

Desain Sistem *Smart Charger* Berbasis Fuzzy untuk Optimasi Pengisian Baterai Li-Ion

Dwi Feriyanto¹, Agus Wantoro^{2*}, Dikpride Despa³, Nur Aminudin⁴

^{1,4}Rekayasa Perangkat Lunak, Fakultas Teknologi dan Informatika, Universitas Aisyah Pringsewu, Indonesia

²Teknik Informatika, Fakultas Teknologi dan Informatika, Universitas Aisyah Pringsewu, Indonesia

³Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung, Indonesia

¹dwiferiyanto@aisyahuniversity.ac.id, ^{2*}aguswantoro@aisyahuniversity.ac.id, ³despa@eng.unila.ac.id,

⁴nuraminudin@aisyahuniversity.ac.id

Abstrak

Perkembangan teknologi perangkat portabel dan kendaraan listrik menuntut sistem pengisian baterai yang efisien, aman, dan adaptif. Salah satu baterai yang paling populer dan banyak digunakan di kendaraan masyarakat Indonesia yaitu Li-Ion. Baterai ini memegang peranan krusial sebagai sumber energi utama. Proses pengisian baterai yang tidak dikontrol secara cerdas seperti penggunaan pengecasan konvensional menggunakan metode Constant Current/Constant Voltage (CC/CV) dapat mempercepat degradasi baterai, meningkatkan risiko overcharging, dan menurunkan efisiensi energi. Penelitian ini merancang dan mengimplementasikan sistem *Smart Charger* berbasis logika fuzzy untuk optimasi pengisian baterai lithium-ion (Li-Ion). Sistem mengintegrasikan sensor suhu dan tegangan dengan mikrokontroler untuk mengatur arus pengisian secara dinamis berdasarkan input parameter aktual seperti suhu baterai, tegangan awal, dan kapasitas sisa (*State of Charge*). Pengujian dilakukan pada berbagai skenario suhu lingkungan dan kondisi baterai. Hasil menunjukkan bahwa sistem fuzzy mampu memberikan kestabilan keluaran berdasarkan inputan yang diberikan dibandingkan dengan *charger* konvensional. Sistem akan menyesuaikan arus pengisian dengan kondisi baterai, khususnya pada suhu tinggi, tanpa intervensi manual. Penelitian ini membuktikan bahwa penerapan logika fuzzy dalam sistem pengisian baterai dapat memberikan peningkatan performa, keamanan, dan efisiensi. Sistem ini memiliki potensi untuk dikembangkan dan diterapkan pada berbagai perangkat elektronik serta dapat dikembangkan lebih lanjut dengan pendekatan *adaptive rule learning* dan integrasi antarmuka pemantauan *real-time*.

Kata kunci: Baterai Li-Ion, Logika Fuzzy, Pengisian Daya, *Smart Charger*;

1 Pendahuluan

Perkembangan teknologi perangkat elektronik portabel seperti smartphone, laptop, kendaraan listrik, hingga drone semakin pesat (Hasan et al., 2025). Di balik performa perangkat-perangkat ini, baterai lithium-ion (Li-Ion) memegang peranan krusial sebagai sumber energi utama (Peng et al., 2023). Baterai Li-Ion dipilih karena densitas energinya yang tinggi, tidak memiliki efek memori, serta memiliki efisiensi siklus pengisian yang baik (Utomo et al., 2024). Namun, umur pakai dan performa baterai Li-Ion sangat bergantung pada cara dan pola pengisian daya yang digunakan (Chen et al., 2023).

Pada kenyataannya, proses pengisian baterai yang tidak dikontrol secara cerdas seperti penggunaan pengecasan konvensional yang hanya menerapkan metode *Constant Current/Constant Voltage* (CC/CV) dapat mempercepat degradasi baterai, meningkatkan risiko *overcharging*, dan menurunkan efisiensi energi (Maheswaran et al., 2024). Di sinilah pentingnya penerapan teknologi cerdas yang mampu mengatur pengisian daya baterai secara adaptif dan dinamis sesuai dengan kondisi aktual baterai.

Logika fuzzy merupakan metode kecerdasan buatan yang mampu menangani ketidakpastian dan variasi input yang tidak eksak (S et al., 2024). Dengan pendekatan ini, sistem pengisian daya dapat mengakomodasi berbagai parameter seperti suhu, tegangan awal, arus, dan usia pakai baterai, sehingga proses pengisian menjadi lebih optimal, efisien, dan aman.

