

Sistem Baterai Cell Balancing Pasif Menggunakan Kontrol Logika Fuzzy Tipe Mamdani untuk Baterai Pack Lithium

Moh. Rifqi Faqih¹, Novie Ayub Windarko², Endro Wahjono³

^{1,2,3}Departemen Teknik Elektro, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya

¹ rifqifaqih11@gmail.com, ² ayub@pens.ac.id, ³ endro@pens.ac.id

ABSTRACT

Lithium-ion batteries have been widely used in energy storage for electric vehicle and hybrid vehicle applications. After several cycles of charging and discharging, there is one cell whose performance and capacity decreases, causing the performance and capacity of the battery pack to decrease so that it cannot work optimally. So it is necessary to design a cell voltage balancing system to minimize cell voltage imbalance in the charging process. Passive balancing is widely implemented because of its simplicity, reliability, and relatively low cost. The balancing process must be carried out as quickly as possible as the battery is charging, so a PWM ignition technique using mamdani fuzzy is needed to discharge an unbalanced battery cell. The result are compared with no balancing system, fixed balancing 50% duty cycle system, and sugeno fuzzy logic balancing system. From the simulation result, using mamdani fuzzy the final delta voltage value is 0.0344 volt, energy charged is 58.18 Wh and the final State of Charge is 74%. When compared with other balancing method, it shows that using mamdani fuzzy logic method is more optimal because the final of delta voltage value is very small and the battery capacity charged is larger than other method.

Keywords: *Lithium-Ion, Battery Balancing System, Passive Cell Balancing, Fuzzy Logic*

ABSTRAK

Baterai lithium-ion banyak digunakan pada penyimpanan energy untuk aplikasi kendaraan listrik dan kendaraan hybrid. Baterai lithium-ion memiliki power density yang besar dan juga lifetime yang panjang, sehingga dapat meningkatkan jarak tempuh dan usia kendaraan. Setelah beberapa siklus pengisian dan pengosongan terdapat salah satu cell yang berkurang performa dan kapasitasnya, sehingga menyebabkan performa dan kapasitas baterai pack berkurang sehingga tidak bisa bekerja dengan optimal. Sehingga perlu dirancang sistem cell balancing untuk meminimalkan ketidakseimbangan tegangan sel pada proses pengisian. Metode pasif cell balancing diterapkan secara luas karena kesederhanaan, keandalan, dan biaya yang relatif rendah. Proses balancing harus dilakukan secepat mungkin saat baterai sedang diisi, sehingga diperlukan teknik kontrol PWM menggunakan logika fuzzy mamdani untuk melepaskan sel baterai yang tidak seimbang. Hasilnya dibandingkan tanpa sistem balancing, sistem fixed balancing 50% duty cycle, dan sistem balancing logika fuzzy sugeno. Dari hasil simulasi dengan menggunakan fuzzy mamdani didapatkan nilai tegangan delta akhir sebesar 0,0344 volt, energi yang terisi sebesar 58,18 Wh dan State of Charge akhir sebesar 74%. Jika dibandingkan dengan metode balancing lainnya menunjukkan bahwa penggunaan metode logika fuzzy mamdani lebih optimal karena nilai tegangan delta akhir yang sangat kecil dan kapasitas baterai yang terisi lebih besar dibandingkan metode lainnya.

Kata kunci: *Lithium-Ion, Sistem Cell Balancing, Pasif Cell Balancing, Logika Fuzzy*

I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi baterai dalam memberikan solusi penyimpanan energi berkembang dengan cepat. Baterai lithium-ion banyak digunakan pada penyimpanan energy untuk aplikasi kendaraan listrik dan kendaraan listrik hybrid [1]. Baterai lithium-ion memiliki power density yang besar dan juga lifetime yang panjang, sehingga dapat meningkatkan jarak tempuh dan usia kendaraan [2]. Ketika baterai dirangkai secara seri terjadi perbedaan kapasitas baterai yang disebabkan karena toleransi manufaktur baterai dan kondisi lingkungan [2]. Namun, tidak mungkin semua sel dalam baterai memiliki karakteristik yang sama karena perbedaan dalam proses pembuatan dan kondisi kerja. Bahkan jika baterai dibuat dengan unsur kimia, fisik, bentuk dan berat yang sama, mereka dapat memiliki kapasitas total yang berbeda, tingkat pengosongan diri yang berbeda, resistansi internal yang berbeda, dan penuaan yang berbeda yang semuanya mempengaruhi masa pakai baterai [3][4]. Setelah beberapa siklus charging dan discharging, terdapat satu sel yang performa dan kapasitasnya menurun sehingga menyebabkan performa dan kapasitas battery pack menurun sehingga tidak dapat bekerja secara maksimal [2][5]. Ketidakseimbangan tegangan sel juga menyebabkan salah satu sel mengalami over-discharge atau over-charge lebih cepat [6].

