

Sistem Kontrol Daya Berbasis Fuzzy Logic Pada Kendaraan Listrik Multi-Sumber

Galih Ade Kusuma¹ dan Subiyanto^{2*}

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

¹proplayerpubgm@students.unnes.ac.id, ²subiyanto@mail.unnes.ac.id

Abstrak— Permasalahan pemanasan global dan tingginya emisi karbon dari sektor transportasi menjadi perhatian utama di Indonesia. Kebutuhan akan kendaraan listrik yang efisien dan berkelanjutan mendorong pengembangan sistem manajemen energi yang adaptif dan cerdas. Perancangan sistem kontrol daya berbasis *Fuzzy Logic* pada kendaraan listrik multi-sumber yang mengintegrasikan fuel cell, baterai, superkapasitor, dan *plug-in charger* menjadi salah satu solusi untuk mengoptimalkan distribusi energi secara dinamis. Sistem ini memanfaatkan kombinasi antara *Fuzzy Logic Controller* (FLC) dan *Proportional-Integral* (PI) controller untuk menyesuaikan suplai daya antar sumber energi sesuai dengan kondisi beban kendaraan yang berubah-ubah. Simulasi dilakukan dalam dua skenario utama, yaitu mode *discharging* (pengosongan daya) dan *charging* (pengisian daya). Pada mode *discharging*, fuel cell dan baterai berperan menjaga kestabilan suplai daya dalam kondisi *steady state*, sementara superkapasitor menyediakan respons cepat terhadap lonjakan beban. Sedangkan pada mode *charging*, fokus pengisian diarahkan ke baterai melalui *plug-in charger* dengan dukungan fuel cell, sementara superkapasitor tidak aktif. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem yang dirancang mampu menjaga kestabilan tegangan bus dan meningkatkan efisiensi distribusi energi.

Kata kunci— kendaraan listrik multi-sumber, *fuzzy logic*, sistem kendali daya.

Abstract— The issues of global warming and high carbon emissions from the transportation sector are a major concern in Indonesia. The need for efficient and sustainable electric vehicles drives the development of adaptive and intelligent energy management systems. The design of a power control system based on *Fuzzy Logic* for multi-source electric vehicles—integrating fuel cells, batteries, supercapacitors, and *plug-in chargers*—offers a solution to optimize dynamic energy distribution. This system utilizes a combination of *Fuzzy Logic Controller* (FLC) and *Proportional-Integral* (PI) controller to adjust the power supply among energy sources according to the vehicle's fluctuating load conditions. Simulations were carried out in two main scenarios: *discharging* (energy depletion) mode and *charging* (energy replenishment) mode. In *discharging* mode, fuel cells and batteries maintain a stable power supply under steady-state conditions, while supercapacitors provide a rapid response to load surges. In *charging* mode, the charging process focuses on the battery via the *plug-in charger*, supported by the fuel cell, while the supercapacitor remains inactive. Simulation results indicate that the designed system is capable of maintaining bus voltage stability and improving energy distribution efficiency.

Keywords— multi-source electric vehicle, *fuzzy logic*, power control system

I. PENDAHULUAN

Permasalahan pemanasan global dan tingginya emisi karbon dari sektor transportasi menjadi perhatian utama di Indonesia (Zola et al., n.d.). Untuk mengatasinya, pemerintah mendorong penggunaan kendaraan listrik melalui Peraturan Presiden No. 55 Tahun 2019 tentang percepatan program kendaraan bermotor listrik berbasis baterai. Kendaraan listrik dinilai lebih ramah lingkungan karena tidak menghasilkan emisi gas buang selama operasional (Ezra et al., 2022).

Dalam perkembangannya, teknologi kendaraan listrik berbasis multi-sumber mulai banyak dikembangkan, menggabungkan *fuel cell*, baterai, superkapasitor, dan *plug-in charger*. Masing-masing komponen memiliki keunggulan

seperti efisiensi tinggi, respons cepat, dan fleksibilitas dalam menyuplai daya (Hasan & Hudaya, 2023). Namun, tantangan utama terletak pada manajemen dan pembagian daya yang optimal antar sumber energi (Belhadj et al., 2019).

Pendekatan kontrol cerdas seperti *Fuzzy Logic Controller* (FLC) yang dikombinasikan dengan *Proportional-Integral* (PI) terbukti efektif dalam mengatasi tantangan tersebut (D. Li et al., 2020). FLC unggul dalam menangani sistem nonlinier dan kompleks tanpa perlu model matematis presisi, sedangkan PI menjaga kestabilan dan kecepatan respon sistem (Hu et al., 2021). Integrasi kontrol ini membantu mencapai efisiensi distribusi daya dan memperpanjang umur komponen penyimpanan.

