tegangan lebih tinggi, sistem yang diusulkan melakukan pengisian secara selektif pada sel dengan tegangan lebih rendah dan hanya mengaktifkan *corrective pulse discharge* pada kondisi tertentu. Pendekatan ini diharapkan mampu mengurangi kehilangan energi balancing sekaligus meningkatkan keseragaman tegangan antar sel dengan kompleksitas sistem yang relatif sederhana.

Sistem balancing yang diusulkan melakukan pengisian individual pada masing-masing sel baterai lithium-ion hingga mencapai tegangan balancing sebesar 4,0 V. Setelah proses charging selesai, baterai memasuki tahap *rest verification* selama 30 menit sebelum dilakukan evaluasi selisih tegangan antar sel untuk menentukan proses balancing lanjutan (Wang et al., 2024).

Hubungan antara SOC berbasis kapasitas muatan (*mAh*) terhadap OCV baterai lithium-ion bersifat nonlinier, sehingga pada penelitian ini digunakan metode *polynomial regression* untuk merepresentasikan karakteristik hubungan tersebut. *Polynomial regression* digunakan sebagai pendekatan *curve fitting* untuk membentuk hubungan OCV–kapasitas yang selanjutnya digunakan sebagai dasar estimasi kebutuhan kapasitas tambahan pada proses *selective recharge balancing* (Wang et al., 2024).

Selain *charge balancing* sebagai metode utama, penelitian ini juga menambahkan metode *corrective pulse discharge balancing* menggunakan pola pulsa 5 detik ON dan 5 detik OFF sebagai koreksi akhir apabila setelah proses *rest verification* masih terdapat selisih tegangan antar sel pada rentang tertentu. Metode *corrective pulse discharge balancing* hanya diaktifkan pada kondisi ketidakseimbangan tegangan menengah untuk mengurangi selisih tegangan antar sel tanpa menyebabkan pembuangan energi yang berlebihan (Chavan et al., 2025a). Sedangkan pada kondisi selisih tegangan yang lebih besar, sistem akan kembali melakukan *selective charge balancing* pada sel dengan tegangan lebih rendah hingga mendekati kondisi *balanced* (Khan et al., 2024).

Seiring dengan meningkatnya pemanfaatan energi terbarukan, estimasi kapasitas baterai yang akurat menjadi semakin penting. Hal ini disebabkan karena sistem penyimpanan energi berbasis baterai memiliki peran krusial dalam menjaga kontinuitas pasokan daya, meningkatkan keandalan sistem, serta mendukung manajemen energi pada berbagai instalasi energi terbarukan, seperti pembangkit listrik tenaga surya dan pembangkit listrik tenaga angin (Irawan et al., 2023) , (Irawan & Kinanti, 2023)

Tujuan dari penelitian ini adalah merancang dan mengimplementasikan sistem balancing empat sel lithium-ion yang mampu menyamakan tegangan antar sel hingga berada pada batas toleransi tertentu menggunakan pendekatan *selective charge balancing*, *corrective pulse discharge balancing*, serta *polynomial regression* berbasis karakteristik SOC–OCV baterai lithium-ion.

## Methods

### Perancangan Sistem Balancing

Sistem balancing dirancang sebagai modul balancing eksternal untuk empat sel baterai lithium-ion yang merepresentasikan konfigurasi empat sel. Sistem tidak dirancang sebagai Battery Management System (BMS) penuh, melainkan sebagai sistem balancing tegangan antar sel. Metode utama yang digunakan pada penelitian ini adalah *charge balancing* menggunakan modul TP5100 pada masing-masing sel baterai lithium-ion. Seluruh baterai akan melakukan proses charging hingga mencapai tegangan balancing sebesar 4.0 V. Pada proses ini sistem menggunakan relay sebagai pemutus jalur charging ketika baterai telah mencapai tegangan balancing yang ditentukan. Setelah seluruh baterai mencapai kondisi cut-off balancing, sistem akan memasuki tahap *rest verification* selama 30 menit untuk memperoleh kondisi tegangan baterai yang lebih stabil.

Setelah proses rest verification selesai dilakukan, sistem kembali membaca tegangan seluruh sel dan menghitung selisih tegangan maksimum antar sel menggunakan Persamaan:

$$\Delta V = V_{max} - V_{min}$$

dengan:

$\Delta V$  = selisih tegangan antarsel,

$V_{max}$  = tegangan sel tertinggi,

$V_{min}$  = tegangan sel terendah.

Apabila selisih tegangan berada pada rentang 0.04V hingga 0.08V maka sistem akan mengaktifkan metode *corrective pulse discharge balancing* sebagai koreksi tambahan terhadap sel dengan tegangan lebih tinggi. *Corrective discharge balancing* dilakukan menggunakan metode pulsa dengan pola 5 detik ON dan 5 detik OFF pada sel yang memiliki tegangan tertinggi. Sedangkan apabila selisih tegangan melebihi 0.08V maka sistem akan kembali melakukan *selective charge balancing* pada sel dengan tegangan lebih rendah hingga mendekati kondisi balanced.

## Desain Hardware Sistem

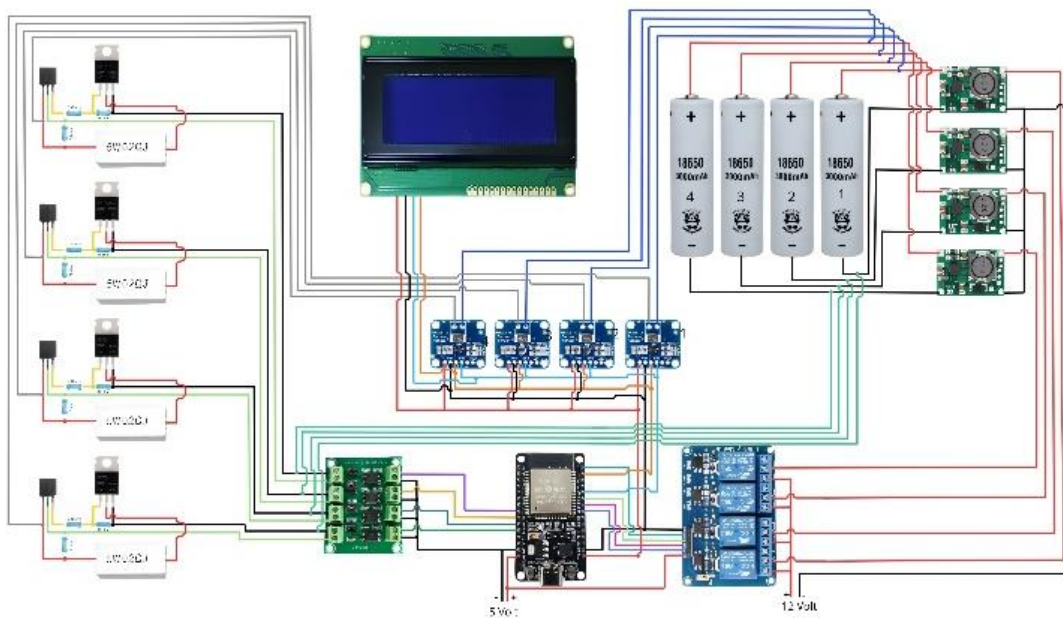
### Spesifikasi Baterai

**Tabel 1.** Spesifikasi Baterai Lithium-Ion

Parameter	Nilai
Jenis Baterai	Lithium-Ion 18650
Kapasitas Nominal	3000 mAh
Tegangan Nominal	3.7 V
Tegangan Maksimum	4.2 V
Arus Discharge Maksimum	10 A
Jumlah Sel	4 Sel

### Diagram Blok Sistem

Diagram blok sistem menunjukkan hubungan antar komponen utama yang digunakan pada penelitian. Sistem terdiri dari empat sel baterai lithium-ion, modul charging individual, mikrokontroler, sensor pembacaan tegangan, relay pemutus charging, serta rangkaian *corrective discharge balancing*.



**Gambar 1.** Diagram Blok Sistem Balancing Empat Sel Lithium-Ion

### Modul Charging

Sistem menggunakan empat modul TP5100 sebagai modul charging individual untuk masing-masing sel baterai lithium-ion. Penggunaan charging individual memungkinkan proses balancing dilakukan secara selektif pada setiap sel baterai. Sumber daya utama sistem charging menggunakan adaptor 12V 8A yang digunakan untuk menyuplai proses charging pada sistem balancing. Relay digunakan sebagai pemutus jalur charging ketika baterai telah mencapai tegangan balancing sebesar 4.0 V. Metode *selective charge* dipilih karena mampu mengurangi proses *discharge* berlebih dan mempertahankan energi yang telah tersimpan pada sel dengan tegangan lebih tinggi (Abadi, 2025).

