

Sistem Cerdas untuk Menganalisis Parameter Pengisian Cepat Baterai Kendaraan Listrik menggunakan Raspberry Pi 4

Advent Samuel Halomoan ^{a,1}, Amperawan ^{a,2,*}, Sabial Rasyad ^{a,3}

^aProgram Studi D4 Teknik Elektro, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Sriwijaya

¹ adventsamuelhalomoan36@gmail.com; ²amperawan@polsri.ac.id*; ³sabial_rasyad@polsri.ac.id

* Penulis Koresponden

INFO ARTIKEL

Histori Artikel

Pengajuan 2025-6-23
Diperbaiki 2025-09-16
Diterima 2025-10-10

Kata Kunci

Kendaraan Listrik,
LSTM-RNN, Manajemen
Baterai,
Pengisian Cepat,
Raspberry Pi

ABSTRAK

Kemajuan teknologi kendaraan listrik (EV) mendorong kebutuhan pengisian baterai yang cepat dan efisien. Namun, pengisian cepat dapat menyebabkan masalah seperti panas berlebih, degradasi sel, dan penurunan performa baterai. Penelitian ini mengembangkan sistem cerdas berbasis Long Short-Term Memory Recurrent Neural Network (LSTM-RNN) yang dijalankan di Raspberry Pi untuk memantau dan memprediksi parameter pengisian baterai secara real-time. Sistem mengolah data sensor tegangan, arus, daya, suhu, dan State of Charge (SOC) untuk mendeteksi kondisi kritis seperti overcharging dan overheating. Dilengkapi antarmuka Human-Machine Interface (HMI) untuk visualisasi data langsung, sistem ini mampu memprediksi SOC dengan akurasi tinggi (MAE 1,97%, RMSE 2,84%) dan merespon kontrol otomatis dalam kurang dari 2 detik. Integrasi ini meningkatkan efisiensi dan keamanan pengisian cepat baterai EV.

ABSTRACT

Keyword

Battery Management,
Electric Vehicle, Fast
Charging, LSTM-RNN,
Raspberry Pi

Advances in electric vehicle (EV) technology drive the need for fast and efficient battery charging. However, fast charging can cause problems such as overheating, cell degradation, and decreased battery performance. This research develops a Long Short-Term Memory Recurrent Neural Network (LSTM-RNN)-based intelligent system running on Raspberry Pi to monitor and predict battery charging parameters in real-time. The system processes data from voltage, current, power, temperature, and State of Charge (SOC) sensors to detect critical conditions such as overcharging and overheating. Equipped with a Human-Machine Interface (HMI) for live data visualization, the system is able to predict SOC with high accuracy (MAE 1.97%, RMSE 2.84%) and respond to automatic control in less than 2 seconds. This integration improves the efficiency and safety of EV battery fast charging.

Ini adalah artikel akses terbuka di bawah lisensi [CC-BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).



1. Pendahuluan

Penggunaan kendaraan listrik (EV) berkembang di seluruh dunia sebagai respons terhadap kebutuhan mendesak untuk meminimalkan ketergantungan pada bahan bakar fosil dan mengurangi emisi karbon. Mobil listrik lebih hemat energi dan memiliki biaya operasional yang lebih rendah daripada mobil konvensional. [1]. Namun, tantangan utama yang masih dihadapi adalah terbatasnya efisiensi dan keamanan dalam proses pengisian daya baterai, terutama dalam skenario pengisian daya cepat.

Proses pengisian daya yang cepat dapat menyebabkan lonjakan suhu, degradasi sel baterai, dan berpotensi memperpendek masa pakai baterai jika tidak dikontrol dengan baik [2]. Data terkini menunjukkan bahwa risiko tersebut bukan sekadar teoretis, melainkan nyata terjadi. Misalnya, di Malaysia tercatat 27 insiden kebakaran kendaraan listrik dan hibrida sejak tahun 2023, dengan penyebab utama berasal dari hubungan arus pendek dan masalah pengisian daya. Selain itu, laporan EV FireSafe menunjukkan bahwa sekitar 15–18% kebakaran baterai kendaraan listrik terjadi saat proses charging atau dalam waktu satu jam setelah pengisian dihentikan. Kasus recall yang dilakukan oleh General Motors terhadap unit Bolt EV/EUV model 2020–2022 juga menegaskan adanya potensi bahaya kebakaran ketika baterai diisi penuh atau mendekati penuh akibat kegagalan perangkat lunak diagnostik. Fakta-fakta ini memperlihatkan bahwa aspek keamanan pengisian cepat masih menjadi perhatian serius dalam ekosistem kendaraan listrik modern.

