

# Optimasi sistem energi kendaraan listrik berbasis logika fuzzy untuk efisiensi daya dan umur baterai

**Irzha Aditya Gyanda<sup>1\*)</sup>, Bambang Suprianto<sup>2</sup>, Amanda Elena Sapiro<sup>3</sup>**

<sup>1,2,3</sup>Program Studi S1 Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya, Jalan Ketintang, Surabaya, Indonesia

*\*Penulis Korespondensi, e-mail: [irzha.22050874120@mhs.unesa.ac.id](mailto:irzha.22050874120@mhs.unesa.ac.id)*

*Received: 14/06/2026*

*Revised: 21/07/2026*

*Accepted: 21/07/2026*

## ABSTRAK

Kendaraan listrik memerlukan Energy Management System (EMS) yang mampu mengelola penggunaan energi secara efisien untuk menjaga performa kendaraan dan kondisi baterai. Penelitian ini bertujuan mengimplementasikan logika fuzzy Mamdani pada EMS kendaraan listrik untuk mengoptimalkan penggunaan energi, meningkatkan efisiensi konsumsi daya, dan menjaga kondisi baterai Lithium-Ion. Sistem dikembangkan menggunakan MATLAB dan Simulink dengan State of Charge (SoC) dan temperatur baterai sebagai masukan, sedangkan keluaran berupa faktor penyesuaian arus. Hasil simulasi menunjukkan bahwa penerapan logika fuzzy meningkatkan SoC akhir menjadi 55,890% dibandingkan 50,288% pada sistem tanpa fuzzy. Selain itu, daya keluaran EMS menurun dari 432,8502 W menjadi 187,4026 W, arus keluaran berkurang dari 0,7 A menjadi 0,2972 A, serta SoH akhir meningkat menjadi 99,9958%. Nilai daya dan arus tersebut merepresentasikan sinyal kontrol relatif hasil regulasi EMS, bukan estimasi daya traksi aktual kendaraan. Hasil tersebut menunjukkan bahwa logika fuzzy mampu menurunkan laju konsumsi sinyal daya EMS sekaligus menjaga kondisi baterai lebih stabil dibandingkan sistem tanpa fuzzy.

**Kata Kunci:** Baterai Lithium-Ion, Efisiensi Konsumsi Daya, Energy Management System, Kendaraan Listrik, Logika Fuzzy.

## ABSTRACT

*Electric vehicles require an Energy Management System (EMS) capable of managing energy efficiently to maintain vehicle performance and battery condition. This study aims to implement the Mamdani fuzzy logic method in an electric vehicle EMS to optimize energy utilization, improve power consumption efficiency, and maintain the condition of Lithium-Ion batteries. The system was developed using MATLAB and Simulink, with State of Charge (SoC) and battery temperature as the input variables, while the output was a current adjustment factor used to regulate power distribution. The simulation results show that the proposed fuzzy logic system increased the final SoC to 55.890%, compared to 50.288% in the conventional system without fuzzy logic. In addition, the EMS output power decreased from 432.8502 W to 187.4026 W, the output current was reduced from 0.7 A to 0.2972 A, and the final State of Health (SoH) increased to 99.9958%. These power and current values represent relative control signals from EMS regulation rather than the vehicle's actual traction power. These results indicate that the Mamdani fuzzy logic approach reduces the EMS power-signal consumption rate while maintaining a more stable battery condition than the system without fuzzy logic.*

**Keywords:** *Electric Vehicle, Energy Management System, Fuzzy Logic, Lithium-Ion Battery, Power Consumption Efficiency.*

## 1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi transportasi global menunjukkan pergeseran yang signifikan menuju pemanfaatan energi listrik sebagai penggerak utama kendaraan [1], [2]. Pergeseran ini didorong oleh meningkatnya kesadaran terhadap dampak negatif bahan bakar fosil serta kontribusinya terhadap

pemanasan global, sehingga kendaraan listrik (Electric Vehicle/EV) menjadi salah satu solusi transportasi berkelanjutan yang banyak dikembangkan di berbagai negara [3]. Kendaraan listrik memiliki tingkat emisi yang lebih rendah, efisiensi energi yang lebih tinggi, dan kebisingan yang lebih kecil dibandingkan kendaraan bermesin pembakaran internal [1].

Di Indonesia, pengembangan kendaraan listrik terus meningkat seiring kebijakan pemerintah melalui Peraturan Presiden Nomor 55 Tahun 2019 yang mendorong percepatan transisi energi nasional dan penggunaan kendaraan bermotor listrik berbasis baterai [4]. Namun demikian, kondisi geografis dan iklim tropis menyebabkan kendaraan listrik di Indonesia beroperasi pada suhu lingkungan yang relatif tinggi, yang berpotensi mempercepat degradasi baterai Lithium-Ion apabila tidak dikelola dengan baik [5]. Karakteristik lalu lintas perkotaan dengan pola berkendara stop-and-go juga menimbulkan fluktuasi beban daya yang tinggi [6], sehingga sistem energi kendaraan listrik dituntut bekerja secara dinamis dan adaptif.

Baterai Lithium-Ion menjadi teknologi penyimpanan energi yang paling banyak digunakan pada kendaraan listrik karena memiliki densitas energi tinggi dan efisiensi pengisian yang baik [7], [8]. Meskipun demikian, tingkat degradasi baterai sangat dipengaruhi oleh pola pengisian-pengosongan, besar arus, dan suhu kerja baterai [9]. Pengelolaan energi yang kurang optimal dapat menyebabkan baterai bekerja di luar kondisi idealnya sehingga kapasitas penyimpanan menurun secara bertahap dan berdampak pada jarak tempuh kendaraan serta biaya penggantian baterai yang relatif tinggi.

Berbagai penelitian terdahulu telah membahas pengelolaan energi kendaraan listrik menggunakan beragam pendekatan kontrol [10], [11]. Namun, sebagian besar penelitian tersebut masih berfokus pada peningkatan efisiensi konsumsi daya tanpa mempertimbangkan dampaknya terhadap umur baterai, atau belum mengintegrasikan parameter State of Charge dan kondisi arus secara terpadu dalam satu sistem manajemen energi. Logika fuzzy dinilai sesuai untuk mengatasi keterbatasan tersebut karena mampu merepresentasikan pengetahuan pakar dalam bentuk aturan IF-THEN dan menghasilkan keputusan pengendalian yang lebih halus dibandingkan metode kontrol konvensional, khususnya pada sistem yang bersifat non-linear dan tidak pasti seperti kondisi operasi kendaraan listrik.