**Tabel 2.** Spesifikasi TP5100

Parameter	Nilai
IC Charger	TP5100
Tegangan Input	5–18 V DC
Tegangan Output	4.2 V (1S) / 8.4 V (2S)
Arus Pengisian Maksimum	2 A
Metode Pengisian	CC-CV

### Mikrokontroler

Sistem menggunakan mikrokontroler ESP32 sebagai pusat pengendali sistem balancing. Mikrokontroler berfungsi untuk membaca tegangan masing-masing sel baterai, menghitung selisih tegangan antar sel, menentukan kondisi balancing, serta mengendalikan proses *charge balancing* dan *corrective pulse discharge balancing*. ESP32 dipilih karena memiliki kemampuan pemrosesan data yang baik, jumlah pin input/output yang memadai, serta mendukung proses monitoring dan pengendalian sistem balancing secara real-time.

### Pembacaan Tegangan dan Arus

Sistem menggunakan sensor INA219 untuk melakukan pembacaan tegangan dan arus baterai secara real-time. Data hasil pembacaan sensor digunakan oleh ESP32 untuk memantau kondisi tegangan masing-masing sel baterai selama proses charging dan balancing berlangsung. Sensor INA219 dipilih karena mampu melakukan monitoring tegangan dan arus secara digital dengan komunikasi I2C sehingga mempermudah proses integrasi dengan mikrokontroler ESP32. Data hasil pembacaan sensor kemudian digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan pada proses *charge balancing* dan *corrective pulse discharge balancing*. Sensor INA219 digunakan untuk memantau tegangan dan arus setiap sel baterai secara real-time selama proses charging dan balancing berlangsung. Sensor memiliki kemampuan pengukuran arus hingga  $\pm 3,2$  A dengan resolusi sekitar  $\pm 0,8$  mA sehingga cukup untuk memantau proses charging pada penelitian ini. Data hasil pembacaan sensor digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan pada proses *charge balancing*, *corrective pulse discharge balancing*, dan *selective recharge balancing*.

**Tabel 3.** Spesifikasi Sensor INA219

Parameter	Nilai
Sensor	INA219
Tegangan Kerja	3–5.5 V
Tegangan Pengukuran	0–26 V
Arus Maksimum	$\pm 3.2$ A
Resolusi Arus	$\pm 0.8$ mA
Resolusi ADC	12-bit
Interface Komunikasi	I2C
Resistor Shunt	0.1 $\Omega$ , 1%

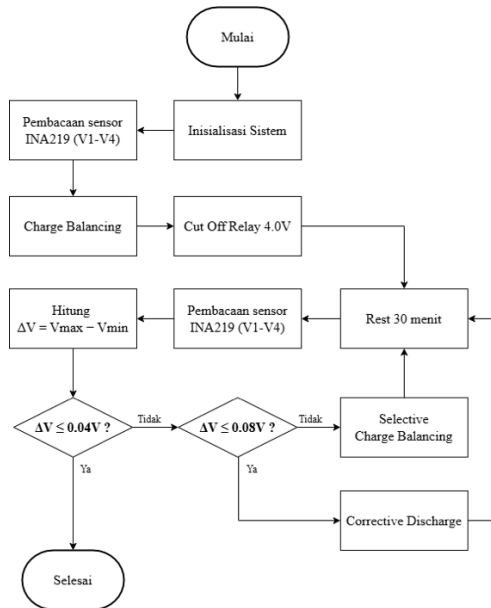
### Rangkaian Corrective Discharge

Rangkaian *corrective pulse discharge balancing* terdiri dari optocoupler, MOSFET IRLZ44N, resistor *discharge* 2.8  $\Omega$  5W, dan transistor C9012. Rangkaian ini digunakan sebagai metode koreksi tambahan apabila setelah proses *rest verification* masih terdapat selisih tegangan antar sel pada rentang tertentu. Metode *corrective discharge balancing* bekerja secara selektif hanya pada sel dengan tegangan lebih tinggi, sedangkan sel lain tetap berada pada kondisi isolasi menggunakan optocoupler. Pada penelitian ini metode *corrective pulse discharge balancing* diterapkan menggunakan pola pulsa 5 detik ON dan 5 detik OFF. Pola pulsa ini digunakan untuk mengurangi laju pelepasan energi yang terlalu cepat, menekan kenaikan suhu pada resistor *discharge*, serta memberikan waktu relaksasi tegangan baterai selama proses balancing berlangsung.

### Flowchart Sistem

Sistem dimulai dengan membaca tegangan seluruh sel baterai kemudian mengaktifkan proses *charge balancing* menggunakan modul TP5100 hingga seluruh sel mencapai tegangan balancing sebesar 4.0 V. Setelah proses charging selesai, relay akan memutuskan jalur charging dan baterai memasuki tahap *rest verification* selama 30 menit untuk memperoleh kondisi tegangan yang lebih stabil. Setelah proses *rest* selesai, sistem kembali membaca tegangan seluruh sel dan menghitung

selisih tegangan maksimum antarsel. Sistem dianggap berada pada kondisi *balanced* apabila selisih tegangan maksimum antarsel berada pada batas toleransi sistem. Apabila setelah proses *rest verification* selisih tegangan berada pada rentang 0.04 V hingga 0.08 V maka sistem akan mengaktifkan metode *corrective pulse discharge balancing* sebagai koreksi tambahan terhadap sel dengan tegangan lebih tinggi. Sedangkan apabila selisih tegangan melebihi 0.08V maka sistem akan kembali melakukan *selective charge balancing* pada sel dengan tegangan lebih rendah hingga mendekati kondisi *balanced*.



**Gambar 2.** Flowchart Sistem

### Pengambilan Data OCV dan Kapasitas Muatan

Pengambilan data dilakukan secara otomatis menggunakan sistem monitoring yang dirancang pada penelitian ini. Sistem melakukan pembacaan kapasitas muatan (*mAh*) dan tegangan baterai secara *real-time* selama proses charging berlangsung. Data hasil pembacaan sistem kemudian digunakan untuk membentuk hubungan antara kapasitas muatan terhadap *Open Circuit Voltage* (OCV) baterai lithium-ion. Setelah proses charging selesai pada setiap tahap pengujian, baterai didiamkan (*rest*) selama 30 menit untuk memperoleh nilai OCV yang lebih stabil dan representatif.

Data hasil pengujian kemudian digunakan sebagai dasar pembentukan model *polynomial regression*. Proses *rest* selama 30 menit dilakukan untuk mengurangi pengaruh *surface charge* dan *recovery voltage* sehingga nilai OCV yang diperoleh menjadi lebih stabil dan representatif terhadap kondisi aktual baterai lithium-ion (Wang et al., 2024). Pendekatan ini digunakan agar proses evaluasi kondisi balancing dilakukan pada kondisi tegangan baterai yang lebih mendekati karakteristik aktual sel baterai lithium-ion.

### Polynomial Regression

Metode *polynomial regression* digunakan untuk menganalisis hubungan antara kapasitas muatan (*mAh*) terhadap OCV baterai lithium-ion selama proses charging. Hubungan antara kapasitas muatan dan OCV baterai lithium-ion bersifat nonlinier sehingga digunakan pendekatan *polynomial* sebagai metode *curve fitting* (Gu et al., 2023).

Pendekatan *polynomial regression* digunakan untuk merepresentasikan karakteristik hubungan antara kapasitas muatan dan OCV baterai lithium-ion selama proses charging berlangsung. Model yang diperoleh selanjutnya digunakan sebagai dasar estimasi kebutuhan kapasitas tambahan pada proses

*selective recharge balancing*. Polynomial regression dipilih karena mampu merepresentasikan hubungan nonlinier antara kapasitas muatan dan OCV baterai lithium-ion dengan tingkat akurasi yang tinggi serta kompleksitas komputasi yang relatif rendah. Pendekatan ini banyak digunakan pada pemodelan karakteristik baterai berbasis data karena mampu menghasilkan representasi kurva OCV yang mendekati data aktual hasil pengujian (Karnehm & Neve, 2024).

Bentuk umum persamaan polynomial ditunjukkan pada Persamaan:

$$y = ax^2 + bx + c$$

dengan:

- $y$  = nilai OCV baterai,
- $x$  = kapasitas muatan ( $mAh$ ),
- $a, b, c$  = koefisien polynomial.

Pada penelitian ini, model *polynomial regression* tidak digunakan sebagai metode balancing utama, melainkan sebagai alat estimasi kapasitas tambahan yang diperlukan pada proses *selective recharge balancing*. Hasil estimasi tersebut digunakan untuk menentukan kebutuhan pengisian ulang pada sel dengan tegangan lebih rendah hingga mendekati tegangan referensi.