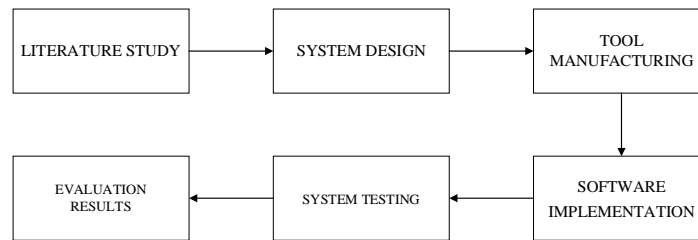
Untuk mengatasi tantangan tersebut, pengembangan sistem pengisian daya yang cerdas dan adaptif sangat dibutuhkan agar mampu memantau dan mengatur parameter pengisian daya secara real-time. Sejumlah penelitian sebelumnya telah mengeksplorasi implementasi algoritma Long Short-Term Memory Recurrent Neural Network (LSTM-RNN) untuk memprediksi parameter baterai seperti State of Charge (SOC), tegangan, arus, dan suhu selama proses pengisian daya. Menurut Shanmuganathan dkk. (2022), penggunaan model LSTM-RNN meningkatkan akurasi prediksi dan mengurangi risiko kerusakan baterai yang disebabkan oleh pengisian daya berlebih maupun panas berlebihan [3].

Selain aspek algoritmik, perangkat keras juga menjadi perhatian penting dalam sistem pemantauan baterai. Raspberry Pi, sebagai komputer mini yang hemat daya dan fleksibel, telah digunakan dalam berbagai sistem pemantauan pengisian daya cepat dan terbukti mampu mengintegrasikan data sensor dan sistem kecerdasan buatan secara efisien. [4][5].

Dengan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem pemantauan pengisian cepat baterai mobil listrik berbasis Raspberry Pi yang menggabungkan algoritma LSTM-RNN. Sistem ini dirancang untuk meramalkan nilai SOC secara real-time dengan menginterpretasikan data sensor dalam bentuk tegangan, arus, daya, dan suhu. Mekanisme pemutusan arus otomatis diintegrasikan untuk mengatur proses pengisian daya, sementara Human-Machine Interface (HMI) ditambahkan agar pengguna dapat memantau parameter pengisian daya secara langsung dan responsif.

2. Metode

Penelitian ini dilakukan dalam beberapa langkah metodis, termasuk tinjauan literatur, desain sistem, pengembangan perangkat lunak dan perangkat keras, dan penilaian kinerja sistem.



Gambar 1 Diagram Block Pendekatan Penelitian

Gambar 1 menunjukkan diagram blok pendekatan penelitian yang digunakan dalam studi ini. Proses penelitian dimulai dari literature study untuk memperoleh landasan teori terkait karakteristik baterai kendaraan listrik, teknologi pengisian cepat, algoritma LSTM-RNN, serta pemanfaatan Raspberry Pi dalam sistem tertanam. Tahap berikutnya adalah system design, yang meliputi perancangan mekanik, elektronik, dan perangkat lunak. Setelah itu dilakukan tool manufacturing berupa perakitan komponen utama sistem. Selanjutnya, tahap software implementation mencakup pengembangan algoritma LSTM-RNN, akuisisi data sensor, serta integrasi Human-Machine Interface (HMI). Sistem yang telah dibangun kemudian diuji melalui tahap system testing untuk mengevaluasi kinerja prediksi dan kontrol otomatis. Hasil pengujian tersebut dianalisis secara menyeluruh pada tahap evaluation results sebagai dasar validasi efektivitas sistem yang diusulkan.

2.1. Studi Literatur

Studi literatur dilakukan untuk membangun dasar teori dan teknis dari sistem pengisian cepat baterai kendaraan listrik berbasis LSTM-RNN. Literatur yang dikaji meliputi empat domain utama yaitu karakteristik baterai kendaraan listrik, teknologi fast charging, algoritma LSTM-RNN dalam prediksi data sekuensial, dan penggunaan perangkat keras tertanam seperti Raspberry Pi.

a. Karakteristik Baterai Kendaraan Listrik

Baterai adalah komponen utama kendaraan listrik (EV) yang memasok energi ke motor dan sistem elektronik lainnya. Daya baterai didefinisikan sebagai hasil kali antara tegangan dan arus ($P = V \times I$), yang dipengaruhi oleh suhu, kapasitas, dan efisiensi konversi energi. [6]. Baterai yang digunakan pada EV umumnya berjenis Lithium-ion atau LifePO4 karena memiliki kepadatan energi yang tinggi dan siklus hidup yang panjang. [7]. Mengelola parameter seperti suhu, tegangan, dan arus sangat penting untuk menjaga stabilitas dan mencegah degradasi baterai. [8].

