



Terbit online pada laman: <https://ejurnal.umri.ac.id/index.php/JST>

## Jurnal Surya Teknika

| ISSN (Print) 2354-6751 | ISSN (Online) 2723-7222 |



Research Article

# Desain Sistem Kontrol Cerdas Penyeimbangan Sel Baterai yang Disusun Seri

Wiwit Yuni Safitri\*, Asde Rahmawati, Fahrizal, Basthul Wajhi Akramunnas, dan Tesya Uldira Septiyeni

Department of Electrical Engineering, Institut Teknologi Bisnis Riau, Jl. Jend Sudirman, Tengkerang Selatan, Kec. Bukit Raya, Kota Pekanbaru, Riau 28125, Indonesia.

### INFORMASI ARTIKEL

Diserahkan : 30 Mei 2026  
Diterima : 28 Juni 2026  
Diterbitkan : 30 Juni 2026

### KATA KUNCI

Baterai, Fuzzy, Kontrol, Penyeimbangan.

### KORESPONDENSI

\*E-mail:

[wiwityunisafitri.wys@gmail.com](mailto:wiwityunisafitri.wys@gmail.com)

### A B S T R A K

Baterai digunakan sebagai penyimpan energi karena memiliki densitas energi dan daya yang tinggi. Sel baterai biasanya disusun seri untuk menghasilkan tegangan dan kapasitas daya yang lebih besar. Namun, perbedaan karakteristik kimia dan listrik pada setiap sel dapat memicu ketidakseimbangan tegangan setelah siklus pengisian-pengosongan berulang. Kondisi ini pada akhirnya menurunkan kapasitas total baterai lithium-ion dan memperpendek masa pakai. Penelitian ini memperkenalkan mekanisme penyeimbangan sel yang efisien dan berkinerja tinggi yang dirancang khusus untuk rangkaian baterai yang terhubung secara seri. Untuk mengoptimalkan proses penyeimbangan dan memastikan keseragaman tegangan di seluruh sel, kontrol cerdas Fuzzy Logic Kontroler diintegrasikan untuk mengendalikan rangkaian penyeimbangan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa penggunaan kontrol cerdas dapat mencapai keseimbangan tegangan baterai dalam 60 detik.

### A B S T R A C T

Batteries are used as energy storage devices due to their high energy and power density. Battery cells are typically connected in series to achieve higher voltage and power capacity. However, differences in chemical and electrical characteristics of each cell can lead to voltage imbalance after repeated charge-discharge cycles. This condition ultimately reduces the total capacity of lithium-ion batteries and shortens their lifespan. This study introduces an efficient and high-performance cell balancing mechanism specifically designed for series-connected batteries. To optimize the balancing process and ensure voltage uniformity across the cells, an intelligent Fuzzy Logic Kontroler is integrated to control the balancing circuit. Simulation results show that the use of intelligent control can achieve battery voltage balance within 60 seconds.

## 1. PENDAHULUAN

Kemajuan teknologi pada baterai dalam menyediakan solusi penyimpanan energi mengalami kemajuan yang sangat pesat. Baterai lithium-ion sering dipakai untuk penyimpanan energi, terutama pada kendaraan listrik, kendaraan listrik *hybrid*, sistem fotovoltaik, dan aplikasi energi lainnya. Baterai lithium-ion memiliki densitas daya yang tinggi, *lifetime* yang panjang, serta

tingkat *self-discharge* yang rendah, dengan demikian dapat memperpanjang usia kendaraan dan meningkatkan jarak tempuh [1], [2]. Namun keterbatasan tegangan sel tunggal merupakan kelemahan utama yang membuat baterai harus dihubungkan secara seri untuk catu daya tegangan tinggi, seperti kendaraan listrik dan kendaraan listrik *hybrid*. Seiring bertambahnya usia, baterai yang terhubung seri akan mengalami penurunan yang

sangat cepat, terjadi kerusakan karena memiliki variasi kapasitas yang diakibatkan oleh proses manufaktur baterai serta kondisi suhu lingkungan yang tidak optimal [3] - [13]. Untuk menjaga agar energi sel seimbang dan memperpanjang masa pakainya, maka perlu dilakukan penyeimbangan sel untuk rangkaian baterai yang terhubung seri.