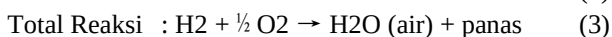
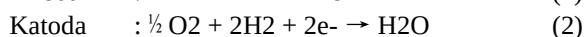
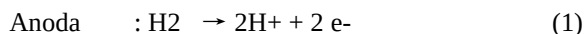
Tujuan dari penelitian ini adalah merancang sistem kendaraan listrik multi-sumber yang mengintegrasikan *fuel cell*, baterai, superkapasitor, dan *plug-in charger*. Fokus penelitian adalah mengkaji efektivitas distribusi daya dan mengembangkan sistem kontrol berbasis FLC-PI yang adaptif, efisien, dan andal untuk mendukung operasional kendaraan dalam berbagai kondisi beban dan skenario pengisian daya.

II. TINJAUAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

Sistem kendaraan listrik multi-sumber dirancang untuk mengintegrasikan beberapa sumber energi utama yaitu *fuel cell*, baterai, superkapasitor, dan *plug-in charger*, yang semuanya dihubungkan menggunakan konverter DC-DC serta sistem pengendali cerdas. Pengelolaan daya yang optimal membutuhkan strategi manajemen energi berdasarkan karakteristik setiap sumber (Zou et al., 2023). *Fuel cell* sebagai penyedia daya berkelanjutan, baterai untuk penyimpanan energi utama dan suplai beban sedang, serta superkapasitor yang sangat efektif merespons lonjakan beban (Jia & Zhao, 2023). Untuk mencapai distribusi daya yang adaptif dan stabil, digunakan kombinasi *Fuzzy Logic Controller* (FLC) yang menangani sistem nonlinier dan dinamis serta *PI controller* untuk menjaga kestabilan sistem.

A. Fuel Cell

Fuel cell adalah perangkat elektrokimia yang mengubah energi kimia hidrogen menjadi listrik secara kontinu, ideal digunakan pada kendaraan listrik sebagai penyedia daya utama untuk beban konstan (Saputra et al., 2020). Salah satu jenis yang banyak diterapkan adalah *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (PEMFC), yang reaksi kimianya dapat ditulis sebagai berikut:



Fuel cell menawarkan keuntungan berupa emisi rendah dan daya yang kontinyu namun memerlukan pengelolaan suplai hidrogen yang baik serta proteksi sistem saat pengisian eksternal berlangsung.

B. Baterai

Baterai, terutama tipe lithium-ion, digunakan sebagai penyimpan energi utama karena memiliki densitas energi tinggi, umur pakai yang panjang, serta efisiensi siklus tinggi (Rafi et al., n.d.). Dalam sistem multi-sumber, baterai berperan menyeimbangkan kebutuhan energi saat suplai dari *fuel cell* atau superkapasitor tidak mencukupi, serta menerima pengisian dari *plug-in charger*.

C. Superkapasitor

Superkapasitor, atau *ultracapacitor*, menyimpan dan melepaskan energi dengan sangat cepat berkat mekanisme *double-layer* antar elektroda dan elektrolit (Rafi et al., n.d.). Berfungsi krusial ketika dibutuhkan daya puncak sesaat (misal akselerasi atau *regenerative braking*). Susunan arsitektur karbon aktif

serta resistansi internalnya yang rendah membuat perangkat ini sangat efisien dan memiliki umur siklus hingga jutaan kali.

D. Plug-in Charger

Plug-in charger berperan sebagai salah satu sumber pengisian energi eksternal yang sangat penting dalam sistem kendaraan listrik multi-sumber. Fungsi utama *plug-in charger* adalah mengisi ulang energi listrik ke dalam baterai kendaraan dengan memanfaatkan suplai daya dari jaringan listrik luar (*external grid*) saat kendaraan dalam kondisi tidak digunakan atau sedang parkir.