Dari uraian di atas masalah keseimbangan sistem baterai sangat diperlukan ketika sel-sel dalam baterai pack dihubungkan secara seri [7]. Sehingga perlu dirancang sistem balancing tegangan sel pada battery pack. Balancing pasif banyak diterapkan karena kesederhanaan, keandalan, dan biaya yang relatif rendah [8][9]. Balancing pasif dilakukan dengan cara mengosongkan sel yang memiliki kapasitas lebih tinggi menggunakan resistor hingga muatan sel mendekati muatan sel terendah dalam baterai pack [10]. Proses balancing harus dilakukan seoptimal mungkin dengan waktu pengisian baterai, sehingga diperlukan teknik pengapian PWM (Pulse Width Modulation) untuk melepaskan sel-sel baterai yang tidak seimbang [10][11]. Ketika balancing dilakukan dengan parameter tetap, sistem

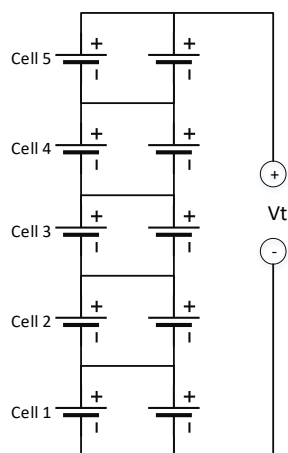
tidak akan stabil ketika perbedaan tegangan terlalu kecil [12].

Oleh karena itu, perlu dirancang sistem balancing untuk baterai pack li-ion. Logika fuzzy akan diimplementasikan pada teknik pengapian PWM pada algoritma passive cell balancing pada battery pack. Logika fuzzy bergantung pada pengetahuan ahli tentang sistem dan membangun basis data logika fuzzy untuk operasi. Topologi balancing adalah pengontrol dengan logika fuzzy melalui pengisian durasi balancing atau balancing frekuensi [13]. Parameter inputnya adalah perbedaan tegangan sel-n dan tegangan sel-n, keluaran logika fuzzy akan menghasilkan nilai duty cycle balancing. Hasil implementasi logika fuzzy dapat menyeimbangkan tegangan sel baterai secara optimal.

II. METODOLOGI

1. Perencanaan Li-ion Baterai Pack

Dalam makalah ini digunakan baterai li-ion yang terdiri dari sel lithium nickel cobalt aluminium oxides (NCA) berkapasitas 3,5 Ah. Sel-sel baterai dihubungkan secara paralel 5 seri 2 seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 1. Koneksi sel pada baterai pack.

Gambar 1 menunjukkan bahwa baterai terdiri dari beberapa sel li-ion, sehingga spesifikasi sel baterai ditunjukkan pada Tabel 1.

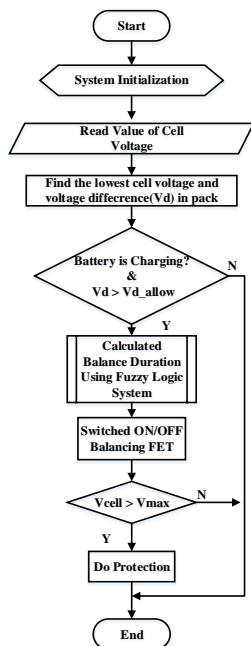
Tabel 1. Spesifikasi Baterai Sel

Parameter	Value
Capacity	3500 mAh Rated
Voltage	3.6 V (Nominal)
Charging Voltage	4.2 V (Maximum)
Charging Current	1.7 A (Standard) 3.4 A (Maximum)
Discharging Voltage	2.5 V (Cutoff)
Discharging Current	0.68 A (Standard) 10 A (Maximum)

Tabel 1. menunjukkan spesifikasi sel baterai li-ion yang digunakan dalam makalah ini. Karena battery pack dirangkai secara paralel 5 seri 2, maka spesifikasi battery pack adalah 18 V 7Ah.

2. Sistem Cell Balancing Pasif

Topologi cell balancing dikategorikan menjadi 2 yaitu passive balancing dan active balancing. Metode passive balancing dilakukan dengan cara menghilangkan kelebihan muatan pada sel baterai yang mengalami kelebihan muatan secara pasif menggunakan resistor hingga diseimbangkan mendekati sel terendah dalam baterai pack [10].