Dalam berbagai penelitian telah dikembangkan sistem pengisian baterai berbasis metode cerdas. Penelitian oleh (Zhang et al., 2022) menunjukkan bahwa sistem fuzzy dapat memperbaiki kestabilan suhu baterai saat pengisian. Sementara itu, studi oleh (Rahmawati et al., 2024) berhasil menggunakan fuzzy untuk mengendalikan arus secara real-time berdasarkan suhu dan tegangan. (Chopra & Gupta, 2023) menggabungkan Artificial Neural Network (ANN) dan fuzzy untuk prediksi *State of Health* (SoH) sehingga *rule set fuzzy* dapat diperbarui secara dinamis.

Namun, sebagian besar sistem yang telah dikembangkan hanya mengoptimalkan satu parameter, seperti arus atau tegangan, tanpa mempertimbangkan faktor lingkungan seperti suhu atau status kesehatan baterai. Selain itu, kebanyakan

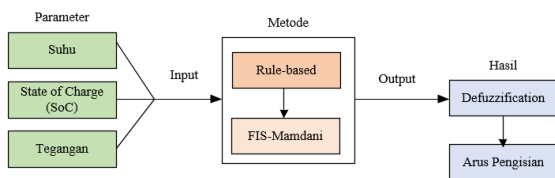
sistem tidak menyediakan fleksibilitas konfigurasi terhadap berbagai jenis baterai atau kapasitasnya.

Berdasarkan tinjauan pustaka, ditemukan bahwa belum banyak sistem pengecasan berbasis fuzzy yang mengintegrasikan multi-parameter input secara dinamis seperti suhu, tegangan awal, dan kapasitas sisa baterai. Masih terbatas optimasi *fuzzy rule-set* untuk skenario pengisian non-standar seperti *fast charging* atau pengisian pada suhu ekstrem. Logika fuzzy menunjukkan potensi signifikan dalam optimasi pengisian baterai Li-Ion. Kebanyakan studi masih terbatas pada satu atau dua parameter input dan rule base statis. Berdasarkan beberapa penelitian maka perlu dilakukan penelitian yang merancang prototipe *Smart Charger (SC)* berbasis fuzzy dengan multi-parameter input

Penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem SC berbasis fuzzy logic yang mempertimbangkan multi-parameter input, termasuk Suhu baterai, Tegangan *real-time*, dan Status kapasitas baterai

2 Metode

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental dengan pengembangan sistem prototipe SC berbasis fuzzy logic. Proses dimulai dari perancangan sistem, implementasi fuzzy controller, hingga pengujian pada berbagai kondisi. Desain prototipe ditampilkan pada Gambar 1.

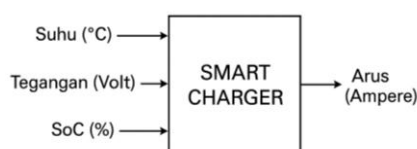


Gambar 1. Desain prototipe berbasis fuzzy

Penelitian ini menggunakan logika fuzzy dan FIS Mamdani. Logika fuzzy digunakan untuk memetakan suatu ruang masuk ke dalam suatu ruang output. Model yang dikembangkan terdiri dari tiga bagian, yaitu parameter sebagai masukan, metode sebagai perhitungan dan hasil adalah berupa keluaran dari model yang akan dihasilkan

2.1 Input Parameter

Parameter yang digunakan sebagai masukan pada sistem sebagai acuan dalam menentukan besaran arus. Tiga parameter yang digunakan yaitu Suhu (S), *State of Charge (SoC)*, dan Tegangan (T). Parameter *input* dan *output* ditampilkan pada Gambar 2.

