

Automatic Switching Berbasis *Fuzzy Logic* Untuk Pengaturan Daya Mikrogrid

Adhi Kusmanto^{1*)}

¹⁾Program Studi Teknik Elektro, Universitas PGRI Semarang
Jl. Sidodadi Timur No. 24 – Dr. Cipto Semarang

*Corresponding author E-mail: adhikusmanto@upgris.ac.id

Naskah Masuk: Mei 2026; Diterima: Juni 2026; Terbit: Juli 2026

ABSTRACT

The development of microgrid systems requires an energy management system capable of maintaining the continuity and stability of power supply. The main problems in microgrid systems with hybrid sources are fluctuations in photovoltaic (PV) power and load changes, which cause unstable energy supply. Therefore, an automatic switching strategy is needed that can automatically manage the transition of power sources within a short time between PV, batteries, and PLN to ensure optimal and efficient system operation. This study aims to regulate the switching of power supplies between PV, batteries, and PLN in a microgrid system. The research method uses an automatic switching strategy to determine switching decisions based on PV power conditions, battery state of charge (SOC), and load demand. The system was designed and simulated using MATLAB/Simulink with five test scenarios: PV supplying the load, PV and batteries supplying the load, PLN as a backup source, automatic switching back to PV, and sudden load increases. The study results show that the fuzzy logic-based automatic switching system is capable of adaptively switching energy sources. Under high PV power conditions, the microgrid system prioritizes PV as the primary source. When PV power decreases, the battery automatically helps supply the remaining power. When the battery SOC is low, the system activates PLN as a backup source to maintain power continuity. The system is also capable of automatically switching back to PV when PV output is high and is able to respond to load increases quickly and stably through PV and battery power sharing. The fuzzy logic method successfully improves the stability, efficiency, and reliability of the microgrid system with hybrid sources.

Keywords: Mikrogrid, power management, photovoltaic (PV), automatic switching, fuzzy logic.

ABSTRAK

Perkembangan sistem Mikrogrid memerlukan sistem manajemen energi yang mampu menjaga kontinuitas dan kestabilan suplai daya. Permasalahan utama pada sistem mikrogrid dengan sumber hibrid adalah fluktuasi daya photovoltaic (PV) dan perubahan beban yang menyebabkan ketidakstabilan suplai energi. Oleh karena itu, diperlukan strategi automatic switching yang mampu mengatur perpindahan sumber daya secara otomatis dengan waktu singkat antara PV, baterai, dan PLN agar sistem dapat bekerja secara optimal dan efisien. Penelitian ini bertujuan untuk mengatur pergantian suplai daya dengan sumber PV, Baterai, PLN pada sistem mikrogrid. Metode penelitian dengan strategi automatic switching yang digunakan untuk menentukan keputusan switching berdasarkan kondisi daya PV, state of charge (SOC) baterai, dan kebutuhan beban. Sistem dirancang dan disimulasikan menggunakan MATLAB/Simulink dengan lima skenario pengujian, yaitu kondisi PV menyuplai beban, PV dan baterai menyuplai beban, PLN sebagai sumber cadangan, perpindahan otomatis kembali ke PV, dan kondisi kenaikan beban mendadak. Hasil studi memperlihatkan bahwa sistem automatic switching berbasis fuzzy logic mampu bekerja secara adaptif dalam pergantian sumber energi yang digunakan. Pada kondisi daya PV tinggi, sistem mikrogrid memprioritaskan PV sebagai sumber utama. Ketika daya PV menurun, maka baterai secara otomatis membantu menyuplai kekurangan daya. Ketika SOC baterai rendah, sistem akan mengaktifkan PLN sebagai sumber cadangan untuk menjaga kontinuitas suplai daya. Sistem juga mampu melakukan perpindahan otomatis kembali ke PV ketika daya keluaran PV tinggi dan mampu merespon kenaikan beban secara cepat dan stabil melalui power sharing PV dan baterai. Metode fuzzy logic berhasil meningkatkan stabilitas, efisiensi, dan keandalan sistem mikrogrid dengan sumber hibrid.

Kata Kunci: Mikrogrid, manajemen daya, photovoltaik (PV), automatic switching, fuzzy logic.

I. PENDAHULUAN

Perkembangan kebutuhan energi listrik di Indonesia terus mengalami peningkatan seiring pertumbuhan populasi, perkembangan industri, dan kemajuan teknologi. Ketergantungan terhadap sumber energi fosil yaitu batu bara, minyak bumi, dan gas alam masih menjadi

permasalahan utama dalam sistem ketenagalistrikan modern. Hal ini menyebabkan peningkatan emisi karbon dan dampak negatif terhadap lingkungan. Kondisi tersebut mendorong berbagai negara untuk mengembangkan sistem energi berkelanjutan berbasis energi terbarukan sebagai solusi untuk memenuhi kebutuhan energi listrik yang lebih ramah

lingkungan dan efisien [1]. Salah satu teknologi pembangkit listrik yang berkembang pesat dalam beberapa tahun terakhir adalah sistem mikrogrid. Mikrogrid menggunakan beberapa sumber energi terbarukan yang terintegrasi dalam manajemen energi.

Mikrogrid merupakan sistem tenaga listrik skala kecil yang mampu mengintegrasikan berbagai sumber energi seperti photovoltaik (PV), turbin angin, baterai, generator diesel, dan jaringan utilitas dalam satu sistem yang terkoordinasi [2]. Sistem mikrogrid dapat beroperasi dengan terhubung dengan jaringan utama (*grid-connected*) maupun secara mandiri (*islanded mode*). Keunggulan utama mikrogrid adalah kemampuannya dalam meningkatkan keandalan sistem tenaga, memperbaiki kualitas daya, mengurangi rugi-rugi distribusi, serta mendukung pemanfaatan energi terbarukan secara optimal [3]. Selain itu, mikrogrid juga menjadi salah satu solusi penting dalam mendukung konsep *smart grid* dan transisi menuju sistem energi hijau. Di antara berbagai sumber energi terbarukan, photovoltaik (PV) menjadi teknologi yang paling banyak digunakan dalam sistem mikrogrid karena memiliki sumber energi yang melimpah, biaya operasional yang rendah, dan ramah lingkungan [4]. Namun demikian, karakteristik daya keluaran PV sangat dipengaruhi oleh kondisi cuaca dan intensitas iradiasi matahari sehingga daya yang dihasilkan bersifat fluktuatif [5].

Perubahan iradiasi matahari dapat menyebabkan ketidakstabilan suplai daya yang berdampak pada penurunan kualitas sistem tenaga listrik. Ketika daya PV mengalami penurunan, maka diperlukan sumber energi tambahan untuk menjaga kontinuitas suplai daya terhadap beban. Untuk mengatasi permasalahan tersebut, sistem penyimpanan energi baterai banyak digunakan pada sistem mikrogrid. Baterai berfungsi sebagai penyimpan energi ketika produksi daya PV berlebih dan akan menyuplai energi kembali ketika daya PV tidak mencukupi kebutuhan beban [6]. Penggunaan baterai pada sistem mikrogrid juga mampu meningkatkan stabilitas tegangan, memperbaiki kualitas daya, dan menjaga kontinuitas suplai energi [7]. Akan tetapi, penggunaan baterai secara terus menerus tanpa sistem pengelolaan yang baik dapat menyebabkan penurunan umur baterai akibat *overcharge* maupun *over-discharge* [8]. Oleh karena itu, diperlukan sistem manajemen energi yang mampu mengatur penggunaan baterai secara optimal. Selain PV dan baterai, jaringan PLN juga memiliki peranan penting sebagai sumber energi cadangan pada sistem mikrogrid. Ketika daya PV rendah dan kondisi *state of charge* (SOC) baterai berada di bawah batas minimum, maka PLN digunakan untuk menjaga kontinuitas suplai daya terhadap beban [9]. Integrasi antara PV, baterai, dan PLN membutuhkan strategi pengaturan energi yang baik agar perpindahan sumber daya dapat berlangsung secara otomatis dan stabil tanpa menyebabkan gangguan pada sistem.

Salah satu metode yang banyak dikembangkan dalam sistem manajemen energi mikrogrid adalah *automatic switching*. Sistem *automatic switching* berfungsi untuk melakukan perpindahan sumber energi secara otomatis berdasarkan kondisi operasi sistem seperti daya PV, kondisi baterai, dan kebutuhan beban [10]. Dengan adanya *automatic switching*, sistem mampu menentukan sumber energi yang paling optimal sehingga efisiensi penggunaan energi dapat meningkat dan kontinuitas suplai daya dapat terjaga. Namun demikian, proses perpindahan sumber

energi pada sistem mikrogrid tidak dapat dilakukan menggunakan metode kontrol konvensional secara sederhana karena sistem memiliki karakteristik non-linear dan dinamis [11]. Perubahan kondisi iradiasi matahari, variasi beban, serta kondisi SOC baterai menyebabkan sistem mikrogrid membutuhkan metode kontrol yang adaptif dan fleksibel. Oleh sebab itu, *fuzzy logic* banyak digunakan dalam pengembangan sistem kontrol mikrogrid.

