

Sistem Manajemen Energi berbasis *Fuzzy Logic-Kontrol PI* pada Kendaraan Listrik Multisumber

Uma Elza Salsabila¹, Subiyanto^{2*}

Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Semarang, Jawa Tengah 50229, Indonesia

umaelzas@students.unnes.ac.id¹, subiyanto@mail.unnes.ac.id^{2*}

Abstrak— Kebutuhan akan kendaraan listrik (*Electric Vehicle/EV*) yang efisien menghadapi tantangan seperti keterbatasan jangkauan, penurunan performa, dan degradasi baterai akibat beban berkendara yang dinamis. Sistem multisumber yang mengintegrasikan *Fuel cell*, baterai, dan superkapasitor menjadi solusi menjanjikan untuk mengatasi keterbatasan tersebut karena mampu menyinergikan keunggulan masing-masing komponen. Namun, perbedaan karakteristik dinamis dari setiap sumber energi menuntut adanya sistem manajemen energi (*Energy Management System/EMS*) yang cerdas dan adaptif untuk mengoordinasikan aliran daya secara optimal. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan menyimulasikan EMS berbasis kombinasi *Fuzzy Logic Controller (FLC)* dan *Proportional-Integral (PI) Controller* pada kendaraan listrik multisumber. FLC digunakan untuk menentukan daya referensi bagi *Fuel cell* dan superkapasitor berdasarkan permintaan beban (Preq) dan status *State of Charge (SoC)*, sedangkan PI Controller digunakan untuk menstabilkan tegangan bus DC melalui pengaturan daya baterai. Model sistem dibangun dan diuji menggunakan MATLAB/Simulink, dengan skenario beban dinamis, termasuk kondisi akselerasi dan pengereman. Pada kondisi pengereman dengan SOC tinggi, sistem diasumsikan dilengkapi dengan *braking resistor* untuk menyerap kelebihan daya. Hasil simulasi menunjukkan bahwa EMS mampu membagi daya sesuai karakteristik masing-masing sumber, menjaga kestabilan tegangan bus DC, serta merespons perubahan beban secara efektif. *Fuel cell* berperan sebagai sumber daya dasar yang stabil, superkapasitor menyuplai dan menyerap daya puncak secara cepat, sedangkan baterai berfungsi menjaga kestabilan sistem secara keseluruhan. Strategi kontrol FLC-PI yang diusulkan menunjukkan performa yang adaptif, efisien, dan stabil, sehingga berpotensi meningkatkan efisiensi dan durabilitas kendaraan listrik multisumber.

Kata kunci— Sistem Manajemen Energi, Kendaraan Listrik, *Fuel cell*, Superkapasitor, Baterai, *Fuzzy Logic Controller*, Kontrol PI.

Abstract— The demand for efficient electric vehicles (EVs) faces major challenges such as limited driving range, performance degradation, and battery wear due to dynamic driving loads. A multi-source energy system integrating *Fuel cells*, batteries, and supercapacitors offers a promising solution to these limitations by leveraging the strengths of each component. However, the different dynamic characteristics of these energy sources require an intelligent and adaptive *Energy Management System (EMS)* to coordinate power flow effectively. This study aims to design and simulate an EMS based on a combination of a *Fuzzy Logic Controller (FLC)* and a *Proportional-Integral (PI) Controller* for a multi-source electric vehicle system. The FLC is used to determine power references for the *Fuel cell* and supercapacitor based on load demand (Preq) and the *State of Charge (SoC)*, while the PI controller stabilizes the DC bus voltage by controlling the battery power. The system model is developed and tested in MATLAB/Simulink using dynamic load scenarios, including acceleration and braking conditions. During braking events with high SOC levels, a braking resistor is assumed to be present to absorb excess energy. Simulation results show that the EMS effectively distributes power according to each component's characteristics, maintains DC bus voltage stability, and responds adaptively to load variations. The *Fuel cell* acts as a steady base power supplier, the supercapacitor manages peak power and regenerative braking energy, and the battery ensures overall system stability. The proposed FLC-PI control strategy demonstrates adaptive, efficient, and stable performance, showing its potential to enhance the efficiency and durability of multi-source electric vehicles.

Keywords— *Energy Management System*, Electric Vehicle, *Fuel cell*, Supercapacitor, Battery, *Fuzzy Logic Controller*, PI Control.

I. PENDAHULUAN

Perubahan iklim dan meningkatnya emisi gas rumah kaca dari sektor transportasi mendorong perlunya adopsi teknologi kendaraan yang lebih ramah lingkungan. Kendaraan listrik (*Electric Vehicle/EV*) menjadi solusi potensial karena tidak

menghasilkan emisi langsung dan memiliki efisiensi energi yang lebih tinggi dibanding kendaraan berbasis mesin pembakaran dalam (*Internal Combustion Engine/ICE*) (IPCC, 2023; Dephub, 2022). Di Indonesia, kebijakan percepatan adopsi EV telah ditetapkan melalui Peraturan Presiden No. 55 Tahun 2019 tentang Kendaraan Bermotor Listrik Berbasis

Baterai (KBLBB) (PPRI, 2019), sebagai bagian dari upaya mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan menurunkan emisi karbon di sektor transportasi.