E. Fuzzy Logic Controller

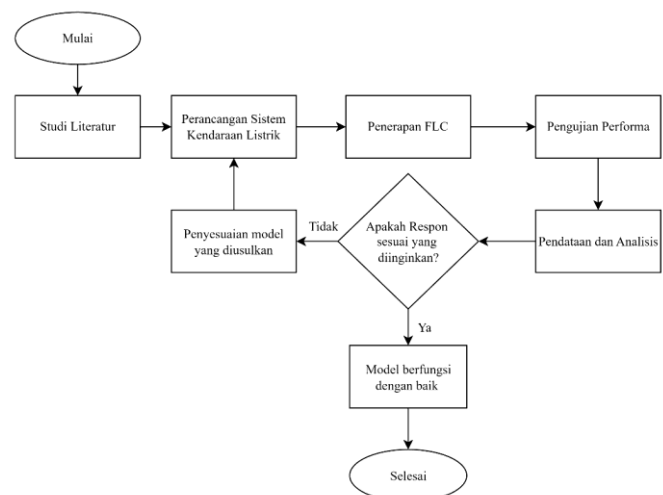
FLC berfungsi mengatur distribusi suplai daya antar sumber secara adaptif berdasarkan parameter input seperti SoC baterai, kebutuhan daya beban, dan tegangan bus DC, tanpa memerlukan model matematis sistem yang presisi. Pendekatan *rule-based* FLC mampu menanggulangi variasi nonlinier dan ketidakpastian pada manajemen energi, meningkatkan efisiensi serta memperpanjang umur komponen penyimpanan energi.

F. Kontrol PI

Pada sistem pembagian daya kendaraan listrik multi-sumber, *PI (Proportional-Integral) controller* berperan penting dalam mengatur respons sistem terhadap kebutuhan daya yang berubah-ubah. *PI controller* menerima power referensi yang dihasilkan oleh *Fuzzy Logic Controller* (FLC) sebagai acuan utama dalam proses pengendalian.

III. METODOLOGI

A. Flowchart Sistem



Gambar 1. Diagram Alir Sistem

Proses pengembangan ini dimulai dari perancangan sistem antar kompoenen yang terdiri dari *fuel cell*, baterai, superkapasitor, *plug-in charger* yang dikontrol melalui 2 buah *Fuzzy Logic Controller* yang dikombinasikan dengan *PI* difungsikan sebagai pembagian daya. Sistem pembebanan menggunakan DC Machine yang memiliki nilai *armatur*, *field*,

dan *torsi load*. Pengujian sistem dilakukan dalam dua strategi kondisi, kondisi *discharge* dan kondisi *charge*.

B. Integrasi sistem simulasi

FLC dirancang menggunakan 2 FLC (FLC regulator dan FLC EMS) yang berbeda tugas dan fungsi. FLC regulator dirancang dengan 25 *rulebase*, yang merupakan kombinasi dari kondisi *error* dan *delta error* dalam lima kategori linguistik (misal : *Negative Big*, *Negative Small*, *Zero*, *Positive Small*, *Positive Big*). Setiap *rule* pada *rulebase* memberikan keputusan mengenai besarnya arus referensi total yang harus diberikan, berdasarkan kondisi sistem saat itu. Adapun *rulebase* sebagai berikut :

1. If (Error is NB) and (dError is NB) then (Itot is ZE)
2. If (Error is NB) and (dError is NM) then (Itot is ZE)
3. If (Error is NB) and (dError is ZE) then (Itot is ZE)
4. If (Error is NB) and (dError is PM) then (Itot is ZE)
5. If (Error is NB) and (dError is PB) then (Itot is ZE)
6. If (Error is NM) and (dError is NB) then (Itot is ZE)
7. If (Error is NM) and (dError is NM) then (Itot is ZE)
8. If (Error is NM) and (dError is ZE) then (Itot is ZE)
9. If (Error is NM) and (dError is PM) then (Itot is ZE)
10. If (Error is NM) and (dError is PB) then (Itot is ZE)
11. If (Error is ZE) and (dError is NB) then (Itot is PVS)
12. If (Error is ZE) and (dError is NM) then (Itot is PS)
13. If (Error is ZE) and (dError is ZE) then (Itot is PS)
14. If (Error is ZE) and (dError is PM) then (Itot is PS)
15. If (Error is ZE) and (dError is PB) then (Itot is PM)
16. If (Error is PM) and (dError is NB) then (Itot is PS)
17. If (Error is PM) and (dError is NM) then (Itot is PM)
18. If (Error is PM) and (dError is ZE) then (Itot is PM)
19. If (Error is PM) and (dError is PM) then (Itot is PM)
20. If (Error is PM) and (dError is PB) then (Itot is PB)
21. If (Error is PB) and (dError is NB) then (Itot is PM)
22. If (Error is PB) and (dError is NM) then (Itot is PB)
23. If (Error is PB) and (dError is ZE) then (Itot is PB)
24. If (Error is PB) and (dError is PM) then (Itot is PB)
25. If (Error is PB) and (dError is PB) then (Itot is PB)

Inti dari *rulebase* FLC ini adalah memberikan referensi arus total yang adaptif dan sesuai kebutuhan sistem, sehingga tegangan DC bus dapat diregulasi secara optimal tanpa terjadi overshoot atau fluktuasi berlebihan.