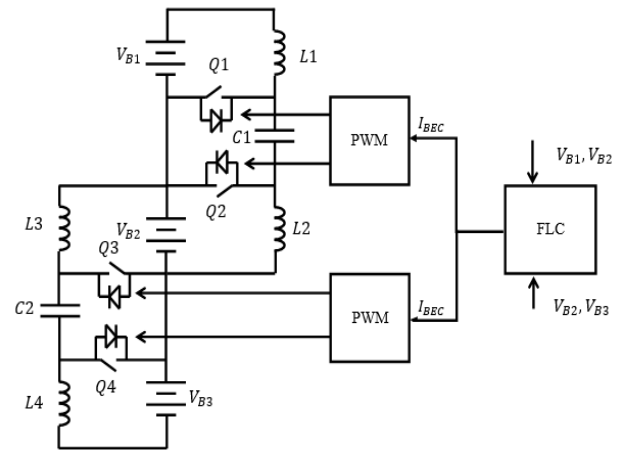
Beberapa skema dan rangkaian penyeimbangan telah dilakukan [3] - [13]. Metode yang lebih umum yaitu dengan menggunakan penyeimbangan pasif yang mana merupakan metode sederhana dan mudah diterapkan. Energi yang berlebih akan diransfer dari sel bertegangan tinggi kemudian dibuang pada resistor. Tetapi metode ini mempunyai kelemahan yaitu memiliki efisiensi yang sangat rendah dan energi panas yang dibuang melalui resistor akan memperpendek umur baterai [7]. Dalam pendekatan desain pengontrol konvensional, sulit untuk membangun model sel baterai untuk menggambarkan karakteristik penyeimbangan dari string baterai lithium-ion, karena ketidakpastian yang melekat pada reaksi elektrokimia. Model baterai tidak diperlukan untuk menggambarkan sistem penyeimbangan baterai di bawah prosedur desain kontroler fuzzy [12], [13].

Dalam penelitian ini, metode yang diusulkan adalah rangkaian penyeimbang dengan struktur sederhana. Komponen rangkaian yang dipilih untuk penyimpanan energi hanya mencakup kapasitor dan induktor dalam rangkaian modul, yang dimodifikasi berdasarkan konverter DC-DC Cuk dua arah. *Fuzzy Logic Kontroler (FLC)* digunakan untuk mengatur arus penyeimbangan dan mengatasi masalah kecepatan penyeimbangan yang lambat.

## 2. METODOLOGI

### 2.1. Konfigurasi Sistem

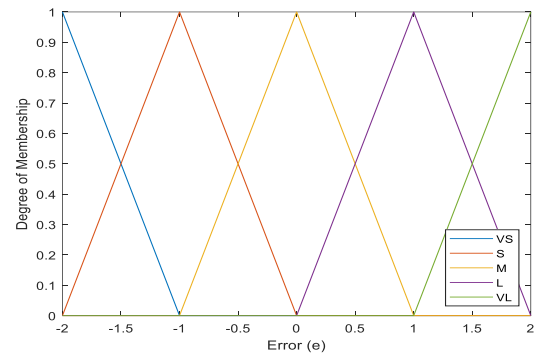
Gambar 1 menunjukkan penyeimbangan sel individu dari skema penyeimbangan yang diusulkan. Algoritma kontrol penyeimbangan tegangan sel telah diinstruksikan oleh pengontrol penyeimbang FLC untuk skema penyeimbangan baterai. Energi antara dua sel baterai diubah melalui kapasitor yang berfungsi sebagai transfer energi. Perbedaan tegangan sel pada rangkaian baterai dan sakelar MOSFET daya yang dikendalikan menentukan arah proses transfer energi.



Gambar 1. Strategi Kontrol FLC yang diusulkan.

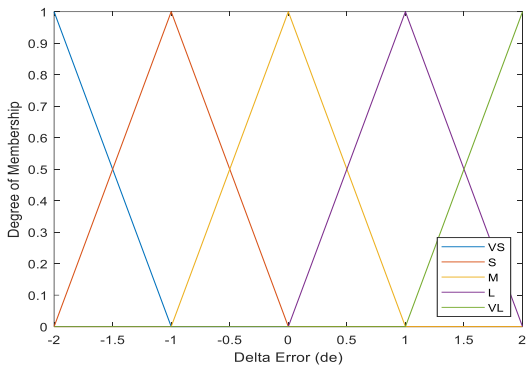
### 2.2. Fuzzy Logic Kontroler (FLC)

FLC dirancang sebagai pengatur arus penyeimbangan yang akan diberikan untuk sinyal PWM. FLC memiliki 1 *output* dan 2 *input*. *Input* yang digunakan berupa tegangan baterai ( $V_B$ ) dan perbedaan tegangan ( $V_d$ ) sedangkan untuk *output* FLC yaitu arus penyeimbangan baterai ( $I_{BEC}$ ). Perbandingan antara ( $V_B$ ) dan ( $V_d$ ) menghasilkan nilai *error*. Nilai *error* ( $e$ ) ini akan menjadi *input* pertama. Fungsi keanggotaan yang digunakan memiliki lima variabel linguistik yaitu VS (*Very Small*), S (*Small*), M (*Middle*), L (*Large*), dan VL (*Very Large*), yang berbentuk segitiga seperti Gambar 2 berikut :