Evaluasi performa model polynomial regression dilakukan menggunakan koefisien determinasi ( $R^2$ ) dan *Root Mean Square Error* (RMSE). Nilai  $R^2$  digunakan untuk mengukur tingkat kesesuaian model terhadap data hasil pengujian, sedangkan RMSE digunakan untuk mengevaluasi besarnya kesalahan prediksi model terhadap data aktual. Hasil evaluasi model ditampilkan pada bagian hasil dan pembahasan.

## Parameter Balancing Sistem

### *Kriteria Balanced*

Sistem dianggap berada pada kondisi *balanced* apabila selisih tegangan maksimum antarsel memenuhi Persamaan:

$$\Delta V \leq 0.04 V$$

Nilai toleransi dipilih untuk mengakomodasi perubahan tegangan alami baterai setelah proses *rest* sehingga sistem balancing tidak bekerja secara berlebihan akibat fluktuasi tegangan kecil setelah proses relaksasi baterai lithium-ion (Theuerkauf & Swan, 2022).

### *Trigger Corrective Discharge*

Metode *corrective discharge balancing* akan aktif apabila setelah proses *rest verification* selisih tegangan antarsel berada pada rentang:

$$0.04 V \leq \Delta V \leq 0.08 V$$

Ketika kondisi tersebut terpenuhi, sistem akan mengaktifkan rangkaian *discharge* menggunakan pola pulsa 5 detik ON dan 5 detik OFF hingga selisih tegangan antar sel berada di bawah batas yang ditentukan atau mencapai kondisi *balanced*. Pendekatan ini digunakan agar metode *discharge* hanya bekerja pada kondisi ketidakseimbangan tegangan menengah sehingga dapat mengurangi selisih

tegangan tanpa menyebabkan pembuangan energi yang berlebihan. Sedangkan apabila selisih tegangan melebihi 0.08 V maka sistem akan kembali melakukan *selective charge balancing* pada sel dengan tegangan lebih rendah. Metode yang telah dirancang kemudian diuji untuk menganalisis performa sistem balancing dalam menurunkan selisih tegangan antar sel serta merepresentasikan hubungan kapasitas muatan terhadap OCV menggunakan metode *polynomial regression*.

## **Skenario Pengujian Sistem Balancing**

### *Skenario Pengujian Charge Balancing*

Pengujian *charge balancing* dilakukan dengan memberikan kondisi awal tegangan yang berbeda pada empat sel baterai lithium-ion. Sistem kemudian melakukan proses charging secara individual menggunakan modul TP5100 hingga seluruh sel mencapai tegangan balancing sebesar 4.0 V. Pengujian bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam mengurangi selisih tegangan antar sel melalui metode *selective charge balancing*.

### *Skenario Pengujian Rest Verification*

Setelah seluruh sel mencapai tegangan balancing sebesar 4.0 V, sistem memutus jalur charging menggunakan relay dan memasuki tahap *rest verification* selama 30 menit. Pengujian dilakukan untuk memperoleh kondisi tegangan yang lebih stabil sebelum dilakukan evaluasi akhir kondisi balancing.

### *Skenario Pengujian Corrective Pulse Discharge Balancing*

Pengujian *corrective pulse discharge balancing* dilakukan dengan sengaja menciptakan kondisi ketidakseimbangan tegangan antar sel. Pada skenario ini dua sel baterai dibiarkan memiliki tegangan lebih tinggi, sedangkan dua sel lainnya dipertahankan pada tegangan yang lebih rendah sehingga diperoleh selisih tegangan yang berada pada rentang aktivasi *corrective pulse discharge balancing*. Skenario ini dirancang untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam mendeteksi sel dengan tegangan lebih tinggi dan melakukan proses *pulse discharge* secara selektif hingga mencapai kondisi *balanced*.

Untuk mengevaluasi konsistensi kinerja sistem, skenario *corrective pulse discharge balancing* dilakukan sebanyak dua kali pengujian dengan kondisi awal ketidakseimbangan tegangan yang sama. Data yang dicatat meliputi tegangan setiap sel sebelum dan sesudah proses *discharge*, selisih tegangan maksimum antar sel, serta waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kondisi *balanced*.

### *Skenario Pengujian Selective Recharge Balancing*

Pengujian *selective recharge balancing* dilakukan dengan sengaja menciptakan kondisi ketidakseimbangan tegangan antar sel yang melebihi batas aktivasi *corrective discharge balancing*. Pada skenario ini Cell 1 digunakan sebagai sel referensi dengan tegangan tertinggi, sedangkan Cell 2, Cell 3, dan Cell 4 dipertahankan pada tegangan yang lebih rendah sehingga diperoleh selisih tegangan maksimum lebih dari 0,08 V.

Ketika kondisi tersebut terdeteksi, sistem tidak mengaktifkan *corrective pulse discharge balancing*, melainkan menjalankan *selective recharge balancing* pada sel dengan tegangan lebih rendah. Besarnya kapasitas tambahan yang diberikan pada masing-masing sel ditentukan berdasarkan hasil *polynomial regression* hubungan kapasitas muatan terhadap OCV yang telah diperoleh sebelumnya.

Proses *selective recharge balancing* dilakukan hingga tegangan Cell 2, Cell 3, dan Cell 4 mendekati tegangan referensi Cell 1. Setelah seluruh sel berada dalam rentang toleransi balancing yang ditentukan, proses pengisian dihentikan secara otomatis dan sistem dinyatakan berada pada kondisi *balanced*.

Skenario *selective recharge balancing* juga dilakukan sebanyak dua kali pengujian dengan kondisi awal yang sama untuk mengevaluasi konsistensi kinerja sistem. Data yang dicatat meliputi nilai Open Circuit Voltage (OCV), kapasitas tambahan hasil estimasi polynomial regression, tegangan akhir setiap sel, serta waktu balancing yang diperlukan hingga seluruh sel berada pada rentang toleransi yang ditentukan.

## Hasil dan Pembahasan

### Validasi Akurasi Sensor INA219

Sebelum digunakan pada proses pengujian sistem balancing, sensor INA219 terlebih dahulu divalidasi untuk mengetahui tingkat akurasi pengukuran tegangan dan arus. Proses validasi dilakukan dengan membandingkan hasil pembacaan sensor INA219 terhadap alat ukur referensi berupa multimeter digital pada beberapa kondisi pengukuran. Pengujian dilakukan pada rentang tegangan kerja baterai lithium-ion yang digunakan pada penelitian ini. Nilai tegangan yang dibaca oleh sensor INA219 kemudian dibandingkan dengan hasil pengukuran multimeter digital sebagai nilai referensi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sensor INA219 mampu melakukan pengukuran tegangan dengan tingkat kesalahan yang relatif kecil sehingga masih berada dalam batas yang dapat diterima untuk aplikasi monitoring baterai lithium-ion.

**Tabel 4.** Hasil Validasi Sensor INA219

Parameter	Sensor	Alat Referensi	Error (%)
Tegangan	INA219	Multimeter Digital	0,5
Arus	INA219	Multimeter Digital	0,8

Berdasarkan hasil validasi, sensor INA219 memiliki tingkat kesalahan pengukuran kurang dari 1%, sehingga sensor dinilai cukup akurat untuk digunakan dalam proses monitoring tegangan dan arus pada sistem balancing baterai lithium-ion. Data hasil pembacaan sensor selanjutnya digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan pada proses *charge balancing*, *corrective pulse discharge balancing*, dan *selective recharge balancing*.

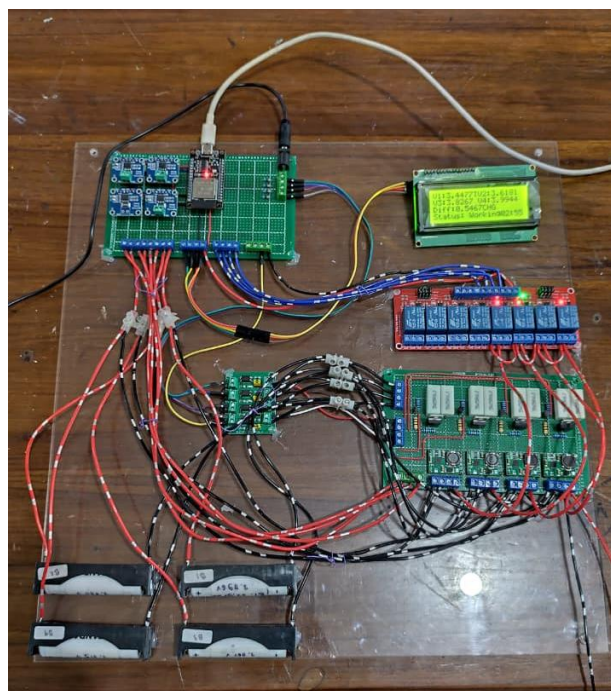
### Implementasi Hardware Sistem

Implementasi hardware sistem balancing dilakukan menggunakan empat sel baterai lithium-ion dengan metode *selective charge balancing* sebagai metode utama dan *corrective pulse discharge balancing* sebagai metode koreksi tambahan. Sistem menggunakan mikrokontroler ESP32 sebagai pusat pengendali sistem balancing. Proses *charge balancing* dilakukan menggunakan empat modul TP5100 yang bekerja secara individual pada masing-masing sel baterai lithium-ion. Sumber daya utama sistem charging menggunakan adaptor 12V 8A, sedangkan relay digunakan sebagai pemutus jalur charging ketika baterai telah mencapai tegangan balancing sebesar 4.0 V. Pada metode *corrective pulse discharge balancing* digunakan rangkaian optocoupler, MOSFET IRLZ44N, resistor *discharge* 2.8  $\Omega$  5W, dan transistor C9012 untuk melakukan proses *discharge* selektif pada sel dengan tegangan lebih tinggi setelah proses *rest verification* selesai dilakukan.