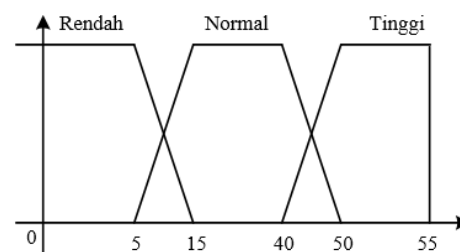


Gambar 2. Parameter *input* dan *output*

Suhu menjadi parameter utama dalam penentuan arus. Semakin tinggi suhu, maka arus yang akan diberikan semakin kecil. SoC adalah persentase kapasitas baterai yang tersisa dibandingkan dengan kapasitas maksimumnya. SoC adalah indikator penting untuk mengetahui seberapa banyak energi yang tersisa dalam baterai dan kapan perlu diisi ulang, mirip dengan indikator bahan bakar pada kendaraan konvensional. SoC membantu pengguna memperkirakan waktu pengisian, dan menjaga kinerja baterai (Xiong et al., 2018). Tegangan (T) adalah perbedaan potensial listrik antara kutub positif dan negatif baterai. Tegangan ini berfungsi mengukur tekanan yang mendorong elektron dari satu kutub ke kutub lainnya dan merupakan faktor penting dalam menentukan keluaran daya baterai, serta kebutuhan tegangan perangkat yang terhubung. Semakin tinggi tegangan maka semakin rendah ampere yang dikeluarkan (Waqar et al., 2023)

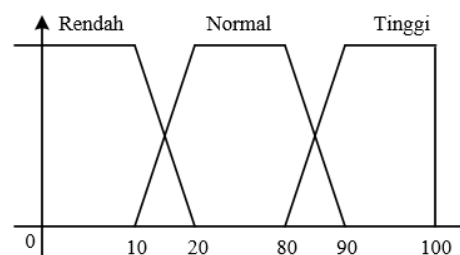
2.2 Membership Function

Fungsi keanggotaan menunjukkan pemetaan titik-titik masukan ke dalam nilai keanggotaannya yang memiliki interval nilai antara 0 sampai 1 (Ramírez et al., 2023). Fungsi keanggotaan ini dinyatakan dalam bentuk kurva yang dinyatakan dalam Gambar 3, 4, dan 5. Fungsi keanggotaan parameter keluaran dinyatakan dalam Gambar 6. Setiap *input* dan *output* akan dimodelkan dengan fungsi keanggotaan trapezoidal. Fungsi keanggotaan variabel input suhu ditampilkan pada Gambar 3.



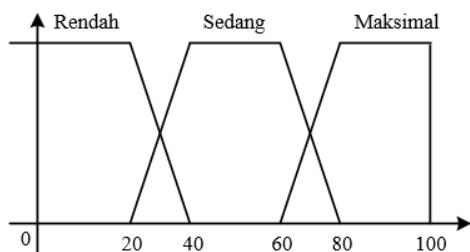
Gambar 3. Fungsi keanggotaan input "Suhu"

Gambar 3 menampilkan bentuk kurva keanggotaan menggunakan tiga sub-variabel yaitu Rendah, Normal, dan Tinggi. Domain sub-variabel Rendah (0-15), Normal (5-50), dan Tinggi (40-55) (Leng et al., 2015). Selanjutnya kami melakukan pembuatan fungsi keanggotaan untuk variabel input Tegangan yang ditampilkan pada Gambar 4.

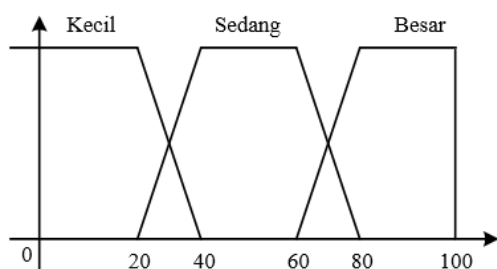


Gambar 4. Fungsi keanggotaan input "Tegangan"

Gambar 4 menampilkan bentuk kurva keanggotaan menggunakan tiga sub-variabel yaitu Rendah, Normal, dan Tinggi. Domain sub-variabel Rendah (0-20), Normal (10-90), dan Tinggi (80-100). Selanjutnya kami melakukan pembuatan fungsi keanggotaan untuk variabel input SoC yang ditampilkan pada Gambar 5.



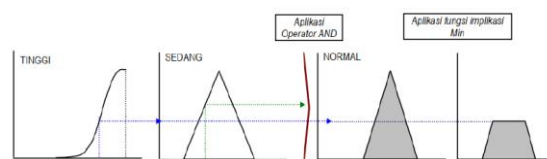
Gambar 5 menampilkan bentuk kurva keanggotaan menggunakan tiga sub-variabel yaitu Rendah, Normal, dan Maksimal. Domain sub-variabel Rendah (0-40), Normal (20-80), dan Maksimal (60-100). Selanjutnya kami melakukan pembuatan fungsi keanggotaan untuk variabel output "Arus" yang ditampilkan pada Gambar 6.