Namun, EV berbasis satu sumber energi seperti baterai menghadapi beberapa kendala, antara lain keterbatasan jangkauan, waktu pengisian ulang yang lama, serta degradasi performa akibat pembebanan dinamis yang terus-menerus (Maghfiroh et al., 2024). Ketergantungan tunggal ini tidak hanya membatasi efisiensi sistem, tetapi juga mempercepat penurunan umur komponen penyimpan energi. Untuk mengatasi hal ini, pendekatan multisumber seperti *Hybrid Energy Source and Storage System* (HESSS) menjadi pilihan yang menjanjikan. HESSS menggabungkan *fuel cell*, baterai, dan superkapasitor yang masing-masing memiliki karakteristik dinamis berbeda dan dapat saling melengkapi.

Meskipun integrasi multisumber meningkatkan fleksibilitas sistem, perbedaan karakteristik dinamis dari *fuel cell*, baterai, dan superkapasitor menghadirkan tantangan dalam pengelolaan distribusi daya. Untuk itu, diperlukan sistem manajemen energi (*Energy Management System/EMS*) yang cerdas, adaptif, dan mampu mengoptimalkan aliran daya sesuai kondisi beban dan status pengisian komponen. *Fuzzy Logic Controller* (FLC) telah terbukti efektif dalam menangani sistem nonlinier dan ketidakpastian parameter tanpa memerlukan model matematis yang kompleks (Lakshmi & Bitragunta, 2023; Sudhakar & Kumaraswamy, 2023).

Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan menyimulasikan sistem manajemen energi berbasis kombinasi *Fuzzy Logic Controller* (FLC) dan *Proportional-Integral (PI) Controller* pada kendaraan listrik multisumber. FLC digunakan untuk menentukan referensi daya *fuel cell* dan superkapasitor berdasarkan beban dan status *State of Charge* (SoC), sedangkan PI Controller digunakan untuk menjaga kestabilan tegangan bus DC melalui pengaturan kontribusi daya dari baterai. Pendekatan ini diuji melalui simulasi pada MATLAB/Simulink dengan skenario beban dinamis.

Kontribusi utama dari artikel ini adalah pengembangan strategi EMS berbasis gabungan FLC dan PI yang mampu mengoptimalkan pembagian daya antar sumber, menjaga kestabilan tegangan, dan meningkatkan respons sistem terhadap variasi beban. Dengan mengintegrasikan keunggulan FLC dalam pengambilan keputusan adaptif dan kemampuan PI dalam pengaturan presisi, penelitian ini diharapkan memberikan kontribusi signifikan terhadap pengembangan teknologi manajemen energi pada kendaraan listrik multisumber yang efisien, andal, dan berkelanjutan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Sistem manajemen energi (*Energy Management System/EMS*) pada kendaraan listrik berbasis multi-sumber merupakan pendekatan penting dalam menjawab keterbatasan performa dari sistem penyimpanan energi tunggal. Secara teoritis, pengelolaan energi dalam *Hybrid Energy Storage System* (HESSS) merujuk pada prinsip *power-split control theory*, di mana distribusi beban antara dua atau lebih sumber energi harus dilakukan secara efisien, stabil, dan adaptif. *Fuel cell* sebagai sumber daya primer menyediakan dasar

secara stabil, baterai berfungsi sebagai penyimpan energi menengah, sedangkan superkapasitor berperan dalam merespons fluktuasi beban dengan cepat karena densitas dayanya yang tinggi (Krishna et al., 2023; Mounica & Obulesu, 2023). *Fuzzy Logic Control* (FLC) dalam kendali nonlinier, menawarkan kemampuan pengambilan keputusan berbasis aturan linguistik tanpa perlu model matematis kompleks, yang sangat sesuai untuk sistem multisumber dengan ketidakpastian tinggi.

Sejumlah penelitian terdahulu telah mengaplikasikan FLC dalam berbagai skenario sistem kendaraan listrik multisumber. Misalnya, (Sudhakar & Kumaraswamy, 2023) mengembangkan sistem HESS dengan FLC untuk mendistribusikan beban antara *fuel cell*, baterai, dan superkapasitor. Penelitian mereka menunjukkan peningkatan efisiensi distribusi daya dan kestabilan tegangan bus, namun belum mengintegrasikan kontrol linier seperti PI untuk koreksi kesalahan. Sementara itu, (Lakshmi & Bitragunta, 2023) menggunakan kombinasi kontrol logika *fuzzy* dan model prediktif, namun pendekatannya memerlukan pemodelan prediktif yang kompleks dan tidak mudah diimplementasikan secara *real-time*. Di sisi lain, penelitian (Rezk & Fathy, 2025) berhasil membandingkan beberapa strategi kontrol EMS berbasis kecerdasan buatan dan menemukan bahwa kombinasi FLC dan PI memiliki keunggulan pada kestabilan tegangan dan kecepatan respons sistem.