Fuzzy logic merupakan metode kecerdasan buatan yang mampu menangani sistem *non-linear* dan ketidakpastian kondisi operasi melalui pendekatan linguistik berbasis aturan (*rule base*) [12]. Metode ini dikembangkan berdasarkan konsep logika fuzzy yang diperkenalkan oleh Lotfi Zadeh pada tahun 1965. Berbeda dengan logika konvensional yang hanya memiliki nilai benar atau salah, *fuzzy logic* mampu memberikan nilai keanggotaan dalam rentang tertentu sehingga lebih fleksibel dalam proses pengambilan keputusan [13]. Pada sistem mikrogrid, *fuzzy logic* banyak digunakan untuk pengaturan aliran daya, kontrol tegangan, optimasi penggunaan baterai, dan manajemen energi hibrid [14]. Keunggulan utama *fuzzy logic* adalah tidak memerlukan model matematis yang kompleks sehingga lebih mudah diterapkan pada sistem tenaga listrik yang memiliki karakteristik dinamis [15]. Selain itu, *fuzzy logic* juga mampu meningkatkan respon sistem terhadap perubahan kondisi operasi secara real-time.

Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa *fuzzy logic* mampu meningkatkan performa sistem mikrogrid secara signifikan. Peneliti [16] mengembangkan sistem kontrol mikrogrid berbasis *fuzzy logic* pada sistem PV dan baterai yang mampu meningkatkan stabilitas suplai daya. Penelitian lain oleh peneliti [17] menunjukkan bahwa *fuzzy logic* dapat meningkatkan efisiensi manajemen energi pada sistem mikrogrid terisolasi melalui optimasi aliran daya. Sementara itu, Peneliti [18] mengembangkan strategi *integrated control* berbasis *fuzzy logic* untuk photovoltaik dan *wind system* yang mampu menjaga kestabilan sistem tenaga listrik. Penelitian pengaturan *power sharing* berbasis *fuzzy logic* juga telah dilakukan oleh beberapa peneliti. Peneliti [19] mengembangkan metode *fuzzy logic* untuk pengalokasian daya dan pemulihan *state of charge* baterai pada sistem mikrogrid. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode *fuzzy logic* mampu menjaga keseimbangan daya dan memperpanjang umur baterai. Peneliti [20] juga menunjukkan bahwa *fuzzy logic controller* mampu meningkatkan stabilitas mikrogrid melalui koordinasi sistem baterai. Meskipun berbagai penelitian *fuzzy logic* pada sistem mikrogrid telah banyak dilakukan, sedangkan penelitian strategi *automatic switching* antara PV, baterai, dan PLN masih memerlukan pengembangan lebih lanjut. Strategi ini untuk mengatasi kondisi perubahan daya PV, penurunan SOC baterai, dan kenaikan beban secara dinamis.

Sebagian besar penelitian sebelumnya lebih berfokus pada optimasi daya dan kontrol tegangan, sedangkan mekanisme perpindahan sumber energi otomatis berbasis *fuzzy logic* pada sistem mikrogrid sederhana masih belum banyak dibahas secara detail. Selain itu, beberapa penelitian sebelumnya juga masih menggunakan metode *rule-based* konvensional yang memiliki keterbatasan dalam menghadapi kondisi operasi yang berubah secara cepat [21]. Metode konvensional cenderung menghasilkan perpindahan sumber daya yang kurang fleksibel dan dapat menyebabkan osilasi *switching* ketika terjadi perubahan beban maupun

fluktuasi daya PV. Oleh karena itu, diperlukan sistem *automatic switching* berbasis *fuzzy logic* yang mampu memberikan keputusan perpindahan sumber daya secara lebih adaptif dan stabil.

Fuzzy logic dirancang dengan 2 input dan 1 output. Setiap input mempunyai 3 fungsi keanggotaan dan output mempunyai 3 fungsi keanggotaan. Pada penelitian ini jumlah *rule fuzzy logic* ditentukan berdasarkan kombinasi seluruh kondisi input yang digunakan. Pada input Daya PV dengan 3 fungsi keanggotaan (Rendah, Sedang, Tinggi), input SOC 3 fungsi keanggotaan (Rendah, Sedang, Tinggi), dan output dengan 3 fungsi keanggotaan (Ringan, Sedang, Berat) Dengan setiap input dan output mempunyai 3 fungsi keanggotaan, maka jumlah kombinasi *rule fuzzy logic* adalah 27 *rule*. Tabel 1 memperlihatkan *rule base fuzzy logic* yang digunakan untuk menentukan keputusan *automatic switching*.

TABEL 1. RULE BASE FUZZY LOGIC

No	PV	SOC	Beban	Output
R1	Rendah	Rendah	Ringan	PLN
R2	Rendah	Rendah	Sedang	PLN
R3	Rendah	Rendah	Berat	PLN
R4	Rendah	Sedang	Ringan	Baterai
R5	Rendah	Sedang	Sedang	Baterai
R6	Rendah	Sedang	Berat	Baterai dan PLN
R7	Rendah	Tinggi	Ringan	Baterai
R8	Rendah	Tinggi	Sedang	Baterai
R9	Rendah	Tinggi	Berat	Baterai
R10	Sedang	Rendah	Ringan	PLN
R11	Sedang	Rendah	Sedang	PLN
R12	Sedang	Rendah	Berat	PLN
R13	Sedang	Sedang	Ringan	PV
R14	Sedang	Sedang	Sedang	PV dan Baterai
R15	Sedang	Sedang	Berat	PV dan Baterai
R16	Sedang	Tinggi	Ringan	PV
R17	Sedang	Tinggi	Sedang	PV
R18	Sedang	Tinggi	Berat	PV dan Baterai
R19	Tinggi	Rendah	Ringan	PV dan PLN
R20	Tinggi	Rendah	Sedang	PV dan PLN
R21	Tinggi	Rendah	Berat	PV dan PLN
R22	Tinggi	Sedang	Ringan	PV
R23	Tinggi	Sedang	Sedang	PV
R24	Tinggi	Sedang	Berat	PV dan Baterai
R25	Tinggi	Tinggi	Ringan	PV
R26	Tinggi	Tinggi	Sedang	PV
R27	Tinggi	Tinggi	Berat	PV + Battery

Berdasarkan penelitian sebelumnya, maka artikel ini mengusulkan strategi *automatic switching* pada sumber PV, baterai, PLN menggunakan *fuzzy logic* pada sistem mikrogrid. Sistem dirancang untuk menentukan sumber energi yang paling optimal berdasarkan kondisi daya PV, *state of charge* baterai, dan kebutuhan beban. Ketika daya PV mencukupi kebutuhan beban, sistem akan memprioritaskan penggunaan energi PV sebagai sumber utama. Jika daya PV menurun, maka baterai akan membantu menyuplai kekurangan daya dengan *power sharing*. Selanjutnya, ketika kondisi SOC baterai berada di bawah batas minimum, sistem akan mengaktifkan PLN sebagai sumber cadangan untuk menjaga kontinuitas suplai daya. Penelitian ini menggunakan simulasi MATLAB/Simulink untuk mengevaluasi kinerja sistem pada berbagai kondisi operasi. Pengujian dilakukan melalui beberapa skenario seperti kondisi PV menyuplai beban, *power sharing* antara

PV dan baterai, penggunaan PLN sebagai sumber cadangan, perpindahan otomatis kembali ke PV, serta kondisi kenaikan beban secara mendadak.