Tabel berikut menunjukkan komponen utama yang digunakan pada sistem balancing.

**Tabel 5.** Daftar Komponen Hardware

<b>Komponen</b>	<b>Jumlah</b>	<b>Fungsi</b>
ESP32	1	Pengendali sistem balancing
TP5100	4	Modul charging individual
Relay	4	Pemutus jalur charging
Optocoupler	4	Isolasi discharge balancing
IRLZ44N	4	Switching discharge balancing
Resistor 2.8Ω 5W	4	Beban discharge balancing
Transistor C9012	4	Driver rangkaian discharge
Adaptor 12V 8A	1	Sumber daya sistem



**Gambar 3.** Implementasi Hardware Sistem

### **Hasil Polynomial Regression Kapasitas Muatan terhadap OCV**

Pengujian dilakukan untuk menganalisis hubungan antara kapasitas muatan (*mAh*) terhadap *Open Circuit Voltage* (OCV) baterai lithium-ion selama proses charging berlangsung. Data diperoleh secara otomatis menggunakan sistem monitoring berbasis ESP32 yang dirancang pada penelitian ini sehingga proses pengambilan data dilakukan secara *real-time* selama charging berlangsung. Setelah proses charging selesai, baterai memasuki tahap *rest verification* selama 30 menit untuk memperoleh kondisi tegangan yang lebih stabil sebelum data OCV dicatat oleh sistem. Pendekatan ini dilakukan untuk mengurangi pengaruh *surface charge* dan *recovery voltage* sehingga nilai OCV yang diperoleh lebih representatif terhadap kondisi aktual baterai lithium-ion. Hubungan antara kapasitas muatan terhadap

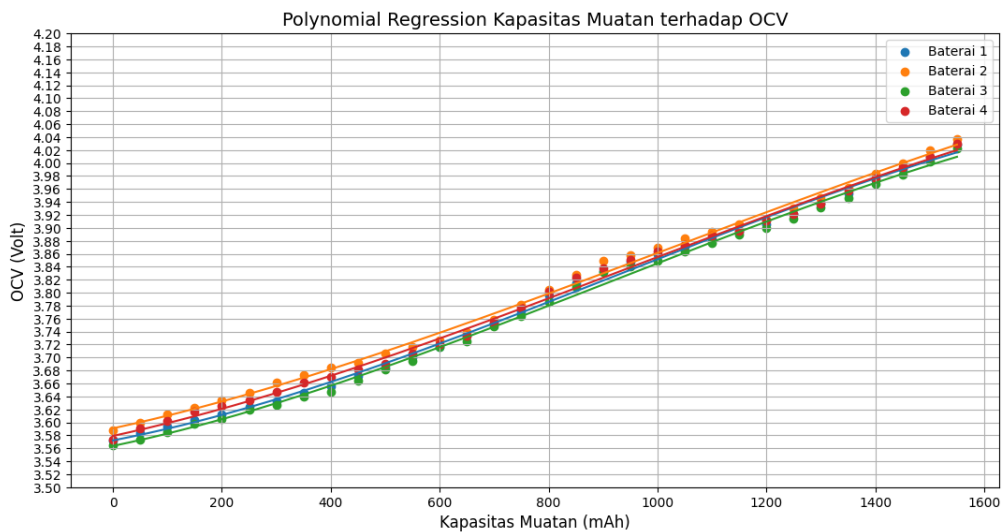
OCV direpresentasikan menggunakan metode *polynomial regression* karena karakteristik tegangan baterai lithium-ion bersifat nonlinier.

Bentuk umum persamaan polynomial ditunjukkan pada Persamaan:

$$y = ax^2 + bx + c$$

dengan:

- $y$  = nilai OCV baterai,
- $x$  = kapasitas muatan (*mAh*),
- $a, b, c$  = koefisien polynomial.



**Gambar 4.** Hasil Polynomial Regression Kapasitas Muatan terhadap OCV

Berdasarkan hasil pengujian pada grafik polynomial regression, seluruh sel baterai menunjukkan pola kenaikan tegangan yang relatif serupa terhadap peningkatan kapasitas muatan. Nilai OCV meningkat secara bertahap mulai dari sekitar 3.56 V hingga mendekati 4.02 V seiring bertambahnya kapasitas muatan baterai. Kurva polynomial yang terbentuk menunjukkan karakteristik nonlinier baterai lithium-ion, terutama pada kondisi mendekati tegangan akhir charging. Pada kondisi kapasitas rendah hingga menengah, kenaikan tegangan cenderung berlangsung lebih lambat dan stabil. Sedangkan pada kondisi mendekati kapasitas penuh, kenaikan tegangan terlihat lebih cepat hingga mendekati tegangan balancing sistem. Hasil pengujian juga menunjukkan bahwa masing-masing sel baterai memiliki karakteristik OCV yang relatif berdekatan, namun tetap terdapat sedikit perbedaan tegangan antar sel. Perbedaan kecil tersebut menjadi salah satu faktor penyebab munculnya kondisi *cell imbalance* pada sistem baterai multi-sel lithium-ion.

Untuk mengevaluasi tingkat kesesuaian model polynomial regression terhadap data hasil pengujian, dilakukan perhitungan koefisien determinasi ( $R^2$ ) dan Root Mean Square Error (RMSE). Hasil evaluasi model ditunjukkan pada Tabel 6.

**Tabel 6.** Hasil Evaluasi Polynomial Regression

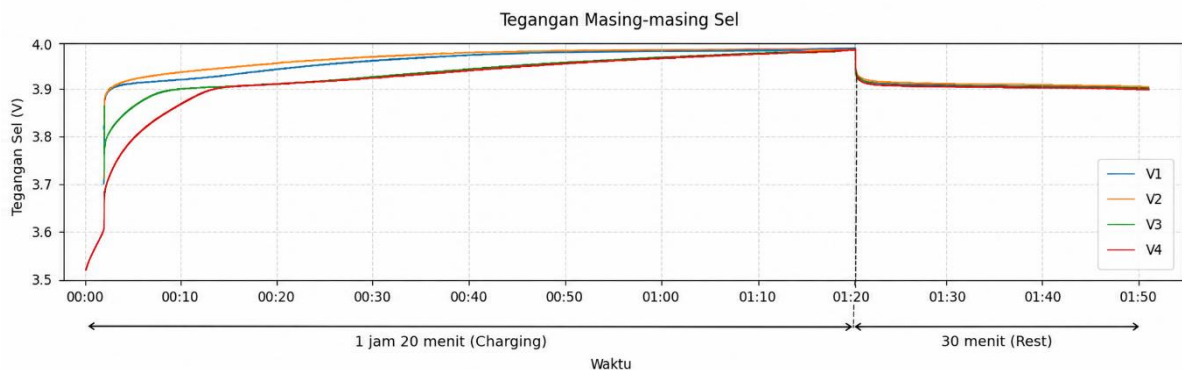
Baterai	Persamaan Polynomial	R <sup>2</sup>	RMSE (V)
Baterai 1	$y = 2.799 \times 10^{-8}x^2 + 2.579 \times 10^{-4}x + 3.5608$	0.9961	0.0087
Baterai 2	$y = 3.109 \times 10^{-8}x^2 + 2.435 \times 10^{-4}x + 3.5836$	0.9961	0.0085
Baterai 3	$y = 2.479 \times 10^{-8}x^2 + 2.629 \times 10^{-4}x + 3.5531$	0.9962	0.0085
Baterai 4	$y = 2.688 \times 10^{-8}x^2 + 2.537 \times 10^{-4}x + 3.5706$	0.9961	0.0085

Untuk mengevaluasi kemampuan model polynomial regression dalam merepresentasikan hubungan antara kapasitas muatan dan OCV baterai lithium-ion, dilakukan perhitungan koefisien determinasi (R<sup>2</sup>) dan Root Mean Square Error (RMSE). Hasil evaluasi menunjukkan bahwa seluruh model polynomial memiliki nilai R<sup>2</sup> di atas 0,996, yang mengindikasikan bahwa model mampu menjelaskan lebih dari 99,6% variasi data OCV terhadap kapasitas muatan. Selain itu, nilai RMSE yang berada pada rentang 0,0085–0,0087 V menunjukkan bahwa kesalahan prediksi model relatif kecil dibandingkan rentang tegangan pengukuran baterai. Hasil ini menunjukkan bahwa polynomial regression orde dua yang digunakan mampu merepresentasikan karakteristik nonlinier hubungan kapasitas muatan terhadap OCV dengan tingkat akurasi yang tinggi sehingga dapat digunakan sebagai dasar estimasi kebutuhan kapasitas tambahan pada proses *selective recharge balancing*.