Gambar 2. Flowchart sistem balancing

Gambar 2 menunjukkan algoritma flowchart cell balancing menggunakan logika fuzzy. Proses balancing mempertimbangkan kondisi distribusi tegangan sel pada baterai. Menemukan tegangan terendah dalam baterai diperlukan untuk menghitung nilai perbedaan tegangan. Proses balancing dilakukan pada saat proses charging dan jika nilai selisih tegangan sel n diatas nilai selisih tegangan yang diperbolehkan. Proteksi akan aktif ketika tegangan sel berada di atas tegangan sel maksimum. Nilai beda tegangan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (1).

$$V_{d(n)} = V_{\text{cell}(n)} - V_{\text{cell-lowest}} \quad (1)$$

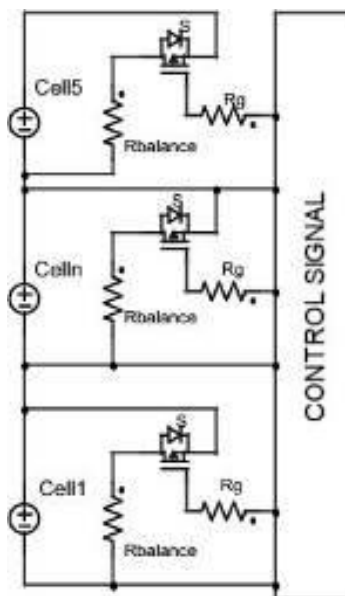
Keterangan :

$V_{d(n)}$ = Perbedaan tegangan cell-n (V)

$V_{\text{cell}(n)}$ = tegangan cell-n (V)

$V_{\text{cell-lowest}}$ =Tegangan terendah dipack (A)

Dalam metode ini, resistor ditempatkan secara paralel dengan setiap sel dan nilai resistor dihitung sesuai dengan tingkat keseimbangan [14]. Umumnya resistor yang digunakan untuk balancing memiliki nilai yang tetap atau disesuaikan dengan kebutuhan sistem. Rangkaian keseimbangan pasif ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Rangkaian pasif balancing

Gambar 3 menunjukkan rangkaian balancing pasif sederhana menggunakan resistor dan komponen switching berupa MOSFET. Sel yang memiliki kapasitas berlebih dibuang sebagai pembuangan panas di resistor. Cara ini efektif diterapkan pada saat baterai dalam proses pengisian, karena jika diterapkan dalam kondisi pengosongan akan memperpendek umur baterai [9]. Desain resistor balancing dapat dihitung menggunakan persamaan (2).

$$R_{\text{balance}} = V_{\text{cell-nom}} / I_{\text{balance}} \quad (1)$$

Keterangan :

R_{balance} = Resistor balancing (Ω)

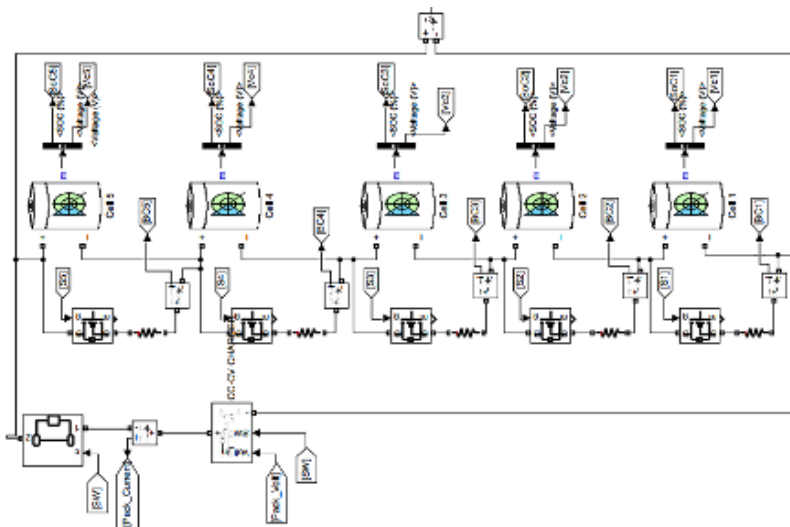
$V_{\text{cell-nom}}$ = Tegangan nominal cell (Volt)

I_{balance} = Arus balancing (Ampere)

Jika arus balancing yang diinginkan adalah 0,218 A, maka nilai resistor balancing adalah.

$$I_{\text{balance}} = 3.6 / 0.2 = 16.5 \Omega$$

Spesifikasi MOSFET pada rangkaian balancing juga dapat ditentukan dari parameter arus balancing dan tegangan. Setelah rangkaian balancing dirancang, dibuat pemodelan rangkaian pada perangkat lunak simulink yang ditunjukkan pada Gambar 3.



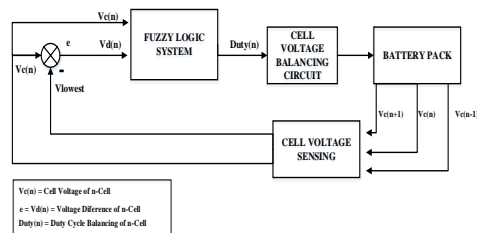
Gambar 4. Rangkaian Balancing pada software MATLAB simulink

Gambar 4 menunjukkan rangkaian simulasi sistem keseimbangan pasif berbasis software Simulink. Simulasi dilakukan dengan pengisian baterai dengan mode CC-CV dan arus pengisian 2A. Relai akan memutuskan rangkaian jika terjadi tegangan lebih pada salah satu sel baterai.