FLC EMS memiliki fungsi sebagai pusat pengatur pembagian daya pada setiap sumber energi dalam kendaraan listrik multi-sumber. Sistem ini memastikan distribusi daya dari baterai, superkapasitor, dan *fuel cell* berlangsung secara optimal sesuai dengan kebutuhan operasional kendaraan dan kondisi aktual setiap sumber energi. FLC EMS dirancang dengan 27 *rulebase* yang mengatur keputusan pembagian daya

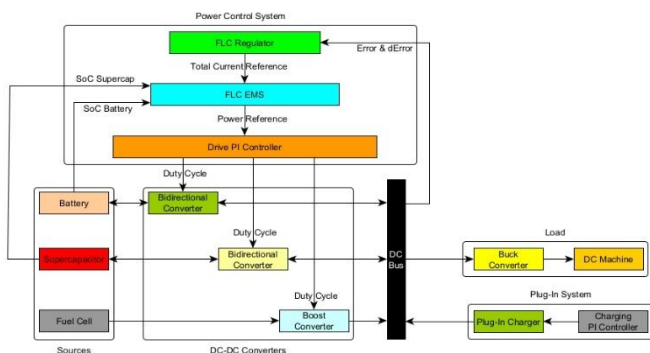
berdasarkan kombinasi kondisi input (P_{demand} , SoC baterai, SoC superkapasitor). Rancangan *rulebase* :

1. If (Pdemand is Low) and (SoCBat is Low) and (SoCSC is Low) then (Pbat is VL) and (Psc is L) and (Pfc is M)
2. If (Pdemand is Med) and (SoCBat is Low) and (SoCSC is Low) then (Pbat is L) and (Psc is M) and (Pfc is L)
3. If (Pdemand is High) and (SoCBat is Low) and (SoCSC is Low) then (Pbat is L) and (Psc is VH) and (Pfc is M)
4. If (Pdemand is Low) and (SoCBat is Med) and (SoCSC is Low) then (Pbat is L) and (Psc is L) and (Pfc is L)
5. If (Pdemand is Med) and (SoCBat is Med) and (SoCSC is Low) then (Pbat is L) and (Psc is H) and (Pfc is M)
6. If (Pdemand is High) and (SoCBat is Med) and (SoCSC is Low) then (Pbat is M) and (Psc is VH) and (Pfc is M)
7. If (Pdemand is Low) and (SoCBat is High) and (SoCSC is Low) then (Pbat is L) and (Psc is L) and (Pfc is L)
8. If (Pdemand is Med) and (SoCBat is High) and (SoCSC is Low) then (Pbat is M) and (Psc is M) and (Pfc is L)
9. If (Pdemand is High) and (SoCBat is High) and (SoCSC is Low) then (Pbat is H) and (Psc is VH) and (Pfc is M)
10. If (Pdemand is Low) and (SoCBat is Low) and (SoCSC is Med) then (Pbat is L) and (Psc is L) and (Pfc is L)
11. If (Pdemand is Med) and (SoCBat is Low) and (SoCSC is Med) then (Pbat is L) and (Psc is M) and (Pfc is M)
12. If (Pdemand is High) and (SoCBat is Low) and (SoCSC is Med) then (Pbat is L) and (Psc is VH) and (Pfc is H)
13. If (Pdemand is Low) and (SoCBat is Med) and (SoCSC is Med) then (Pbat is L) and (Psc is M) and (Pfc is L)
14. If (Pdemand is Med) and (SoCBat is Med) and (SoCSC is Med) then (Pbat is M) and (Psc is H) and (Pfc is M)
15. If (Pdemand is High) and (SoCBat is Med) and (SoCSC is Med) then (Pbat is M) and (Psc is VH) and (Pfc is H)
16. If (Pdemand is Low) and (SoCBat is High) and (SoCSC is Med) then (Pbat is L) and (Psc is L) and (Pfc is L)
17. If (Pdemand is Med) and (SoCBat is High) and (SoCSC is Med) then (Pbat is M) and (Psc is H) and (Pfc is M)
18. If (Pdemand is High) and (SoCBat is High) and (SoCSC is Med) then (Pbat is H) and (Psc is VH) and (Pfc is M)
19. If (Pdemand is Low) and (SoCBat is Low) and (SoCSC is High) then (Pbat is L) and (Psc is M) and (Pfc is L)
20. If (Pdemand is Med) and (SoCBat is Low) and (SoCSC is High) then (Pbat is L) and (Psc is H) and (Pfc is M)