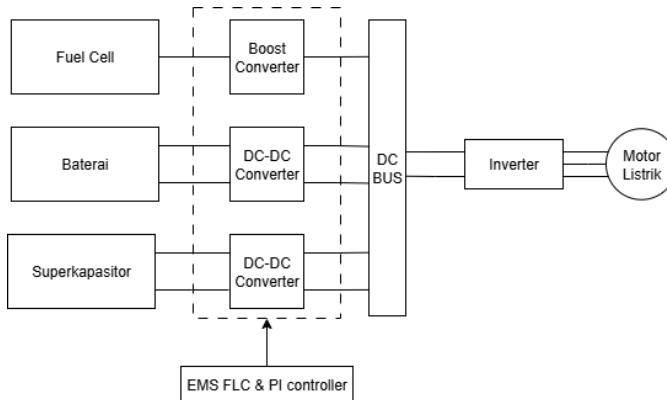
Meskipun berbagai pendekatan telah dilakukan, terdapat beberapa kesenjangan yang belum terselesaikan secara menyeluruh. Secara teoritis, belum banyak studi yang menyatakan keunggulan FLC dalam pengambilan keputusan dengan kestabilan numerik kontrol PI untuk pengaturan daya baterai secara simultan dalam satu sistem EMS. Secara empiris, masih terbatas jumlah studi yang menguji integrasi FLC-PI dalam kondisi simulasi realistik berbasis MATLAB/Simulink dengan konfigurasi penuh HESSS: *fuel cell*, baterai, dan superkapasitor. Selain itu, sebagian besar penelitian terdahulu masih memusatkan perhatian pada pengujian komponen atau kontrol secara terpisah, bukan dalam integrasi sistem penuh.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, artikel ini berkontribusi dalam mengembangkan dan mengevaluasi sistem EMS kendaraan listrik multisumber dengan kombinasi FLC dan PI Controller secara terintegrasi. Sistem ini dirancang untuk mengelola aliran daya antara *fuel cell*, baterai, dan superkapasitor dalam satu skema kontrol simultan. Dengan memanfaatkan keunggulan adaptivitas FLC serta kestabilan koreksi PI, pendekatan ini diharapkan dapat mengatasi keterbatasan dari pendekatan sebelumnya sekaligus menawarkan solusi yang lebih praktis, *robust*, dan dapat direalisasikan dalam sistem nyata.

III. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan jenis eksperimen simulasi berbasis model, untuk menguji performa sistem manajemen energi (*Energy Management System/EMS*) pada kendaraan listrik multisumber. Pemilihan pendekatan ini didasarkan pada kebutuhan untuk menganalisis secara terukur kinerja sistem kendali berbasis logika *fuzzy* dan

PI controller dalam mengatur distribusi daya dari tiga sumber energi, yakni fuel cell, baterai, dan superkapasitor, dalam skenario dinamis berbasis MATLAB/Simulink.



Gambar 1. Diagram Blok Sistem Manajemen Energi

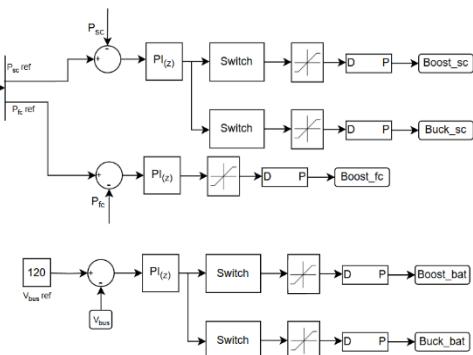
Konfigurasi sistem dirancang menggunakan pendekatan topologi paralel, yang memungkinkan ketiga sumber bekerja secara kolaboratif maupun bergantian sesuai kebutuhan. Pada gambar 1. menunjukkan diagram blok EMS, yang menggambarkan hubungan antar sumber energi, konverter, EMS, dan beban. Fuel cell digunakan sebagai sumber utama, baterai sebagai penyanga energi menengah, dan superkapasitor sebagai penyerap dan penyedia daya saat terjadi perubahan beban cepat (*load transient*). Diagram blok sistem manajemen energi multisumber yang diusulkan, terdiri dari *fuel cell*, baterai, dan superkapasitor yang terhubung secara paralel melalui konverter masing-masing ke DC bus untuk menyuplai motor tiga fasa.

Untuk memastikan performa simulasi mendekati kondisi nyata, setiap komponen utama pada sistem dimodelkan dengan parameter teknis yang mengacu pada data pabrikan dan penelitian sebelumnya. Rincian spesifikasi *fuel cell*, baterai, superkapasitor, serta parameter *Proportional-Integral (PI) controller* yang digunakan, disajikan pada tabel 1.

TABEL 1. SPESIFIKASI TEKNIS KOMPONEN SISTEM EMS MULTISUMBER

Komponen	Parameter	Nilai
Fuel Cell	Tipe fuel cell	PEMFC
	Stack power	6 kW
	Number of Cells	65
	Nominal Stack Efficiency	55%
Baterai	Tipe baterai	Lithium-Ion
	Tegangan Nominal	72 V
Superkapasitor	Kapasitas nominal	20 Ah
	Kapasitas nominal	125 F
	Tegangan nominal	32,4 V
Motor Listrik	Jumlah kapasitor seri	12
	Hambatan seri ekivalen	8,1 mΩ
	Tipe motor	PMSM
	Phase Resistance	0,012 Ω
	Phase Induction	0,154 mH
PI Controller	Voltage Constant	72 V
	Mode komutasi	120°
	Proportional Gain (Kp)	0,007