Sebagian besar penelitian terdahulu mengembangkan sistem manajemen energi kendaraan listrik menggunakan konfigurasi penyimpanan hibrida (baterai dan superkapasitor), skema pemanfaatan energi regeneratif, atau pendekatan kecerdasan buatan lanjutan seperti fuzzy tipe-2, jaringan saraf tiruan, maupun reinforcement learning yang membutuhkan beban komputasi relatif besar untuk diimplementasikan secara real-time pada unit kendali kendaraan. Selain itu, optimasi efisiensi konsumsi daya dan upaya perpanjangan umur baterai umumnya masih diperlakukan sebagai dua tujuan penelitian yang terpisah. Oleh karena itu, diperlukan pengendali fuzzy yang ringan namun mampu mengintegrasikan sekaligus aspek efisiensi daya dan proteksi termal baterai dalam satu skema aturan berbasis dua variabel masukan (State of Charge dan temperatur baterai), sehingga pengaruhnya terhadap SoC, konsumsi daya, dan State of Health (SoH) baterai dapat dievaluasi secara bersamaan dalam satu kerangka simulasi.

Untuk memperjelas posisi penelitian ini terhadap pendekatan Energy Management System (EMS) yang telah dikembangkan pada penelitian terdahulu [10], [11], Tabel I merangkum perbandingan sejumlah metode EMS yang umum digunakan pada kendaraan listrik, meliputi kontrol berbasis aturan ambang batas (rule-based), logika fuzzy tipe-1 dan tipe-2, jaringan saraf tiruan, reinforcement learning, serta pendekatan berbasis optimasi matematis (optimization-based).

TABEL I : RINGKASAN PERBANDINGAN METODE ENERGY MANAGEMENT SYSTEM (EMS) KENDARAAN LISTRIK

| Metode EMS                      | Prinsip Kerja Utama                                                                              | Beban Komputasi | Catatan / Posisi Penelitian                                                                                                 |
|---------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Rule-based (ambang batas tetap) | Aturan IF-THEN sederhana berbasis nilai ambang SoC, tegangan, atau arus                          | Rendah          | Mudah diimplementasikan, tetapi transisi kontrol cenderung tidak halus di sekitar titik ambang                              |
| Fuzzy Logic Type-1 (Mamdani)    | Aturan linguistik IF-THEN dengan fungsi keanggotaan tunggal pada dua variabel masukan atau lebih | Rendah-Sedang   | Transisi kontrol lebih halus dan adaptif; dipilih pada penelitian ini karena ringan dan sesuai untuk implementasi real-time |

|                                                        |                                                                              |               |                                                                                                                      |
|--------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|---------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Fuzzy Type-2                                           | Fungsi keanggotaan interval untuk merepresentasikan ketidakpastian parameter | Sedang–Tinggi | Lebih tangguh terhadap noise dan ketidakpastian, namun kompleksitas komputasi meningkat                              |
| Jaringan Saraf Tiruan (Neural Network)                 | Pemetaan pola kontrol dari data pelatihan historis                           | Tinggi        | Akurat untuk pola non-linear kompleks, tetapi memerlukan dataset besar serta proses pelatihan dan tuning             |
| Reinforcement Learning                                 | Pembelajaran kebijakan kontrol melalui interaksi berulang dengan lingkungan  | Tinggi        | Berpotensi mendekati optimal jangka panjang, namun waktu konvergensi lama dan berat untuk unit kendali kendaraan     |
| Optimization-based EMS (mis. Dynamic Programming, PSO) | Optimasi matematis multi-objektif terhadap fungsi biaya energi               | Tinggi        | Solusi mendekati optimal global, tetapi memerlukan model matematis presisi dan beban komputasi besar untuk real-time |

Berdasarkan perbandingan pada Tabel I, metode berbasis kecerdasan buatan lanjutan seperti fuzzy tipe-2, jaringan saraf tiruan, dan reinforcement learning umumnya menawarkan potensi adaptabilitas yang lebih tinggi, tetapi disertai beban komputasi yang besar sehingga kurang praktis untuk diimplementasikan secara real-time pada unit kendali kendaraan dengan sumber daya komputasi terbatas. Sebaliknya, pendekatan rule-based memiliki beban komputasi rendah namun kurang adaptif pada kondisi transisi. Logika fuzzy Mamdani tipe-1 dipilih pada penelitian ini karena menempati posisi yang seimbang antara kedua ekstrem tersebut: cukup ringan untuk implementasi real-time, namun tetap mampu menghasilkan transisi kontrol yang adaptif berdasarkan kombinasi dua variabel masukan (SoC dan temperatur baterai) dalam satu skema aturan yang terintegrasi.

Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengimplementasikan logika fuzzy Mamdani pada Energy Management System (EMS) kendaraan listrik guna mengoptimalkan distribusi daya, meningkatkan efisiensi konsumsi daya, serta menilai dampaknya terhadap potensi perpanjangan umur pakai baterai Lithium-Ion. Sistem fuzzy dirancang menggunakan parameter State of Charge (SoC) dan temperatur baterai sebagai masukan sehingga strategi pengelolaan energi dapat disesuaikan dengan kondisi aktual kendaraan. Perlu ditegaskan bahwa penelitian ini difokuskan pada perilaku sinyal kendali EMS terhadap SoC dan SoH baterai, dan tidak mencakup evaluasi indikator performa berkendara seperti torsi, kecepatan, maupun akselerasi kendaraan, sebagaimana dijelaskan lebih lanjut pada bagian Metode dan Batasan Penelitian.