3. Perencanaan Sistem Logika Fuzzy

Idealnya, duty cycle balancing sel-n harus adaptif terhadap perbedaan tegangan dan tegangan sel dalam paket baterai. Logika fuzzy diusulkan untuk memenuhi persyaratan dan sepenuhnya digunakan untuk menentukan

duty cycle balancing sel ke-n yang harus dilakukan oleh rangkaian balancing di setiap sel. Berikut ini akan dijelaskan desain dari logika fuzzy.

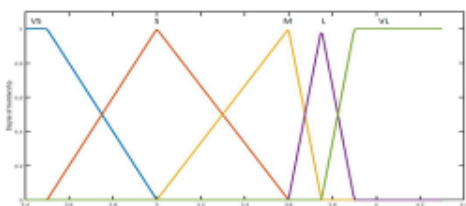


Gambar 5. Diagram sistem balancing Menggunakan fuzzy.

Gambar 5. menunjukkan bahwa dalam logika fuzzy dengan tegangan input masing-masing sel baterai. Sensor tegangan membaca tegangan sel n-baterai, (n-1), (n+1), et. seq. Sehingga didapatkan nilai tegangan terendah pada sel baterai. Dengan mengurangkan tegangan sel-n dengan tegangan terendah, kita mendapatkan nilai $V_d(n)$ (berbeda tegangan) sel-n pada baterai. Proses balancing dilakukan hingga beda tegangan sel-n di bawah 50mV.

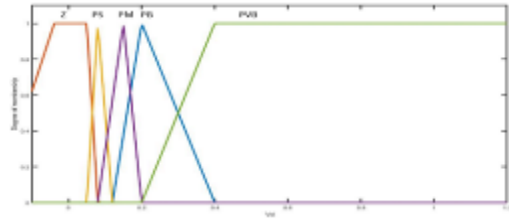
Dengan mengubah secara dinamis durasi balancing atau duty cycle balancing sel-n, sel baterai yang kelebihan kapasitas dapat dikosongkan secara optimal. Ketika durasi balancing diatur sama untuk semua paket sel, kondisi paket baterai menjadi tidak stabil. Karena proses balancing yang dilakukan pada saat proses charging tidak mempertimbangkan kondisi distribusi tegangan sel dan perbedaan tegangan pada battery pack.

Kontrol logika fuzzy menggunakan metode mamdani dengan variabel input FIS (Fuzzy Inference System) V_c -n dan V_d -n dan menghasilkan output fuzzy berupa duty cycle balancing sel-n. Metode defuzzifikasi yang digunakan adalah CEO (Center of Area) dengan operasi fuzzy AND set untuk mengambil nilai minimum dari kedua input data. Metode fuzzy Mamdani dengan defuzzifikasi tipe CEO (Center of Area) digunakan karena keluaran dari fuzzifikasi yang dibutuhkan berupa himpunan sehingga didapatkan nilai keluaran defuzzifikasi yang tepat dan selalu mengikuti acuan. Kontrol logika fuzzy menggunakan metode sugeno juga diimplementasikan sebagai perbandingan hasil dari metode mamdadi menggunakan input dan rule base yang sama. Metode defuzzifikasi untuk sugeno yang digunakan adalah weight average dengan operasi himpunan fuzzy AND untuk mengambil nilai minimum dari kedua input data.



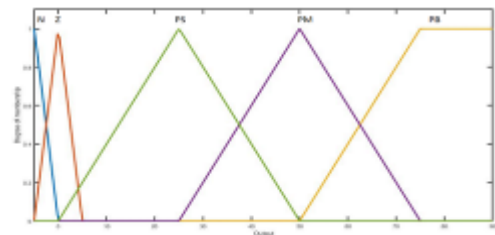
Gambar 6. Fungsi keanggotaan input tegangan cell (V_c).

Gambar 6 menunjukkan bahwa tegangan sel diklasifikasikan sebagai VS (sangat kecil), S (kecil), M (sedang), L (besar), dan VL (sangat besar). Rentang input diatur antara 2.4 V dan 4.3 V.



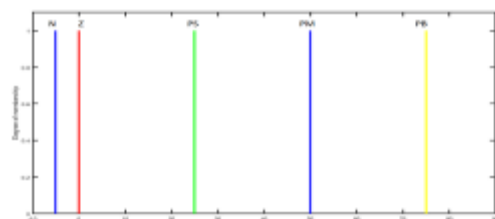
Gambar 7. Fungsi keanggotaan input perbedaan tegangan (V_d)

Gambar 7 menunjukkan bahwa beda tegangan diklasifikasikan sebagai Z (Zero), PS (positif kecil), PM (positif sedang), PB (positif besar), dan PVB (positif sangat besar). Rentang input diatur antara -0,05 V dan 1,2 V.