21. If (Pdemand is High) and (SoCBat is Low) and (SoCSC is High) then (Pbat is M) and (Psc is VH) and (Pfc is H)
22. If (Pdemand is Low) and (SoCBat is Med) and (SoCSC is High) then (Pbat is L) and (Psc is M) and (Pfc is L)
23. If (Pdemand is Med) and (SoCBat is Med) and (SoCSC is High) then (Pbat is M) and (Psc is H) and (Pfc is M)
24. If (Pdemand is High) and (SoCBat is Med) and (SoCSC is High) then (Pbat is M) and (Psc is VH) and (Pfc is M)
25. If (Pdemand is Low) and (SoCBat is High) and (SoCSC is High) then (Pbat is L) and (Psc is M) and (Pfc is L)
26. If (Pdemand is Med) and (SoCBat is High) and (SoCSC is High) then (Pbat is M) and (Psc is H) and (Pfc is L)
27. If (Pdemand is High) and (SoCBat is High) and (SoCSC is High) then (Pbat is H) and (Psc is VH) and (Pfc is M)

Inti dari *rulebase* ini adalah superkapasitor diprioritaskan untuk merespons kebutuhan daya pada kondisi transien atau perubahan beban mendadak, karena kemampuannya dalam menyimpan dan melepaskan energi secara cepat. Baterai digunakan untuk kondisi *steady state*, yaitu saat kebutuhan daya cenderung stabil dalam jangka waktu tertentu, sehingga baterai tidak terbebani oleh fluktuasi beban yang ekstrem. *Fuel cell* berperan sebagai sumber pendukung, yang memberikan kontribusi daya tambahan sesuai kebutuhan sistem dan kondisi SoC sumber utama.

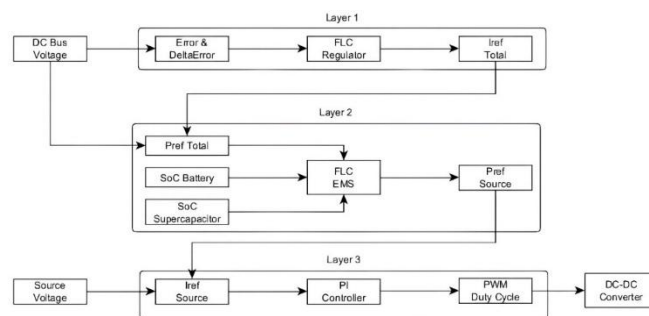
Sistem kontrol dimulai dari *Power Control System* yang dikendalikan oleh FLC Regulator, yang berfungsi mengatur tegangan DC bus. Regulator menerima dua parameter masukan : *error* (selisih antara tegangan referensi dan nilai aktual DC bus) dan *delta error* (perubahan *error* antar waktu). Keluaran dari FLC Regulator berupa *Total Current Reference*, yang kemudian diproses oleh FLC Energy Management System (EMS).



Gambar 2. Framework Simulasi Sistem

FLC EMS mendistribusikan daya berdasarkan tiga input : *Total Power Reference* (hasil dari perkalian *total current reference* dengan tegangan bus), *State of Charge* (SoC) baterai, dan SoC superkapasitor. Output dari FLC EMS yaitu *power reference* untuk setiap sumber energi. Nilai ini dibagi dengan

tegangan masing-masing sumber untuk memperoleh *current reference*, yang digunakan sebagai input bagi *Drive PI Controller*.

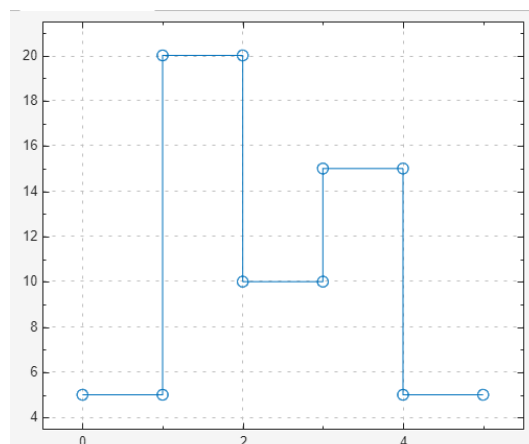


Gambar 3. Diagram Sistem Kendali

PI Controller membandingkan *current reference* dan *current* aktual, lalu menghasilkan *duty cycle* untuk mengontrol DC-DC converter setiap sumber energi : *boost converter* untuk *fuel cell* dan *bidirectional converter* untuk baterai serta superkapasitor. Selanjutnya, semua daya dikonsolidasikan di DC bus, kemudian dialirkan ke *buck converter* yang menyesuaikan tegangan untuk disuplai ke beban *DC Machine*. Sementara itu, *Plug-in Charger* menyuplai daya langsung ke baterai via DC bus dan *bidirectional converter*, aktif hanya saat mode pengisian dan terisolasi dari sumber lain untuk mencegah konflik.