Hasil polynomial regression ini memberikan dasar yang lebih terukur dalam proses pengambilan keputusan *selective recharge balancing*. Dengan tingkat akurasi model yang tinggi, estimasi kapasitas yang diperoleh dapat membantu menentukan kebutuhan pengisian tambahan pada sel dengan tegangan lebih rendah sehingga proses balancing dapat dilakukan secara lebih efektif dan efisien.

### Hasil Charge Balancing

Pengujian *charge balancing* dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam menyamakan tegangan antar sel menggunakan metode *selective charge balancing*. Pada proses ini seluruh baterai melakukan charging secara individual menggunakan modul TP5100 hingga mencapai tegangan balancing sebesar 4.0 V. Ketika tegangan baterai telah mencapai batas balancing, relay akan memutuskan jalur charging secara otomatis. Metode *charge balancing* digunakan sebagai metode utama balancing karena mampu mempertahankan energi pada sel dengan tegangan lebih tinggi tanpa melakukan proses *discharge* secara berlebihan.



**Gambar 5.** Hasil Charge Balancing

Berdasarkan Gambar 5. seluruh sel baterai mengalami kenaikan tegangan secara bertahap hingga mendekati tegangan balancing sebesar 4.0 V. Sel dengan tegangan awal lebih tinggi mencapai kondisi cut-off lebih dahulu dibandingkan sel lainnya sehingga proses *charge balancing* berlangsung secara selektif. Setelah seluruh sel mencapai tegangan balancing, relay memutuskan jalur charging dan sistem memasuki tahap *rest verification* selama 30 menit.

**Tabel 7.** Hasil Tegangan Cut-off Charge Balancing

Sel	Tegangan Awal (V)	Tegangan Cut-off (V)
Cell 1	3.850	4.000
Cell 2	3.820	4.000
Cell 3	3.720	4.000
Cell 4	3.540	4.000

Hasil *charge balancing* menunjukkan seluruh sel berhasil mencapai tegangan cut-off 4,0 V secara individual. Hasil ini sejalan dengan penelitian (Khan et al., 2024) yang menyatakan bahwa metode balancing berbasis *selective charge* mampu meningkatkan keseragaman tegangan antar sel tanpa menyebabkan kehilangan energi sebesar metode *passive balancing* konvensional.

Berdasarkan Tabel 7, seluruh sel baterai berhasil mencapai tegangan cut-off sebesar 4,0 V sesuai dengan target *charge balancing* yang telah ditentukan. Meskipun kondisi tegangan awal setiap sel berbeda, sistem mampu melakukan proses charging secara individual hingga seluruh sel mencapai batas tegangan yang sama. Hasil ini menunjukkan bahwa mekanisme *selective charge balancing* dan pengendalian relay yang diterapkan pada sistem dapat bekerja sesuai dengan perancangan. Setelah seluruh sel mencapai tegangan cut-off, proses charging dihentikan secara otomatis dan sistem memasuki tahap *rest verification* untuk mengevaluasi kondisi tegangan setelah proses relaksasi baterai.

### Hasil Rest Verification

Setelah proses *charge balancing* selesai dilakukan, seluruh baterai memasuki tahap *rest verification* selama 30 menit untuk memperoleh kondisi tegangan yang lebih stabil. Tahapan ini dilakukan untuk mengurangi pengaruh *surface charge* yang masih tersisa setelah proses charging selesai. Pada kondisi ini tegangan baterai mengalami sedikit penurunan akibat proses stabilisasi internal baterai lithium-ion. Selisih tegangan antar sel setelah proses *rest verification* digunakan sebagai parameter utama untuk menentukan proses balancing lanjutan pada sistem.

Sistem dianggap berada pada kondisi *balanced* apabila memenuhi Persamaan:

$$\Delta V \leq 0.04 V$$

**Tabel 8.** Hasil Rest Verification

Sel	Tegangan Cut-off (V)	Tegangan Setelah Rest (V)
Cell 1	3.998	3.910
Cell 2	3.997	3.905
Cell 3	3.996	3.903
Cell 4	3.994	3.900

**Tabel 9.** Evaluasi Rest Verification

Parameter	Nilai
Tegangan Tertinggi	3.910 V
Tegangan Terendah	3.900 V
Selisih Tegangan ( $\Delta V$ )	0.010 V
Batas Balanced	0.040 V
Status Sistem	Balanced

Tahap *rest verification* ditunjukkan pada bagian akhir Gambar 5 setelah proses charging dihentikan. Selama periode rest selama 30 menit, seluruh sel mengalami penurunan tegangan akibat proses *surface charge relaxation* sehingga diperoleh kondisi tegangan yang lebih stabil. Berdasarkan Tabel 8, tegangan tertinggi setelah *rest verification* tercatat sebesar 3,910 V pada Cell 1, sedangkan tegangan terendah sebesar 3,900 V pada Cell 4. Selisih tegangan maksimum antar sel setelah proses *rest verification* adalah 0,010 V. Nilai tersebut masih berada di bawah batas toleransi balancing sebesar 0,040 V sehingga sistem dinyatakan berada pada kondisi balanced. Hasil ini menunjukkan bahwa proses *selective charge balancing* yang diterapkan mampu menghasilkan keseragaman tegangan antar sel setelah proses stabilisasi tegangan baterai. Penurunan tegangan setelah proses *rest verification* juga sesuai dengan karakteristik relaksasi OCV yang dilaporkan oleh (Theuerkauf & Swan, 2022), dimana tegangan baterai lithium-ion mengalami penurunan sesaat setelah proses charging dihentikan sebelum mencapai kondisi stabil.

Berdasarkan Tabel 8, tegangan tertinggi setelah *rest verification* tercatat sebesar 3,910 V pada Cell 1, sedangkan tegangan terendah sebesar 3,900 V pada Cell 4. Selisih tegangan maksimum antar sel setelah proses *rest verification* adalah 0,010 V. Nilai tersebut berada jauh di bawah batas toleransi balancing sebesar 0,040 V sehingga sistem dinyatakan berada pada kondisi balanced dan tidak menunjukkan adanya ketidakseimbangan tegangan yang signifikan antar sel baterai.

### Hasil Corrective Discharge Balancing

Metode *corrective pulse discharge balancing* digunakan sebagai metode koreksi tambahan apabila setelah proses *rest verification* masih terdapat selisih tegangan antar sel pada rentang tertentu. Pada penelitian ini *corrective discharge balancing* dilakukan menggunakan pola pulsa 5 detik ON dan 5 detik OFF pada sel dengan tegangan tertinggi. Pola pulsa tersebut memungkinkan proses pengurangan

tegangan berlangsung secara bertahap sehingga mengurangi risiko pelepasan energi berlebih dan kenaikan suhu pada resistor *discharge*.

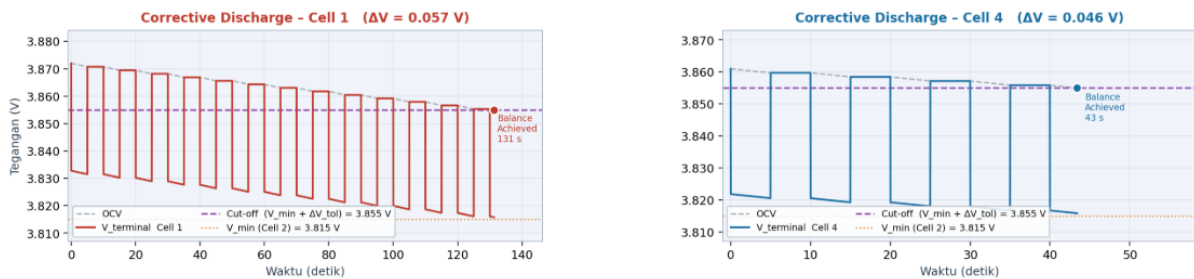
Metode *discharge balancing* diaktifkan apabila memenuhi Persamaan:

$$0.04 V \leq \Delta V \leq 0.08 V$$

Pada kondisi ini sistem akan menentukan sel dengan tegangan lebih tinggi kemudian mengaktifkan rangkaian *discharge balancing* hanya pada sel tersebut. Sel lain tetap berada pada kondisi isolasi menggunakan optocoupler sehingga proses *discharge* dilakukan secara selektif. Metode *corrective discharge balancing* digunakan hanya pada kondisi ketidakseimbangan tegangan menengah untuk mengurangi selisih tegangan tanpa menyebabkan pembuangan energi yang berlebihan.