b. Sistem Pengisian Daya Cepat dan Masalah Teknisnya

Pengisian daya cepat bertujuan untuk mempercepat pengisian daya, tetapi secara signifikan dapat meningkatkan suhu baterai dan menyebabkan tekanan elektrokimia pada sel. Sistem pengisian daya cepat harus dapat mendeteksi potensi pengisian daya yang berlebihan dan panas berlebih. Sistem Manajemen Baterai (BMS) konvensional tidak sepenuhnya adaptif dalam menghadapi variasi kondisi selama pengisian daya, sehingga diperlukan pendekatan prediktif berdasarkan kecerdasan buatan. [9].

c. Algoritma LSTM-RNN untuk Prediksi Parameter Pengisian

Recurrent Neural Network (RNN) dari jaringan saraf tiruan mencakup bentuk Long Short-Term Memory (LSTM), yang dimaksudkan untuk menangani data berurutan jangka panjang secara efisien. LSTM memiliki akurasi yang unggul dalam meramalkan pola yang terkait dengan State of Charge (SOC) dan tegangan baterai jika dibandingkan dengan metode konvensional seperti Kalman Filter atau algoritme regresi. [10], [11]. Sebuah studi oleh Shanmuganathan dkk. (2022) menyatakan bahwa LSTM mampu menyesuaikan input historis untuk mengoptimalkan proses pengisian daya dan mencegah kegagalan baterai. [12].

d. Sistem Tertanam: Raspberry Pi dalam Sistem Pemantauan

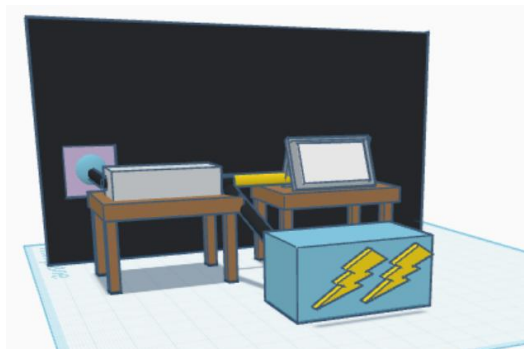
Raspberry Pi digunakan sebagai unit pemrosesan utama karena fleksibilitasnya, konsumsi daya yang rendah, dan kompatibilitasnya dengan Python dan pustaka pembelajaran mesin seperti TensorFlow. [13] Raspberry Pi digunakan sebagai pengumpul data dari sensor seperti PZEM-004T, dan PZEM-017 untuk mengukur parameter waktu nyata seperti tegangan, arus, dan daya [14], [15]. Kombinasi Raspberry Pi telah digunakan dalam berbagai penelitian tentang pemantauan sistem kelistrikan mobil listrik dan sistem IoT lainnya. [16].

2.2. Desain Sistem

Desain sistem berfokus pada pembuatan dan pembangunan sistem pemantauan pengisian daya cepat untuk baterai kendaraan listrik menggunakan platform Raspberry Pi. Proses desain dibagi menjadi tiga komponen utama: desain mekanik, desain elektronik, dan desain perangkat lunak.

a. Desain Mekanis

Perancangan mekanik berfokus pada desain struktur fisik dan susunan komponen utama agar efisien ruang dan mudah dalam perawatan. Perancangan 3D dilakukan untuk menentukan posisi perangkat seperti Raspberry Pi, Power Supply Unit (PSU), baterai, dan sistem pendingin. Perancangan mekanik ini disusun menggunakan software Tinkercad agar sesuai dengan ukuran alat yang sebenarnya dan dapat diimplementasikan dengan stabil seperti pada Gambar 2.



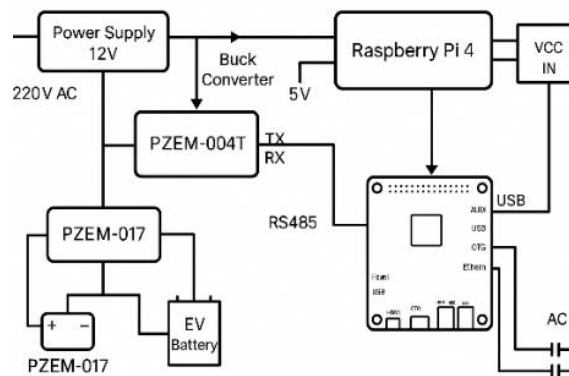
Gambar 2 Desain Mekanik

b. Desain elektronik

Desain elektronik dilakukan dengan menyusun rangkaian integrasi antara komponen daya, sensor, pengontrol dan aktuator [17], diagram blok dirancang seperti pada gambar 3 terdiri dari:

1. Catu Daya 12V sebagai sumber utama sistem
2. Sensor PZEM-004T untuk pengukuran tegangan dan arus AC
3. Sensor PZEM-017 memantau parameter daya sistem arus searah (DC), terutama pada baterai EV.