TABEL 2. KESENJANGAN PENELITIAN SEBELUMNYA

Peneliti (Tahun)	Sistem yang Diusulkan	Metode	Fokus Penelitian
Vigneysh & Kumarappan (2016)	Microgrid PV/SOFC/ Battery	Fuzzy Logic Controller	Penelitian ini fokus pada automatic switching PV-Battery-PLN
Kusmantoro et al. (2021)	Microgrid with Battery Energy Storage	Coordinated Fuzzy Logic Control	Penelitian ini menggunakan fuzzy untuk menentukan perpindahan sumber energi
Snoussi et al. (2026)	Hybrid Fuel Cell Vehicle	Multi-objective Optimization	Penelitian ini diterapkan pada mikrogrid PV-Baterai-PLN
Hannan et al. (2017)	Energy Storage System Review	Review teknologi baterai	Penelitian ini menerapkan kontrol manajemen energi baterai
Ma'rifat et al. (2024)	Sistem Energi Hybrid	Kontrol energi	Penelitian ini menggunakan fuzzy logic untuk switching
Masih-Tehrani et al. (2019)	Hybrid Energy Storage System	Wavelet-Based Power Management	Penelitian ini mengintegrasikan PV-Baterai-PLN
Mahela et al. (2022)	Smart Grid Multi-Agent System	Multi Agent Control	Penelitian ini menggunakan fuzzy switching sederhana dan adaptif
Saleem et al. (2022)	IoT Smart Energy Management	IoT-Based EMS	Penelitian ini fokus pada kontrol sumber energi
Mulneh & Wang (2026)	DC Microgrid	Hybrid Optimization Algorithm	Penelitian ini fokus pada operasi switching
Wu et al. (2026) [10]	AC/DC Microgrid Cluster	Distributed Autonomous Control	Penelitian ini menggunakan sistem hibrid sederhana
Biglarahmadi et al. (2022)	Hybrid AC/DC Microgrid	Nonlinear Hierarchical Control	Penelitian ini menggunakan fuzzy logic yang lebih fleksibel
Gutiérrez-Escalona et al. (2024)	Review AI Microgrid Control	Artificial Intelligence	Penelitian ini mengimplementasikan fuzzy controller
Yang et al. (2019) [13]	Hybrid Microgrid Hydrogen Storage	Hierarchical Self Regulation	Penelitian ini fokus energi surya dan baterai
Cakmak et al. (2025)	DC Microgrid Charging Station	Fuzzy Logic Energy Management	Penelitian ini menambahkan PLN sebagai sumber cadangan
El Mezdi et al. (2024)	Grid Connected PV/Wind/Battery	Fuzzy Logic Controller	Penelitian ini melakukan switching PV-Baterai-PLN
Bhosale & Agarwal (2019)	DC Microgrid	Fuzzy Logic Control	Penelitian ini fokus manajemen sumber energi
Jafari et al. (2019)	Residential Smart Microgrid	Fuzzy Logic EMS	Penelitian ini menggunakan tiga sumber energi
Guler et al. (2024)	Hybrid Energy Vehicle	Adaptive Fuzzy Controller	Penelitian ini diterapkan pada mikrogrid
Morales Escobar et al. (2020)	Building Energy System	Fuzzy Logic Control	Penelitian ini diterapkan pada sistem kelistrikan

Bharathi et al. (2022)	DC Microgrid Hybrid Generation	Fuzzy Logic Coordination Control	Penelitian ini fokus automatic switching
Bidram et al. (2013)	Microgrid Distributed Control	Multi-Agent Cooperative Control	Penelitian ini menggunakan fuzzy logic untuk keputusan switching

II. METODE

Dalam Penelitian yang diusulkan menggunakan MATLAB/Simulink. Dalam simulasi dan perancangan sistem kontrol dalam sistem Mikrogrid dengan sumber PV, baterai, PLN dengan strategi *automatic switching* menggunakan *fuzzy logic*. Penerapan simulasi bertujuan untuk menganalisis kinerja sistem dalam berbagai kondisi operasi.

A. Pemodelan Sistem

PV dalam sistem mikrogrid digunakan untuk memproduksi daya berdasarkan kondisi iradiasi matahari dan suhu lingkungan. Persamaan PV dinyatakan sebagai berikut:

$$P_{PV} = V_{PV} \times I_{PV} \quad (1)$$

Dimana

P_{PV} = Daya produksi PV (W)

V_{PV} = Tegangan PV (V)

I_{PV} = Arus PV (A)

Sedangkan pada baterai, untuk menentukan kapasitas baterai dengan menghitung SOC baterai sebagai berikut:

$$SOC(t) = SOC(t-1) + \frac{P_B \Delta t}{C_B} \quad (2)$$

Dimana

SOC = State of charge

P_B = Daya baterai

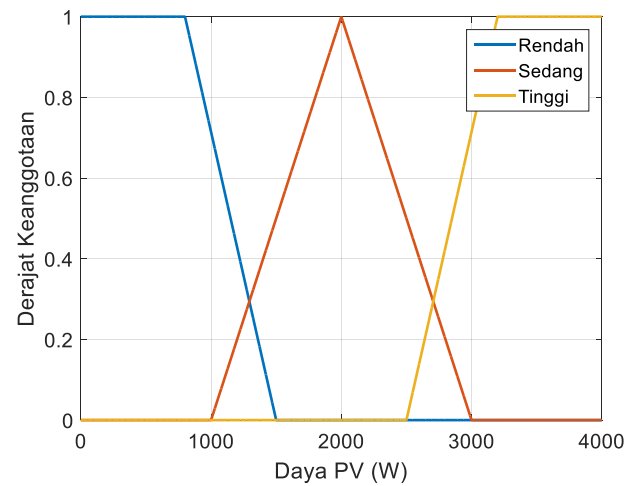
C_B = Kapasitas baterai

Δt = interval waktu

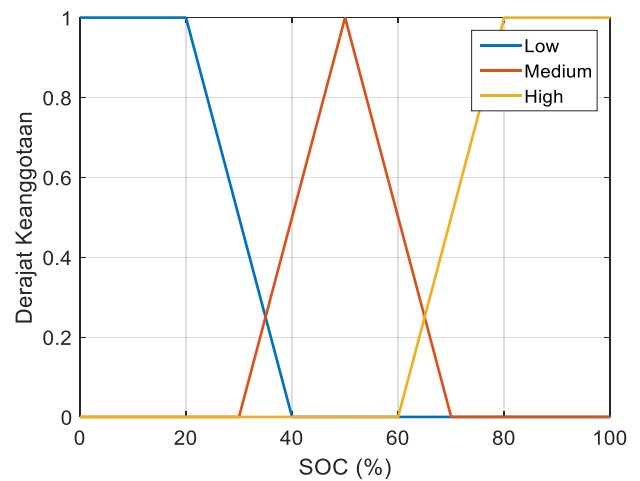
B. Desain Fuzzy Logic Controller

Perancangan *fuzzy logic controller* pada sistem mikrogrid dengan sumber hibrid dilakukan untuk mengatur proses *automatic switching* sumber energi secara adaptif berdasarkan kondisi operasi sistem. *Fuzzy logic controller* (FLC) dirancang agar mampu menentukan sumber energi yang paling optimal antara photovoltaik (PV), baterai, dan PLN sesuai dengan kondisi daya PV, *state of charge* (SOC) baterai, dan kebutuhan beban. Penggunaan *fuzzy logic* dipilih karena sistem mikrogrid memiliki karakteristik nonlinear dan dinamis akibat perubahan iradiasi matahari serta variasi beban yang berubah-ubah secara *real-time*.

Gambar 1 dan 2 memperlihatkan fungsi keanggotaan *fuzzy logic*. Dalam fuzzifikasi, data input berupa daya PV, SOC baterai, dan daya beban diubah menjadi variabel linguistik *fuzzy*. Variabel daya PV dibagi menjadi tiga himpunan *fuzzy* yaitu rendah, sedang, dan tinggi. Variabel SOC baterai dibagi menjadi *low*, *medium*, dan *high*, sedangkan variabel beban dibagi menjadi ringan, sedang, dan berat. Pembagian *membership function* tersebut bertujuan agar sistem mampu mengenali kondisi operasi secara lebih fleksibel.



Gambar 1. Fungsi keanggotaan daya PV



Gambar 2. Fungsi keanggotaan SOC Baterai.

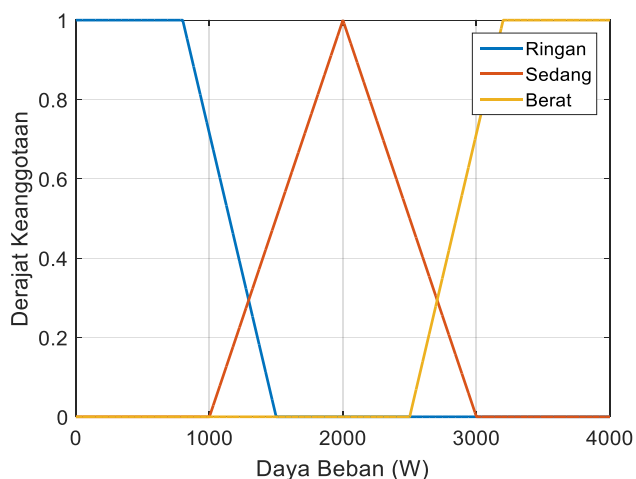
Dalam proses *inference* menggunakan *rule base fuzzy*. *Rule base* berisi aturan logika IF-THEN yang digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan *switching* sumber energi. Aturan fuzzy dirancang berdasarkan kondisi operasi sistem mikrogrid.