Pengujian *corrective pulse discharge balancing* dilakukan pada dua skenario ketidakseimbangan tegangan yang berada pada rentang aktivasi sistem, yaitu  $0,04 V \leq \Delta V \leq 0,08 V$ . Pada masing-masing skenario, sistem melakukan proses *discharge* secara selektif pada sel yang memiliki tegangan lebih tinggi menggunakan pola pulsa 5 detik ON dan 5 detik OFF hingga mencapai kondisi balanced.

### Skenario Pengujian 1



Gambar 6. Corrective Pulse Discharge Balancing Skenario 1

Tabel 10. Hasil Skenario 1

Sel	$\Delta V$ Awal (V)	Waktu Balancing (s)	Status
Cell 1	0,057	131	Balanced
Cell 4	0,046	43	Balanced

Berdasarkan Gambar 6 dan Tabel 10, sistem berhasil mengurangi ketidakseimbangan tegangan pada Cell 1 dan Cell 4 hingga mencapai kondisi balanced. Cell 1 memerlukan waktu balancing lebih lama dibandingkan Cell 4 karena memiliki selisih tegangan awal yang lebih besar. Hal ini menunjukkan bahwa durasi *corrective pulse discharge* dipengaruhi oleh besar ketidakseimbangan tegangan yang harus dikoreksi.

### Skenario Pengujian 2



Gambar 7. Corrective Pulse Discharge Balancing Skenario 2

**Tabel 11.** Hasil Skenario 2

Sel	$\Delta V$ Awal (V)	Waktu Balancing (s)	Status
Cell 1	0,044	31	Balanced
Cell 3	0,058	140	Balanced

Berdasarkan Gambar 7 dan Tabel 11, proses *corrective pulse discharge balancing* kembali berhasil mencapai kondisi balanced. Cell 3 memerlukan waktu balancing paling lama sebesar 140 detik karena memiliki selisih tegangan awal terbesar pada skenario pengujian kedua. Sebaliknya, Cell 1 dengan selisih tegangan awal sebesar 0,044 V hanya memerlukan waktu balancing selama 31 detik untuk mencapai kondisi balanced.

**Tabel 12.** Rekapitulasi Corrective Pulse Discharge Balancing

Skenario	Sel	$\Delta V$ Awal (V)	Waktu Balancing (s)	Status
1	Cell 1	0,057	131	Balanced
1	Cell 4	0,046	43	Balanced
2	Cell 1	0,044	31	Balanced
2	Cell 3	0,058	140	Balanced

**Tabel 13.** Evaluasi Efektivitas Corrective Pulse Discharge Balancing

Sel	$\Delta V$ Awal (V)	$\Delta V$ Akhir (V)	Error (%)	Efektivitas (%)
Cell 1 (Skenario 1)	0,057	0,003	5,26	94,74
Cell 4 (Skenario 1)	0,046	0,002	4,35	95,65
Cell 1 (Skenario 2)	0,044	0,002	4,55	95,45
Cell 3 (Skenario 2)	0,058	0,003	5,17	94,83

Berdasarkan Tabel 13, metode *corrective pulse discharge balancing* menghasilkan efektivitas pengurangan ketidakseimbangan tegangan sebesar 94,74% hingga 95,65%. Nilai error akhir berada di bawah 5,3% terhadap kondisi ketidakseimbangan awal. Hasil tersebut menunjukkan bahwa metode *corrective pulse discharge balancing* mampu mengurangi ketidakseimbangan tegangan secara efektif dan konsisten hingga mencapai kondisi balanced. Berdasarkan hasil kedua skenario, seluruh sel yang memenuhi rentang aktivasi *corrective pulse discharge balancing* berhasil mencapai kondisi balanced. Waktu balancing berkorelasi dengan besar selisih tegangan awal yang harus dikoreksi. Semakin besar nilai  $\Delta V$  awal, semakin lama waktu yang diperlukan untuk mencapai kondisi balanced. Hasil ini menunjukkan bahwa metode *corrective pulse discharge balancing* mampu bekerja secara konsisten dalam mengurangi ketidakseimbangan tegangan menengah tanpa memerlukan proses *recharge* tambahan.

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian (Chavan et al., 2025) yang menunjukkan bahwa metode *pulse balancing* mampu mengurangi ketidakseimbangan tegangan secara bertahap dibandingkan metode *discharge* kontinu. Namun, pada penelitian ini proses *discharge* dilakukan secara selektif hanya pada sel yang memiliki tegangan tertinggi menggunakan mekanisme isolasi optocoupler sehingga energi yang dibuang dapat diminimalkan. Pendekatan ini memungkinkan proses balancing berlangsung lebih terkontrol dengan kompleksitas sistem yang relatif rendah dibandingkan metode active balancing berbasis transfer energi antar sel.

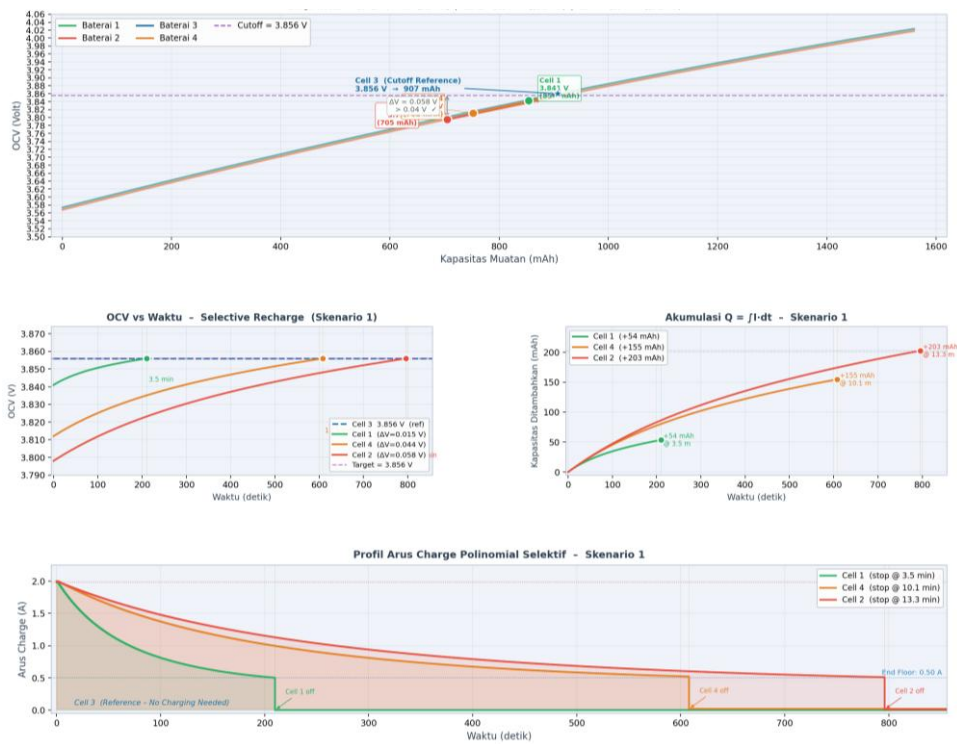
### Selective Recharge Balancing

Metode *selective recharge balancing* diaktifkan ketika selisih tegangan maksimum antar sel melebihi batas aktivasi sebesar 0,08 V. Pada kondisi ini sistem tidak melakukan *corrective discharge*

*balancing*, melainkan melakukan pengisian ulang secara selektif pada sel yang memiliki tegangan lebih rendah hingga mencapai tegangan referensi yang ditentukan. Besarnya kapasitas tambahan yang diberikan pada setiap sel ditentukan menggunakan model polynomial regression hubungan kapasitas muatan terhadap Open Circuit Voltage (OCV) yang telah diperoleh sebelumnya. Model ini digunakan untuk mengestimasi kebutuhan kapasitas tambahan sehingga proses *recharge* dapat dilakukan secara lebih terukur sesuai kondisi masing-masing sel.

*Skenario Pengujian 1*

Pada skenario pertama, Cell 3 memiliki tegangan tertinggi sebesar 3,856 V dan digunakan sebagai sel referensi. Cell 1, Cell 2, dan Cell 4 memiliki tegangan yang lebih rendah sehingga memerlukan proses *selective recharge balancing*.