Gambar 6 menampilkan fungsi keanggotaan Arus dengan tiga sub yaitu , yaitu tekanan Kecil, Sedang dan Besar. Domain untuk sub Kecil (0-40), Sedang (20-80) dan Besar (60-100). Selanjutnya melakukan perhitungan menggunakan fungsi implikasi

2.3 Fungsi Implikasi

Aturan yang digunakan sebagai basis pengetahuan pada FIS Mamdani adalah If-Then dengan relasi AND (Ramírez et al., 2023). Banyaknya aturan FIS yang akan digunakan mengacu pada jumlah parameter masukan dan sub-parameter yang digunakan (Wang et al., 2023). Jumlah parameter masukan yang digunakan sebanyak tiga dan sub parameter tiga, maka diperoleh jumlah aturan FIS Mandani sebanyak 27 aturan. Aturan yang digunakan pada inferensi FIS ini dinyatakan dalam Tabel 1. Pembuatan aturan fuzzy dengan fungsi IF-Then dan operator AND dibuat menggunakan perangkat lunak Matlab. Fungsi implikasi MIN ditampilkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Fungsi implikasi menggunakan MIN

Perhitungan fungsi implikasi dari tiap aturan, digunakan metode MAX untuk melakukan komposisi antar semua aturan yang dihitung pada tampilan *Rule Viewer* seperti pada Gambar 9 untuk penentuan Arus.

2.4 Rule-based

Basis aturan (*rule-based*) fuzzy digunakan dalam sistem logika fuzzy untuk menyimpulkan keluaran berdasarkan variabel masukan (Varshney & Torra, 2023). Basis aturan (*rule-based*) digunakan untuk memastikan bahwa baterai beroperasi dalam kondisi yang aman dan efisien. Dengan memantau dan mengontrol suhu, SOC, dan tegangan, maka dapat memperpanjang umur baterai, mencegah kerusakan, dan memastikan kinerja yang optimal. Contoh aturan untuk menentukan besaran Arus:

- IF Suhu = "Rendah" AND Tegangan="Normal" AND SoC = "Maksimal" THEN Arus = "BESAR"
- IF Suhu = "Normal" AND Tegangan="Tinggi" AND SoC = "Sedang" THEN Arus = "KECIL"

Jumlah basis aturan didapatkan dari jumlah variabel dengan sub-variabel yaitu $3^3=27$. Detail basis aturan fuzzy (1-27) untuk penentuan arus ditampilkan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Basis aturan penentuan besaran arus

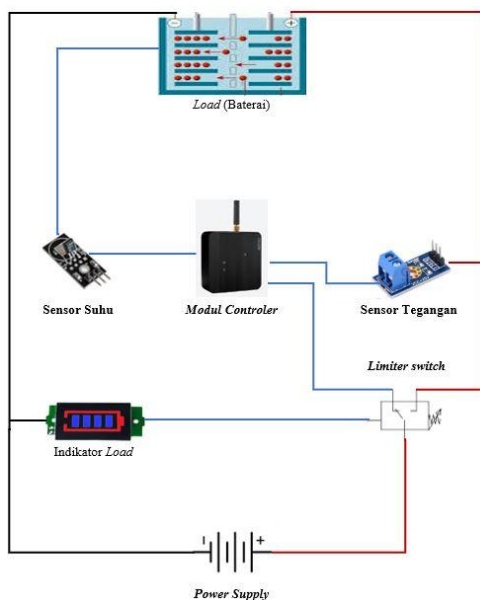
No	Suhu	Tegangan	SoC	Arus
1	Rendah	Rendah	Rendah	Besar
2	Rendah	Rendah	Sedang	Besar
3	Rendah	Rendah	Maksimal	Besar
4	Rendah	Normal	Rendah	Besar
5	Rendah	Normal	Sedang	Sedang
6	Rendah	Normal	Maksimal	Sedang
7	Rendah	Tinggi	Rendah	Besar
8	Rendah	Tinggi	Sedang	Sedang
9	Rendah	Tinggi	Maksimal	Sedang
10	Normal	Rendah	Rendah	Besar
11	Normal	Rendah	Sedang	Sedang
12	Normal	Rendah	Maksimal	Sedang
13	Normal	Normal	Rendah	Besar
14	Normal	Normal	Sedang	Sedang
15	Normal	Normal	Maksimal	Sedang
16	Normal	Tinggi	Rendah	Sedang
17	Normal	Tinggi	Sedang	Kecil
18	Normal	Tinggi	Maksimal	Kecil