- IF PV tinggi AND SOC tinggi THEN sumber = PV
- IF PV rendah AND SOC tinggi THEN sumber = Battery
- IF PV rendah AND SOC rendah THEN sumber = PLN

Sedangkan pada proses defuzzifikasi yang berfungsi mengubah keluaran fuzzy menjadi nilai tegas (*crisp output*). *Output* fuzzy pada penelitian ini berupa keputusan *switching* sumber daya yaitu PV, baterai, atau PLN. Metode defuzzifikasi yang digunakan adalah *centroid method* karena mampu menghasilkan keluaran yang lebih stabil dan halus pada sistem kontrol. Untuk menguji kinerja sistem mikrogrid, maka dilakukan 5 skenario pengujian sebagai berikut:

1. Pada saat daya keluaran PV tinggi.
2. Pada saat daya keluaran PV rendah dan SOC baterai tinggi
3. Pada saat daya keluaran PV dan SOC rendah, PLN beroperasi.

4. Pada saat daya keluaran PV Kembali tinggi.
5. Pada saat terjadi peningkatan beban secara mendadak.



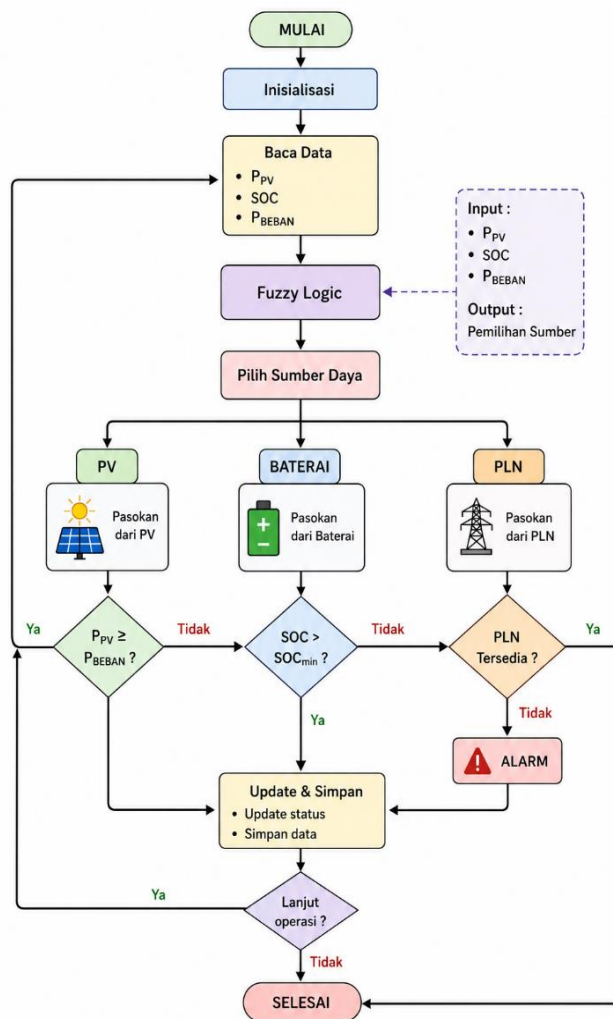
Gambar 3. Fungsi keanggotaan beban

Flowchart pada Gambar 4 sistem *automatic switching* mikrogrid menggambarkan proses pengambilan keputusan dalam menentukan sumber energi yang digunakan untuk menyuplai beban. Sistem dimulai dengan proses pembacaan parameter input berupa daya fotovoltaik (PV), *state of charge* (SOC) baterai, dan kebutuhan beban. Ketiga parameter tersebut digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan oleh *fuzzy logic controller*. Pada saat awal adalah pemeriksaan kondisi daya PV terhadap kebutuhan beban. Jika daya PV lebih besar atau sama dengan daya beban, maka sistem akan memprioritaskan PV sebagai sumber utama penyuplai energi. Pada kondisi ini, PLN berada pada status *off* dan baterai dapat berada pada kondisi *standby* atau *charging* apabila terdapat kelebihan daya dari PV. Ketika daya PV lebih kecil dibandingkan kebutuhan beban, sistem akan melakukan pemeriksaan terhadap kondisi SOC baterai.

Jika nilai SOC baterai masih berada di atas batas minimum, maka baterai akan diaktifkan untuk membantu menyuplai kekurangan daya melalui *power sharing* antara PV dan baterai. Pada kondisi ini, PV tetap menjadi sumber utama sedangkan baterai berfungsi sebagai sumber pendukung agar kebutuhan daya beban tetap terpenuhi secara stabil. Namun, ketika kondisi SOC baterai berada di bawah batas minimum yang telah ditentukan, maka sistem akan memproteksi baterai dengan menghentikan proses *discharge* untuk mencegah *over-discharge* yang dapat memperpendek umur baterai. Pada kondisi tersebut, sistem secara otomatis mengaktifkan PLN sebagai sumber cadangan untuk menjaga kontinuitas suplai daya terhadap beban. Flowchart untuk menunjukkan bahwa sistem *continuously monitoring* kondisi daya PV. Ketika daya PV kembali meningkat dan mampu memenuhi kebutuhan beban, maka sistem secara otomatis melakukan *switching* kembali dari PLN menuju PV. Proses perpindahan sumber energi dilakukan secara otomatis dan bertahap sehingga tidak menyebabkan gangguan pada sistem maupun pemutusan suplai daya pada beban.

Gambar 5 memperlihatkan konfigurasi utama dari sistem Mikrogrid berbasis fotovoltaik (PV), baterai, dan PLN yang dikendalikan menggunakan *fuzzy logic controller*. Sistem dirancang untuk mengatur aliran daya dan melakukan *automatic switching* sumber daya secara

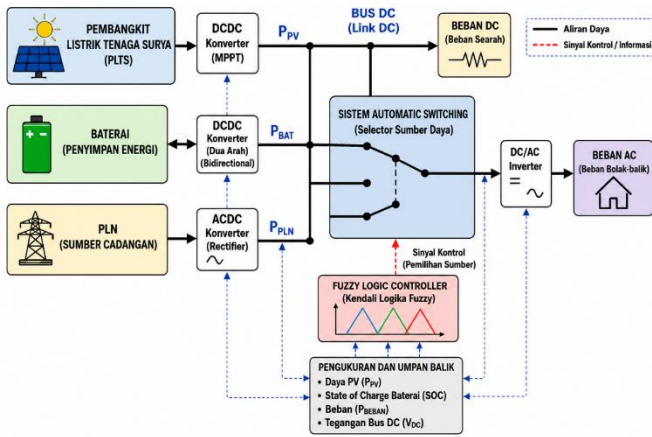
otomatis agar kontinuitas suplai listrik pada beban tetap terjaga. Pada bagian pertama terdapat sumber energi utama berupa fotovoltaik (PV), mengubah energi matahari menjadi energi listrik DC yang digunakan sebagai sumber utama pada sistem mikrogrid.



Gambar 4. Flowchart sistem *automatic switching*

Bagian berikutnya adalah baterai yang berfungsi menyimpan energi listrik ketika daya PV berlebih dan akan menyuplai kembali energi ketika daya PV tidak mencukupi kebutuhan beban. Penggunaan baterai pada sistem mikrogrid bertujuan untuk menjaga stabilitas suplai daya serta meningkatkan keandalan sistem tenaga listrik. Pada sistem juga dilengkapi dengan jaringan PLN sebagai sumber daya cadangan. PLN akan aktif secara otomatis ketika daya PV rendah dan kondisi *state of charge* (SOC) baterai berada di bawah batas minimum. Dengan adanya sumber cadangan dari PLN, kontinuitas suplai daya terhadap beban dapat tetap terjaga meskipun kondisi energi terbarukan tidak mencukupi. Pada pusat sistem terdapat *fuzzy logic controller* (FLC) yang berfungsi sebagai pengendali utama dalam proses pengambilan keputusan. FLC menerima input berupa daya PV, kondisi SOC baterai, dan kebutuhan daya beban. Berdasarkan parameter tersebut, *fuzzy logic* menentukan sumber energi yang paling optimal untuk digunakan. Output dari *fuzzy logic controller* selanjutnya diteruskan menuju sistem *automatic switching*. Sistem *automatic switching* berfungsi mengatur perpindahan sumber energi antara PV,

baterai, dan PLN secara otomatis tanpa mengganggu suplai daya pada beban.