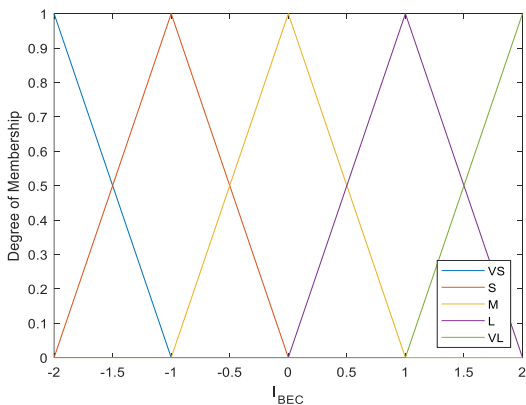
Gambar 2. Fungsi keanggotaan variabel error (e) FLC.

Nilai *error* diterapkan sebagai *input* kedua dari FLC yakni nilai *delta error* ( $de$ ). Nilai *delta error* ini dihasilkan dari selisih antara nilai *error* saat ini dan nilai *error* sebelumnya. Fungsi keanggotaan yang digunakan memiliki lima variabel linguistik yaitu VS (*Very Small*), S (*Small*), M (*Middle*), L (*Large*), dan VL (*Very Large*), yang berbentuk segitiga seperti Gambar 3 berikut :



Gambar 3. Fungsi keanggotaan pada variabel *delta error* (*e*) FLC.

Kedua variabel *input* tersebut kemudian di proses dalam subsistem FLC yang telah dirancang *rule base* nya, dengan demikian menghasilkan *output* FLC yang akan diproses pada bagian berikutnya untuk dijadikan sinyal penyalan sakelar atau MOSFET. Pada desain penyeimbangan baterai ini, FLC memiliki satu *output* yang akan dijadikan sebagai arus penyeimbangan baterai ( $I_{BEC}$ ) dan selanjutnya akan diproses menjadi *duty cycle* oleh sinyal *Pulse Width Modulation* (PWM) untuk pengsakelaran. Fungsi keanggotaan yang digunakan memiliki lima variabel linguistik yaitu VS (*Very Small*), S (*Small*), M (*Middle*), L (*Large*), dan VL (*Very Large*), yang berbentuk segitiga seperti Gambar 4 berikut :



Gambar 4. Fungsi keanggotaan variabel *Output* FLC.

Tabel 1.  
Rule Base FLC

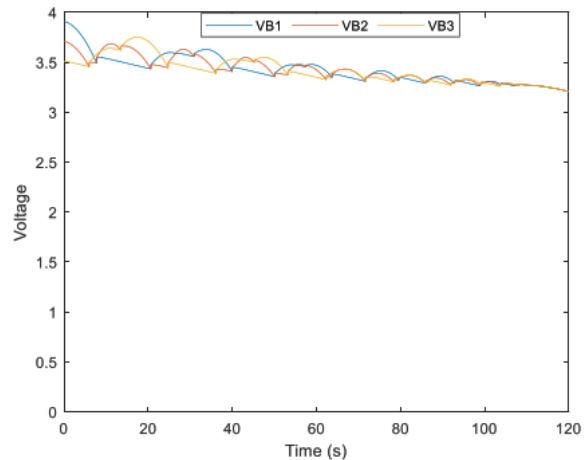
		<i>e</i>				
<i>Output</i>		VS	S	M	L	VL
<i>de</i>	VS	VS	M	L	VL	VL
	S	VS	M	L	VL	VL
	M	VS	M	L	VL	VL

L	VS	S	M	L	VL
VL	VS	S	M	L	VL

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1. Case I

Pada Gambar 5 menunjukkan grafik penyeimbangan konvensional dengan masing-masing nilai tegangan baterai yaitu  $V_{B1} = 3.9$  V,  $V_{B2} = 3.7$  V dan  $V_{B3} = 3.5$  V. Pada kondisi ini, tegangan baterai diseimbangkan tanpa menggunakan kontrol logika *fuzzy*. Penyeimbangan baterai hanya menggunakan sakelar atau MOSFET dalam penyeimbangan konvensional. Hasil simulasi menunjukkan, dimana terjadinya *ripple* yang sangat tinggi, dan sistem tidak stabil. Pada gambar ini, sistem membutuhkan waktu lama untuk seimbang. Tanpa menggunakan FLC, waktu penyeimbangan mencapai 100 detik. Hal tersebut dapat digambarkan bahwa pada proses penyeimbangan konvensional, durasi sakelar tidak dikontrol dan hanya bekerja ketika algoritma memerintahkan untuk dihidupkan. Sehingga, arus mengalir ke sel lain secara alami.

