

## PENERAPAN ADAPTIVE NEURO-FUZZY INFERENCE SYSTEM UNTUK ESTIMASI STATE OF CHARGE BATERAI LEAD ACID

Sutedjo<sup>1)</sup>, Diah Septi Yanaratri<sup>1)</sup>, Shintia Devi Amanda<sup>1)</sup>, Irianto<sup>1)</sup> dan Renny Rakhmawati<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Teknik Elektro Industri, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya, Jl. Raya ITS, Keputih, Sukolilo, Surabaya, 60111  
E-mail: [diahsepti@pens.ac.id](mailto:diahsepti@pens.ac.id)

### Abstract

Excessive and uncontrolled battery charging can lead to rapid overheating and damage to the battery. The State of Charge (SOC) indicates the proportion of remaining capacity relative to the nominal capacity. Understanding the SOC value helps prevent excessive battery charging. This study implements the ANFIS method for estimating the SOC of lead-acid batteries. The combination of ANN and fuzzy logic allows predictions based on the provided training data and decision-making based on applied rules. A buck converter with PI control using CC-CV method is employed to maintain a consistent current and voltage during battery charging. These parameters serve as training data for ANFIS to estimate SOC value. Research results demonstrate that the PI control effectively maintains constant current and voltage charging. Additionally, ANFIS exhibits the capability to estimate battery SOC with an average inaccuracy of 0.121% on simulations and 0.2% on hardware testing.

**Keywords:** *state of charge, ANFIS, lead-acid, buck converter, PI, CC-CV*

### Abstrak

Pengisian baterai yang berlebih dan tidak terkontrol dapat menyebabkan baterai cepat panas dan rusak. State of Charge (SOC) adalah rasio kapasitas tersisa dibandingkan dengan kapasitas nominal. Dengan mengetahui nilai SOC, pengisian baterai yang berlebihan dapat dihindari. Dalam penelitian ini, estimasi SOC baterai lead-acid diimplementasikan menggunakan metode ANFIS. Kombinasi ANN dan logika fuzzy memungkinkan prediksi berdasarkan data pelatihan dan pengambilan keputusan sesuai aturan yang diterapkan. Buck converter dengan kontrol PI metode CC-CV digunakan untuk menjaga arus dan tegangan pengisian baterai tetap konstan. Kedua parameter ini menjadi data pelatihan ANFIS untuk memperkirakan nilai SOC. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kontrol PI berfungsi efektif dalam menjaga arus dan tegangan pengisian tetap konstan. ANFIS juga mampu memperkirakan nilai SOC baterai dengan ketidakkuratan rata-rata sebesar 0.121% pada simulasi dan 0.2% pada pengujian alat.

**Kata Kunci:** *state of charge, ANFIS, lead-acid, buck converter, PI, CC-CV*

## PENDAHULUAN

Baterai *lead acid* merupakan salah satu media penyimpanan energi yang banyak digunakan karena biaya bahan baku yang relatif rendah, ketangguhan baterai, efisiensi yang tinggi yaitu 75-80%, dan dapat didaur ulang (KITARONKA, Sefu, 2022). Baterai *lead acid* sering digunakan untuk penyimpanan daya skala kecil, menengah dan besar dan dapat dikombinasikan dengan sumber energi terbarukan seperti sistem

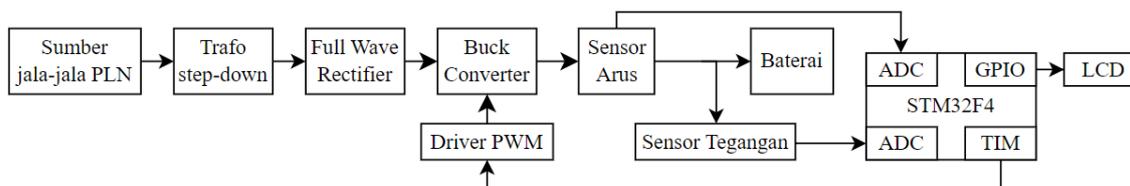
fotovoltaik. Pengisian daya yang berlebihan dapat mengurangi masa pakai baterai dan menyebabkan kerusakan baterai yang parah. Salah satu cara untuk menghindari kerusakan baterai adalah dengan membuat sistem pengisian baterai terkontrol yang dilengkapi dengan estimasi *State of Charge* (SOC) untuk menentukan energi/ kapasitas yang tersisa dalam baterai.