## 2. METODE PENELITIAN

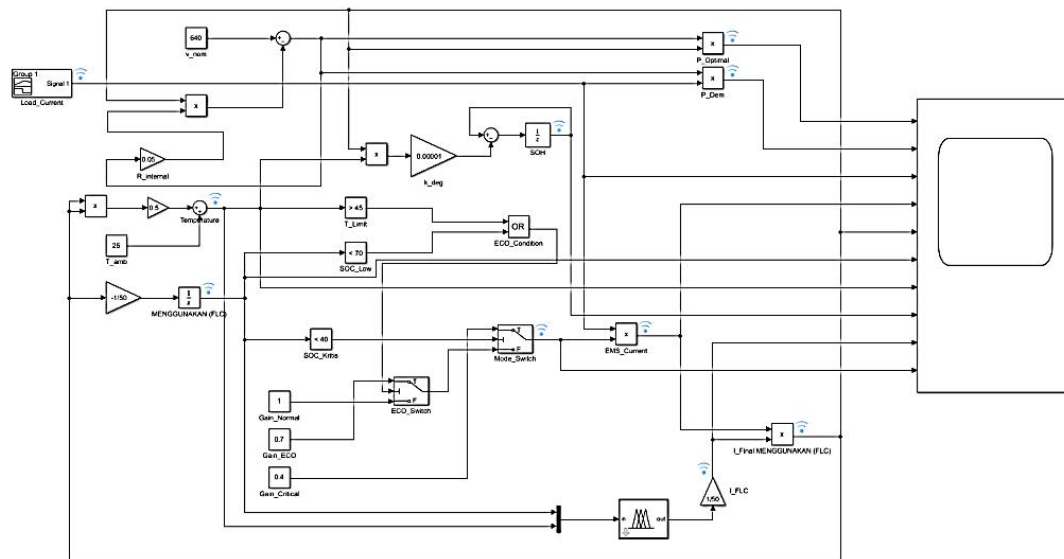
### 2.1 Desain dan Pendekatan Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian rekayasa (engineering research) dengan pendekatan kuantitatif dan komparatif yang berorientasi pada pengembangan serta pengujian sistem optimasi energi berbasis logika fuzzy pada kendaraan listrik. Evaluasi kinerja sistem dilakukan dengan membandingkan performa Energy Management System (EMS) tanpa kontrol fuzzy dan EMS dengan kontrol fuzzy berdasarkan parameter tegangan, arus, daya, temperatur baterai, dan State of Charge (SoC).

### 2.2 Pemodelan Sistem

Pemodelan sistem dilakukan menggunakan MATLAB R2021a dan Simulink, sedangkan perancangan pengendali fuzzy dilakukan menggunakan Fuzzy Logic Toolbox. Model yang dibangun terdiri atas model baterai Lithium Iron Phosphate ( $\text{LiFePO}_4$ ), Energy Management System (EMS), beban kendaraan, dan pengendali logika fuzzy sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1. Baterai yang digunakan sebagai acuan adalah BYD Blade Battery dengan karakteristik yang ditunjukkan pada Tabel II.





Gambar 1: Model Simulink Energy Management System (EMS) kendaraan listrik

TABEL II : PARAMETER BATERAI BYD BLADE BATTERY

| No | Parameter                | Simbol | Nilai                  | Satuan |
|----|--------------------------|--------|------------------------|--------|
| 1  | Kimia baterai            | -      | Lithium Iron Phosphate | -      |
| 2  | Kapasitas energi nominal | Ebat   | 86,4                   | kWh    |
| 3  | Tegangan nominal         | Vnom   | 640                    | V      |
| 4  | Kapasitas listrik        | Cbat   | 135                    | Ah     |
| 5  | Densitas energi          | pE     | 140                    | Wh/kg  |
| 6  | Rentang suhu operasi     | -      | -20 s.d. 60            | °C     |

Parameter pada Tabel II merupakan spesifikasi nominal baterai BYD Blade Battery yang digunakan sebagai acuan karakteristik elektrokimia (kapasitas energi, tegangan nominal, dan densitas energi), bukan sebagai representasi langsung skala daya yang tertera pada hasil simulasi. Nilai Daya Keluaran EMS dan arus keluaran ( $I_{Final}$ ) yang dilaporkan pada Bagian 3 berorde ratusan watt dan tidak dimaksudkan sebagai estimasi daya traksi aktual kendaraan yang dapat mencapai orde puluhan kilowatt. Nilai tersebut merupakan sinyal kontrol relatif hasil regulasi EMS terhadap arus beban yang dinormalisasi, sehingga digunakan murni untuk membandingkan pola dan tren respons antara sistem tanpa fuzzy dan sistem dengan fuzzy pada kondisi masukan yang identik, bukan untuk menyatakan konsumsi energi kendaraan secara absolut. Sementara itu, nilai State of Charge (SoC) dihitung melalui fungsi deplesi proporsional yang independen terhadap sinyal daya tersebut, sebagaimana dijelaskan pada bagian berikut.

### 2.3 Perancangan Energy Management System (EMS)

EMS dirancang untuk mengatur distribusi daya berdasarkan kondisi temperatur dan SoC baterai. Ketika temperatur baterai melebihi 45°C atau nilai SoC berada di bawah 60%, sistem mengaktifkan mode ECO dengan faktor gain 0,7. Ketika SoC berada di bawah 40%, sistem mengaktifkan mode kritis dengan gain 0,4, sedangkan pada kondisi normal digunakan gain sebesar 1. Nilai gain tersebut dikalikan dengan arus beban kendaraan untuk menghasilkan arus keluaran EMS, sebagaimana dinyatakan pada persamaan (1).

$$I_{EMS} = k_p \times I_{beban} \quad (1)$$

### 2.4 Perancangan Logika Fuzzy

Pengendali fuzzy dirancang menggunakan metode inferensi Mamdani dengan dua variabel masukan, yaitu State of Charge (SoC) dan temperatur baterai, serta satu variabel keluaran berupa faktor pengaturan



daya (kp). Logika fuzzy diaktifkan ketika nilai SoC berada di bawah 60%. Fungsi keanggotaan variabel input dan output ditunjukkan pada Tabel III, Tabel IV, dan Tabel V, sedangkan basis aturan (rule base) sistem fuzzy ditunjukkan pada Tabel VI.