Gambar 8 Fungsi keanggotaan output duty cycle (mamdani)

Gambar 8 menunjukkan bahwa beda tegangan diklasifikasikan sebagai N (negatif), Z (Zero), PS (positif kecil), PM (positif sedang), dan PB (positif besar). Rentang input diatur antara 0% dan 90%.



Gambar 9. Fungsi keanggotaan output duty cycle (sugeno)

Gambar 9 menunjukkan bahwa sama seperti metode mamdadi bahwa perbedaan tegangan diklasifikasikan sebagai N (negatif)

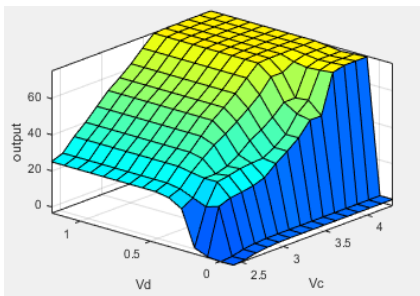
= -5, Z (Zero) =0, PS (positif kecil)=25, PM (positif sedang) = 50, dan PB (positif besar) =75.

Tabel 2. Aturan dasar fuzzy yang direncanakan

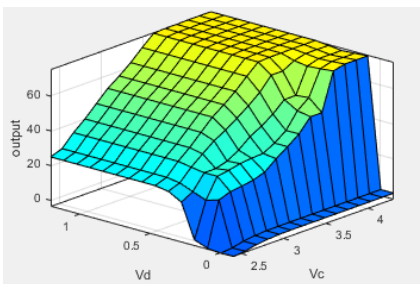
OUTPUT (AND)		Vd				
		N	Z	PS	PM	PB
Vc	VS	N	N	N	Z	PS
	S	N	Z	PS	PM	PM
	M	N	Z	PM	PM	PB
	L	N	Z	PM	PB	PB
	VL	N	Z	PB	PB	PB

Tabel 2. menunjukkan bahwa aturan dasar logika fuzzy terdiri dari 25 aturan yang dihubungkan oleh konektor “dan”. Terakhir, defuzzifikasi akan mengubah keluaran variabel linguistik menjadi variabel numerik. fungsi keanggotaan dan aturan dasar dirancang khusus untuk mendapatkan duty cycle balancing yang optimal. COA (Centroid of Area) digunakan dalam proses defuzzifikasi yang menggunakan persamaan (3) [15].

$$Z_{COA} = \frac{\int \mu A(z) z dz}{\int \mu A(z) dz} \quad (3)$$



Gambar 10. Hasil fuzzy surface view metode mamdani.

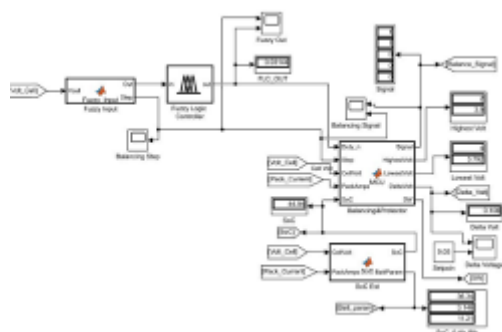


Gambar 11. Hasil fuzzy surface view metode sugeno.

Gambar 10. dan Gambar 11. menunjukkan bahwa hasil permukaan keluaran fuzzy. Keduanya terlihat sama, ketika perbedaan tegangan sel sangat besar, duty cyclebalancing juga besar untuk mengurangi kapasitas sel lebih cepat. Ketika tegangan sel sangat kecil, duty cyclebalancing juga kecil untuk menjaga stabilitas sel saat pengisian dengan balancing.

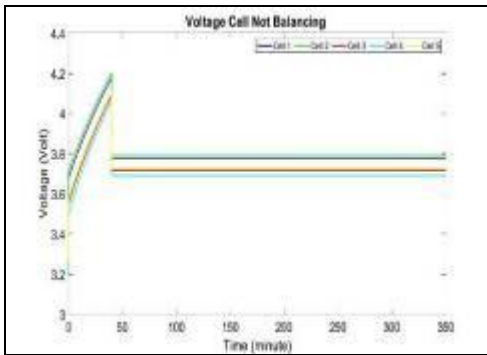
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Untuk menguji keefektifan metode yang diusulkan, dilakukan percobaan tanpa sistem balancing, balancing menggunakan duty cycle 50%, dan balancing menggunakan logika fuzzy. Untuk kasus simulasi dalam tulisan ini, proses balancing proses pengisian baterai dilakukan selama proses pengisian baterai. Durasi balancing total adalah 10 detik atau periode 0.1Hz PWM (Pulse Width Moudlation). Pengisian baterai menggunakan charger baterai CC-CV dengan arus maksimum 2A selama 350 menit waktu simulasi. Kondisi awal SoC sel adalah Sel 1=38 %, Sel 2=39 %, Sel 3=34 %, Sel 4=33%, dan Sel 5=35 %. Variasi SoC awal dilakukan untuk mengasumsikan bahwa sel dalam kondisi tidak seimbang.