No	Suhu	Tegangan	SoC	Arus
19	Tinggi	Rendah	Rendah	Besar
20	Tinggi	Rendah	Sedang	Sedang
21	Tinggi	Rendah	Maksimal	Sedang
22	Tinggi	Normal	Rendah	Sedang
23	Tinggi	Normal	Sedang	Kecil
24	Tinggi	Normal	Maksimal	Kecil
25	Tinggi	Tinggi	Rendah	Sedang
26	Tinggi	Tinggi	Sedang	Kecil
27	Tinggi	Tinggi	Maksimal	Kecil

Pembuatan aturan fuzzy dengan fungsi If-Then dan operator AND dibuat menggunakan perangkat lunak Matlab. Penampilan hasil pemetaan semua variabel masukan ke variabel keluaran dinyatakan dalam *Matlab Surface Viewer* pada Gambar 10-12.

3 Hasil dan Pembahasan

Penelitian ini menghasilkan desain prototipe pengecasan cerdas (*Smart-Charge*). Desain sistem ini dirancang untuk mengelola pengisian daya perangkat elektronik, seperti ponsel agar lebih efisien dan cerdas. Tujuannya adalah untuk mengoptimalkan penggunaan energi, melindungi baterai, dan mengurangi biaya. Prototipe ditampilkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Desain prototipe “Smart Charge”

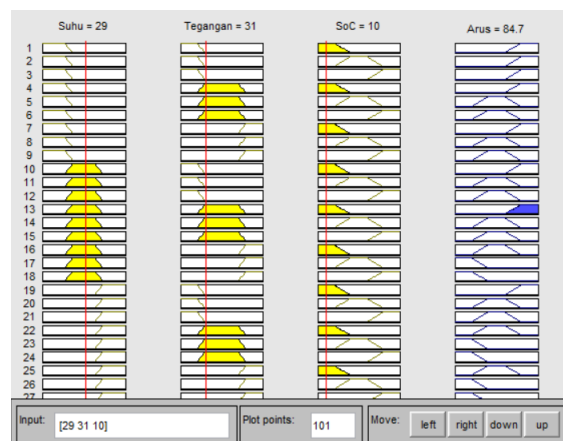
Sistem terdiri dari beberapa komponen utama:

- 1) Sensor suhu dan tegangan: digunakan untuk mendeteksi kondisi aktual baterai secara *real-time*.
- 2) Mikrokontroler (Arduino/ESP32): digunakan mengeksekusi algoritma fuzzy logic dan mengontrol proses pengisian.

- 3) Modul *driver* pengisian: digunakan mengatur arus dan tegangan sesuai *output* dari fuzzy controller.
- 4) Baterai Li-Ion: objek utama penelitian dengan pengukuran Suhu, *State of Charge* (SoC) dan Tegangan.

Skema pengujian dilakukan (Gambar 9) untuk menguji besaran arus yang dikeluarkan sistem dengan skenario:

- Pengisian pada suhu lingkungan (29°C)
- Tegangan listrik (31 Volt)
- Status baterai dari SoC (10%)



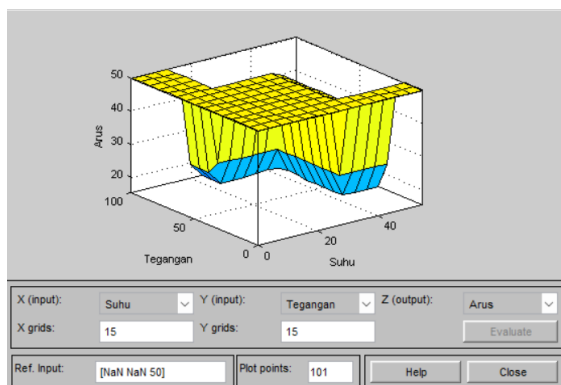
Gambar 9. Rule viewer penentuan besaran arus

Hasil input dari parameter (Suhu, Tegangan, SoC) yang telah dilakukan pengujian menghasilkan keluaran berupa Arus. Hasil keluaran ditampilkan dalam Tabel 2.