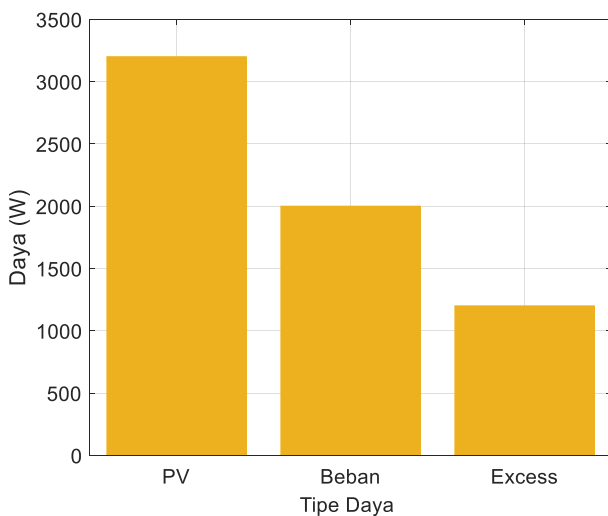


Gambar 5. Sistem mikrogrid yang diusulkan.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

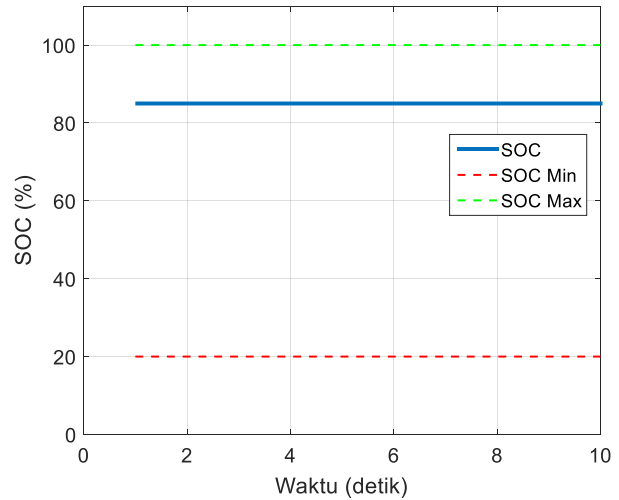
Dalam rancangan penelitian digunakan PV sebesar 3200 Wp dengan beban 2000 W. Dalam kondisi awal SOC baterai sebesar 85%. Untuk mengetahui kinerja *automatic switching* pada sistem mikrogrid dilakukan 5 skenario pengujian.

Gambar 6 dan 7 merupakan simulasi skenario 1. Pada Gambar 6 menunjukkan kondisi operasi sistem mikrogrid ketika sumber energi utama berasal dari photovoltaic (PV). Pada kondisi ini, daya yang dihasilkan PV sebesar 3200 W mampu memenuhi kebutuhan beban sebesar 2000 W sehingga sistem *fuzzy logic* memprioritaskan PV sebagai sumber utama penyuplai daya. Hal ini ditunjukkan dari grafik status sumber daya, dimana PV berada pada kondisi aktif (*On*), sedangkan baterai berada pada kondisi *standby* dan PLN dalam keadaan *Off*. Grafik daya sistem memperlihatkan bahwa terdapat kelebihan daya (*excess power*) sebesar 1200 W yang diperoleh dari selisih antara daya PV dan daya beban. Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem memiliki surplus energi sehingga energi berlebih dapat dimanfaatkan untuk proses pengisian baterai (*charging*). Dengan demikian, energi surya tidak hanya mampu menyuplai beban, tetapi juga meningkatkan cadangan energi pada baterai.



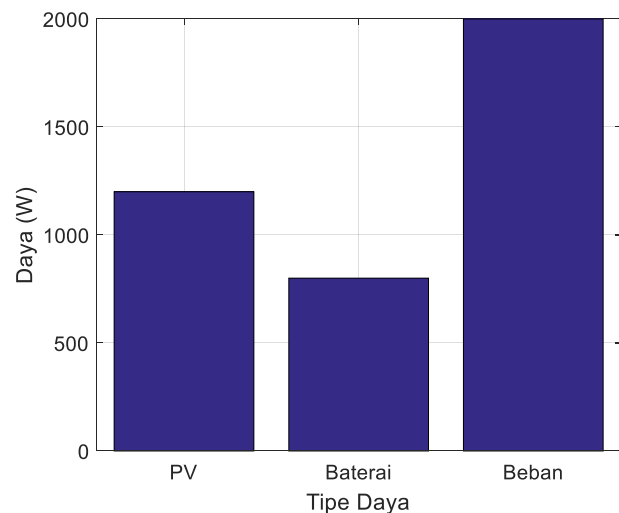
Gambar 6. Skenario 1 sistem mikrogrid.

Pada Gambar 7 merupakan grafik *State of Charge* (SOC) baterai dan terlihat bahwa nilai SOC berada pada 85%, masih berada di atas batas minimum SOC dan di bawah batas maksimum. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa baterai masih dalam kondisi aman dan memungkinkan untuk dilakukan pengisian energi dari surplus daya PV. Sistem *fuzzy logic* berhasil menjaga kestabilan operasi dengan memanfaatkan energi terbarukan secara optimal tanpa menggunakan sumber cadangan dari PLN.



Gambar 7. SOC skenario 1 sistem mikrogrid.

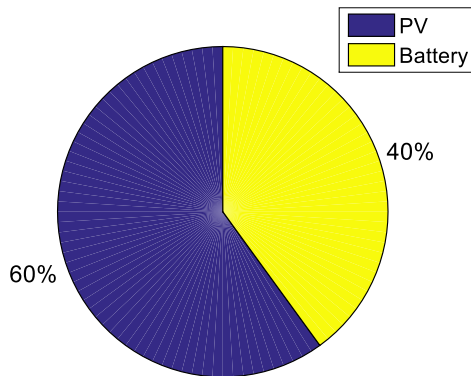
Selanjutnya pada skenario 2 menunjukkan kondisi operasi sistem mikrogrid ketika daya photovoltaik (PV) tidak mampu memenuhi seluruh kebutuhan beban sehingga baterai digunakan sebagai sumber pendukung. Gambar 8 memperlihatkan daya PV yang dihasilkan sebesar 1200 W, sedangkan kebutuhan beban mencapai 2000 W. Karena terdapat kekurangan daya sebesar 800 W, sistem *fuzzy logic* secara otomatis mengaktifkan baterai untuk membantu menyuplai kekurangan daya tersebut.



Gambar 8. Skenario 2 sistem mikrogrid.

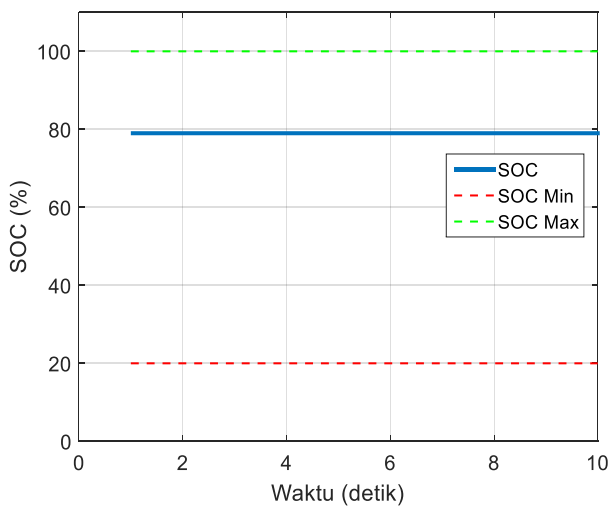
Dalam skenario 2 ini status sistem menunjukkan bahwa PV dan baterai berada pada kondisi *on*, sedangkan PLN berada pada kondisi *off*. Hal ini menunjukkan bahwa strategi *automatic switching* berhasil memprioritaskan penggunaan energi terbarukan dan baterai tanpa menggunakan sumber daya dari jaringan PLN. Total daya suplai yang dihasilkan dari kombinasi PV dan baterai

mencapai 2000 W sehingga seluruh kebutuhan beban dapat terpenuhi dengan stabil. Gambar 9 memperlihatkan kontribusi masing-masing sumber energi, yaitu PV sebesar 1200 W dan baterai sebesar 800 W. Kondisi ini menunjukkan mekanisme *power sharing* berjalan dengan baik, dimana PV tetap menjadi sumber utama sedangkan baterai hanya membantu kekurangan daya.



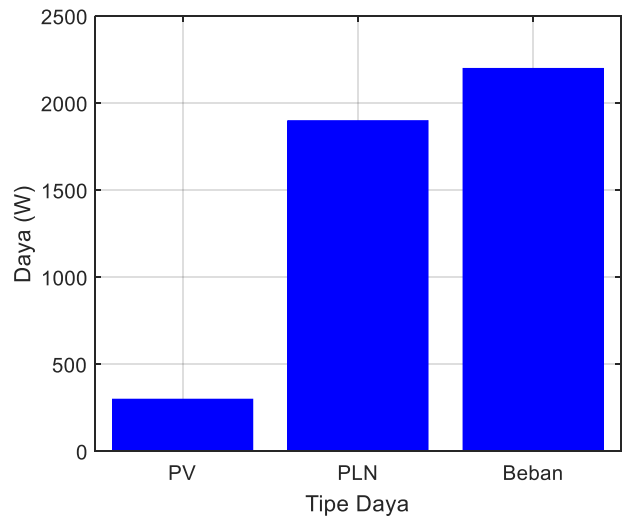
Gambar 9. Skenario 2 *power sharing*.