Berbagai metode telah dibuat untuk memperkirakan SOC. Metode *open-circuit voltage* (OCV) merupakan teknik berbasis pengukuran langsung yang banyak digunakan, diperoleh berdasarkan tegangan baterai dalam kondisi ketika baterai terputus selama lebih dari dua jam yang dapat menjadi tidak praktis atau terlalu memakan waktu untuk diimplementasikan pada baterai (Danko et al., 2019). Sistem adaptif mendesain diri mereka sendiri untuk menyesuaikan SOC secara otonom berdasarkan data pelatihan yang diberikan. Metode hibrida menggunakan setiap metode estimasi secara bersamaan dan secara umum memberikan estimasi SOC yang lebih baik dibandingkan dengan metode individual. Pada sistem adaptif, untuk mencapai estimasi nilai SOC yang tepat, memanfaatkan sejumlah besar data pelatihan baterai berkualitas tinggi sangat penting (Al-Majidi et al., 2019).

Pada penelitian ini, sistem pengisian daya diimplementasikan menggunakan konverter yang terkontrol agar arus dan tegangan pengisian baterai stabil sesuai dengan yang diinginkan dan dilengkapi dengan estimasi SOC menggunakan ANFIS (*Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System*) yang merupakan penggabungan dari metode ANN dan Logika Fuzzy. Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan simulasi pada perangkat lunak MATLAB dan pembuatan perangkat keras.

## METODE PENELITIAN

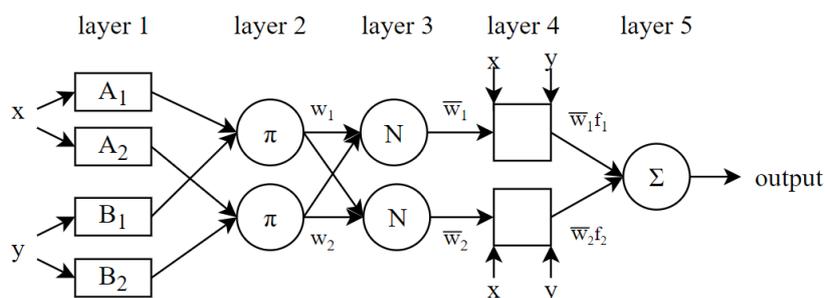
Sistem pengisi daya baterai *lead acid* 12V 12Ah yang terkontrol dan dilengkapi dengan estimasi SOC metode ANFIS dirangkai seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram blok sistem

Gambar 1 menunjukkan gambaran umum sistem *battery charger* pada penelitian ini, yang menggunakan sumber PLN yang diturunkan tegangannya menggunakan trafo *step-down* dan disearahkan menggunakan *Full Wave Rectifier* (FWR). Keluaran dari FWR akan menjadi masukan untuk konverter buck. Keluaran konverter diatur menggunakan kontroler PI dengan harapan arus keluaran konstan 1,2 A kemudian beralih ke tegangan keluaran konstan 13,8 V. Nilai arus, tegangan pengisian baterai dan hubungan SOC-OCV akan digunakan sebagai data pelatihan ANFIS untuk mengestimasi SOC.

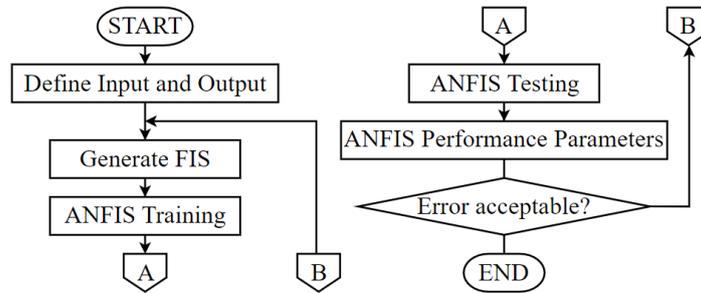
ANFIS merupakan metode yang menggabungkan jaringan syaraf tiruan (JST) dan Fuzzy Inference System (FIS). Logika fuzzy tidak bisa menyimpan data numerik tetapi menawarkan keuntungan untuk mewakili aspek kualitatif dari pengetahuan manusia dan pengambilan keputusan melalui penerapan basis aturan yang sederhana. ANN, di sisi lain, dapat mempelajari dan mengenali pola serta memecahkan masalah dengan akurasi tinggi melalui proses pembelajaran. Namun, ANN memiliki kemampuan yang terbatas untuk memproses sistem yang diwakili oleh informasi linguistik. Menggabungkan ANN dan FIS memberikan keuntungan dan mengatasi kelemahan dari kedua metode tersebut, sehingga memungkinkan metode ANFIS untuk mendapatkan keuntungan dari pengetahuan numerik dan linguistik (Sahoo & Baitalik, 2022).