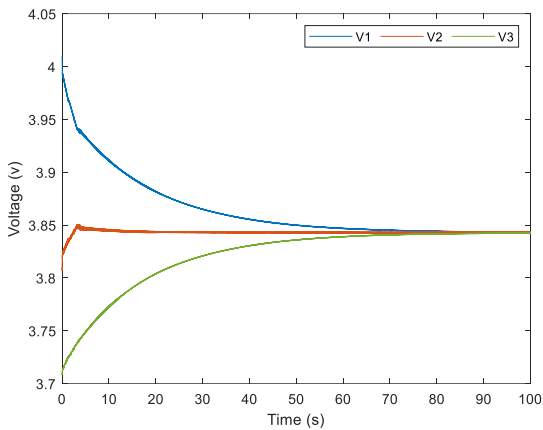


Gambar 5. Penyeimbangan Tanpa Menggunakan FLC

#### 3.2. Case II

Pada Gambar 6 menunjukkan grafik penyeimbangan tegangan baterai berbasis FLC dengan masing-masing nilai tegangan baterai yaitu  $V_{B1} = 3.9$  V,  $V_{B2} = 3.8$  V dan  $V_{B3} = 3.7$  V. Pada kondisi ini, tegangan baterai diseimbangkan menggunakan kontrol logika *fuzzy*. Hasil simulasi menunjukkan, sistem menyeimbangkan lebih cepat dari pada penyeimbangan sebelumnya (penyeimbangan konvensional), terbukti dengan waktu penyeimbangan yang mencapai 70 detik. Dalam hal ini kontroler memberikan keuntungan yaitu mempercepat akurasi balancing menjadi lebih optimal. Pada kondisi ini, perbedaan tegangan pada

setiap sel tidak terlalu tinggi. Oleh karena itu, algoritma FLC dapat menyamakan lebih mudah dan lebih cepat. Selain itu, fluktuasi arus selama proses ini sangat kecil dan berdampak pada perubahan tegangan baterai yang sangat halus.

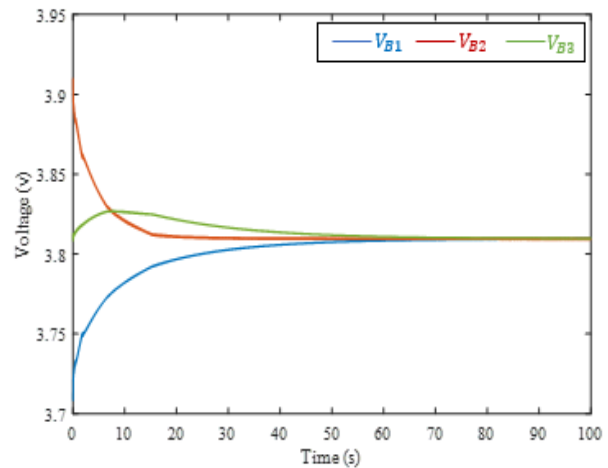


Gambar 6. Penyeimbangan Menggunakan FLC

### 3.3. Case III

Pada Gambar 7 menunjukkan grafik penyeimbangan tegangan baterai berbasis FLC dengan masing-masing nilai tegangan baterai yaitu  $V_{B1} = 3.7 \text{ V}$ ,  $V_{B2} = 3.9 \text{ V}$  dan  $V_{B3} = 3.8 \text{ V}$ . Pada kondisi ini, tegangan baterai diseimbangkan menggunakan kontrol logika *fuzzy*. Hasil simulasi menunjukkan, sistem menyeimbangkan lebih cepat dari pada penyeimbangan sebelumnya (penyeimbangan konvensional), terbukti dengan waktu penyeimbangan yang mencapai 60 detik. Dalam hal ini kontroler memberikan keuntungan yaitu mempercepat akurasi balancing menjadi lebih optimal. Pada kondisi ini, perbedaan tegangan pada setiap sel tidak terlalu tinggi. Oleh karena itu, algoritma FLC dapat menyamakan lebih mudah dan lebih cepat. Selain itu, fluktuasi arus selama proses ini sangat kecil dan berdampak pada perubahan tegangan

baterai yang sangat halus.