TABEL III : FUNGSI KEANGGOTAAN VARIABEL SoC

| Himpunan | Jenis Fungsi | Rentang (%)      |
|----------|--------------|------------------|
| Low      | Trapesium    | 0, 0, 20, 40     |
| Medium   | Segitiga     | 30, 50, 70       |
| High     | Trapesium    | 60, 80, 100, 100 |

TABEL IV : FUNGSI KEANGGOTAAN VARIABEL TEMPERATUR BATERAI

| Himpunan      | Jenis Fungsi | Rentang (°C)   |
|---------------|--------------|----------------|
| Normal        | Trapesium    | 20, 20, 25, 30 |
| Tinggi        | Segitiga     | 28, 35, 42     |
| Sangat Tinggi | Trapesium    | 40, 45, 60, 60 |

TABEL V : FUNGSI KEANGGOTAAN VARIABEL OUTPUT (FAKTOR PENGATURAN DAYA)

| Himpunan | Jenis Fungsi | Rentang          |
|----------|--------------|------------------|
| Hemat    | Trapesium    | 0, 0, 30, 50     |
| Normal   | Segitiga     | 40, 60, 80       |
| Boost    | Trapesium    | 70, 85, 100, 100 |

TABEL VI : BASIS ATURAN (RULE BASE) SISTEM FUZZY

| Temperatur    | SoC    | Output |
|---------------|--------|--------|
| Sangat Tinggi | Low    | Hemat  |
| Tinggi        | Medium | Hemat  |
| Normal        | Medium | Normal |
| Normal        | High   | Boost  |
| Tinggi        | High   | Normal |

Istilah himpunan pada Tabel VI telah diseragamkan dengan istilah pada Tabel III dan Tabel IV agar tidak menimbulkan ambiguitas penamaan. Nilai keluaran fuzzy (Tabel V) didefuzzifikasi pada rentang 0–100 menggunakan metode centroid, kemudian dikonversi menjadi faktor gain kp pada rentang 0–1 melalui pembagian dengan 100 ( $kp = \text{output\_fuzzy} / 100$ ) sebelum digunakan pada persamaan (1). Dengan demikian, satu variabel gain kp yang sama digunakan baik pada mode EMS berbasis ambang batas ( $kp = 1; 0,7; \text{atau } 0,4$ ) maupun pada mode kendali fuzzy kontinu, sehingga kedua skema dapat dibandingkan secara langsung.

## 2.5 Teknik Analisis Data

Data hasil simulasi dianalisis secara kuantitatif dan komparatif dengan membandingkan performa sistem tanpa fuzzy dan sistem dengan fuzzy selama simulasi berlangsung 3600 detik (1 jam operasi kendaraan). Parameter yang dibandingkan meliputi SoC, arus keluaran ( $I_{\text{Final}}$ ), daya keluaran EMS, dan State of Health (SoH). Sebagai titik pembandingan utama digunakan data pada detik ke-2520 dan ke-3240, karena pada rentang waktu tersebut Fuzzy Logic Controller (FLC) telah aktif setelah SoC berada di bawah 60%.

Nilai State of Health (SoH) pada model ini dihitung menggunakan pendekatan degradasi sederhana berbasis integrasi arus, dengan laju degradasi per langkah waktu sebanding dengan konstanta degradasi  $k_{\text{deg}}$  dan magnitudo arus keluaran EMS ( $|I_{\text{EMS}}|$ ), yang kemudian diintegrasikan terhadap waktu simulasi sebagaimana dinyatakan pada persamaan (2).

$$\text{SoH}(t) = \text{SoH}(0) - k_{\text{deg}} \int_0^t |I_{\text{EMS}}(\tau)| d\tau \quad (2)$$

dengan  $\text{SoH}(0) = 100\%$  sebagai kondisi awal baterai dan  $k_{\text{deg}} = 2 \times 10^{-6} \text{ \%/A}\cdot\text{s}$  sebagai konstanta degradasi empiris yang digunakan pada simulasi ini. Persamaan (2) menunjukkan bahwa penurunan SoH



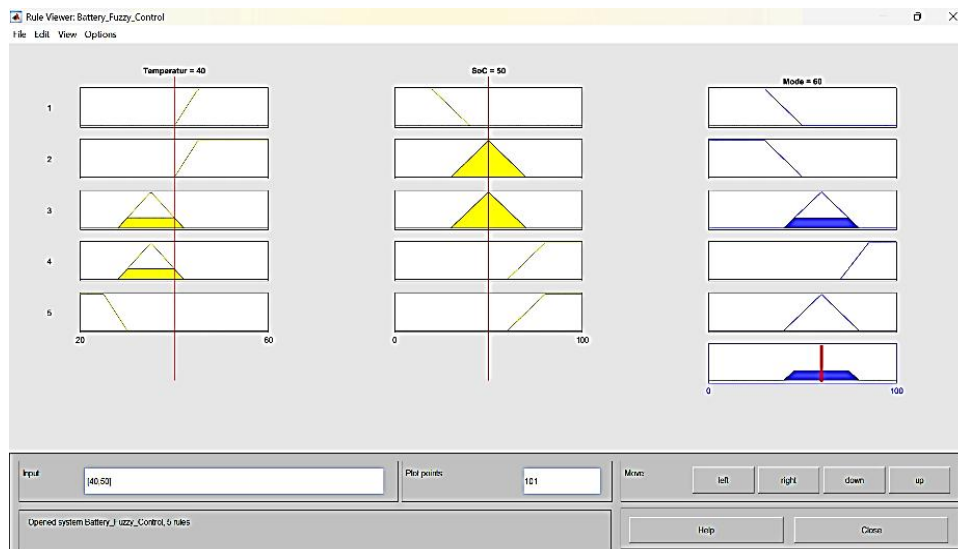
bersifat kumulatif terhadap magnitudo arus keluaran EMS sepanjang waktu simulasi, tanpa mempertimbangkan tanda arus (proses charge maupun discharge memberi kontribusi degradasi yang sama) maupun kondisi temperatur baterai. Pendekatan ini merupakan model empiris tingkat pertama (first-order) yang menekankan pengaruh besar arus terhadap laju penurunan SoH, dan belum memodelkan secara eksplisit pengaruh temperatur baterai, depth of discharge (DoD), maupun efek non-linear akumulasi siklus (cycle aging) pada horizon waktu yang lebih panjang — parameter-parameter yang pada model degradasi baterai Lithium-Ion yang lebih lengkap umumnya turut diperhitungkan sebagai faktor pengali terhadap laju degradasi dasar. Model pada persamaan (2) dipilih karena kesederhanaannya cukup untuk membandingkan tren relatif SoH antara sistem tanpa fuzzy dan sistem dengan fuzzy pada durasi simulasi 3600 detik, namun belum merepresentasikan mekanisme degradasi elektrokimia baterai Lithium-Ion secara lengkap.