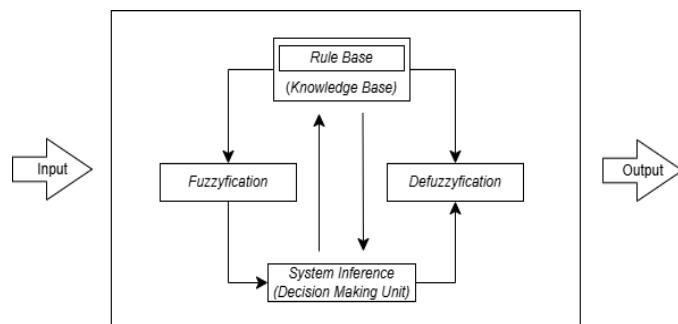
Komponen	Parameter	Nilai
PI Controller	Integral Gain (Ki)	0,02
	Sampling time	1e-6



Gambar 2. Skema Proses Sistem Kendali EMS

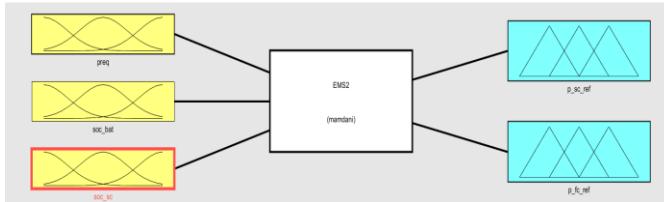
Desain strategi kontrol EMS dalam penelitian ini mengombinasikan pengendali logika fuzzy (FLC) dan *Proportional-Integral (PI) controller*. FLC digunakan untuk menentukan referensi daya *fuel cell* dan superkapasitor berdasarkan masukan berupa selisih tegangan (U_{err}), daya *Fuel cell* kuadrat (P_{fc}^2), tegangan superkapasitor kuadrat (U_{cap}^2), dan arus baterai (I_{bat}). PI Controller digunakan untuk menjaga kestabilan tegangan DC bus dengan mengatur arus baterai.

Pada gambar 2, memperlihatkan skema strategi kendali yang digunakan, mulai dari akuisisi data sensor hingga pengiriman sinyal kendali ke konverter masing-masing. Untuk merespons dinamika sistem secara efisien, FLC yang digunakan dalam EMS menggunakan tipe mamdani dan dirancang melalui tahapan fuzzifikasi, evaluasi aturan (*rule base*), dan defuzzifikasi. Pada gambar 3 menunjukkan proses alur fuzzy logic.



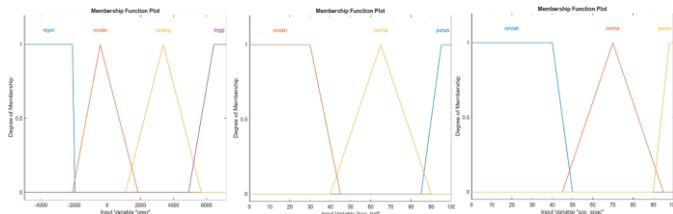
Gambar 3. Proses Alur Fuzzy Logic

Pada tahap fuzzifikasi, sinyal *input* diubah menjadi nilai linguistik berdasarkan fungsi keanggotaan yang telah ditetapkan. Kombinasi kondisi ini kemudian diproses oleh *rule base* yang berisi aturan *if-then* sesuai karakteristik tiap sumber energi. Hasil keluaran *fuzzy* selanjutnya dikonversi kembali menjadi nilai numerik melalui proses defuzzifikasi menggunakan metode *centroid*, yang dipilih karena mampu menghasilkan keluaran yang halus dan representatif terhadap distribusi derajat keanggotaan.



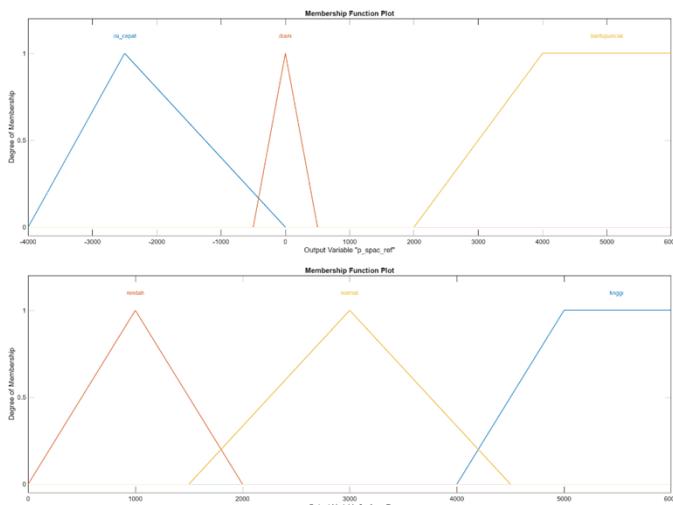
Gambar 4. Perancangan Sistem *Fuzzy*

Pada gambar 4 menunjukkan 5 himpunan keanggotaan yang terdiri dari 3 variabel *input* yaitu *Preq*, *SoC_{bat}*, dan *SoC_{sc}* dan 2 variabel *output* yaitu *P_{sc}_ref* dan *P_{fc}_ref*. Pada proses menentukan parameter nilai digunakan keanggotaan trapesoidal dan triangular karena bentuknya sederhana dan efisien untuk sistem kontrol waktu nyata seperti EMS.