Gambar 2. Arsitektur ANFIS

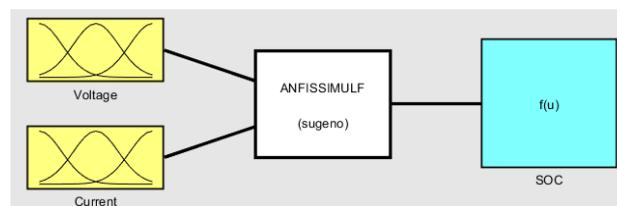
Gambar 2 menunjukkan struktur jaringan dari ANFIS untuk dua *input* satu *output*, yang terdiri dari lima *layer* dimana  $x$  dan  $y$  merupakan variabel *input*,  $A_i$  dan  $B_i$  merupakan set fuzzy, dan  $S$  adalah variabel *output*. *Layer* 1 merupakan lapisan fuzzifikasi yang menyediakan *membership function* (MF) untuk setiap *input*. *Output* dari *layer* ini ditentukan oleh derajat keanggotaan yang diberikan oleh *input* MF. *Layer* 2 merupakan lapisan *membership* dilambangkan dengan  $\pi$  yang merupakan perkalian dari semua *input* untuk menghitung *firing strength* untuk setiap *rule*. *Layer* 3 merupakan lapisan normalisasi yang merepresentasikan bobot *firing strength* *input* yang

telah dinormalisasi oleh neuron yang dilambangkan dengan N, diperoleh dengan menghitung rasio *firing strength* dari lapisan sebelumnya dengan jumlah semua *firing strength*. Layer 4 merupakan lapisan defuzzyfikasi dimana *output* setiap *node* diperoleh dengan mengkalikan *output* dengan *firing strength* yang dinormalisasi di *layer 3*. Layer 5 merupakan lapisan penjumlahan yang dibuat dengan menjumlahkan semua sinyal yang diterima sebagai kontribusi total dari setiap *rule* (Abu Bakar et al., 2022).



Gambar 3. Flowchart ANFIS

Gambar 3 menunjukkan proses ANFIS dimana langkah awal yang perlu dilakukan yaitu memasukkan data training pada *tools* ANFIS sehingga nantinya desain logika fuzzy akan terbentuk seperti yang ada pada Gambar 4 dimana digunakan FIS tipe Sugeno dengan dua *input* dan satu *output*.



Gambar 4. Desain FIS

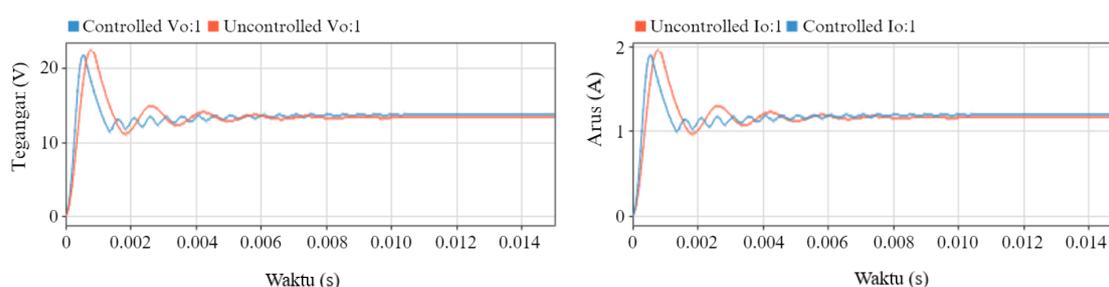
Pada penelitian ini digunakan keanggotaan tipe segitiga dengan jumlah keanggotaan 7 x 7 untuk *input* (VL, L, LM, M, MH, H, VH) dan tipe keanggotaan konstan sejumlah 49 untuk *output*-nya (outmf) sehingga dihasilkan 49 *rules*, ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1  
Rules ANFIS

| I \ V | VL      | L       | LM      | M       | MH      | H       | VH      |
|-------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| VL    | outmf1  | outmf2  | outmf3  | outmf4  | outmf5  | outmf6  | outmf7  |
| L     | outmf8  | outmf9  | outmf10 | outmf11 | outmf12 | outmf13 | outmf14 |
| LM    | outmf15 | outmf16 | outmf17 | outmf18 | outmf19 | outmf20 | outmf21 |
| M     | outmf22 | outmf23 | outmf24 | outmf25 | outmf26 | outmf27 | outmf28 |
| MH    | outmf29 | outmf30 | outmf31 | outmf32 | outmf33 | outmf34 | outmf35 |
| H     | outmf36 | outmf37 | outmf38 | outmf39 | outmf40 | outmf41 | outmf42 |
| VH    | outmf43 | outmf44 | outmf45 | outmf46 | outmf47 | outmf48 | outmf49 |