Gambar 7. Penyeimbangan Menggunakan FLC

## 4. SIMPULAN

Penelitian ini membuktikan bahwa algoritma yang digunakan mampu mempercepat proses penyeimbangan baterai dan menjaga setiap sel tetap aman. Berdasarkan hasil simulasi, metode kontrol cerdas FLC bekerja lebih baik dibandingkan metode penyeimbangan aktif konvensional karena lebih cepat mencapai kondisi stabil dan mengurangi ketidakstabilan pada sel baterai. Pada penelitian selanjutnya, metode ini akan dikembangkan untuk jumlah sel baterai yang lebih banyak dan diuji langsung pada aplikasi kendaraan listrik.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] L. A. Perișoară, I. C. Guran, and D. C. Costache, "A Passive Battery Management System for Fast Balancing of Four LiFePO4 Cells," *2018 IEEE 24th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging, SIITME 2018 - Proceedings*, pp. 390–393, 2019, doi: 10.1109/SIITME.2018.8599258.
- [2] Y. Al-Wreikat, E. K. Attfield, and J. R. Sodré, "Model for payback time of using retired electric vehicle batteries in residential energy storage systems," *Energy*, vol. 259, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.energy.2022.124975.
- [3] K. Manjunath, R. Kalpana, B. Singh, and R. Kiran, "A Two-Stage Module Based Cell-to-Cell Active Balancing Circuit for Series Connected Lithium-Ion Battery Packs," *IEEE*

- Transactions on Energy Conversion*, vol. 38, no. 4, pp. 2282–2297, Dec. 2023, doi: 10.1109/TEC.2023.3283424.
- [4] Y. S. Lee and G. T. Cheng, “Quasi-resonant zero-current-switching bidirectional converter for battery equalization applications,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 21, no. 5, pp. 1213–1224, 2006, doi: 10.1109/TPEL.2006.880349.
- [5] B. Xia, F. Ding, S. Yue, and Y. Li, “An intelligent active equalization control strategy based on deep reinforcement learning for Lithium-ion battery pack,” *J. Energy Storage*, vol. 86, p. 111255, May 2024, doi: 10.1016/J.EST.2024.111255.
- [6] N. Kumar and Prabhansu, “Next-generation battery energy management systems in electric vehicles: An overview of artificial intelligence,” *Future Batteries*, vol. 7, p. 100087, Sep. 2025, doi: 10.1016/J.FUB.2025.100087.
- [7] A. N. Padmasali, S. G. Kini, and A. P. Parameswaran, “Design of optimized single-switch capacitor cell balancing for EV battery management,” *Results in Engineering*, vol. 27, Sep. 2025, doi: 10.1016/j.rineng.2025.105878.
- [8] M. H. Fatimi, N. A. Zaffar, and H. A. Khan, “A modular and scalable architecture for switched-capacitor Li-ion cell voltage equalizer for large-scale Li-ion battery packs,” *J. Energy Storage*, vol. 162, p. 122072, Jun. 2026, doi: 10.1016/J.EST.2026.122072.
- [9] H. Zhong, F. Lei, J. Liu, F. Ding, W. Zhu, and X. Chi, “Optimal design for efficiency enhanced hierarchical cell-to-cell equalization systems based on centralized model predictive control,” *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 60, p. 103470, Dec. 2023, doi: 10.1016/J.SETA.2023.103470.
- [10] M. Tang and T. Stuart, “Selective buck-boost equalizer for series battery packs,” *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 36, no. 1, pp. 201–211, 2000, doi: 10.1109/7.826322.
- [11] E. Oyarbide, C. Bernal, P. Molina, L. A. Jiménez, R. Gálvez, and A. Martínez, “Voltage equalization of an ultracapacitor module by cell grouping using number partitioning algorithm,” *J. Power Sources*, vol. 301, pp. 113–121, Jan. 2016, doi: 10.1016/J.JPOWSOUR.2015.09.122.
- [12] M. H. Demir and B. Eren, “Output voltage control of double chambers microbial fuel cell using intelligence-based optimized adaptive neuro fuzzy inference kontroler,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 45, pp. 19837–19849, May 2022, doi: 10.1016/J.IJHYDENE.2022.03.113.
- [13] R. Chaibi, R. EL Bachtiri, K. El Hammoumi, and M. Yagoubi, “Observer-based fuzzy T–S control with an estimation error guarantee for MPPT of a photovoltaic battery charger in partial shade conditions,” *Results in Control and Optimization*, vol. 17, p. 100488, Dec. 2024, doi: 10.1016/J.RICO.2024.100488.