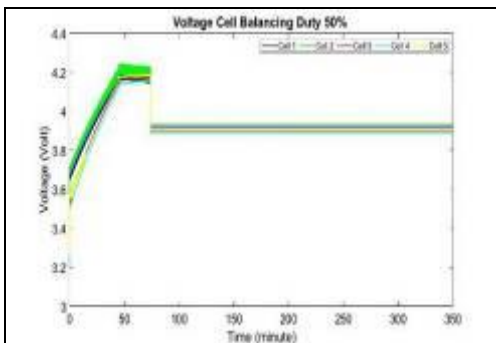
Gambar 12. Sistem balancing pada software simulink.

Gambar 12 menunjukkan bahwa algoritma balancing ditulis dalam fungsi matlab untuk melakukan pemrosesan sinyal balancing, perlindungan, dan juga menghitung kapasitas pengisian baterai selama proses simulasi. Hasil tegangan sel tanpa sistem balancing ditunjukkan pada Gambar 13.



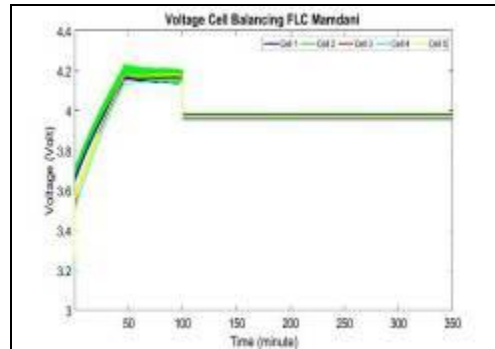
Gambar 13. Tegangan cell pada baterai pack tanpa balancing.

Gambar 13 menunjukkan bahwa jika tanpa sistem balancing, tegangan sel telah mencapai tegangan maksimum pada menit ke-48 dan kemudian proteksi menghentikan proses pengisian. Tanpa sistem balancing, proses pengisian tidak mencapai kondisi tegangan konstan karena proteksi sudah diaktifkan terlebih dahulu.



Gambar 14. Tegangan cell pada baterai pack dengan balancing duty 50%.

Gambar 14 menunjukkan bahwa jika menggunakan sistem balancing dengan nilai fixed duty cycle 50%, tegangan sel telah mencapai tegangan maksimum pada menit ke-75 dan kemudian proteksi menghentikan proses pengisian. Kita dapat mengamati bahwa metode ini lebih baik daripada tidak menggunakan sistem balancing karena waktu pengisian yang lebih lama.



Gambar 15. Tegangan cell pada baterai pack dengan balancing fuzzy mamdani

Gambar 15 menunjukkan bahwa jika menggunakan sistem balancing logika fuzzy, tegangan sel telah mencapai tegangan maksimum pada menit ke-100 dan kemudian proteksi menghentikan proses pengisian. Kita dapat mengamati bahwa metode ini adalah yang terbaik dari metode duty 50%.



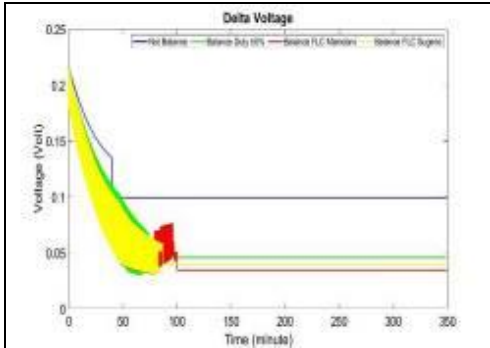
Gambar 16. Tegangan cell pada baterai pack dengan balancing fuzzy sugeno

Gambar 16 menunjukkan bahwa jika menggunakan sistem balancing logika fuzzy, tegangan sel telah mencapai tegangan maksimum pada menit ke-86 dan kemudian proteksi menghentikan proses pengisian. Kita dapat mengamati bahwa metode ini adalah yang terbaik dari metode non fuzzy tetapi masih belum optimal jika dibandingkan dengan logika fuzzy mamdani. Selisih antara tegangan sel tertinggi dan sel terendah dalam baterai pack disebut tegangan delta. Itu dapat dihitung menggunakan persamaan (4).

$$\Delta V = V_{\text{cell-highest}} - V_{\text{cell-lowest}} \quad (4)$$

Keterangan :

- ΔV = Perbedaan tegangan (Volt)
- $V_{\text{cell-highest}}$ = Tegangan Cell tertinggi pada pack (Volt)
- $V_{\text{cell-lowest}}$ = Tegangan cell terendah pada pack (Volt)