**Gambar 8.** Hasil Selective Recharge Balancing Skenario 1

**Tabel 14.** Hasil Selective Recharge Balancing Skenario 1

Sel	Tegangan Awal (V)	$\Delta V$ terhadap Referensi (V)	Tambahan Kapasitas (mAh)	Waktu Recharge (menit)	Status
Cell 3	3,856	0,000	0	0	Referensi
Cell 1	3,841	0,015	54	3,5	Recharge
Cell 4	3,812	0,044	155	10,1	Recharge
Cell 2	3,798	0,058	203	13,3	Recharge

Berdasarkan Gambar 8 dan Tabel 14, sistem berhasil menentukan kebutuhan kapasitas tambahan untuk setiap sel berdasarkan selisih tegangan terhadap tegangan referensi. Cell 1 yang memiliki selisih

tegangan terkecil hanya memerlukan tambahan kapasitas sebesar 54 mAh, sedangkan Cell 2 yang memiliki selisih tegangan terbesar memerlukan tambahan kapasitas sebesar 203 mAh. Setelah masing-masing sel mencapai tegangan target sebesar 3,856 V, sistem secara otomatis menghentikan proses charging sehingga tidak terjadi *overcharge*.

### Skenario Pengujian 2

Pada skenario kedua, Cell 1 memiliki tegangan tertinggi sebesar 3,873 V dan digunakan sebagai sel referensi. Cell 2, Cell 3, dan Cell 4 memiliki tegangan lebih rendah sehingga memerlukan proses *recharge balancing*.



Gambar 9. Hasil Selective Recharge Balancing Skenario 2

Tabel 15. Hasil Selective Recharge Balancing Skenario 2

Sel	Tegangan Awal (V)	$\Delta V$ terhadap Referensi (V)	Tambahan Kapasitas (mAh)	Waktu Recharge (menit)	Status
Cell 1	3,873	0,000	0	0	Referensi
Cell 2	3,769	0,104	361	23,7	Recharge
Cell 3	3,785	0,088	308	20,2	Recharge
Cell 4	3,787	0,086	301	19,8	Recharge

Berdasarkan Gambar 9 dan Tabel 15, sistem kembali berhasil melakukan *recharge balancing* sesuai kebutuhan masing-masing sel. Cell 2 yang memiliki selisih tegangan terbesar memerlukan tambahan kapasitas sebesar 361 mAh dan waktu *recharge* selama 23,7 menit, sedangkan Cell 4 memerlukan tambahan kapasitas sebesar 301 mAh dengan waktu *recharge* selama 19,8 menit.

**Tabel 16.** Rekapitulasi Selective Recharge Balancing

Skenario	Sel Referensi	$\Delta V$ Maksimum (V)	Kapasitas Tambahan Maksimum (mAh)	Waktu Recharge Maksimum (menit)	Status
1	Cell 3	0,058	203	13,3	Balanced
2	Cell 1	0,104	361	23,7	Balanced

Hasil kedua skenario, metode *selective recharge balancing* berhasil mengembalikan kondisi tegangan seluruh sel hingga mendekati tegangan referensi yang ditentukan. Semakin besar selisih tegangan awal terhadap sel referensi, semakin besar kapasitas tambahan dan waktu *recharge* yang diperlukan untuk mencapai kondisi balanced (Pillai et al., 2024).

### Analisis Sistem Balancing

Berdasarkan hasil pengujian, sistem balancing yang dirancang mampu menurunkan selisih tegangan antarsel baterai lithium-ion hingga mendekati batas toleransi balancing yang telah ditentukan. Metode *selective charging balancing* menjadi metode utama balancing karena mampu mempertahankan energi pada masing-masing sel tanpa melakukan discharge secara terus-menerus. Sedangkan metode *corrective pulse discharge balancing* hanya digunakan sebagai koreksi tambahan setelah proses *rest verification* selesai dilakukan.

Penggunaan tahap *rest verification* selama 30 menit juga membantu memperoleh kondisi tegangan yang lebih stabil sebelum dilakukan evaluasi akhir balancing. Selain itu, metode *polynomial regression* berhasil merepresentasikan hubungan kapasitas muatan terhadap OCV baterai lithium-ion dengan karakteristik kurva nonlinier yang sesuai dengan perilaku tegangan baterai selama proses charging berlangsung. Secara keseluruhan sistem balancing yang dirancang mampu bekerja secara otomatis dalam melakukan proses charging, evaluasi tegangan, *corrective discharge balancing*, dan *selective recharge balancing* berdasarkan kondisi selisih tegangan antarsel baterai lithium-ion.

### Evaluasi Polynomial Regression

Model polynomial regression digunakan untuk mengestimasi hubungan kapasitas muatan terhadap OCV baterai lithium-ion selama proses charging. Berdasarkan hasil estimasi, kebutuhan kapasitas tambahan yang dihitung menggunakan model polynomial mampu menghasilkan proses *recharge* yang sesuai dengan kondisi aktual setiap sel.

**Tabel 17.** Evaluasi Model Polynomial Regression

Parameter	Nilai
Orde Polynomial	2
R <sup>2</sup>	0,996
RMSE	0,008 V

Nilai koefisien determinasi (R<sup>2</sup>) sebesar 0,996 menunjukkan bahwa model polynomial regression mampu merepresentasikan hubungan kapasitas muatan terhadap OCV dengan tingkat kesesuaian yang sangat tinggi. Selain itu, nilai RMSE sebesar 0,008 V menunjukkan bahwa kesalahan prediksi model relatif kecil sehingga model dapat digunakan sebagai dasar estimasi kebutuhan kapasitas tambahan pada proses *selective recharge balancing*.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa metode *selective recharge balancing* berbasis polynomial regression mampu menentukan kebutuhan kapasitas tambahan secara adaptif sesuai kondisi masing-masing sel. Dibandingkan metode balancing konvensional yang melakukan pengisian secara serentak,

pendekatan ini memungkinkan proses balancing berlangsung lebih efisien karena hanya sel yang memerlukan tambahan energi yang akan diisi ulang. Selain itu, hasil ini sejalan dengan penelitian (Wang et al., 2024) yang menunjukkan bahwa hubungan OCV dan kapasitas dapat dimanfaatkan untuk membantu estimasi kondisi baterai selama proses balancing dan pengisian.

Selain mampu mengurangi ketidakseimbangan tegangan antar sel, pendekatan yang diusulkan juga memberikan kemampuan estimasi kebutuhan kapasitas tambahan berdasarkan hubungan OCV–kapasitas menggunakan *polynomial regression*. Hasil ini berbeda dengan penelitian Khan et al. (2024) yang berfokus pada *selective charge balancing* untuk menyamakan tegangan antar sel tanpa mempertimbangkan estimasi kebutuhan kapasitas pengisian. Dibandingkan penelitian Chavan et al. (2025) yang menggunakan metode *pulse discharge balancing* untuk mengurangi tegangan sel yang lebih tinggi, penelitian ini mengombinasikan *corrective pulse discharge balancing* dengan *selective recharge balancing* sehingga proses koreksi dapat disesuaikan dengan tingkat ketidakseimbangan tegangan yang terjadi. Selain itu, hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu menghasilkan selisih tegangan akhir sebesar 0,010 V setelah proses *rest verification*, efektivitas *corrective discharge balancing* sebesar 94,74%–95,65%, serta estimasi kapasitas tambahan hingga 361 mAh menggunakan model *polynomial regression* dengan nilai  $R^2$  sebesar 0,996. Hasil tersebut menunjukkan bahwa metode yang diusulkan tidak hanya mampu melakukan balancing tegangan, tetapi juga menyediakan dasar estimasi kapasitas yang dapat digunakan untuk menentukan kebutuhan *recharge* secara lebih terukur.

### **Analisis Konsistensi Kinerja Sistem**

Untuk mengevaluasi konsistensi kinerja sistem balancing yang dikembangkan, pengujian *corrective pulse discharge balancing* dan *selective recharge balancing* dilakukan masing-masing sebanyak dua skenario dengan kondisi awal ketidakseimbangan tegangan yang berbeda. Hasil pengujian menunjukkan bahwa seluruh skenario berhasil mencapai kondisi balanced sesuai kriteria yang telah ditentukan.

Pada pengujian *corrective pulse discharge balancing*, seluruh sel yang memenuhi rentang aktivasi sistem berhasil mengalami penurunan selisih tegangan dengan efektivitas sebesar 94,74% hingga 95,65%. Waktu balancing yang diperoleh menunjukkan kecenderungan yang konsisten, yaitu semakin besar nilai selisih tegangan awal maka semakin lama waktu yang dibutuhkan untuk mencapai kondisi balanced.

Pada pengujian *selective recharge balancing*, kebutuhan kapasitas tambahan dan waktu *recharge* juga menunjukkan hubungan yang konsisten terhadap besar selisih tegangan awal. Skenario dengan selisih tegangan maksimum sebesar 0,104 V memerlukan kapasitas tambahan maksimum sebesar 361 mAh dan waktu *recharge* selama 23,7 menit, sedangkan skenario dengan selisih tegangan maksimum sebesar 0,058 V hanya memerlukan kapasitas tambahan maksimum sebesar 203 mAh dan waktu *recharge* selama 13,3 menit.