Grafik *power sharing* menunjukkan bahwa sekitar 60% daya berasal dari PV dan 40% berasal dari baterai. Hal ini menandakan bahwa sistem masih memaksimalkan pemanfaatan energi surya meskipun kondisi iradiasi mengalami penurunan. Pada Gambar 10 memperlihatkan grafik *State of Charge* (SOC) baterai terlihat bahwa nilai SOC berada pada 75%, masih berada di atas batas minimum SOC. Kondisi ini menunjukkan bahwa baterai masih memiliki kapasitas energi yang cukup untuk membantu menyuplai beban tanpa mengganggu keamanan operasi baterai. Dalam skenario 2 menunjukkan bahwa sistem mikrogrid dengan sumber hibrid mampu bekerja secara adaptif dalam menghadapi penurunan daya PV.



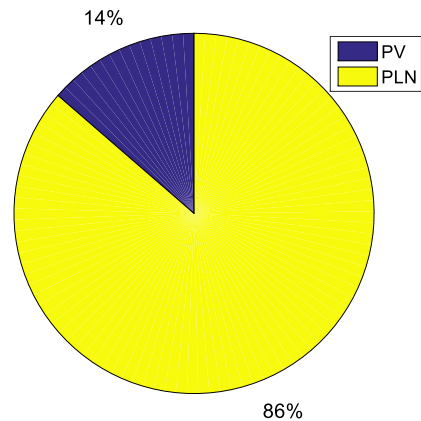
Gambar 10. SOC skenario 2 sistem mikrogrid.

Pada skenario 3 menunjukkan kondisi operasi sistem mikrogrid ketika daya photovoltaik (PV) sangat rendah dan kondisi baterai berada pada batas minimum sehingga sistem secara otomatis mengaktifkan sumber daya dari PLN. Gambar 11 memperlihatkan daya PV yang tersedia hanya sebesar 300 W, sedangkan kebutuhan beban mencapai 2200 W.



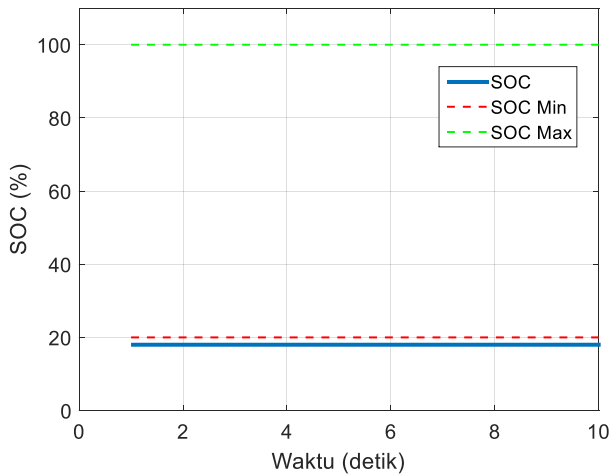
Gambar 11. Skenario 3 sistem mikrogrid.

Berdasarkan kondisi tersebut, sistem *fuzzy logic* mengambil keputusan untuk memproteksi baterai agar tidak mengalami *over-discharge*. Oleh karena itu, baterai dinonaktifkan dan sumber daya dari PLN diaktifkan untuk menjaga kontinuitas suplai energi pada beban. Gambar 12 memperlihatkan grafik *power sharing*, bahwa sebagian besar daya berasal dari PLN, sedangkan kontribusi PV hanya sebagian kecil. Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem *backup* bekerja dengan baik ketika sumber energi terbarukan dan kapasitas baterai tidak mencukupi. Sedangkan Gambar 13 memperlihatkan grafik SOC baterai, yang terlihat bahwa nilai SOC berada di bawah batas minimum sehingga sistem melakukan proteksi baterai dengan menghentikan proses *discharge*. Strategi ini penting untuk menjaga umur baterai dan mencegah kerusakan akibat penggunaan energi yang berlebihan. Nilai *State of Charge* (SOC) baterai berada pada 18%, lebih rendah dari batas minimum SOC yang telah ditentukan sebesar 20%.

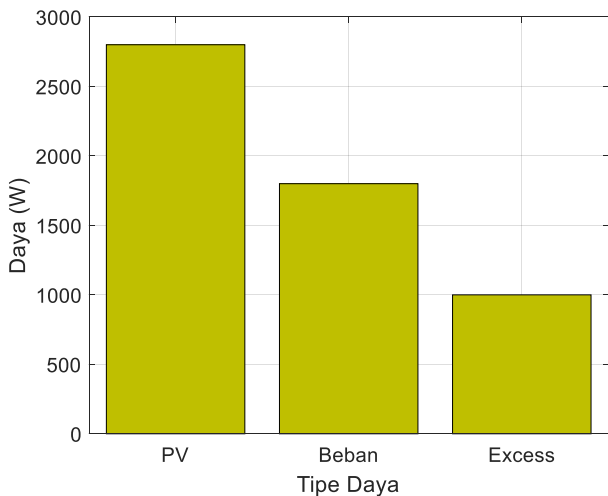


Gambar 12. Skenario 3 *power sharing*.

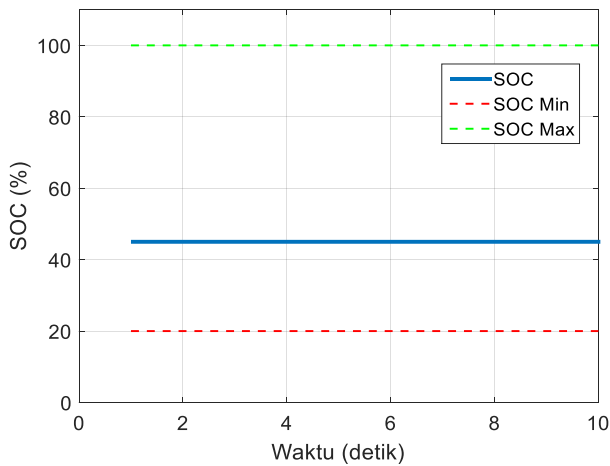
Dalam skenario 4 menunjukkan proses perpindahan otomatis sumber energi dari PLN kembali ke photovoltaik (PV) ketika daya PV telah kembali normal dan mampu memenuhi kebutuhan beban. Pada kondisi awal, sistem menggunakan PLN sebagai sumber utama karena sebelumnya daya PV berada pada kondisi rendah sehingga belum mampu menyuplai beban secara penuh.



Gambar 13. SOC skenario 3 sistem mikrogrid.



Gambar 14. Skenario 4 sistem mikrogrid.

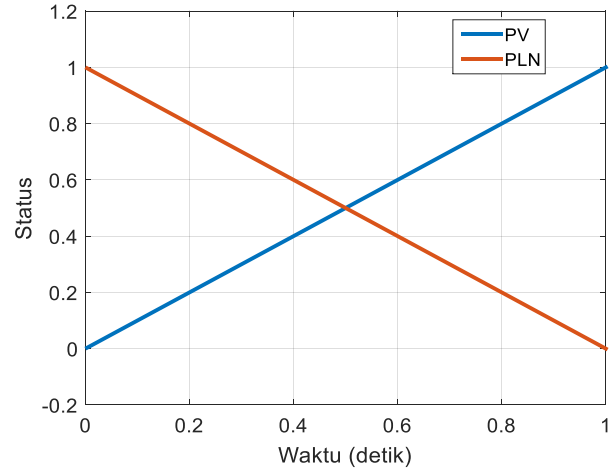


Gambar 15. SOC skenario 4 sistem mikrogrid.

Gambar 14 memperlihatkan daya awal PV sebesar 500 W meningkat menjadi 2800 W, sedangkan kebutuhan beban sebesar 1800 W. Setelah sistem mendeteksi bahwa daya PV telah lebih besar dibandingkan daya beban, maka *fuzzy logic* secara otomatis melakukan *switching* dari PLN ke PV sebagai sumber utama penyuplai daya. Hal ini menunjukkan bahwa sistem *automatic switching* berhasil melakukan perpindahan sumber daya secara otomatis tanpa gangguan pada beban. Surplus daya sebesar 1000 W digunakan untuk proses charging baterai karena nilai State of Charge (SOC) baterai masih berada pada 45% dan belum mencapai batas

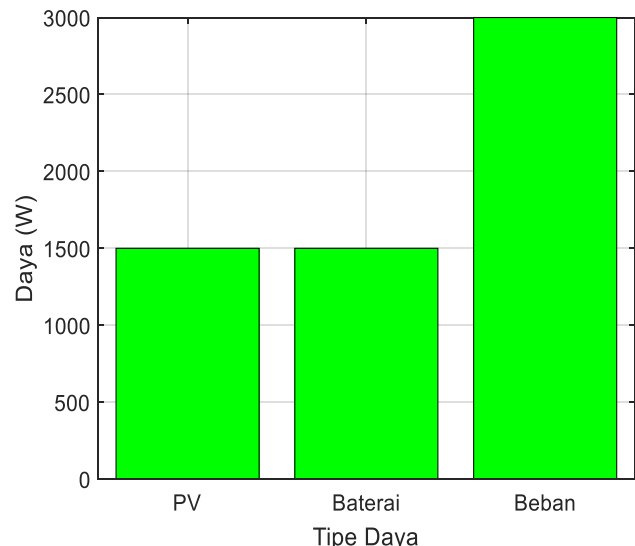
maksimum. Gambar 15 memperlihatkan grafik SOC, bahwa kapasitas baterai masih berada pada kondisi aman sehingga proses pengisian energi dapat dilakukan.