4. Raspberry Pi 4 sebagai pusat pengolahan data dan pengendali sistem
5. Relai elektronik untuk memutus arus pengisian jika parameter pengisian tidak sesuai (misal: SOC 100%)



Gambar 3 Desain Elektronik

c. Desain Perangkat Lunak

Perangkat lunak ini dikembangkan menggunakan Python yang berjalan pada Raspberry Pi. [18] Fitur utama perangkat lunak ini meliputi:

1. Akuisisi Data: Raspberry Pi menerima data serial dari Arduino (yang membaca sensor).
2. Prediksi SOC: Raspberry Pi menjalankan model LSTM-RNN untuk memprediksi nilai State of Charge (SOC) berdasarkan data suhu, tegangan, arus, dan daya.
3. Pemantauan dan Visualisasi: Output sistem ditampilkan dalam antarmuka HMI (GUI berbasis Python) yang menyajikan grafik SOC, tegangan, arus, dan status pengisian daya secara real-time.
4. Kontrol Otomatis: Jika nilai parameter melebihi batas tertentu (misalnya SOC 100%), Raspberry Pi akan memutus arus melalui kontrol relai untuk menjaga keamanan baterai.

2.3. Pembuatan dan Integrasi Perangkat

Pembuatan dan integrasi perangkat adalah tahap inti dalam merealisasikan sistem pemantauan pengisian daya cepat kendaraan listrik. Proses ini melibatkan pembelian komponen, perakitan perangkat keras, pemrograman sistem, dan penggabungan semua modul menjadi sistem yang lengkap dan fungsional. Table 1 merupakan daftar komponen yang digunakan pada penelitian ini.

Tabel 1 Komponen Perakitan

Components	Function
Raspberry Pi 4	Prosesor utama untuk menjalankan model LSTM dan pengontrol sistem
PZEM-004T	Mengukur tegangan AC, arus, dan daya dari catu daya
PZEM-017	Mengukur tegangan dan arus DC dari baterai
Relay	Aktuator untuk memutuskan/menghubungkan arus pengisian daya secara otomatis
HMI 7 inci	Tampilan antarmuka pengguna untuk memantau parameter pengisian daya
Support Components	Resistor, LED, PCB, kabel jumper, header pin, casing, dll.

2.4. Algoritma LSTM-RNN

Long Short-Term Memory (LSTM) adalah arsitektur jaringan saraf tiruan dalam keluarga Recurrent Neural Network (RNN), yang secara khusus dirancang untuk mengatasi masalah gradien yang hilang yang biasa dijumpai pada RNN standar ketika mempelajari ketergantungan jangka panjang dalam data berurutan [19]. Dalam penelitian ini, LSTM digunakan untuk memprediksi parameter pengisian cepat baterai kendaraan listrik, khususnya State of Charge (SOC), dengan memanfaatkan data historis tentang suhu, tegangan, arus, dan daya yang dikumpulkan selama proses pengisian.

a. Struktur dan Arsitektur LSTM

LSTM terdiri dari serangkaian unit berulang, yang masing-masing memiliki struktur internal yang terdiri dari tiga bagian gerbang utama: *Forget Gate*, *Input Gate*, dan *Output Gate*. Setiap gerbang berfungsi untuk mengatur informasi yang disimpan atau dilupakan dari keadaan tersembunyi dan memori internal. [20].

Proses pada waktu t dirumuskan sebagai berikut:

1. *Forget Gate* = Mengidentifikasi informasi yang harus dibuang atau tidak lagi disimpan:

$$f_t = \sigma(W_f \cdot [h_{t-1}] + b_f)$$

2. *Input Gate* = menentukan informasi baru yang disimpan dalam memori:

$$i_t = \sigma(W_i \cdot [h_{t-1}] + b_i)$$

$$\tilde{C}_t = \tanh(W_C \cdot [h_{t-1}] + b_C)$$

3. *Cell State Update* = memperbarui nilai memori:

$$C_t = f_t * C_{t-1} + i_t * \tilde{C}_t$$

4. *Output Gate* = menghasilkan keluaran baru dan keadaan tersembunyi:

$$o_t = \sigma(W_o \cdot [h_{t-1}] + b_o)$$

$$h_t = o_t * \tanh(C_t)$$

Information:

x_t = masukan pada waktu (t)

h_{t-1} = status tersembunyi dari langkah sebelumnya

C_t = memori sel internal

\tilde{C}_t = kandidat nilai baru untuk memori

f_t, i_t, o_t = *output of forget, input, and output gate*

W = matriks bobot untuk input dan status tersembunyi

B = bias dari setiap gerbang

σ = fungsi aktivasi sigmoid: $\sigma(x) = \frac{1}{1+e^{-x}}$

\tanh = fungsi aktivasi tanh: $\tanh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$

b. Pelatihan Model

Model LSTM dilatih menggunakan data historis pengisian daya baterai dengan parameter input: tegangan, arus, daya, dan temperatur; dan label output berupa nilai SOC aktual. Proses pelatihan dilakukan dengan menggunakan Google Colab dan library TensorFlow versi 2.x, dengan metode optimasi Adam dan loss function Mean Squared Error (MSE). Model disusun dalam bentuk Sequential API dengan struktur sebagai berikut:

1. 1 lapisan masukan (4 fitur),
2. 1 atau 2 lapisan LSTM (dengan 50-100 neuron),
3. 1 lapisan keluaran padat (1 neuron, regresi SOC).