C. Load Profile Beban

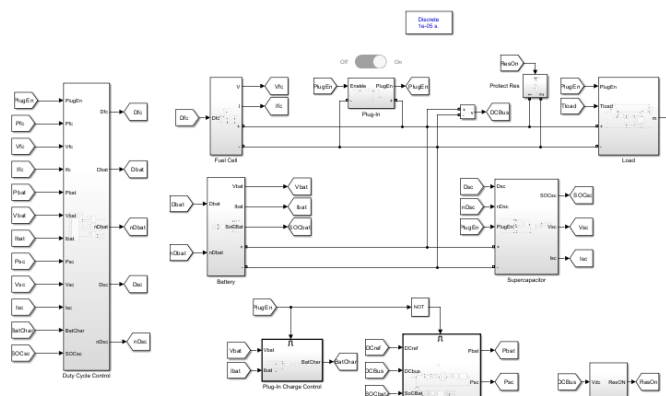
Profil beban dirancang untuk menunjukkan dinamika nyata, dimulai dari kondisi tanpa beban (nol), kemudian pada detik tertentu terjadi lonjakan beban yang signifikan, biasanya merepresentasikan kebutuhan daya saat akselerasi mendadak atau tahanan. Setelah lonjakan tersebut, pada detik berikutnya terjadi penurunan beban yang menggambarkan kondisi deselerasi atau penurunan kebutuhan daya. Selanjutnya, sistem diuji pada kondisi beban stabil, di mana kendaraan melaju pada kecepatan konstan dan kebutuhan daya relatif tetap. Setiap perubahan pada profil beban ini diukur dan dianalisis untuk mengevaluasi respons sistem kendali, kestabilan distribusi daya antar sumber, serta efisiensi penggunaan energi.



Gambar 4. Load Profile Beban

D. Simulasi kendaraan listrik multi-sumber

Sistem kendaraan listrik multisumber dirancang untuk mengintegrasikan beberapa jenis sumber energi dengan tujuan meningkatkan efisiensi, keandalan, serta performa kendaraan dalam berbagai kondisi operasi. Integrasi berbagai sumber energi ini memungkinkan pemanfaatan keunggulan masing-masing komponen secara optimal, sehingga dapat mengatasi keterbatasan jika hanya menggunakan satu jenis sumber energi saja.

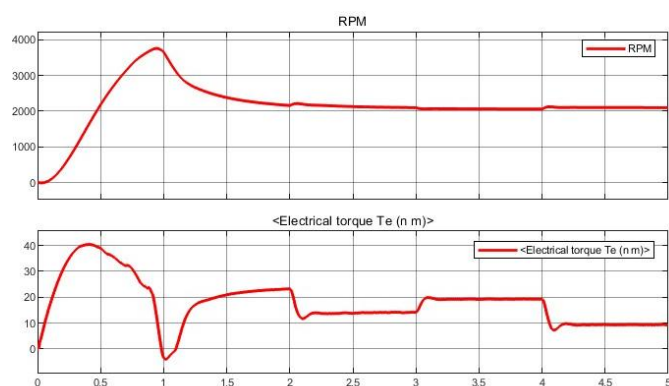


Gambar 5. Simulasi pembagian daya kendaraan listrik multisumber

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

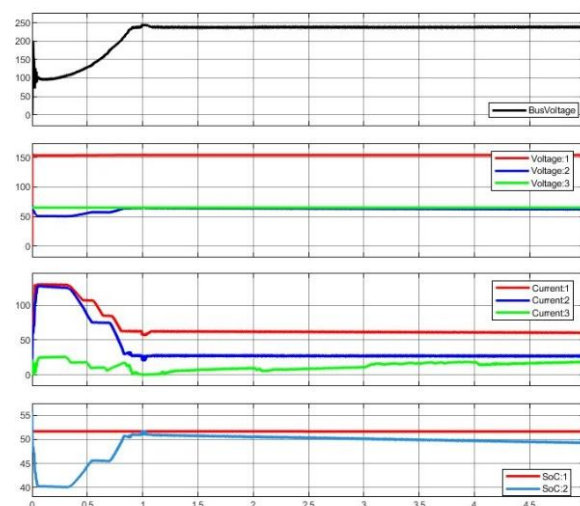
Pengujian sistem dilakukan secara sistematis melalui dua skenario utama yang merepresentasikan kondisi operasional nyata pada kendaraan listrik multi-sumber. Setiap skenario dirancang untuk menguji respons sistem kendali pembagian daya terhadap perubahan beban dan mode operasi, serta memastikan keandalan dan efisiensi sistem dalam berbagai situasi.