Hasil kedua metode balancing menunjukkan pola respon yang serupa pada setiap skenario pengujian sehingga dapat disimpulkan bahwa sistem memiliki performa yang konsisten dalam mendeteksi ketidakseimbangan tegangan, menentukan metode balancing yang sesuai, serta mengembalikan kondisi tegangan antar sel hingga berada pada rentang toleransi yang telah ditetapkan.

### **Analisis Sistem Balancing**

Berdasarkan hasil pengujian, sistem balancing yang dirancang mampu menurunkan selisih tegangan antar sel baterai lithium-ion hingga mendekati batas toleransi balancing yang telah ditentukan.

Metode *selective charge balancing* menjadi metode utama balancing karena mampu mempertahankan energi pada masing-masing sel tanpa melakukan *discharge* secara terus-menerus. Sedangkan metode *corrective pulse discharge balancing* hanya digunakan sebagai koreksi tambahan

setelah proses *rest verification* selesai dilakukan. Penggunaan tahap *rest verification* selama 30 menit juga membantu memperoleh kondisi tegangan yang lebih stabil sebelum dilakukan evaluasi akhir balancing. Selain itu, metode *polynomial regression* berhasil merepresentasikan hubungan kapasitas muatan terhadap OCV baterai lithium-ion dan digunakan sebagai dasar estimasi kebutuhan kapasitas tambahan pada proses *selective recharge balancing*.

Secara keseluruhan sistem balancing yang dirancang mampu bekerja secara otomatis dalam melakukan proses charging, evaluasi tegangan, *corrective discharge balancing*, dan *selective recharge balancing* berdasarkan kondisi selisih tegangan antar sel baterai lithium-ion.

## Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, sistem balancing empat sel baterai lithium-ion berbasis *selective charge balancing* berhasil dirancang dan diimplementasikan menggunakan mikrokontroler ESP32, modul charging individual TP5100, sensor INA219, relay, serta rangkaian *corrective pulse discharge balancing*. Sistem mampu melakukan proses balancing secara otomatis melalui tahapan *charge balancing*, *rest verification*, *corrective pulse discharge balancing*, dan *selective recharge balancing* sesuai dengan kondisi selisih tegangan antar sel baterai.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa metode *selective charge balancing* mampu menyamakan tegangan seluruh sel hingga mencapai tegangan balancing sebesar 4,0 V. Setelah melalui tahap *rest verification* selama 30 menit, diperoleh selisih tegangan maksimum antar sel sebesar 0,010 V yang berada di bawah batas toleransi balancing sebesar 0,040 V sehingga sistem dinyatakan berada pada kondisi balanced. Pada kondisi ketidakseimbangan tegangan menengah, metode *corrective pulse discharge balancing* dengan pola pulsa 5 detik ON dan 5 detik OFF mampu mengurangi ketidakseimbangan tegangan dengan efektivitas sebesar 94,74% hingga 95,65% dan menghasilkan error akhir di bawah 5,3%. Sementara itu, metode *selective recharge balancing* berhasil mengoreksi ketidakseimbangan tegangan yang lebih besar dengan kebutuhan kapasitas tambahan maksimum sebesar 361 mAh dan waktu *recharge* maksimum selama 23,7 menit hingga seluruh sel kembali mencapai kondisi balanced.

Selain itu, metode *polynomial regression* berhasil merepresentasikan hubungan nonlinier antara kapasitas muatan (mAh) dan Open Circuit Voltage (OCV) baterai lithium-ion dengan nilai koefisien determinasi ( $R^2$ ) sebesar 0,996 dan nilai Root Mean Square Error (RMSE) sebesar 0,008 V. Hasil tersebut menunjukkan bahwa model memiliki tingkat kesesuaian yang tinggi terhadap data pengujian sehingga dapat digunakan sebagai dasar estimasi kebutuhan kapasitas tambahan pada proses *selective recharge balancing*.

Secara keseluruhan, sistem yang dirancang mampu meningkatkan keseragaman tegangan antar sel, mengurangi ketidakseimbangan tegangan secara efektif, serta mendukung pengelolaan baterai lithium-ion multi-sel yang lebih efisien. Untuk penelitian selanjutnya, sistem dapat dikembangkan dengan penambahan sensor suhu dan monitoring arus secara real-time pada setiap sel baterai, implementasi estimasi *State of Charge* (SOC) secara langsung, pengujian pada jumlah sel dan kapasitas baterai yang lebih beragam, serta integrasi teknologi Internet of Things (IoT) untuk mendukung sistem monitoring baterai secara jarak jauh dan berkelanjutan.

## Acknowledgment

Penulis mengucapkan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah memberikan dukungan dalam pelaksanaan penelitian ini sehingga penelitian dapat diselesaikan dengan baik.

## Referensi

- Abadi, A. (2025). Design of a Battery Pack for a Solar Power System at the Farmers Group Hut in Guo Village , Padang City. *OF INTELLIGENT CONTROL AND OPTIMIZATION*, 2(2), 31–37.
- Chavan, S. L., Kanawade, M. A., & Ankushe, R. S. (2025). An effective passive cell balancing

- technique for lithium-ion battery. *Next Energy*, 8, 1–12.  
<https://doi.org/10.1016/j.nxener.2025.100258>
- Chen, J., Zhou, Z., Zhou, Z., Wang, X., & Liaw, B. (2022). Impact of Battery Cell Imbalance on Electric Vehicle Range. *Green Energy and Intelligent Transportation*, December.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.geits.2022.100025>
- Gu, X., See, K. W., Liu, Y., Arshad, B., Zhao, L., & Wang, Y. (2023). A time-series Wasserstein GAN method for state-of-charge estimation of lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 581(July), 233472. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.233472>
- Irawan, D., & Kinanti, Z. A. (2023). Performance Analysis of Wind Turbine. *Kontribusi : Research Dissemination for Community Development*, 6(1), 129.  
<https://doi.org/10.30587/kontribusi.v6i1.4256>
- Irawan, D., Prastya, Eka, P., & Hidayah, A. (2023). KOORDINASI PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA (PLTS) BERBASIS ALGORITMA MULTIPLE SEQUENCE ALIGNMENT (MSA). *Multitek Indonesia: Jurnal Ilmiah*, 17(1), 60–68.
- Karnehm, D., & Neve, A. (2024). A Resource-Constrained Polynomial Regression Approach for Voltage Measurement Compression in Electric Vehicle Battery Packs. *Batteries*, 10(9).  
<https://doi.org/10.3390/batteries10090305>
- Khan, N., Ai, C., Alturki, A., & Amir, M. (2024). Review article A critical review of battery cell balancing techniques , optimal design , converter topologies , and performance evaluation for optimizing storage system in electric vehicles. *Energy Reports*, 11(December 2023), 4999–5032. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.04.041>
- Kurniawan, R. D., Hsb, M. P., & Sitompul, R. A. (2025). Studi Literatur Sistem Penyimpanan Energi Berbasis Baterai: Jenis, Kinerja dan Aplikasinya di Sistem Energi Terbarukan. *Perwira Journal of Science & Engineering*, 5(2), 165–169.
- Marlow, M. N., Chen, J., & Wu, B. (2024). Degradation in parallel-connected lithium-ion battery packs under thermal gradients. *Communications Engineering*, 3(1), 1–15.  
<https://doi.org/10.1038/s44172-023-00153-5>
- Pillai, P., Nguyen, J., & Balasingam, B. (2024). Performance Analysis of Empirical Open-Circuit Voltage Modeling in Lithium-Ion Batteries - Part 3: Experimental Results. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 10(3), 7258–7274.  
<https://doi.org/10.1109/TTE.2023.3341695>
- Safari, A., Sorouri, H., Oshnoei, A., & Blaabjerg, F. (2025). A state-of-the-art review on battery cell balancing strategies. *Discover Energy*, 5(1). <https://doi.org/10.1007/s43937-025-00086-4>
- Theuerkauf, D., & Swan, L. (2022). Characteristics of Open Circuit Voltage Relaxation in Lithium-Ion Batteries for the Purpose of State of Charge and State of Health Analysis. *Batteries*, 8(8).  
<https://doi.org/10.3390/batteries8080077>
- Uğurluoğlu, A., & Karaarslan, A. (2024). A Faster Active Package to Cell Balancing of Battery Management System Using Isolated CUK Converter with Switch Matrix. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 12(3), 639–661.  
<https://doi.org/10.29109/gujsc.1487808>
- Wang, X., Gong, R., Yang, Z., & Kang, L. (2024). State of Charge Estimation of Lithium-ion Batteries Based on Online OCV Curve Construction. *Batteries*, 10(6).  
<https://doi.org/10.3390/batteries10060208>