Setelah pelatihan, model disimpan dalam format .h5 dan diterapkan ke Raspberry Pi untuk inferensi waktu nyata.

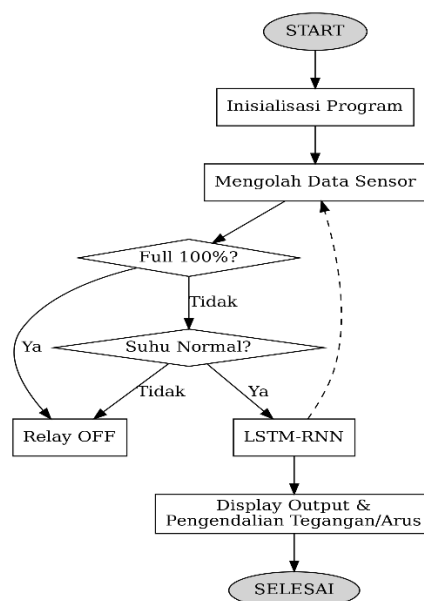
c. Implementasi dalam Sistem

Model LSTM-RNN yang telah dilatih diimplementasikan di Raspberry Pi untuk memprediksi nilai SOC berdasarkan input real-time dari Arduino (data sensor). Setiap kali data masuk, model akan memprosesnya dan memberikan prediksi SOC, yang digunakan untuk pengambilan keputusan seperti mematikan relay ketika $SOC \geq 100\%$. Prediksi ditampilkan pada HMI bersama dengan nilai sensor aktual, menjadikan sistem ini sebagai solusi pemantauan dan prediksi pengisian daya cepat yang cerdas dan adaptif.

2.5. Implementasi dan Visualisasi

Hasil prediksi ditampilkan pada layar Human Machine Interface (HMI) berbasis GUI Python. Sistem ini dirancang untuk menampilkan tegangan, arus, daya, suhu, dan SOC secara real-time. Selain itu, Raspberry Pi juga mengendalikan relay untuk memutus aliran pengisian daya ketika baterai telah mencapai kapasitas penuh atau jika suhu melebihi ambang batas aman.

Diagram Alir



Gambar 4 Diagram Alir

Gambar 4 memperlihatkan diagram alir proses sistem pemantauan pengisian cepat baterai kendaraan listrik. Proses dimulai dari kondisi start dengan inialisasi program, kemudian sistem melakukan pengambilan data sensor. Data hasil akuisisi dianalisis oleh algoritma LSTM-RNN untuk memprediksi nilai State of Charge (SOC). Jika SOC belum penuh, maka pengisian daya berlanjut. Sebaliknya, apabila SOC mencapai 100% atau suhu terdeteksi melebihi batas, sistem akan mengirim perintah pemutusan arus melalui relay. Seluruh parameter kemudian divisualisasikan pada HMI sehingga pengguna dapat memantau status pengisian secara real-time. Proses berakhir pada kondisi stop setelah pengisian selesai.

3. Hasil dan Analisis

Tahap pengujian dan analisis dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sistem pemantauan dan prediksi pengisian daya cepat baterai kendaraan listrik berbasis Raspberry Pi dan LSTM-RNN. Fokus pengujian meliputi: validasi data sensor, akurasi prediksi State of Charge (SOC), performa kontrol otomatis, dan keandalan visualisasi pada antarmuka HMI.

3.1. Validasi Sensor dan Akuisisi Data

Sistem ini berhasil memperoleh data dari dua sensor utama:

1. PZEM-004T untuk tegangan dan arus AC dari catu daya,
2. PZEM-017 untuk tegangan dan arus DC pada saluran baterai

Pembacaan sensor divalidasi menggunakan alat ukur eksternal (multimeter digital). Hasilnya menunjukkan perbedaan rata-rata kurang dari $\pm 2\%$, yang masih dalam rentang toleransi teknis.