Gambar 16 memperlihatkan grafik transisi *switching*, perubahan status sumber energi dari PLN menuju PV secara bertahap dan stabil. Kurva PV meningkat dari kondisi *off* menjadi *on*, sedangkan kurva PLN menurun dari kondisi *on* menjadi *off*. Hal ini menunjukkan bahwa perpindahan sumber energi berlangsung dengan baik tanpa terjadi osilasi *switching* maupun pemutusan suplai daya pada beban.



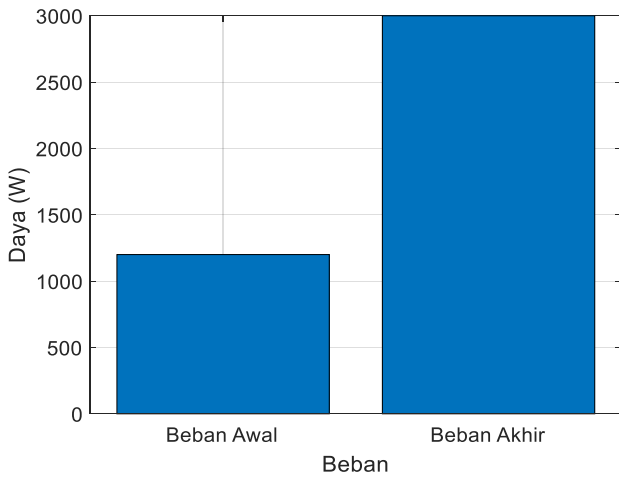
Gambar 16. Skenario 4 *automatic switching*.

Pada skenario 5 menunjukkan kondisi operasi sistem mikrogrid ketika terjadi kenaikan beban secara mendadak. Gambar 17 merupakan kondisi awal, photovoltaik (PV) menghasilkan daya sebesar 1500 W dan hanya menyuplai beban sebesar 1200 W sehingga sistem berada dalam kondisi stabil. Namun, ketika beban meningkat menjadi 3000 W maka daya dari PV tidak lagi mencukupi untuk memenuhi kebutuhan daya sistem. Oleh karena itu baterai membantu PV menyuplai daya beban.

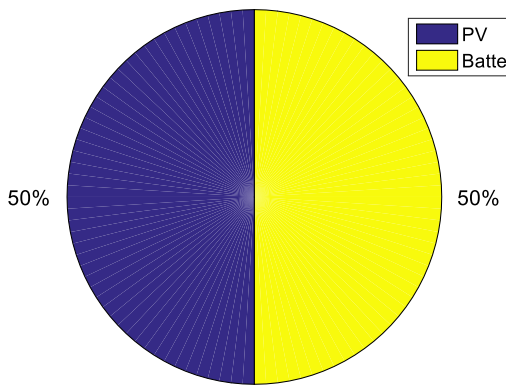


Gambar 17. Skenario 5 sistem mikrogrid.

Hal ini menunjukkan bahwa sistem *automatic switching* berhasil melakukan respon cepat terhadap perubahan beban secara adaptif tanpa mengganggu kontinuitas suplai daya. Grafik perubahan beban memperlihatkan peningkatan daya beban dari 1200 W menjadi 3000 W, yang terlihat pada Gambar 18.

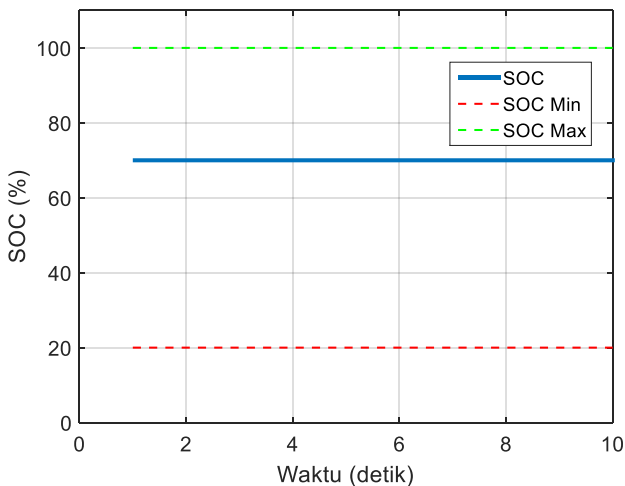


Gambar 18. Skenario 5 perubahan beban.



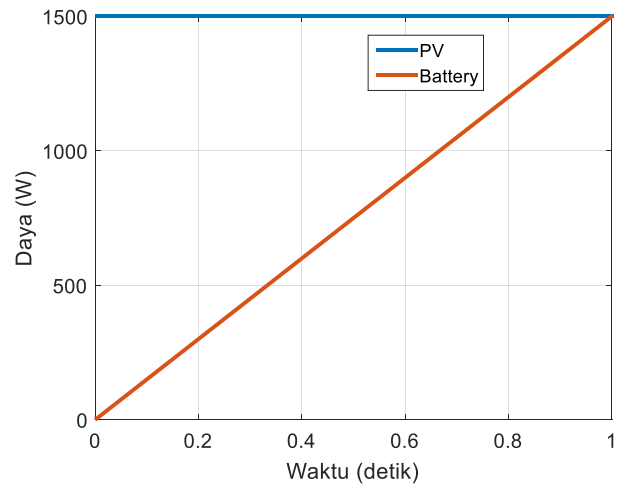
Gambar 19. Skenario 5 power sharing.

Gambar 19 memperlihatkan grafik pembagian daya yang seimbang antara PV dan baterai. Kondisi ini menunjukkan bahwa baterai berhasil membantu menjaga kestabilan sistem ketika terjadi lonjakan beban mendadak. Sedangkan Gambar 20 memperlihatkan grafik SOC baterai, yang terlihat bahwa nilai SOC masih berada di atas batas minimum sehingga baterai dapat digunakan secara aman untuk proses *discharge*. Sistem *fuzzy logic* juga berhasil menjaga agar PLN tidak aktif karena kebutuhan daya masih dapat dipenuhi oleh kombinasi PV dan baterai. Nilai *State of Charge* (SOC) baterai masih berada pada 70%, baterai masih mampu membantu menyuplai daya tanpa perlu mengaktifkan PLN.



Gambar 20. SOC skenario 5 sistem mikrogrid.

Gambar 21 memperlihatkan grafik respon sistem bahwa daya PV tetap konstan, sedangkan daya baterai meningkat secara otomatis mengikuti kenaikan beban. Hal ini menunjukkan bahwa sistem memiliki respon yang cepat terhadap perubahan kondisi operasi dan mampu mempertahankan stabilitas suplai daya tanpa terjadi penurunan tegangan maupun pemutusan beban.



Gambar 21. Skenario 5 perubahan kondisi operasi.