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Simulasi sistem charging baterai menghasilkan tegangan DC dengan *ripple* yang kecil dan arus serta tegangan yang konstan 1,199 A dan 13,78 V karena kontrol PI yang mana untuk nilai  $K_p$  dan  $K_i$  yang digunakan yaitu 5,16 dan 2029,99. Tanpa kontrol PI, nilai arus dan tegangan yang didapatkan adalah 1,163 A dan 13,38 V, sedangkan target arus dan tegangan charging adalah 1,2 A 13,8 V. Nilai  $K_p$  dan  $K_i$  didapatkan melalui PI analitik. Gambar 5 menunjukkan bentuk gelombang tegangan dan arus *charging* dengan kontrol dan tanpa kontrol PI.



Setelah didapatkan sistem *charging* baterai sesuai dengan perencanaan, dilakukan pengambilan data arus, tegangan dan SOC baterai yang nantinya digunakan sebagai data training ANFIS untuk dilakukan pembelajaran pola berdasarkan data pelatihan yang diberikan. Setelah desain FIS dibuat, dilakukan *training* dan *testing* data ANFIS dengan total 198 data *input* dan 99 data *output*, dengan hasil rata-rata error yang sangat kecil yakni 0,1256.

Tabel 2

Perbandingan hasil sampling data simulasi estimasi SOC dengan metode ANFIS dan FF-NN

| Tegangan (V) | Arus (A) | SOC (%) |       |       | Error(%) |       |
|--------------|----------|---------|-------|-------|----------|-------|
|              |          | Baterai | ANFIS | FF-NN | ANFIS    | FF-NN |
| 13.23        | 1.199    | 50      | 49.90 | 50.30 | 0.199    | 0.595 |
| 13.36        | 1.199    | 55      | 55.13 | 55.05 | 0.229    | 0.099 |
| 13.47        | 1.199    | 60      | 60    | 59.98 | 0.002    | 0.029 |
| 13.56        | 1.199    | 65      | 64.86 | 64.79 | 0.22     | 0.329 |
| 13.65        | 1.199    | 70      | 70.1  | 70.12 | 0.136    | 0.172 |
| 13.72        | 1.199    | 75      | 74.82 | 74.73 | 0.234    | 0.358 |
| 13.78        | 1.166    | 80      | 80.04 | 80.04 | 0.05     | 0.047 |
| 13.78        | 1.044    | 85      | 84.99 | 84.99 | 0.01     | 0.015 |
| 13.79        | 0.9282   | 90      | 89.98 | 90    | 0.019    | 0.005 |
| 13.79        | 0.8152   | 95      | 95    | 95.01 | 0.001    | 0.01  |

Tabel 2 menunjukkan sampling data estimasi SOC baterai menggunakan metode ANFIS dengan didapatkan error rata-rata 0,121%. Pada penelitian ini, dilakukan

perbandingan estimasi SOC metode ANFIS dengan Feed-Forward Neural Network (FF-NN). FF-NN dibuat dengan total 10 *hidden layer*, 1 *output layer* dan 1000 epoch. Dari simulasi, dapat dilihat bahwa ANFIS menghasilkan error estimasi yang lebih kecil dibandingkan FF-NN, dengan error ANFIS 0,121% sedangkan FF-NN 0,132%.