3.2. Analisis Prediksi SOC oleh LSTM-RNN

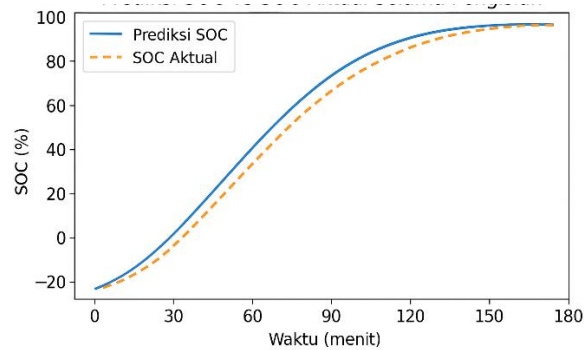
Model LSTM-RNN yang diimplementasikan pada Raspberry Pi telah dilatih sebelumnya menggunakan data historis pengisian daya selama ± 3 jam dengan interval 10 menit. Model tersebut memproses input berupa tegangan, arus, dan daya untuk memprediksi SOC yang sebenarnya.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa model LSTM-RNN yang diimplementasikan pada Raspberry Pi mampu memprediksi State of Charge (SOC) dengan tingkat akurasi tinggi. Nilai performa prediksi model ditunjukkan pada Tabel 2 berikut.:

Tabel 2 Prediksi SOC

Parameter	Score
<i>MAE (Mean Absolute Error)</i>	1.97%
<i>RMSE (Root Mean Squared Error)</i>	2.84%
<i>Prediction accuracy at final SOC (100%)</i>	98.3%

Tabel tersebut menunjukkan bahwa model mampu meminimalkan kesalahan prediksi secara konsisten, dengan deviasi rata-rata hanya 1,97%. Untuk memperjelas pola prediksi SOC terhadap data aktual, Gambar 5 berikut menyajikan visualisasi hasil prediksi selama proses pengisian daya.



Gambar 5 Grafik Prediksi

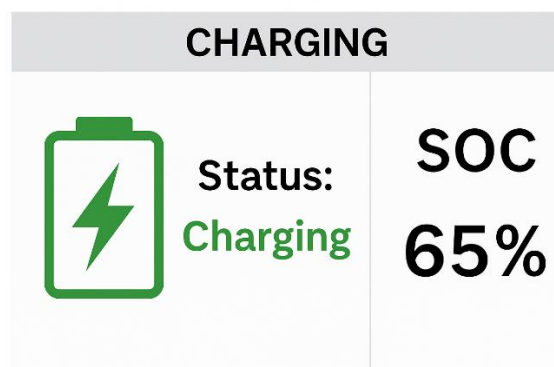
Model LSTM mampu mengikuti peningkatan pola SOC secara bertahap, dan mendeteksi titik jenuh pada 100% dengan deviasi akhir hanya $\pm 1,7\%$. Hal ini menunjukkan bahwa LSTM cocok untuk digunakan dalam sistem prediksi SOC berbasis data real-time dengan kompleksitas non-linear.

3.3. Pengujian Fitur Kontrol Otomatis

Sistem kontrol otomatis diuji dalam dua skenario, $SOC \geq 100\% \rightarrow$ sistem memutuskan arus melalui relai. Kedua skenario tersebut berhasil dijalankan dengan penundaan < 2 detik sejak parameter terdeteksi hingga relai diaktifkan. Hal ini menunjukkan bahwa sistem mampu merespons kondisi kritis secara real-time dan dapat meningkatkan keamanan baterai dari pengisian daya yang berlebihan dan panas berlebih.

3.4. Visualisasi dan Evaluasi Kinerja Sistem

Antarmuka HMI menampilkan semua parameter utama tampak pada gambar 6 (tegangan, arus, daya, suhu, SOC) dengan pembaruan setiap 2 detik. Grafik SOC dan suhu juga berhasil ditampilkan secara dinamis.



Gambar 6 Tampilan HMI

Selama pengujian, sistem bekerja tanpa crash selama 5 sesi pengisian daya penuh, menunjukkan stabilitas perangkat lunak. Raspberry Pi mampu menangani inferensi model LSTM dan tampilan GUI secara bersamaan dengan penggunaan CPU $< 40\%$.

3.5. Diskusi dan Implikasi

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem monitoring pengisian daya cepat baterai kendaraan listrik berbasis LSTM-RNN dan Raspberry Pi memiliki performa yang unggul dalam

tiga aspek utama: akurasi prediksi, kecepatan respons otomatis, dan kemudahan visualisasi real-time.