Perlu digarisbawahi bahwa penelitian ini membandingkan tren SoC, sinyal daya/arus EMS, dan SoH antara kedua skema kendali, namun tidak mencakup pengukuran indikator performa berkendara seperti torsi, kecepatan, akselerasi, maupun kemampuan EMS memenuhi permintaan beban puncak kendaraan (load-following performance). Dengan demikian, penurunan sinyal daya dan arus keluaran EMS pada sistem fuzzy diinterpretasikan sebagai indikasi efisiensi pengelolaan sinyal energi oleh EMS, bukan sebagai bukti langsung peningkatan efisiensi energi kendaraan secara menyeluruh. Evaluasi terhadap indikator performa berkendara tersebut merupakan keterbatasan penelitian ini dan diusulkan sebagai arah penelitian lanjutan.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1 Hasil Rancangan Sistem Fuzzy

Pengujian rule viewer menunjukkan bahwa pada kondisi temperatur 40°C dan SoC 50%, sistem fuzzy menghasilkan output faktor pengaturan daya sebesar 60, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem fuzzy mampu melakukan pengambilan keputusan secara adaptif berdasarkan kombinasi kondisi SoC dan temperatur baterai sesuai basis aturan yang telah dirancang pada Tabel VI.



Gambar 2: Hasil pengujian rule viewer sistem fuzzy pada kondisi Temperatur = 40°C dan SoC = 50%

#### 3.2 Perbandingan State of Charge (SoC)

Berdasarkan hasil simulasi selama 3600 detik, sistem tanpa fuzzy mengalami penurunan SoC dari 80% menjadi 50,288%, sedangkan sistem dengan logika fuzzy menghasilkan SoC akhir sebesar 55,890% (Tabel VII dan Gambar 3). Selisih akhir sebesar 5,602 poin persentase ini setara dengan peningkatan retensi kapasitas relatif sebesar 11,14% dibandingkan sistem tanpa fuzzy ( $5,602 / 50,288 \times 100\%$ ). Pola penurunan SoC pada kedua sistem dapat dibagi menjadi dua fase berdasarkan titik aktivasi logika fuzzy. Pada fase

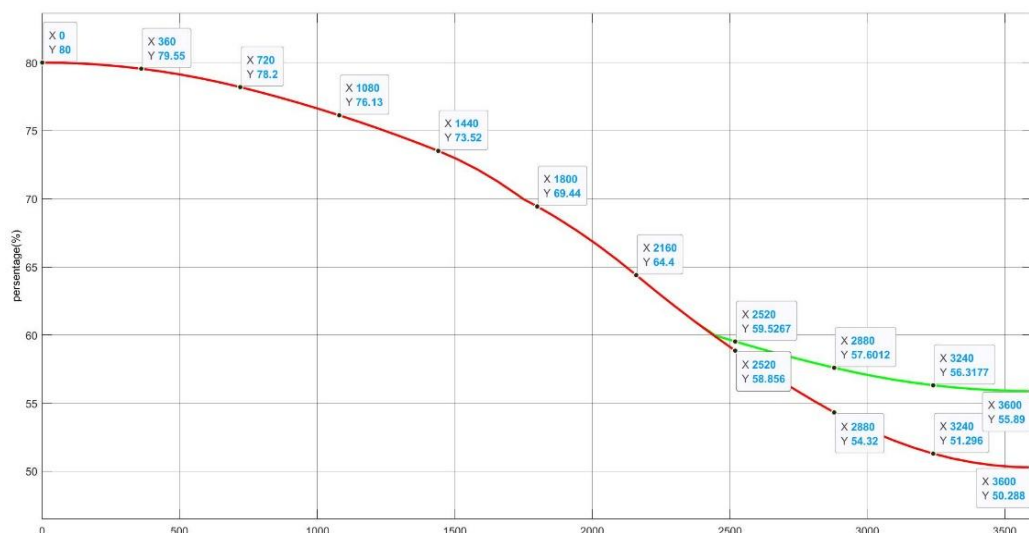


pertama (0–2520 detik), SoC kedua sistem menurun secara identik dari 80% menjadi sekitar 60%, karena logika fuzzy baru diaktifkan setelah SoC berada di bawah ambang batas 60% sehingga kedua sistem masih beroperasi pada gain normal ( $k_p = 1$ ). Laju penurunan pada fase ini tercatat sekitar 0,0079%/detik ( $\approx 0,48\%$ /menit).

Pada fase kedua (2520–3600 detik), kedua sistem mulai menunjukkan perbedaan perilaku yang signifikan. Sistem tanpa fuzzy melanjutkan penurunan dari 60% menjadi 50,288% — turun 9,712 poin persentase dalam 1080 detik, dengan laju rata-rata 0,0090%/detik ( $\approx 0,54\%$ /menit). Sebaliknya, sistem dengan logika fuzzy hanya turun 4,110 poin persentase pada rentang waktu yang sama, dengan laju rata-rata 0,0038%/detik ( $\approx 0,23\%$ /menit). Dengan kata lain, aktivasi logika fuzzy berhasil menekan laju deplesi SoC hingga sekitar 57,7% dibandingkan sistem tanpa fuzzy pada fase operasi kritis tersebut. Perbedaan laju ini konsisten dengan mekanisme kerja pengendali fuzzy, yang menyesuaikan faktor gain ( $k_p$ ) secara kontinu berdasarkan kombinasi SoC dan temperatur baterai (Tabel VI), berbeda dari sistem tanpa fuzzy yang membatasi arus keluaran hanya melalui ambang batas tetap (fixed-threshold gain). Pendekatan berbasis aturan fuzzy ini memungkinkan transisi penurunan gain yang lebih halus, sehingga tidak terjadi penurunan tajam ketika SoC mendekati ambang kritis, dan pada akhirnya menghasilkan laju deplesi SoC yang lebih landai pada paruh akhir simulasi.