Gambar 5. Fungsi keanggotaan input *Preq*, *SOC_{bat}*, dan *SOC_{sc}*

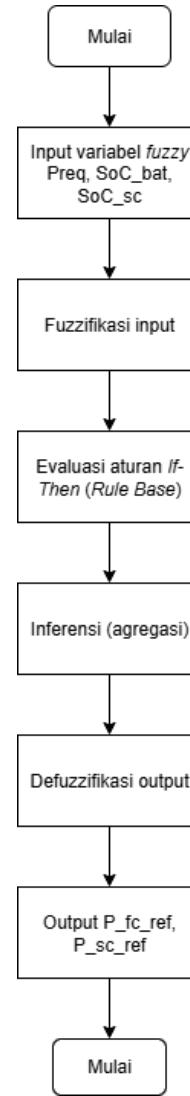
Pada gambar 5 menunjukkan fungsi keanggotaan input untuk permintaan daya (*Preq*) menggunakan regen, rendah, sedang dan tinggi. Sementara *SoC* baterai menggunakan penuh, rendah, dan normal. Dan *SoC* superkapasitor menggunakan rendah, normal, dan penuh.



Gambar 6. Fungsi Keanggotaan Output *P_{sc}_ref* dan *P_{fc}_ref*

Pada gambar 6 menunjukkan fungsi keanggotaan *output* untuk referensi daya superkapasitor menggunakan *isi_cepat*, *diam*, *bantupuncak* dan referensi daya *fuel cell* menggunakan *tinggi*, *rendah*, *normal*.

Gambar 7 menampilkan alur kerja internal dari FLC, termasuk bagaimana data masukan diolah menjadi sinyal pengontrol berdasarkan basis aturan yang telah ditentukan.



Gambar 7. Skema Logika Kerja FLC dalam EMS

Selanjutnya, untuk menentukan keluaran sistem berdasarkan kombinasi kondisi masukan yang beragam, digunakan basis aturan *fuzzy* yang dirancang secara khusus. Tabel 2 menunjukkan daftar lengkap aturan *fuzzy* yang digunakan dalam sistem EMS ini. Tabel tersebut memuat 17 aturan yang menghubungkan kombinasi kondisi masukan (*if*) seperti permintaan daya, status *SoC_{bat}*, dan *SoC_{scap}*, dengan keluaran (*then*) berupa besaran daya referensi dari *fuel cell* maupun superkapasitor. Aturan-aturan ini disusun berdasarkan logika heuristik dan karakteristik masing-masing sumber energi, serta berfungsi sebagai dasar pengambilan keputusan dalam mengalokasikan beban secara dinamis dan efisien.

TABEL 2. TABEL RULES FUZZY

No	Kondisi (If)	Maka (Then)
1	Preq is tinggi AND soc_scap is normal	P_scap_ref is bantupuncak
2	Preq is tinggi AND soc_scap is rendah	P_fc_ref is tinggi
3	SoC_bat is rendah	P_fc_ref is tinggi
4	Preq is rendah AND SoC_bat is penuh	P_fc_ref is rendah
5	Preq is regen AND SoC_bat is penuh	P_scap_ref is isi_cepat
6	Preq is regen AND SoC_scap is normal	P_scap_ref is diam
7	Preq is regen AND SoC_scap is penuh	P_scap_ref is diam AND P_fc_ref is normal
8	Preq is sedang AND SoC_bat is normal	P_scap_ref is diam AND P_fc_ref is normal
9	Preq is rendah AND SoC_bat is normal	P_scap_ref is diam AND P_fc_ref is normal
10	Preq is sedang AND SoC_bat is rendah	P_fc_ref is tinggi
11	Preq is rendah AND SoC_scap is rendah	P_Scap_ref is isi_cepat
12	SoC_bat is normal	P_fc_ref is normal
13	Preq is tinggi AND SoC_bat is normal	P_fc_ref is tinggi
14	Preq is rendah AND SoC_bat is normal	P_fc_ref is rendah
15	Preq is rendah	P_scap_ref is diam
16	Preq is sedang	P_scap_ref is diam
17	SoC_bat is normal	P_scap_ref is diam

Aturan-aturan fuzzy yang telah dirancang dan ditampilkan pada tabel 2 berfungsi sebagai dasar pengambilan keputusan sistem EMS dalam menentukan distribusi daya yang tepat dari setiap sumber energi dianalisis untuk menghasilkan output referensi daya yang adaptif.

Untuk menguji validitas dan responsivitas dari sistem fuzzy ini, diterapkan skenario beban dinamis yang ditampilkan pada grafik 1. Sinyal ini menggambarkan perubahan permintaan daya akibat kondisi akselerasi dan deselerasi kendaraan listrik, dengan *sample time* sebesar 5 detik. Profil beban disusun dengan variasi nilai dari -20 W hingga 30 W, sehingga mampu memicu aktivasi berbagai kombinasi aturan fuzzy secara bergantian sesuai kondisi sistem.