Gambar 17. Hasil perbandingan delta voltage

Gambar 17 menunjukkan hasil perbedan tegangan (delta voltage) selama proses balancing dengan logika fuzzy mamdani. Dibandingkan dengan sistem tidak seimbang, balancing dengan duty tetap 50%, dan sistem balancing logika fuzzy sugeno. Terlihat adanya fluktuasi tegangan akibat proses balancing, dimana lamanya waktu dan hasil akhir dari proses balancing tegangan delta pada masing-masing metode berbeda. Nilai akhir sistem delta voltage not balance adalah 0.09V, fixed duty balancing 0.045V, sugeno fuzzy logic balancing 0.039V, dan mamdani fuzzy logic balancing 0.034V. Dari data tersebut dapat disimpulkan bahwa dengan menggunakan fuzzy logic balancing menunjukkan bahwa dengan menggunakan balancing logika fuzzy, nilai akhir tegangan delta lebih kecil dibandingkan dengan metode balancing lainnya tanpa fuzzy. Tapi, menggunakan fuzzy mamdani lebih baik daripada sugeno fuzzy.

Nilai SoC (State of Charge) juga dibandingkan. Metode Coloumb Counting diterapkan untuk mengestimasi SoC Battery Pack yang dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (5) [16].

$$SOC(t) = SOC(0) + \frac{\int_0^t I_{bat} \cdot dt}{Q_{rated}} \times 100\% \quad (5)$$

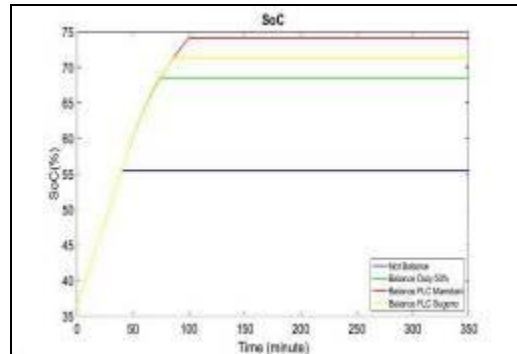
Keterangan :

$SOC(t)$ = SoC pada detik ke-t (%)

$SOC(0)$ = SoC Awal (%)

I_{bat} = Arus baterai pack (Ampere)

Q_{rated} = Kapasitas baterai pack (Ah)



Gambar 18. Hasil perbandingan SoC

Gambar 18 menunjukkan hasil SoC (State of Charge) baterai selama proses balancing dengan logika fuzzy. Dibandingkan dengan sistem non balance, balancing dengan nilai fixed duty cycle 50%, dan sistem balancing logika fuzzy sugeno. Hasil penelitian menunjukkan nilai akhir dari SoC yaitu Not balance system sebesar 55.41%, fixed duty balancing sebesar 68.45%, sugeno fuzzy balancing sebesar 71.35%, dan mamdani fuzzy balancing sebesar 74.68%. Dari data tersebut dapat disimpulkan bahwa dengan menggunakan fuzzy logic balancing, nilai akhir dari SoC lebih tinggi dibandingkan dengan metode balancing lainnya tanpa fuzzy. Menggunakan mamdani fuzzy lebih baik daripada sugeno fuzzy. Hasil data simulasi secara keseluruhan dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Perbandingan hasil balancing

Parameter	Mamdani flc	Sugeno flc	Tanpa Balancing	Fixed Duty 50%
SOC Awal (%)	36.34	36.34	36.34	36.34
Tegangan Pack Awal (VOLT)	16.18	16.18	16.18	16.18
Delta Voltage Awal (VOLT)	0.19643	0.19643	0.19643	0.19643
Energi Terisi (WH)	53.18	49.07	25.947	44.86
SOC Akhir (%)	74.08	71.35	55.41	68.45
Tegangan Pack Akhir (V)	19.86	19.72	18.7	19.55
Delta Voltage Akhir (V)	0.03446	0.03952	0.09921	0.0457

Hasil analisis data eksperimen untuk ketiga metode masing-masing ditunjukkan pada Tabel 3. SoC awal, tegangan paket dan tegangan delta dibuat pada kondisi yang sama. Tanpa sistem balancing, 25.947 Wh dibebankan ke baterai dan nilai akhir tegangan delta adalah 0.09921 Volt. Dengan sistem fix duty cycle balancing, 44.86 Wh dibebankan ke batter pack dan nilai akhir tegangan delta adalah 0,0457 Volt. Sebaliknya, dengan balancing logika fuzzy mamdani menunjukkan kinerja yang jauh lebih baik, 53.18 Wh diisi ke baterai dan nilai akhir tegangan delta adalah 0.0344. Sehingga dengan menggunakan fuzzy logic balancing diperoleh kapasitas charging yang lebih besar dan delta voltage yang kecil.