TABEL VII : PERBANDINGAN SoC KEDUA SISTEM

| Parameter          | Tanpa Fuzzy | Dengan Fuzzy |
|--------------------|-------------|--------------|
| SoC awal           | 80%         | 80%          |
| SoC akhir (3600 s) | 50,288%     | 55,890%      |



Gambar 3: Grafik perbandingan penurunan SoC sistem tanpa fuzzy (merah) dan sistem dengan fuzzy (hijau)

### 3.3 Perbandingan Daya Keluaran EMS dan Arus Keluaran

Pada detik ke-3240, sistem tanpa fuzzy menghasilkan daya keluaran EMS sebesar 176,726 W dan arus keluaran 0,28 A, sedangkan sistem dengan logika fuzzy menghasilkan daya keluaran EMS sebesar 75,598 W dan arus keluaran 0,1188 A (Tabel VIII). Pada waktu simulasi 2520 detik, sistem fuzzy menghasilkan daya keluaran EMS 187,4026 W dan arus akhir 0,2972 A, sedangkan sistem tanpa fuzzy menghasilkan daya keluaran EMS 432,8502 W dan arus akhir 0,7 A. Sebagaimana dijelaskan pada Bagian 2.2, nilai-nilai tersebut merupakan sinyal kontrol relatif EMS dan bukan estimasi daya traksi aktual kendaraan. Secara kuantitatif, pada detik ke-2520 logika fuzzy menekan daya keluaran EMS sebesar 56,71% (dari 432,8502 W menjadi 187,4026 W) dan arus keluaran sebesar 57,54% (dari 0,7 A menjadi 0,2972 A) dibandingkan sistem tanpa fuzzy. Pada detik ke-3240, reduksi tercatat sebesar 57,23% untuk daya keluaran EMS dan 57,57% untuk arus keluaran. Konsistensi angka reduksi pada kedua titik waktu tersebut — berkisar 56,7–57,6% —

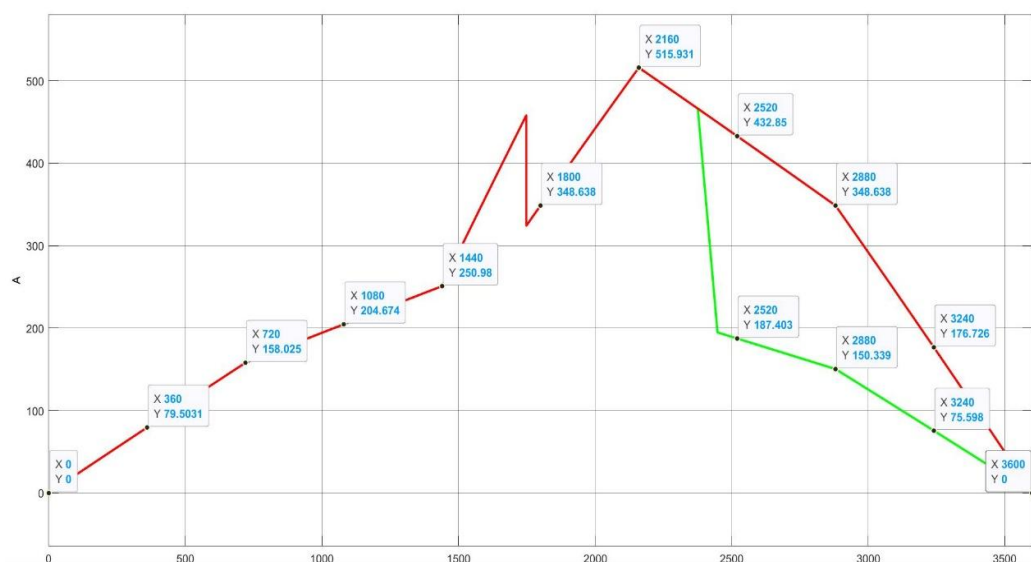


mengindikasikan bahwa logika fuzzy tidak menghasilkan penurunan daya yang bersifat kebetulan atau sesaat, melainkan mencerminkan penyesuaian gain kendali yang relatif stabil selama fase SoC rendah berlangsung.

Pola ini juga dapat ditinjau dari sisi laju perubahan antar dua titik waktu (2520–3240 detik, rentang 720 detik). Sistem tanpa fuzzy mengalami penurunan daya sebesar 256,1242 W (dari 432,8502 W menjadi 176,726 W), setara laju rata-rata 0,3557 W/detik, dan penurunan arus sebesar 0,42 A atau 0,000583 A/detik. Sementara itu, sistem dengan logika fuzzy menurun dari 187,4026 W menjadi 75,598 W — selisih 111,8046 W atau 0,1553 W/detik — dengan arus turun dari 0,2972 A menjadi 0,1188 A (selisih 0,1784 A, setara 0,000248 A/detik). Meskipun laju penurunan absolut sistem tanpa fuzzy lebih besar, hal ini wajar karena titik awalnya juga jauh lebih tinggi; yang lebih relevan secara operasional adalah bahwa sistem fuzzy secara konsisten mempertahankan sinyal daya dan arus pada kisaran 42–43% dari nilai sistem tanpa fuzzy di kedua titik pengamatan. Rasio yang relatif stabil ini konsisten dengan mekanisme kendali pada kedua sistem: EMS tanpa fuzzy menggunakan gain tetap berbasis ambang batas ( $k_p = 0,7$  pada mode ECO ketika  $SoC < 60\%$ ), sedangkan logika fuzzy menghasilkan faktor pengaturan daya secara kontinu berdasarkan Tabel VI. Rasio reduksi ~57% yang teramati mengindikasikan bahwa pada rentang SoC tersebut, fuzzy logic controller secara efektif beroperasi pada gain ekuivalen sekitar 0,30 ( $0,7 \times (1 - 0,57) \approx 0,30$ ) — lebih agresif dibanding gain tetap mode ECO, namun belum mencapai gain mode kritis (0,4). Temuan ini memperkuat argumen bahwa logika fuzzy tidak sekadar mereplikasi mode ambang batas yang sudah ada pada EMS konvensional, melainkan menghasilkan titik operasi baru di antara kedua mode tersebut, sesuai kondisi SoC dan temperatur aktual (Gambar 4). Penurunan sinyal daya dan arus ini mencerminkan strategi konservasi energi EMS pada kondisi SoC rendah, dan sebagaimana dijelaskan pada Bagian 2.5, belum tentu berkorelasi langsung dengan peningkatan performa berkendara karena aspek tersebut berada di luar cakupan penelitian ini.