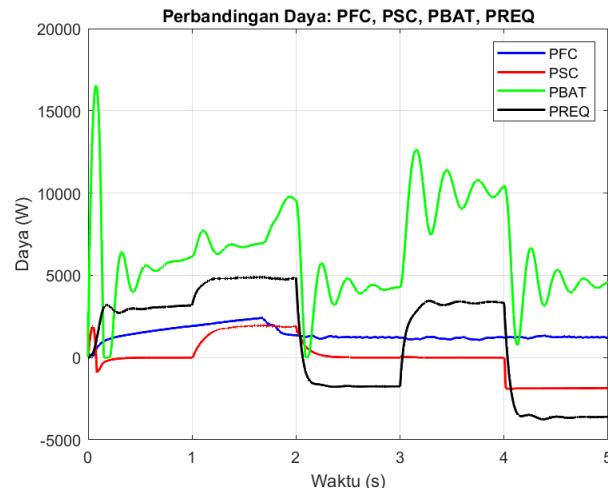


Grafik 1. Skenario Beban

Dengan demikian, sinyal beban ini tidak hanya merepresentasikan dinamika operasional kendaraan, tetapi juga menjadi uji fungsi langsung terhadap keefektifan aturan *fuzzy* dalam merespons perubahan sistem secara *real-time*. Pengujian ini memungkinkan evaluasi menyeluruh terhadap ketepatan keputusan kendali, kestabilan tegangan DC bus, serta efisiensi kontribusi sumber daya pada berbagai kondisi beban.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penerapan *fuzzy logic* dan Kontrol PI pada kendaraan listrik multisumber dalam sistem manajemen energi dijabarkan pada bagian ini untuk mengevaluasi efektivitas menjaga kestabilan tegangan DC bus dan mengoptimalkan distribusi daya berdasarkan status sumber serta merespons perubahan beban secara dinamis.



Grafik 2. Perbandingan Permintaan Daya Preq, Daya Fuel Cell, Superkapasitor, dan Baterai

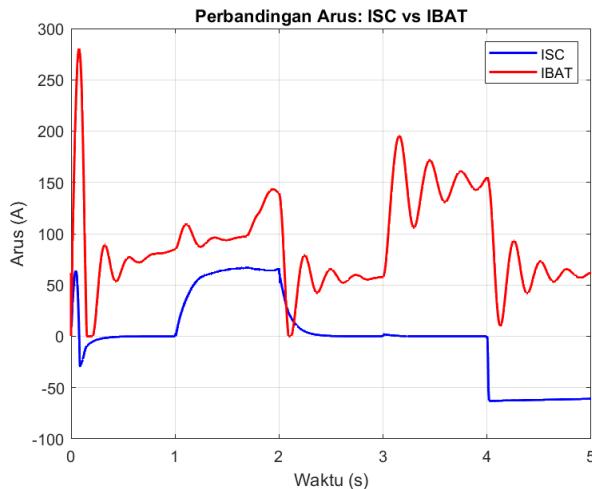
Hasil simulasi pada grafik 2 menunjukkan bahwa permintaan daya beban (Preq) bervariasi sepanjang waktu simulasi dengan beberapa puncak dan penurunan tajam yang merepresentasikan perubahan kondisi operasi kendaraan. Nilai Preq berkisar antara -4000 W hingga sekitar 4900 W. di mana

nilai positif menunjukkan kondisi akselerasi atau beban positif, sedangkan nilai negatif menandakan fase *regenerative braking*.

Dalam merespons fluktuasi tersebut, fuel cell (Pfc) secara konsisten menyuplai daya dengan nilai stabil di kisaran 1000 W hingga 2000 W, memperlihatkan karakteristiknya sebagai sumber daya utama (*base load*) yang tidak terpengaruh signifikan oleh perubahan beban mendadak.

Baterai (Pbat) memberikan kontribusi daya paling dominan dan fluktuatif, dengan rentang 0 W hingga mendekati 17000 W. Baterai menyuplai daya tambahan ketika permintaan beban melampaui kapasitas fuel cell dan superkapasitor. Tidak ditemukan nilai negatif pada Pbat, yang menunjukkan bahwa baterai tidak beroperasi dalam mode penyimpanan energi (*charging*) selama skenario ini, melainkan selalu berada dalam mode suplai daya.

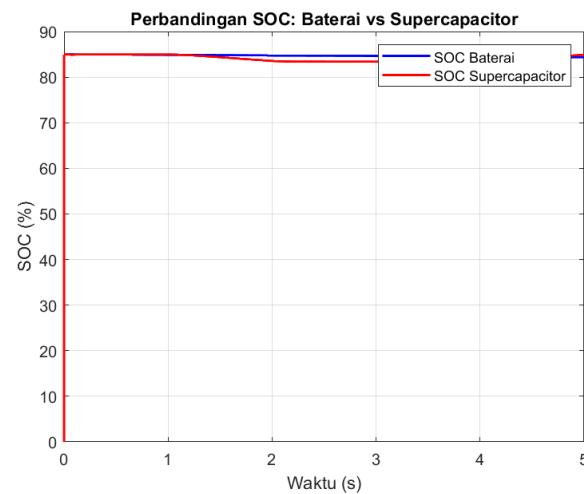
Superkapasitor (Psc) berkontribusi dalam rentang -2300 W hingga 2000 W dengan perubahan yang cepat dan tajam, terutama saat terjadi transien beban. Lonjakan positif terjadi ketika beban meningkat mendadak, sementara nilai negatif muncul saat sistem melakukan *regenerative braking*. Pola ini menguatkan peran superkapasitor sebagai penyeimbang daya transien berfrekuensi tinggi dengan durasi singkat untuk menjaga stabilitas tegangan dan mengurangi stres pada baterai.