Secara keseluruhan, hasil simulasi skenario 5 menunjukkan bahwa sistem mikrogrid dengan sumber hybrid mampu menghadapi perubahan beban secara dinamis. Strategi *automatic switching* berbasis *fuzzy logic* berhasil melakukan pengaturan *power sharing* secara adaptif sehingga kontinuitas, stabilitas, dan efisiensi sistem tetap terjaga meskipun terjadi kenaikan beban secara mendadak.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, sistem Mikrogrid berbasis sumber PV, baterai, PLN menggunakan metode *fuzzy logic* berhasil dirancang dan disimulasikan dengan baik menggunakan MATLAB/Simulink. Strategi *automatic switching* yang dikembangkan mampu mengatur perpindahan sumber energi secara otomatis berdasarkan kondisi daya photovoltaik (PV), *state of charge* (SOC) baterai, dan kebutuhan beban sistem sehingga kontinuitas suplai daya dapat terjaga secara optimal. Hasil pengujian pada lima skenario menunjukkan bahwa sistem mampu bekerja secara adaptif pada berbagai kondisi operasi. Ketika daya PV tinggi, sistem berhasil memprioritaskan energi surya sebagai sumber utama penyuplai beban. Pada kondisi daya PV menurun, baterai secara otomatis membantu menyuplai kekurangan daya melalui *power sharing* tanpa harus mengaktifkan PLN. Selain itu, ketika kondisi SOC baterai berada di bawah batas minimum, sistem mampu melakukan proteksi baterai dengan mengalihkan suplai daya ke PLN sebagai sumber cadangan untuk menjaga stabilitas sistem dan mencegah *over-discharge* baterai. Sistem juga berhasil melakukan perpindahan otomatis kembali ke PV ketika daya surya kembali normal. Proses switching berlangsung dengan cepat dan stabil tanpa menyebabkan gangguan pada beban maupun osilasi perpindahan sumber daya. Pada kondisi kenaikan beban secara mendadak, *fuzzy logic controller* mampu memberikan respon yang cepat melalui pengaktifan baterai sebagai sumber pendukung sehingga kestabilan tegangan dan kontinuitas daya tetap terjaga. Secara

keseluruhan, penerapan *fuzzy logic* pada sistem *automatic switching* terbukti mampu meningkatkan efisiensi, keandalan, dan stabilitas operasi mikrogrid. Sistem yang dirancang juga mampu mengurangi ketergantungan terhadap PLN dengan memaksimalkan penggunaan energi terbarukan sebagai sumber energi utama. Penelitian ini dapat dikembangkan dengan menambahkan sistem monitoring berbasis *Internet of Things* agar kondisi daya, tegangan, arus, dan SOC baterai dapat dipantau secara real-time. Selain itu, metode *fuzzy logic* dapat dikombinasikan dengan algoritma kecerdasan buatan seperti *Artificial Neural Network* atau optimasi berbasis *machine learning* untuk meningkatkan akurasi pengambilan keputusan *switching* dan prediksi beban sistem. Penelitian selanjutnya juga dapat diarahkan pada implementasi *hardware* secara langsung menggunakan mikrokontroler atau single board computer sehingga sistem dapat diaplikasikan pada skala rumah tangga, industri, maupun smart grid berbasis energi terbarukan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada LPPM Universitas PGRI Semarang yang telah memberikan dukungan dalam penelitian pengembangan energi terbarukan dalam sistem mikrogrid.

REFERENSI

- [1] T. Vigneysh and N. Kumarappan, "Autonomous operation and control of photovoltaic/solid oxide fuel cell/battery energy storage based microgrid using fuzzy logic controller." *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 3, pp. 1877–1891, 2016, doi: 10.1016/j.ijhydene.2015.11.022.
- [2] A. Kusmanto, A. Priyadi, V. L. Budiharto Putri, and M. Hery Purnomo, "Coordinated Control of Battery Energy Storage System Based on Fuzzy Logic for Microgrid with Modified AC Coupling Configuration." *Int. J. Intell. Eng. Syst.*, vol. 14, no. 2, pp. 495–510, 2021, doi: 10.22266/ijies2021.0430.45.
- [3] J. Snoussi, M. Mansouri, M. F. Mimouni, and A. C. Ammari, "A Multi-Objective Framework for Optimal Sizing and Power Splitting in PEM Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles." *IEEE Access*, vol. 14, no. January, pp. 32030–32041, 2026, doi: 10.1109/ACCESS.2026.3667008.
- [4] M. A. Hannan, M. M. Hoque, A. Mohamed, and A. Ayob, "Review of energy storage systems for electric vehicle applications: Issues and challenges." *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 69, no. August 2016, pp. 771–789, 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.11.171.
- [5] I. I. J. Rifka Alkhilyatul Ma'rifat, I Made Suraharta, "No Title 濟無No Title No Title No Title." vol. 2, pp. 306–312, 2024.
- [6] M. Masih-Tehrani, M. R. Ha'Iri Yazdi, V. Esfahanian, M. Dahmardeh, and H. Nehzati, "Wavelet-based power management for hybrid energy storage system." *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*, vol. 7, no. 4, pp. 779–790, 2019, doi: 10.1007/s40565-019-0529-2.
- [7] O. P. Mahela *et al.*, "Comprehensive overview of multi-agent systems for controlling smart grids." *CSEE J. Power Energy Syst.*, vol. 8, no. 1, pp. 115–131, 2022, doi: 10.17775/CSEEJPES.2020.03390.
- [8] M. U. Saleem, M. R. Usman, M. A. Usman, and C. Politis, "Design, Deployment and Performance Evaluation of an IoT Based Smart Energy Management System for Demand Side Management in Smart Grid." *IEEE Access*, vol. 10, pp. 15261–15278, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3147484.
- [9] S. Muluneh and Z. Wang, "DC Microgrid Sizing and Placement Based on Hybrid Optimization Algorithm." *IEEE Access*, vol. 14, no. December 2025, pp. 502–527, 2026, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3645390.
- [10] X. Wu, S. Wang, J. Huang, Y. Xu, and J. M. Guerrero, "Distributed Autonomous Control for Global Economic Operation of AC/DC Microgrid Clusters Interconnected by Flexible DC Distribution Network." *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 17, no. 1, pp. 529–545, 2026, doi: 10.1109/TSTE.2025.3581575.
- [11] M. Biglarahmadi, A. Ketabi, H. Reza Baghaee, and J. M. Guerrero, "Integrated Nonlinear Hierarchical Control and Management of Hybrid AC/DC Microgrids." *IEEE Syst. J.*, vol. 16, no. 1, pp. 902–913, 2022, doi: 10.1109/JSYST.2021.3050334.
- [12] J. Gutiérrez-Escalona, C. Roncero-Clemente, O. Husey, O. Matiushkin, and F. Blaabjerg, "Artificial Intelligence in the Hierarchical Control of AC, DC, and Hybrid AC/DC Microgrids: A Review." *IEEE Access*, vol. 12, no. October, pp. 157227–157246, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3486382.

- [13] H. Yang, Q. Li, S. Zhao, W. Chen, and H. Liu, "A Hierarchical Self-Regulation Control for Economic Operation of AC/DC Hybrid Microgrid with Hydrogen Energy Storage System." *IEEE Access*, vol. 7, pp. 89330–89341, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2923794.
- [14] R. Cakmak, G. Bayrak, and M. Koc, "A Fuzzy Logic-Based Energy Management Approach for Fuel Cell and Photovoltaic Powered Electric Vehicle Charging Station in DC Microgrid Operations." *IEEE Access*, vol. 13, no. March, pp. 49905–49921, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3552253.
- [15] K. El Mezdi, A. El Magri, A. Watil, I. El Myasse, and L. Bahatti, "Integrated Control and Energy Flow Management for Hybrid Grid-Connected Photovoltaic/Wind Systems with Battery Storage Using Fuzzy Logic Controllers." *IFAC-PapersOnLine*, vol. 58, no. 13, pp. 442–447, 2024, doi: 10.1016/j.ifacol.2024.07.522.
- [16] R. Bhosale and V. Agarwal, "Fuzzy logic control of the ultracapacitor interface for enhanced transient response and voltage stability of a dc microgrid." *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 55, no. 1, pp. 712–720, 2019, doi: 10.1109/TIA.2018.2870349.
- [17] M. Jafari, Z. Malekjamshidi, D. D. C. Lu, and J. Zhu, "Development of a Fuzzy-Logic-Based Energy Management System for a Multiport Multioperation Mode Residential Smart Microgrid." *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 34, no. 4, pp. 3283–3301, 2019, doi: 10.1109/TPEL.2018.2850852.
- [18] N. Guler, Z. M. Ismail, Z. Ben Hazem, and N. Naik, "Adaptive Fuzzy Logic Controller-Based Intelligent Energy Management System Scheme for Hybrid Electric Vehicles." *IEEE Access*, vol. 12, no. October, pp. 173441–173454, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3496897.
- [19] L. Morales Escobar, J. Aguilar, A. Garces-Jimenez, J. A. Gutierrez De Mesa, and J. M. Gomez-Pulido, "Advanced fuzzy-logic-based context-driven control for HVAC management systems in buildings." *IEEE Access*, vol. 8, pp. 16111–16126, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2966545.
- [20] G. Bharathi, P. Kantharao, and R. Srinivasarao, "Fuzzy logic control (FLC)-based coordination control of DC microgrid with energy storage system and hybrid distributed generation." *Int. J. Ambient Energy*, vol. 43, no. 1, pp. 4255–4271, 2022, doi: 10.1080/01430750.2021.1874526.
- [21] A. Bidram, A. Davoudi, F. L. Lewis, and Z. Qu, "Secondary control of microgrids based on distributed cooperative control of multi-agent systems." *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 7, no. 8, pp. 822–831, 2013, doi: 10.1049/iet-gtd.2012.0576.