Jika dibandingkan dengan studi oleh Shanmuganathan et al. (2022) [3] yang menerapkan LSTM untuk memprediksi permintaan pengisian EV, penelitian ini lebih menekankan pada integrasi langsung model ke dalam sistem tertanam (embedded system) untuk pengendalian real-time, bukan hanya prediksi berbasis data historis. Sementara Shanmuganathan hanya menggunakan simulasi berbasis Python tanpa integrasi ke hardware fisik, sistem ini berhasil mengimplementasikan prediksi SOC langsung pada Raspberry Pi dan mengaktifkan relai berdasarkan hasil prediksi

Penelitian oleh Hong et al. (2022) [4] menggunakan board tertanam untuk estimasi SOC Li-ion juga menunjukkan akurasi tinggi, namun hanya menggunakan metode regresi klasik. Model LSTM yang digunakan dalam penelitian ini mampu menangani non-linearitas lebih baik dibanding regresi, terbukti dari nilai MAE sebesar 1,97% yang lebih rendah dibandingkan rata-rata 3-5% pada metode non-deep learning

Lebih lanjut, penelitian ini juga menambahkan aspek visualisasi berbasis HMI, yang belum banyak dibahas dalam studi sebelumnya. Hal ini sejalan dengan pendekatan IoT yang mulai menekankan user interface dalam pengawasan sistem teknis secara langsung (Zhou et al., 2021) [18].

Implikasinya, sistem ini menunjukkan bahwa model deep learning seperti LSTM-RNN dapat dioperasikan secara efisien pada perangkat berdaya rendah, seperti Raspberry Pi, untuk keperluan prediksi dan kontrol otomatis pada aplikasi pengisian daya baterai EV. Dengan waktu respons relai <2 detik dan tampilan GUI yang stabil, sistem ini siap dikembangkan lebih lanjut ke dalam ekosistem smart charging berbasis IoT yang terintegrasi dengan cloud dan database historis.

4. Simpulan

Penelitian ini berhasil merancang sistem monitoring pengisian daya baterai kendaraan listrik berbasis LSTM-RNN dan Raspberry Pi. Sistem ini mampu memprediksi SOC secara real-time dengan MAE 1,97%, serta mendeteksi dan mencegah terjadinya overcharging dan overheating melalui kontrol relai otomatis. Integrasi sensor, Raspberry Pi, dan model LSTM berjalan secara sinergis, didukung oleh antarmuka HMI yang informatif dan responsif. Sistem ini bekerja secara stabil dengan respon <2 detik, menunjukkan potensi yang kuat sebagai solusi pengisian daya pintar berbasis IoT yang efisien, aman, dan cerdas.

Referensi

- [1] A. A. A. Gassar and S. H. Cha, "Review of geographic information systems-based rooftop solar photovoltaic potential estimation approaches at urban scales," *Appl Energy*, vol. 291, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.apenergy.2021.116817.
- [2] P. Wachter, C. Gaber, M. Demuth, and C. Hochenauer, "Experimental investigation of tri-reforming on a stationary, recuperative TCR-reformer applied to an oxy-fuel combustion of natural gas, using a Ni-catalyst," *Energy*, vol. 212, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.118719.
- [3] J. Shanmuganathan, A. A. Victoire, G. Balraj, and A. Victoire, "Deep Learning LSTM Recurrent Neural Network Model for Prediction of Electric Vehicle Charging Demand," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 14, no. 16, Aug. 2022, doi: 10.3390/su141610207.