TABEL VIII : PERBANDINGAN DAYA KELUARAN EMS DAN  $I_{Final}$  PADA DETIK KE-3240

| Parameter         | Tanpa Fuzzy | Dengan Fuzzy |
|-------------------|-------------|--------------|
| Daya keluaran EMS | 176,726 W   | 75,598 W     |
| $I_{Final}$       | 0,28 A      | 0,1188 A     |



Gambar 4: Grafik perbandingan daya keluaran EMS sistem tanpa fuzzy (merah) dan sistem dengan fuzzy (hijau)

### 3.4 Perbandingan State of Health (SoH)

Nilai SoH akhir pada sistem dengan logika fuzzy mencapai 99,9958%, sedikit lebih tinggi dibandingkan sistem tanpa fuzzy sebesar 99,9948% (Tabel IX dan Gambar 5). Bila ditinjau dari sisi degradasi

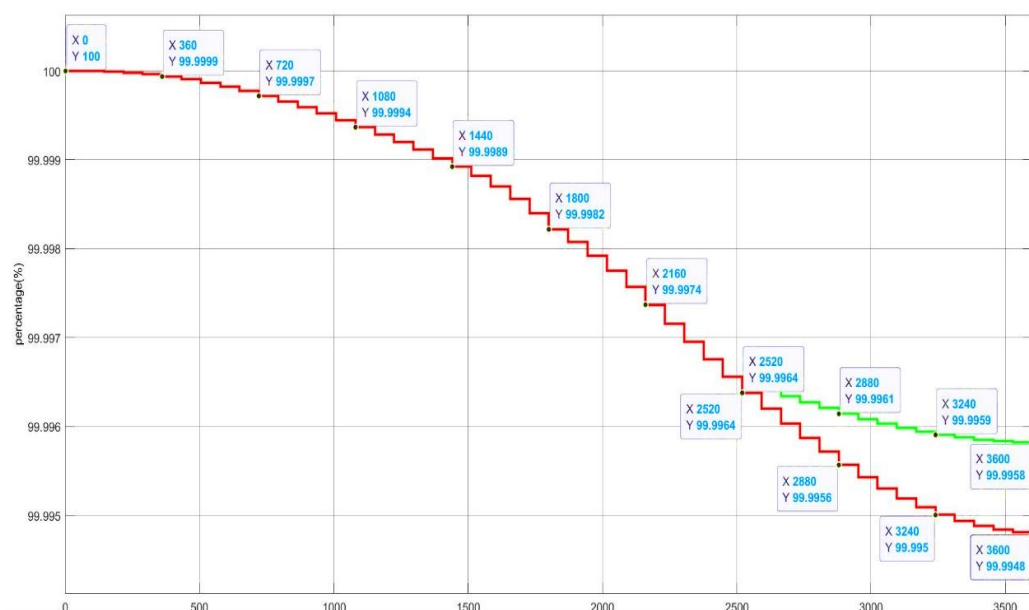


(100% – SoH akhir), sistem tanpa fuzzy mengalami penurunan SoH sebesar 0,0052 poin persentase, sedangkan sistem dengan logika fuzzy hanya mengalami penurunan 0,0042 poin persentase — atau 19,23% lebih rendah dibandingkan sistem tanpa fuzzy ( $0,0010 / 0,0052 \times 100\%$ ). Sebagaimana dijelaskan pada Bagian 2.5 (persamaan 2), nilai SoH ini dihasilkan dari model degradasi sederhana berbasis integrasi arus (first-order) yang belum melibatkan pengaruh temperatur baterai, depth of discharge, secara eksplisit maupun efek non-linear cycle aging. Oleh karena itu, selisih SoH sebesar ~19% ini sebaiknya dimaknai sebagai indikasi awal potensi manfaat logika fuzzy terhadap pengurangan tekanan arus pada baterai, bukan sebagai nilai perpanjangan umur baterai yang telah tervalidasi secara elektrokimia penuh.

Meskipun secara absolut selisih SoH tergolong kecil dan wajar mengingat durasi simulasi hanya 3600 detik (1 jam), pengurangan laju degradasi sebesar ~19% ini konsisten dengan penurunan sinyal arus dan daya oleh sistem fuzzy pada kondisi SoC rendah (Bagian 3.3), yang meringankan beban kerja baterai pada model degradasi yang digunakan. Karena degradasi baterai bersifat kumulatif, selisih laju sekecil ini berpotensi menjadi lebih signifikan pada horizon penggunaan jangka panjang (ribuan siklus pengisian-pengosongan). Namun, pembuktian kuantitatif atas potensi tersebut memerlukan simulasi dengan durasi lebih panjang atau skenario siklus pengisian-pengosongan berulang, serta model degradasi yang turut memperhitungkan pengaruh temperatur baterai secara eksplisit — sebagaimana disampaikan pada Bagian 2.5 — dan diusulkan sebagai arah penelitian lanjutan.