Grafik 3. Perbandingan Arus Superkapasitor dan Baterai

Pada grafik 3 menunjukkan grafik perilaku arus pada dua komponen penyimpanan energi aktif, yaitu baterai (Ibat) dan superkapasitor (Isc). Ibat memiliki kisaran arus dari 0 A hingga sekitar 280 A pada kondisi suplai daya, dan tidak pernah menunjukkan nilai negatif signifikan, yang berarti baterai tidak mengalami fase pengisian selama skenario ini. Arus tertinggi terjadi pada awal simulasi ($t = 0$ s), bertepatan dengan lonjakan beban (*inrush current*) akibat akselerasi awal kendaraan. Setelah fase awal, arus baterai menurun namun tetap berfluktuasi, dengan beberapa puncak sekitar 200 A pada saat terjadi lonjakan permintaan daya ($t = 3$ s). Hal ini menunjukkan peran baterai sebagai sumber daya utama untuk beban menengah hingga tinggi, khususnya ketika permintaan melebihi kapasitas fuel cell dan superkapasitor. Isc beroperasi dalam kisaran -60 A hingga sekitar 65 A. Nilai positif pada Isc terjadi ketika superkapasitor menyuplai daya transien, biasanya

pada momen akselerasi atau perubahan beban mendadak. Nilai negatif, seperti yang terlihat setelah detik ke-4 ($t = 4-5$ s), menunjukkan bahwa superkapasitor sedang diisi kembali (*charging*) selama fase deselerasi atau saat suplai dari sumber lain melebihi permintaan beban. Amplitudo arus Isc yang lebih rendah dibanding Ibat menandakan bahwa kontribusi superkapasitor lebih diarahkan untuk peredaman lonjakan singkat (*short-duration peaks*), bukan untuk suplai daya berkelanjutan. Pola interaksi ini memperlihatkan bahwa sistem manajemen energi memanfaatkan superkapasitor untuk mengatasi kebutuhan daya jangka sangat pendek dan respons cepat, sementara baterai digunakan sebagai sumber fleksibel untuk jangka menengah. Kombinasi ini efektif untuk menjaga kestabilan sistem sekaligus mengurangi stres arus pada baterai, sehingga dapat memperpanjang umur pakai komponen penyimpanan energi.

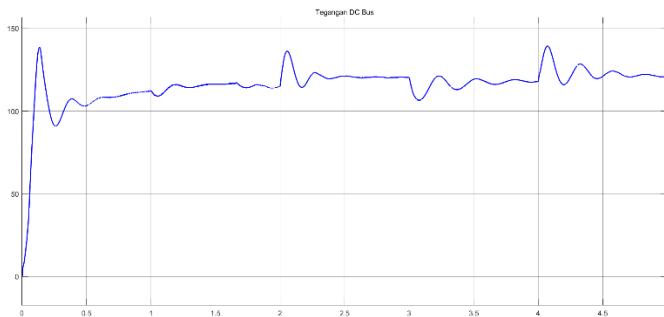


Grafik 4. Perbandingan SoC Baterai dan Superkapasitor

Pada grafik 4 menunjukkan grafik SOC baterai (SOCbat) berawal 85% dan mengalami sedikit penurunan sepanjang simulasi saat sebelum ($t = 2$ s), dengan nilai akhir mendekati 84%. Penurunan yang relatif kecil ini menunjukkan bahwa baterai berperan sebagai sumber energi jangka menengah, hanya menyuplai daya tambahan ketika permintaan melebihi kapasitas fuel cell dan superkapasitor. Berbeda dengan SOCsbat, walaupun SOC superkapasitor (SOCsc) dimulai dari nilai yang sama, 85%, namun mengalami penurunan yang sedikit lebih besar dibanding baterai (pada saat $t = 1,5 - 2$ s), dengan nilai akhir mendekati 83,5%. Perubahan SOC yang lebih cepat pada superkapasitor disebabkan oleh perannya dalam merespons lonjakan beban transien secara instan, yang menyebabkan siklus pengisian dan pengosongan terjadi lebih sering dalam waktu singkat.

Perbedaan pola penurunan SOC antara kedua penyimpanan energi ini mengindikasikan strategi manajemen energi yang efektif, di mana superkapasitor diprioritaskan untuk suplai daya cepat jangka pendek, sedangkan baterai digunakan untuk menopang kebutuhan daya berkelanjutan yang tidak dapat dipenuhi oleh fuel cell. Strategi ini membantu mengurangi stres

pada baterai, sehingga dapat memperpanjang umur pakainya, sambil mempertahankan performa sistem secara keseluruhan.



Grafik 5. Tegangan DC Bus

Pada grafik 5 menunjukkan grafik tegangan DC bus pada awal simulasi ($t = 0$ s), tegangan meningkat sangat cepat dari 0 V hingga puncak sekitar 145 V, yang merupakan respons pengisian awal kapasitor sistem (*initial charging*). Setelah puncak awal, tegangan sempat turun mendekati 90 V sebelum kembali stabil di kisaran 120–125 V. Selama periode stabil, terlihat adanya beberapa fluktuasi kecil dan lonjakan sesaat, misalnya di sekitar detik ke-2 dan ke-4, di mana tegangan naik hingga sekitar 135–140 V. Penurunan tegangan paling rendah pada fase transien terjadi di kisaran 90 V, yang umumnya muncul setelah lonjakan beban atau perubahan distribusi daya antar sumber energi.