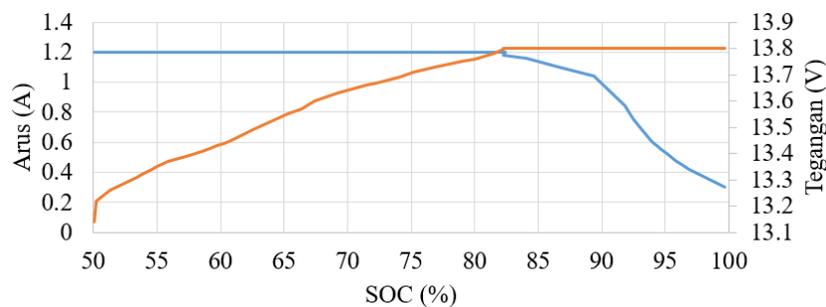
Setelah simulasi selesai dilakukan, dilakukan pembuatan alat charging baterai dengan estimasi SOC metode ANFIS yangmana dari hasil pengujian, dengan menggunakan kontrol PI dengan nilai Kp CC 0,6; Ki CC 1,2; Kp CV 0,9; Ki CV 0,6, didapatkan nilai arus *charging* yang fluktuasi antara 1,18 – 1,22 A dan tegangan *charging* yang fluktuasi antara 13,79 – 13,99 V yangmana kedua nilai ini mendekati dengan nilai arus dan tegangan *charging* target yaitu 1,2 A 13,8 V, kemudian dilanjutkan dengan pengambilan data untuk *training* ANFIS. Pada *hardware*, pembuatan ANFIS dilakukan dengan pemrograman menggunakan *software* Keil uVision yang nantinya dimasukkan ke mikrokontroler STM32F407VGTx.

Tabel 3  
Hasil sampling data *hardware* estimasi SOC

| Waktu<br>(menit) | Tegangan<br>(V) | Arus<br>(A) | SOC (%) |       | Error<br>(%) |
|------------------|-----------------|-------------|---------|-------|--------------|
|                  |                 |             | Baterai | ANFIS |              |
| 0                | 13.14           | 1.2         | 50.04   | 50.07 | 0.06%        |
| 15               | 13.26           | 1.2         | 51.29   | 51.26 | 0.06%        |
| 30               | 13.34           | 1.2         | 54.61   | 54.61 | 0.00%        |
| 45               | 13.39           | 1.2         | 57.28   | 57.39 | 0.19%        |
| 60               | 13.43           | 1.2         | 59.72   | 59.68 | 0.07%        |
| 75               | 13.45           | 1.2         | 60.81   | 60.59 | 0.36%        |
| 90               | 13.55           | 1.2         | 65.28   | 65.26 | 0.03%        |
| 105              | 13.6            | 1.2         | 67.44   | 67.44 | 0.00%        |
| 120              | 13.67           | 1.2         | 72.28   | 72.13 | 0.21%        |
| 135              | 13.73           | 1.2         | 76.79   | 76.88 | 0.12%        |
| 150              | 13.78           | 1.2         | 81.5    | 81.49 | 0.01%        |
| 165              | 13.8            | 1.16        | 84.06   | 82.77 | 1.53%        |
| 180              | 13.8            | 1.04        | 89.38   | 89.43 | 0.06%        |
| 195              | 13.8            | 0.85        | 91.72   | 91.93 | 0.23%        |
| 210              | 13.8            | 0.76        | 92.45   | 92.51 | 0.06%        |
| 225              | 13.8            | 0.62        | 93.76   | 93.65 | 0.12%        |
| 240              | 13.8            | 0.56        | 94.59   | 94.68 | 0.10%        |
| 255              | 13.8            | 0.49        | 95.67   | 95.53 | 0.15%        |
| 270              | 13.8            | 0.42        | 96.87   | 97.01 | 0.14%        |
| 285              | 13.8            | 0.36        | 98.3    | 98.34 | 0.04%        |
| 300              | 13.8            | 0.3         | 99.67   | 99.67 | 0.00%        |

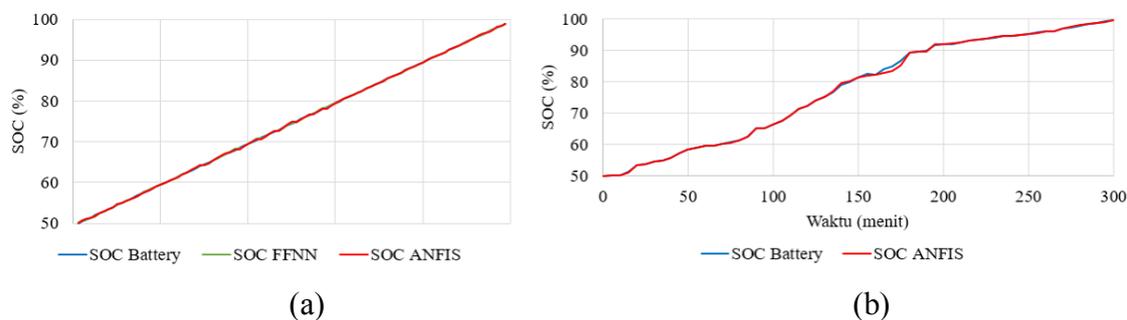
Tabel 3 menunjukkan sampling data estimasi SOC baterai menggunakan metode ANFIS pada *hardware* dengan total 70 data *input* dan 35 data *output*. Dari pengujian

yang telah dilakukan, didapatkan nilai rata-rata *error* ANFIS dalam melakukan estimasi SOC sebesar 0,2%.