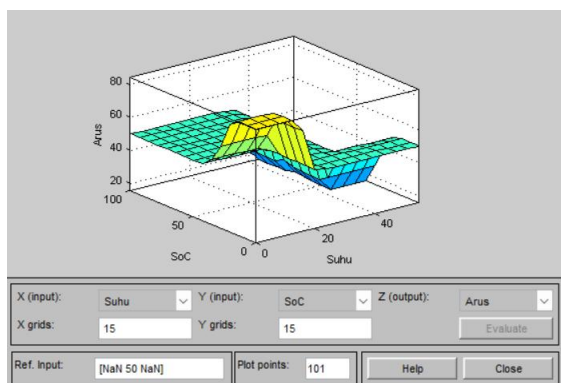
Tabel 2. Pengujian model berdasarkan inputan

Suhu (C)	Parameter Tegangan (V)	SoC (%)	Output Arus (mA)
29	31	10	84,7
17	28	22	76,3
30	60	45	50
41	75	38	25
27	36	16	84,7
25	30	29	64,3
33	31	32	59,7
27	75	28	52,2
36	60	43	45,6
35	55	78	50
30	48	25	71,9
28	51	80	50
31	64	15	84,7

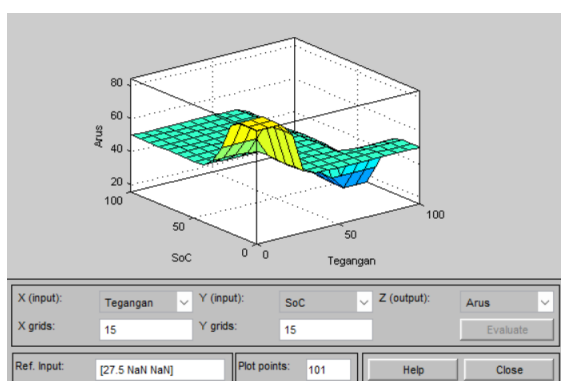
Berdasarkan Tabel 2, terlihat jika suhu rendah (0-20), Tegangan Normal (20-80), dan Soc Maksimal (80-100) maka *output* arus akan kecil. Untuk melihat korelasi hubungan antara parameter input dan *output* dapat menggunakan *Surface Viewer* (SV) (Barini et al., 2019). Visualisasi SV berguna untuk melihat pemetaan antara variabel *input* dan variabel *output* yang ditampilkan pada Gambar 10-12.



Gambar 10. Suhu, Tegangan, dan Arus



Gambar 11. Suhu, SoC, dan Arus



Gambar 12. Tegangan, SoC, dan Arus

4 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pengujian menggunakan prototype, diharapkan sistem *Smart Charger* berbasis fuzzy logic mampu mengatur proses pengisian baterai Li-Ion secara adaptif berdasarkan kondisi suhu, tegangan, dan kapasitas baterai. Penggunaan fuzzy logic diharapkan dapat mencegah *overcharging* dan *overheating*, serta menjaga stabilitas pengisian bahkan pada suhu lingkungan tinggi. Dibandingkan dengan charger konvensional, sistem fuzzy mampu menjaga suhu kerja baterai dalam batas aman. Sistem ini layak untuk dikembangkan lebih lanjut dan diimplementasikan pada aplikasi nyata seperti perangkat elektronik portabel maupun kendaraan listrik.

Untuk pengembangan dan penelitian lebih lanjut, disarankan mengembangkan *rule base fuzzy*

secara dinamis dengan integrasi metode pembelajaran mesin agar sistem dapat belajar dari data historis pengisian. Menguji sistem pada berbagai jenis dan kapasitas baterai Li-Ion untuk meningkatkan generalisasi. Melakukan integrasi antarmuka pengguna (*user interface*) untuk pemantauan data pengisian secara *real-time* melalui perangkat lunak. Meningkatkan efisiensi konversi daya dengan penambahan modul *switching charger* berbasis PWM yang lebih efisien

Daftar Pustaka:

- Barini, G. O., Ngoo, L. M., & Mwangi, R. W. (2019). Application of a fuzzy unit hypercube in cardiovascular risk classification. *Soft Computing*, 23(23), 12521–12527. <https://doi.org/10.1007/s00500-019-03802-0>
- Chen, G., Shi, Y., Ye, H., & Kang, H. (2023). Experimental study on phase change material based thermal management design with adjustable fins for lithium-ion battery. *Applied Thermal Engineering*, 221, 119808. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.119808>
- Chopra, P., & Gupta, M. (2023). *Fuzzy Logic and ANN in an Artificial Intelligent Cloud: A Comparative Study BT - Intelligent Communication Technologies and Virtual Mobile Networks* (G. Rajakumar, K.-L. Du, & Á. Rocha (eds.); pp. 559–570). Springer Nature Singapore.
- Hasan, M. M., Haque, R., Jahirul, M. I., Rasul, M. G., Fattah, I. M. R., Hassan, N. M. S., & Mofijur, M. (2025). Advancing energy storage: The future trajectory of lithium-ion battery technologies. *Journal of Energy Storage*, 120, 116511. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.est.2025.116511>
- Leng, F., Tan, C. M., & Pecht, M. (2015). Effect of Temperature on the Aging rate of Li Ion Battery Operating above Room Temperature. *Scientific Reports*, 5, 1–12. <https://doi.org/10.1038/srep12967>
- Maheswaran, V. D., Carter, S. B. R., Vijay, V., & Raj, S. V. (2024). Study and Implementation of Constant Current-Constant Voltage(CC-CV) Charger for Lithium-Ion(Li-Ion) Battery Using Machine Learning(ML). *2024 IEEE 4th International Conference on Sustainable Energy and Future Electric Transportation (SEFET)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/SEFET61574.2024.10717980>
- Peng, J., Meng, J., Wu, J., Deng, Z., Lin, M., Mao, S., & Stroe, D.-I. (2023). A comprehensive overview and comparison of parameter benchmark methods for lithium-ion battery application. *Journal of Energy Storage*, 71, 108197.

- <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108197>
- Rahmawati, Y., Fadhilla, K. L., & Kadarina, T. M. (2024). Analysis of Power Quality in Low Voltage Switch Panels in Real-Time Based on IoT Using the Fuzzy Logic Method. *Journal of Informatics and Telecommunication Engineering*, 7(2), 486–501. <https://doi.org/10.31289/jite.v7i2.10750>
- Ramírez, M., Melin, P., & Castillo, O. (2023). Interval Type-3 Fuzzy Aggregation for Hybrid-Hierarchical Neural Classification and Prediction Models in Decision-Making. *Axioms*, 12(10), 906. <https://doi.org/10.3390/axioms12100906>
- S, S. C. V, A., K., S., M., & Venkateshkumar, M. (2024). Photovoltaic Charger with Fuzzy Logic Control for Lithium-ion Battery Charging. *2024 2nd International Conference on Cyber Physical Systems, Power Electronics and Electric Vehicles (ICPEEV)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICPEEV63032.2024.10931933>
- Utomo, S. B., Imron, A. M. N., Sujanarko, B., Putra, M. G., Irawan, J. F., & Fitri, Z. E. (2024). Fuzzy-Logic Based Fast-Charger Design For Lithium Polymer Battery Charging. *2024 IEEE 2nd International Conference on Electrical Engineering, Computer and Information Technology (ICEECIT)*, 227–232. <https://doi.org/10.1109/ICEECIT63698.2024.10859512>
- Varshney, A. K., & Torra, V. (2023). Literature Review of the Recent Trends and Applications in Various Fuzzy Rule-Based Systems. *International Journal of Fuzzy Systems*, 25(6), 2163–2186. <https://doi.org/10.1007/s40815-023-01534-w>
- Wang, H. T., Chiang, K. L., Pan, N. F., & Lin, Y. F. (2023). The Road to Sustainable Logistics: Using the Fuzzy Nonlinear Multi-Objective Optimization Model to Build Photovoltaic Stations in Taiwan's Logistics Centers. *Sustainability (Switzerland)*, 15(23). <https://doi.org/10.3390/su152316449>
- Waqar, I., Azizi, Z., Nikmal, P., Rafi, R., Ulfat, W., Abid, O., Niazi, M. J., & Khan, Z. (2023). Comparison between Electromotive Force and Electric Potential Difference. *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education*, 14(01), 236–242.
- Xiong, R., Cao, J., Yu, Q., He, H., & Sun, F. (2018). Critical Review on the Battery State of Charge Estimation Methods for Electric Vehicles. *IEEE Access*, 6, 1832–1843. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2780258>
- Zhang, D., Zhao, W., Wang, L., Chang, X., Li, X., & Wu, P. (2022). Evaluation of the State of Health of Lithium-Ion Battery Based on the Temporal Convolution Network. *Frontiers in Energy Research*, 10(June), 1–8. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.929235>