A. Hasil Discharging Mode



Gambar 6. Pembebanan pada DC Mahine

Pengujian sistem kendaraan listrik multi-sumber dilakukan dengan variasi beban berupa kombinasi kecepatan rotasi (RPM) dan torsi selama 5 detik. Sistem mengalami lima mode pembebanan (t1–t4), dimulai dari akselerasi (t1) hingga stabilisasi dan perlambatan (t4). Hasil simulasi pada mode *discharging* menunjukkan bahwa saat *start-up* (0–1 detik) terjadi lonjakan tegangan bus dari 100 V hingga 240 V akibat tingginya permintaan daya. Setelah itu, sistem mencapai kondisi *steady state*.



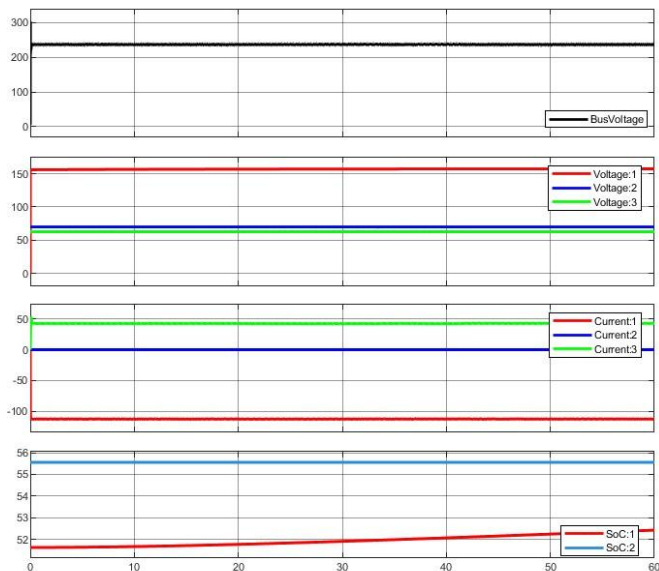
Gambar 7. Grafik hasil mode *discharging*

Tegangan tiga sumber stabil: baterai di 150 V, *fuel cell* di 60 V, dan superkapasitor sempat turun ke 50 V lalu kembali menjadi 60 V. Arus awal dari baterai dan superkapasitor sempat melonjak ke 125 A, lalu stabil masing-masing di 60 A dan 40 A. Arus *fuel cell* menunjukkan fluktuasi adaptif dengan puncak 25 A pada 0,1–0,3 detik. Untuk *State of Charge* (SoC), superkapasitor mengalami penurunan signifikan dari 50% ke 40%, lalu kembali ke 50% setelah sistem stabil. Baterai hanya mengalami penurunan SoC sekitar 2%. Ini menunjukkan bahwa superkapasitor berperan utama saat respon beban cepat, sementara *fuel cell* dan baterai menjaga kestabilan jangka panjang.

B. Hasil Charging Mode

Simulasi sistem charging dilakukan saat kendaraan dalam kondisi parkir dan Plug-in Charger terhubung. Hanya baterai yang aktif menerima pengisian, sementara *fuel cell* bertindak sebagai pendukung, dan superkapasitor dinonaktifkan. Tegangan bus tetap stabil di 240 V selama proses berlangsung, indikatif kapasitas sistem dalam menjaga kestabilan suplai listrik. Tegangan seluruh sumber energi tidak berubah, karena tidak ada beban aktif selain sirkuit pengisian. Arus pengisian tercatat: baterai menerima arus sebesar -120 A, sedangkan *fuel cell* menyuplai 48 A sebagai tambahan. Superkapasitor menunjukkan tidak ada perubahan arus, menegaskan ketidakterlibatannya dalam skenario charging. SoC baterai meningkat selama proses pengisian, sedangkan SoC

superkapasitor statis, karena tidak menerima kontribusi daya dari charger. Ini mengonfirmasi bahwa pada mode pengisian, sistem memfokuskan daya ke baterai, menjaga efisiensi dan distribusi energi secara selektif.



Gambar 8. Grafik hasil mode charging

C. Analisis Hasil Simulasi

Respons sistem dalam kedua mode operasi menunjukkan kinerja adaptif yang baik dari skema kontrol FLC-PI. Dalam mode discharging, superkapasitor aktif pada beban mendadak, seperti saat akselerasi, karena kemampuannya memberikan arus besar dalam waktu singkat. Baterai dan fuel cell lebih dominan dalam jangka menengah-panjang untuk menjaga suplai daya stabil. Dalam mode charging, sistem mampu memfokuskan seluruh suplai ke baterai melalui plug-in charger secara efisien. Fuel cell berperan sebagai pendukung pengisian, sedangkan superkapasitor dikecualikan, karena fungsinya sebagai penyerap puncak beban tidak diperlukan.