Gambar 5. Hubungan arus dan tegangan *charging* terhadap SOC baterai

Gambar 6 menunjukkan grafik arus dan tegangan *charging* terhadap SOC yang mana pada saat SOC 50%, *charging* berada dalam kondisi *constant current* dan pada SOC 82,5% *charging* berubah kondisi menjadi *constant voltage*.



Gambar 6. Grafik estimasi SOC pada (a) simulasi (b) *hardware*

Dari Gambar 7, dapat dilihat bahwa hanya terdapat perbedaan yang sangat kecil antara grafik estimasi SOC ANFIS dengan SOC aktual baterai. Perbedaan kecil ini terjadi karena sedikitnya data pelatihan yang didapatkan dan digunakan, sedangkan ANFIS membutuhkan banyak sekali data pelatihan yang akurat, pengelompokan yang sesuai serta *rule base* yang benar untuk melakukan estimasi.

## SIMPULAN

Sebuah sistem pengisian baterai lead-acid menggunakan konverter buck dengan kontrol PI telah disimulasikan dan dibuat. Dengan menggunakan sumber PLN 220 V, diperoleh nilai arus dan tegangan *charging* konstan sebesar 1,199 A 13,78 V pada simulasi dan 1,2 A 13,8 V pada *hardware*, yang mana kedua nilai ini sangat mendekati nilai perencanaan arus *charging* baterai 1,2 A dan tegangan 13,8 V. Data arus dan

tegangan *charging* diambil sebagai *input* sedangkan data SOC dari 50% hingga 99% diambil sebagai *output* data pelatihan ANFIS. Berdasarkan simulasi pengujian data yang dilakukan dengan total 198 data *input* dan 99 data *output*, didapatkan nilai *state of charge* baterai menggunakan metode ANFIS dengan rata-rata *error* sebesar 0,121%. Pada simulasi, estimasi SOC ANFIS dibandingkan dengan metode FF-NN dengan hasil bahwa ANFIS memiliki keakuratan dalam mengestimasi SOC lebih baik dibandingkan FF-NN dengan *error* 0,132%. Dengan jumlah data pelatihan yang terbatas, ANFIS lebih unggul karena mampu belajar dari dataset pelatihan yang lebih kecil dibandingkan dengan arsitektur FF-NN yang lebih kompleks. Pada pengujian *hardware* dengan total 70 data *input* dan 35 data *output*, didapatkan rata-rata *error* ANFIS dalam mengestimasi SOC sebesar 0,2% sehingga dapat disimpulkan bahwa ANFIS berfungsi dengan sangat baik dalam mengestimasi nilai *state of charge* baterai *lead acid* secara akurat baik dalam simulasi maupun dalam *hardware*.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Abu Bakar, M. A., Ab Ghani, A. T., Abdullah, M. L., Ismail, N., & Aziz, S. A. (2022). Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System(ANFIS) Formulation to Predict Students' Neuroscience Mechanistic: A Concept of an Intelligent Model to Enhance Mathematics Learning Ability. *TEM Journal*, 1942–1951. <https://doi.org/10.18421/TEM114-63>
- Al-Majidi, S. D., Abbod, M. F., & Al-Raweshidy, H. S. (2019). Design of an Efficient Maximum Power Point Tracker Based on ANFIS Using an Experimental Photovoltaic System Data. *Electronics*, 8(8), 858. <https://doi.org/10.3390/electronics8080858>
- Danko, M., Adamec, J., Taraba, M., & Drgona, P. (2019). Overview of batteries State of Charge estimation methods. *Transportation Research Procedia*, 40, 186–192. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.029>
- KITARONKA, Sefu. (2022). *Lead-Acid Battery*. <https://doi.org/10.6084/M9.FIGSHARE.19115057>
- Sahoo, A., & Baitalik, S. (2022). Fuzzy Logic, Artificial Neural Network, and Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Methodology for Soft Computation and Modeling of Ion Sensing Data of a Terpyridyl-Imidazole Based Bifunctional Receptor. *Frontiers in Chemistry*, 10, 864363. <https://doi.org/10.3389/fchem.2022.864363>