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

Makalah ini menyajikan sistem balancing baterai yang menggunakan logika fuzzy untuk mendapatkan durasi keseimbangan berdasarkan tegangan sel dan kondisi tegangan delta. Hal ini menunjukkan bahwa metode fuzzy balancing yang diusulkan dapat secara signifikan mengoptimalkan proses balancing selama proses charging. Metode yang diusulkan dibandingkan tanpa sistem balancing dan dengan sistem balancingan siklus tetap. Logika fuzzy Mamdani memiliki adaptif yang lebih baik pada semua kondisi tegangan sel dan tegangan delta. Energi pengisian dengan balancingan logika fuzzy mamdani dapat mencapai 53.18 Wh, logika fuzzy sugeno dapat mencapai 49.07 Wh, sedangkan dengan balancingan siklus tugas tetap hanya mencapai 44.86 Wh, dan tanpa balancingan hanya mencapai 25.947 karena salah satu sel yang tidak seimbang mencapai tegangan maksimum. Nilai tegangan delta terkecil juga didapatkan saat menggunakan logika fuzzy balancing mamdani yaitu sebesar 0.03466 Volt. Jika dibandingkan dengan metode lain yang dibahas, logika fuzzy mamdani adalah algoritma yang paling optimal untuk sistem balancingan baterai pack li-ion.

Perlu dilakukan pengamatan lebih lanjut terkait metode kontrol balancing untuk mengatur waktu periode balancing agar lebih optimal.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Lucian Andrei Perișoară, Ionuț Constantin Guran, and Dumitrel Cătălin Costache. A Passive Battery Management System for Fast Balancing of Four LiFePO4 Cells . SIITME. Iasi, Romania. 2018.
- [2] M Lukic, Ramesh C . Energy Storage Systems for Automotive Applications. IEEE. Vol.55 No.6 June 2008.
- [3] H. Liu, Z. Wei, W. He, and J. Zhao, 'Thermal issues about Li-ion batteries and recent progress in battery thermal management systems: A review', Energy Convers. Manag., vol. 150, no. May, pp. 304–330, 2017.

- [4] A. Garg, X. Peng, M. L. P. Le, K. Pareek, and C. M. M. Chin, 'Design and analysis of capacity models for Lithium-ion battery', *Measurement*, vol. 120, pp. 114–120, 2018
- [5] Roberto Di Rienzo, Marco Zeni, dkk. Passive balancing algorithm for charge equalization of series connected battery cells. IESE. Cagliari, Italy. 2020.
- [6] Davide Andrea. 2010. *Battery Management System for Large Lithium-Ion Battery Pack*. London: Artech House Publisher.
- [7] Changphao Piao, Zhaoguang Wang, dkk. *Lithium-Ion Battery Cell-Balancing Algorithm for Battery Management System Based on Real-Time Outlier Detection*. Hindawi Publishing. Volume 2015.
- [8] Amin, Kristian Ismail, dkk. *Passive Balancing Battery Management System using MOSFET Internal Resistance as balancing Resistor*. ICSEEA. Jakarta. 2017.
- [9] Mohamed Daowd, Noshin Omar, dkk. *Passive and Active Battery Balancing comparison based on MATLAB Simulation*. VPPC. Chicago. 2011.
- [10] Erika Loniza, Johannes A S, dkk. *Passive Balancing of Battery Lithium Polymer using Shunt Resistor Circuit Method*. ICST. Yogyakarta. 2015.
- [11] Van-Long Pham, Van- Tnh Duong dan Woojin Choi. *A Low Cost and Fast Cell-to-Cell Balancing Circuit for Lithium-Ion Battery String*. MDPI. Vol.9 No.2 Februari 2020.
- [12] Xiudong Cui, Weixiang Shen, dan Yunlei Zhang, Cungang Hu. *Fuzzy Logic Controller for Battery Balancing System for Lithium-Iron Phosphate Battery Pack*. ICEA. Siem Reap, Cambodia. 2018.
- [13] N. Nguyen, S. Oruganti, K. Na, and F. Bien, "An Adaptive Backward Control Battery Equalization System for Serially Connected LithiumIon Battery Packs," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, pp. 1-1, 2014.
- [14] Zachary Bosire O, Lijun Zhang, dan Dongbai Sun. *Review of Battery Cell Balancing Methodologies for optimizing Battery Pack Performance in Electric Vehicle*. IEEE Access. Vol. 7. 2019.
- [15] Edy. Victor Haryanto dan Fina. Nasari, "Perbandingan Penerapan Metode Fuzzy Mamdani Dan Sugeno Dalam Memprediksi Tingginya Pemakaian Listrik". *Seminar Nasional Informatika 2015.*, vol 1. hal 534-539. 2015.
- [16] Ines Baccouche, Asma Mlayah, dkk. *Implementation of a Coulomb Counting Algorithm for SOC estimation of Li-Ion Battery for Multimedia Applications*. SSD15. Mahdia, Tunisia. 2015.
- [17]