Hasil ini menunjukkan bahwa strategi pembagian daya berbasis Fuzzy Logic Controller dikombinasikan dengan PI Controller bekerja optimal dalam mempertahankan kestabilan sistem, merespons variasi beban secara dinamis, serta memperpanjang umur komponen penyimpan energi melalui pembebanan terdistribusi.

V. PENUTUP

Secara keseluruhan, sistem kendaraan listrik multi-sumber yang diuji telah memenuhi tujuan perancangan, yaitu mampu beroperasi secara efisien dan stabil pada berbagai kondisi pengujian. Analisis kuantitatif berbasis data eksperimen membuktikan bahwa integrasi multi-sumber energi tidak hanya meningkatkan keandalan dan performa kendaraan listrik, tetapi juga memberikan fleksibilitas dalam pengelolaan daya sesuai kebutuhan operasional.

REFERENSI

- Belhadj, S., Belmokhtar, K., & Ghedamsi, K. (2019). Improvement of energy management control strategy of fuel cell hybrid electric vehicles based on artificial intelligence techniques. *Journal Europeen Des Systemes Automatises*, 52(6), 541–550. <https://doi.org/10.18280/jesa.520601>
- Ezra, T., Pandin, N., Santoso, B. H., Sitepu, R., Joewono, A., Studi, P., Elektro, T., Katolik, U., & Surabaya, W. M. (2022). ANALISIS TEKNOLOGI MANAJEMEN ENERGI PADA KENDARAAN LISTRIK HIBRIDA BERBASIS TINJAUAN PUSTAKA. In *Scientific Journal Widya Teknik* (Vol. 21, Issue 2).
- Hasan, M., & Hudaya, C. (2023). Analisis Hybrid Energy Storage System (HESS) dengan Pengujian Kombinasi Baterai Lithium-Ion dan Superkapasitor pada Kendaraan Listrik. *JTEV (Jurnal Teknik Elektro Dan Vokasional)*, 9(1), 95. <https://doi.org/10.24036/jtev.v9i1.122396>
- Hu, X., Liu, S., Song, K., Gao, Y., & Zhang, T. (2021). Novel fuzzy control energy management strategy for fuel cell hybrid electric vehicles considering state of health. *Energies*, 14(20). <https://doi.org/10.3390/en14206481>
- Jia, X., & Zhao, M. (2023). A Hierarchical Energy Control Strategy for Hybrid Electric Vehicle with Fuel Cell/Battery/Ultracapacitor Combining Fuzzy Controller and Status Regulator. *Electronics (Switzerland)*, 12(16). <https://doi.org/10.3390/electronics12163428>
- Li, D., Xu, B., Tian, J., & Ma, Z. (2020). Energy management strategy for fuel cell and battery hybrid vehicle based on fuzzy logic. *Processes*, 8(8). <https://doi.org/10.3390/PR8080882>
- Rafi, A., Tahtawi, A., Reihan Iskandar, M., Yahya, S., Tohir, T., & Aming, D. (n.d.). Battery-Supercapacitor Current Control Using Fuzzy Supervisory with PI Controller for Electric Vehicle Application a. In *INTERNATIONAL JOURNAL OF APPLIED TECHNOLOGY RESEARCH* (Vol. 2022, Issue 2). <https://ijatr.polban.ac.id/>
- Saputra, H., Maulana Yusuf, M., Elektro, T., & Negeri Jakarta, P. (2020). SISTEM FUEL CELL PENGAPLIKASIAN PADA MODA TRANSPORTASI (PORTABLE DEVICE). *Seminar Nasional Terapan Riset Inovatif (SENTRINOV) Ke-6 ISAS Publishing Series: Engineering and Science*, 6(1).
- Zola, G., Siska, ;, Nugraheni, D., Andhien, ;, Rosiana, A., Dzamar, ;, Pambudy, A., & Agustanta, N. (n.d.). *Inovasi kendaraan listrik sebagai upaya meningkatkan kelestarian lingkungan dan mendorong pertumbuhan ekonomi hijau di Indonesia* (Vol. 11, Issue 3).
- Zou, K., Luo, W., & Lu, Z. (2023). Real-Time Energy Management Strategy of Hydrogen Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles Based on Power Following Strategy–Fuzzy Logic Control Strategy Hybrid Control. *World Electric Vehicle Journal*, 14(11). <https://doi.org/10.3390/wevj14110315>