Secara keseluruhan, tegangan bus DC berada dalam rentang 90 V hingga 145 V sepanjang simulasi. Rentang ini menunjukkan bahwa sistem manajemen energi yang diterapkan mampu mempertahankan ketabilan tegangan dengan baik, meskipun terjadi perubahan beban mendadak. Peran superkapasitor dalam meredam lonjakan dan kontribusi baterai sebagai penyeimbang daya membantu memastikan bahwa tegangan bus tetap dalam batas operasional yang aman.

V. PENUTUP

Penelitian ini menunjukkan bahwa sistem manajemen energi (EMS) berbasis kombinasi *Fuzzy Logic Controller* (FLC) dan *PI Controller* mampu memaksimalkan potensi masing-masing sumber energi sesuai karakteristiknya. *Fuel cell* berperan sebagai penyedia beban dasar dengan suplai stabil sekitar 1200 W, memastikan kontinuitas daya tanpa fluktuasi signifikan. Baterai berfungsi sebagai penyimpan energi jangka menengah yang fleksibel, mampu memberikan dukungan daya hingga 15000 W pada kondisi puncak. Superkapasitor menunjukkan kinerja optimal dalam merespons lonjakan daya secara cepat dengan rentang -2300 W hingga 2000 W, membantu meredam transien dan menjaga ketabilan sistem.

Kinerja arus yang terukur, dengan puncak 280 A pada baterai dan rentang -60 A hingga 65 A pada superkapasitor, serta SOC baterai (84–85%) dan superkapasitor (83–84%), mengindikasikan efisiensi pengelolaan energi yang meminimalkan degradasi penyimpanan. Selain itu, tegangan DC bus yang konsisten berada dalam rentang 90–145 V

membuktikan bahwa strategi kontrol ini mampu menjaga kualitas daya meskipun terjadi variasi beban yang signifikan.

Hasil ini mengindikasikan bahwa penggunaan kontrol hibrida antara FLC dan PI tidak hanya mempertahankan ketabilan tegangan sistem, tetapi juga mengurangi beban transien pada *fuel cell* dengan mendistribusikan beban secara optimal dan adaptif sesuai kapasitas masing-masing sumber energi serta berpotensi memperpanjang umur pakai dan ketahanan komponen penyimpanan energi.

Penelitian ini memberikan dasar yang kuat untuk pengembangan lebih lanjut sistem EMS pada kendaraan listrik terutama dalam integrasi metode optimasi seperti *Particle Swarm Optimization* (PSO) untuk penyetelan parameter *fuzzy* yang lebih presisi dan disarankan menggunakan profil beban yang diperoleh dari data perjalanan nyata, seperti siklus WLTP atau EUDC serta dapat mempertimbangkan *sample time* yang lebih panjang untuk memastikan keandalan sistem pada kondisi operasional sebenarnya.

REFERENSI

- IPCC. (2023). *AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023*. <Https://Www.Ipcc.Ch/Report/Ar6/Syr/>.
- Krishna, N. G., Sreelekshmi, R. S., & Nair, M. G. (2023). Comprehensive Review on the Developments in Battery/Supercapacitor-Based Hybrid Energy Storage System for Electric Vehicles. *Lecture Notes in Electrical Engineering*, 1022 LNEE, 341–361. https://doi.org/10.1007/978-981-99-0915-5_24
- Lakshmi, S., & Bitragunta, V. (2023). Advancing Energy Management in Hybrid Electric Vehicles (HEVs) and Hybrid Energy Storage System Electric Vehicles (HESS EVs): A Hybrid Fuzzy Logic Approach. In *International Journal on Science and Technology (IJSAT) IJSAT24032261* (Vol. 15, Issue 3).
- Dephub. (2022). *Transportasi umum massal Indonesia menuju zero emission*. <Https://Dephub.Go.Id/Post/Read/Transportasi-Umum-Massal-Indonesia-Menuju-Zero-Emission>.
- Maghfiroh, H., Wahyunggoro, O., & Cahyadi, A. I. (2024). Energy Management in Hybrid Electric and Hybrid Energy Storage System Vehicles: A Fuzzy Logic Controller Review. *IEEE Access*, 12, 56097–56109. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3390436>
- Mounica, V., & Obulesu, Y. P. (2023). An energy management scheme for improving the fuel economy of a fuel cell/battery/supercapacitor-based hybrid electric vehicle using the coyote optimization algorithm (COA). *Frontiers in Energy Research*, 11. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1180531>
- PPRI. (2019). *PERPRES No. 55 Tahun 2019*. <Https://Peraturan.Bpk.Go.Id/Details/116973/Perpres-No-55-Tahun-2019>.
- Rezk, H., & Fathy, A. (2025). Combining proportional integral and fuzzy logic control strategies to improve performance of energy management of fuel cell electric

vehicles. *International Journal of Thermofluids*, 26.
<https://doi.org/10.1016/j.ijft.2025.101076>

Sudhakar, P., & Kumaraswamy, I. (2023). Futuristic Energy Management Solution: Fuzzy logic controller-Enhanced Hybrid Storage for Electric Vehicles with Batteries and Super Capacitors. *International Journal of Electrical and Electronics Research*, 11(4), 917–923.
<https://doi.org/10.37391/ijeer.110406>