TABEL IX : PERBANDINGAN SoH DAN SoC KEDUA SISTEM

| Parameter          | Tanpa Fuzzy | Dengan Fuzzy |
|--------------------|-------------|--------------|
| SoH awal           | 100%        | 100%         |
| SoH akhir (3600 s) | 99,9948%    | 99,9958%     |
| SoC akhir (3600 s) | 50,288%     | 55,890%      |



Gambar 5: Grafik perbandingan State of Health (SoH) sistem tanpa fuzzy dan sistem dengan fuzzy

### 3.5 Pembahasan

Hasil pengujian menunjukkan bahwa implementasi logika fuzzy Mamdani mampu menjawab rumusan masalah penelitian dalam batasan cakupan yang telah ditetapkan. Pertama, sistem fuzzy terbukti mampu mengatur distribusi sinyal daya EMS secara adaptif berdasarkan kondisi SoC dan temperatur baterai, yang ditunjukkan oleh nilai SoC akhir yang lebih tinggi dibandingkan sistem tanpa fuzzy. Kedua, logika fuzzy terbukti menurunkan sinyal konsumsi daya dan arus keluaran EMS secara signifikan pada kondisi SoC rendah; penurunan ini diinterpretasikan sebagai efisiensi pengelolaan sinyal energi oleh EMS, bukan sebagai bukti



langsung peningkatan efisiensi energi kendaraan secara menyeluruh, karena indikator performa berkendara tidak dievaluasi pada penelitian ini. Ketiga, model SoH yang digunakan menunjukkan indikasi awal bahwa optimasi sinyal daya berbasis logika fuzzy berpotensi meringankan beban kerja baterai, meskipun besaran perpanjangan umur baterai yang sesungguhnya memerlukan model degradasi yang lebih lengkap dan simulasi jangka panjang untuk divalidasi. Dengan demikian, penerapan logika fuzzy pada EMS kendaraan listrik dapat menjadi pendekatan awal yang menjanjikan untuk menyeimbangkan kebutuhan sinyal daya kendaraan dengan upaya perlindungan terhadap baterai, dengan catatan keterbatasan cakupan sebagaimana diuraikan di atas.

#### 4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, simulasi, dan analisis sistem Energy Management System (EMS) kendaraan listrik berbasis logika fuzzy menggunakan MATLAB dan Simulink, dapat disimpulkan bahwa implementasi logika fuzzy metode Mamdani mampu mengatur distribusi sinyal daya EMS secara adaptif berdasarkan kondisi State of Charge (SoC) dan temperatur baterai. Nilai SoC akhir pada sistem dengan logika fuzzy mencapai 55,890%, lebih tinggi dibandingkan sistem tanpa logika fuzzy sebesar 50,288%. Implementasi logika fuzzy juga terbukti menurunkan sinyal konsumsi daya EMS, dengan penurunan daya keluaran EMS dari 432,8502 W menjadi 187,4026 W dan arus akhir dari 0,7 A menjadi 0,2972 A pada waktu simulasi 2520 detik. Selain itu, nilai State of Health (SoH) akhir pada sistem fuzzy sebesar 99,9958%, sedikit lebih tinggi dibandingkan sistem tanpa fuzzy sebesar 99,9948%, yang menjadi indikasi awal bahwa penggunaan logika fuzzy pada EMS berpotensi memperpanjang umur pakai baterai Lithium-Ion pada kendaraan listrik.

Penelitian ini memiliki keterbatasan berupa (1) daya dan arus yang dilaporkan merupakan sinyal kontrol relatif EMS, bukan estimasi daya traksi absolut kendaraan; (2) evaluasi tidak mencakup indikator performa berkendara seperti torsi, kecepatan, dan akselerasi; serta (3) model degradasi SoH yang digunakan bersifat sederhana (first-order, berbasis arus) dan belum memodelkan pengaruh temperatur maupun efek cycle aging secara eksplisit. Penelitian lanjutan disarankan untuk memvalidasi klaim efisiensi energi kendaraan secara menyeluruh dengan menambahkan indikator performa berkendara, serta memperluas model degradasi baterai dan durasi simulasi guna memperkuat validitas klaim perpanjangan umur baterai.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. Larminie and J. Lowry, *Electric Vehicle Technology Explained*, 2nd ed. Chichester, U.K.: John Wiley & Sons, 2012.
- [2] X. Bi, W. Li, and H. Zhang, "Transport Electrification: Opportunities and Future Challenges," *IEEE Electrification Magazine*, vol. 11, no. 4, pp. 14–18, 2023.
- [3] J. Stark et al., "Electric Vehicles with Range Extenders: Evaluating the Contribution to the Sustainable Development of Metropolitan Regions," *Journal of Urban Planning and Development*, vol. 144, no. 1, 2018, doi: 10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000408.
- [4] V. Pirmana, A. S. Alisjahbana, A. A. Yusuf, R. Hoekstra, and A. Tukker, "Economic and Environmental Impact of Electric Vehicles Production in Indonesia," *Clean Technologies and Environmental Policy*, vol. 25, no. 6, pp. 1871–1885, 2023, doi: 10.1007/s10098-023-02475-6.
- [5] W. Shen, N. Wang, J. Zhang, F. Wang, and G. Zhang, "Heat Generation and Degradation Mechanism of Lithium-Ion Batteries during High-Temperature Aging," *ACS Omega*, vol. 7, no. 35, pp. 30927–30937, 2022, doi: 10.1021/acsomega.2c04093.
- [6] S. Em and R. Jurecki, "Technological Developments in Vehicles with Electric Drive," *Archives of Automotive Engineering*, vol. 99, no. 1, pp. 38–47, 2023.
- [7] G. L. Plett, *Battery Management Systems, Volume I: Battery Modeling*. Norwood, MA, USA: Artech House, 2015.
- [8] T. Chen et al., "Applications of Lithium-Ion Batteries in Grid-Scale Energy Storage Systems," *Engineering*, vol. 6, no. 2, pp. 208–217, 2020, doi: 10.1016/j.eng.2019.06.006.
- [9] J. Du, W. Wang, Z. Wei, F. Hu, and X. Wu, "Capacity Fading Rules of Lithium-Ion Batteries for Multiple Thermoelectric Aging Paths," *Journal of Energy Storage*, vol. 72, 2023, doi: 10.1016/j.est.2023.108559.
- [10] M. Sumi and P. R. Swathilakshmi, "A Detailed Analysis of Electric Vehicle Technology," *International Journal of Engineering Research and Technology*, vol. 12, no. 4, pp. 1–8, 2023.
- [11] A. Aboazoum, "Electric Vehicles: Innovation Process for Sustainable Development and Future Market Forecasting," *International Journal of Multidisciplinary Sciences and Arts*, vol. 1, no. 1, pp. 9–15, 2022.