- [4] S. Hong, M. Kang, H. Park, J. Kim, and J. Baek, "Real-Time State-of-Charge Estimation Using an Embedded Board for Li-Ion Batteries," *Electronics (Switzerland)*, vol. 11, no. 13, Jul. 2022, doi: 10.3390/electronics11132010.
- [5] A. P. Utomo, A. T. N. Angga, D. S. A. Pambudi, and D. Priyambodo, "Battery Charger Design with PI Control Based on Arduino Uno R3," *Applied Technology and Computing Science Journal*, vol. 4, no. 2, pp. 78–90, May 2022, doi: 10.33086/atcsj.v4i2.2398.
- [6] S. T. Wu, Y. N. Chang, C. Y. Chang, and Y. T. Cheng, "A fast charging balancing circuit for LiFePO₄ battery," *Electronics (Switzerland)*, vol. 8, no. 10, Oct. 2019, doi: 10.3390/electronics8101144.
- [7] T. Ezra *et al.*, "ANALISIS TEKNOLOGI MANAJEMEN ENERGI PADA KENDARAAN LISTRIK HIBRIDA BERBASIS TINJAUAN PUSTAKA," 2022.
- [8] J. Sainstek and S. Pekanbaru, "Attribution-NonCommercial 4.0 International. Some rights reserved," vol. 12, no. 1, 2024, doi: 10.35583/js.v12i1.256.
- [9] L. Yao *et al.*, "A review of lithium-ion battery state of health estimation and prediction methods," *World Electric Vehicle Journal*, vol. 12, no. 3, Sep. 2021, doi: 10.3390/wevj12030113.
- [10] F. Yang, X. Song, F. Xu, and K. L. Tsui, "State-of-Charge Estimation of Lithium-Ion Batteries via Long Short-Term Memory Network," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 53792–53799, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2912803.
- [11] T. Y. Ma and S. Faye, "Multistep electric vehicle charging station occupancy prediction using hybrid LSTM neural networks," *Energy*, vol. 244, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.energy.2022.123217.
- [12] F. Mohammad, D.-K. Kang, M. A. Ahmed, and Y.-C. Kim, "Energy Demand Load Forecasting for Electric Vehicle Charging Stations Network based on ConvLSTM and BiConvLSTM Architectures", doi: 10.1109/ACCESS.2017.Doi.
- [13] "DATASHEET Raspberry Pi 4 Model B," 2024. [Online]. Available: <https://www.raspberrypi.org>
- [14] A. Mubarak 'aafi, J. Jamaaluddin, I. Anshory, and U. M. Sidoarjo, "SNESTIK Seminar Nasional Teknik Elektro, Sistem Informasi, dan Teknik Informatika Implementasi Sensor Pzem-017 Untuk Monitoring Arus, Tegangan dan Daya Pada Instalasi Panel Surya dengan Sistem Data Logger Menggunakan Google Spreadsheet dan Smartphone," p. 191, doi: 10.31284/p.snestik.2022.2718.
- [15] "PZEM-003/017 DC communication module."
- [16] A. T. Nugraha, D. Priyambodo, and S. T. Sanera, "Design A Battery Charger with Arduino Uno-Based for A Wind Energy Power Plant," *Journal of Physical Science and Engineering*), vol. 7, no. 1, pp. 23–38, 2022, doi: 10.17977/um024v7i12022p023.
- [17] J. Brownlee Disclaimer, "Deep Learning for Time Series Forecasting Predict the Future with MLPs, CNNs and LSTMs in Python Acknowledgements Copyright Deep Learning for Time Series Forecasting," 2018.
- [18] H. Zhou *et al.*, "LSTM-based Energy Management for Electric Vehicle Charging in Commercial-building Prosumers," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 9, no. 5, pp. 1205–1216, Sep. 2021, doi: 10.35833/MPCE.2020.000501.

- [19] S. Hochreiter and J. Schmidhuber, "Long Short-Term Memory."
- [20] K. Greff, R. K. Srivastava, J. Koutnik, B. R. Steunebrink, and J. Schmidhuber, "LSTM: A Search Space Odyssey," *IEEE Trans Neural Netw Learn Syst*, vol. 28, no. 10, pp. 2222–2232, Oct. 2017, doi: 10.1109/TNNLS.2016.2582924.



Advent Samuel Halomoan saat ini sedang menempuh pendidikan Diploma III di Politeknik Negeri Sriwijaya, Palembang, dengan perkiraan masa studi hingga tahun 2025. Sebelumnya, Advent aktif mengikuti berbagai program pengembangan kompetensi, termasuk menjadi peserta program Startup Campus Batch 7 pada tahun 2024, di mana ia berhasil masuk dalam Top 30 Performers. Saat ini, Advent beraktivitas sebagai mahasiswa sekaligus pengembang startup digital yang fokus pada inovasi teknologi terapan untuk pendidikan dan UMKM. Minat penelitiannya meliputi pengembangan teknologi informasi, kewirausahaan digital, serta implementasi solusi berbasis teknologi untuk pengembangan sumber daya manusia dan bisnis.

Alamat Email: adventsamuelhalomoan36@gmail.com



Amperawan, S.T., M.T. memperoleh gelar Sarjana Teknik dari Universitas Tridinanti pada tahun 1993 dan melanjutkan studi Magister Teknik di Institut Teknologi Bandung, yang diselesaikannya pada tahun 2006. Beliau merupakan akademisi dan peneliti yang aktif dalam bidang teknik dan rekayasa, dengan minat utama pada pengembangan sistem teknik, otomasi, sistem digital dan analog serta teknologi terapan. Selain berkontribusi dalam kegiatan pengajaran, beliau juga aktif dalam penelitian dan publikasi ilmiah, serta berperan dalam pengembangan inovasi yang mendukung kemajuan teknologi di lingkungan akademik dan industri.

Alamat Email: amperawan@polsri.ac.id



Sabilal Rasyad, S.T., M.Kom. menyelesaikan pendidikan Sarjana Teknik di Universitas Sriwijaya pada tahun 2001 dan meraih gelar Magister Komputer dari Universitas Bina Darma pada tahun 2012. Saat ini beliau aktif sebagai dosen dan peneliti dengan fokus pada bidang teknologi informasi dan sistem komputer. Minat penelitian beliau mencakup pengembangan sistem berbasis komputer, analisis data, sistem digital serta penerapan teknologi informasi dalam dunia pendidikan dan industri. Beliau juga terlibat dalam berbagai kegiatan akademik dan publikasi ilmiah yang mendukung kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi.

Alamat Email: sabilal_rasyad@polsri.ac.id