

Strategi Manajemen Energi PV dan Baterai Pada Mikrogrid Dengan Kendali Zelio Logic

Adhi Kusmantoro¹

¹ Universitas PGRI Semarang 1; email : adhikusmantoro@upgris.ac.id

* Penulis Korespondensi : Adhi Kusmantoro

Abstract: The ever-increasing demand for electrical energy and dependence on conventional energy sources drives the need for more efficient and sustainable use of renewable energy. A viable solution is a photovoltaic (PV) and battery-based microgrid system. However, changes in solar irradiance require an appropriate energy management strategy to ensure a stable power supply. The objective of this research is to automatically regulate the flow of PV and battery power, with a PV capacity of 5 kWp and a 3000 Ah battery, and a load of 2000 W. The research method is carried out by designing a microgrid system and compiling an energy management control algorithm. The implemented control strategy prioritizes the PV as the primary power source, the battery as a secondary backup, and PLN as the other backup source. Regulation is based on the battery's State of Charge (SOC), with a maximum limit of 95% and a minimum limit of 20%. When PV power exceeds the load requirement, energy is used to supply the load and charge the battery. Conversely, when PV power is lower than the load, the battery will be used until it reaches the minimum SOC limit, after which the system will automatically switch to PLN. The results of the study show that the Zelio Logic control is capable of automatically regulating power flow under various operating conditions such as high PV intensity, low PV intensity, peak load, full battery condition, minimum battery condition, and automatic switching to PLN. The system is also capable of protecting the battery from overcharge and overdischarge conditions by setting the SOC limit. The efficiency obtained is 85.7% or around 86%, which indicates that energy from PV can be utilized optimally and the use of PLN can be minimized.

Keywords: Microgrid; Battery; Photovoltaic (PV); Energy Management; Zelio Logic

Abstrak: Kebutuhan energi listrik yang terus meningkat serta ketergantungan terhadap sumber energi konvensional mendorong perlunya pemanfaatan energi terbarukan yang lebih efisien dan berkelanjutan. Solusi yang dapat diterapkan dengan sistem mikrogrid berbasis *Photovoltaic* (PV) dan baterai. Namun perubahan iradiasi matahari memerlukan strategi manajemen energi yang tepat agar suplai daya stabil. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengatur aliran daya PV dan baterai secara otomatis, dengan kapasitas PV 5 kWp dan baterai 3000 Ah, serta beban sebesar 2000 W. Metode penelitian dilakukan dengan perancangan sistem mikrogrid, dan penyusunan algoritma kontrol manajemen energi. Strategi kendali yang diterapkan memaknai prioritas sumber daya utama PV, baterai sebagai cadangan kedua, dan PLN sebagai sumber cadangan lainnya. Pengaturan dilakukan berdasarkan nilai *State of Charge* (SOC) baterai, dengan batas maksimum 95% dan batas minimum 20%. Ketika daya PV melebihi kebutuhan beban, energi digunakan untuk menyuplai beban dan mengisi baterai. Sebaliknya, saat daya PV lebih rendah dari beban, baterai akan digunakan hingga mencapai batas minimum SOC, kemudian sistem akan beralih secara otomatis ke PLN. Hasil penelitian memperlihatkan bahwa kendali zelio logic mampu melakukan pengaturan aliran daya secara otomatis pada berbagai kondisi operasi seperti intensitas PV tinggi, intensitas PV rendah, beban puncak, kondisi baterai penuh, kondisi baterai minimum, serta perpindahan otomatis ke PLN. Sistem juga mampu melindungi baterai dari kondisi *overcharge* dan *overdischarge* melalui pengaturan batas SOC. Efisiensi diperoleh nilai sebesar 85,7% atau sekitar 86%, yang menunjukkan bahwa energi dari PV dapat dimanfaatkan secara optimal dan penggunaan PLN dapat diminimalkan.

Diterima: March 04, 2026

Direvisi: March 22, 2026

Diterima: March 24, 2026

Diterbitkan: April 28, 2026

Versi sekarang: April 30, 2026



Hak cipta: © 2026 oleh penulis.
Diserahkan untuk kemungkinan publikasi akses terbuka berdasarkan syarat dan ketentuan lisensi Creative Commons Attribution (CC BY SA) (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)

Kata kunci: Mikrogrid; Baterai; Photovoltaic (PV); Manajemen Energi; Zelio Logic

1. Pendahuluan

Kebutuhan energi listrik yang terus meningkat seiring pertumbuhan penduduk, perkembangan industri, serta kemajuan teknologi menuntut tersedianya sistem tenaga listrik yang andal, efisien, dan berkelanjutan. Ketergantungan yang tinggi terhadap energi fosil seperti batu bara, minyak bumi, dan gas alam menimbulkan berbagai permasalahan, antara lain peningkatan emisi karbon, pencemaran lingkungan, serta menurunnya cadangan energi primer. Kondisi tersebut mendorong pemanfaatan energi terbarukan sebagai solusi dalam mendukung transisi menuju sistem energi yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan [1], [2].

Salah satu sumber energi terbarukan yang paling potensial di Indonesia adalah energi surya melalui sistem *Photovoltaic* (PV). Letak geografis Indonesia yang berada di daerah khatulistiwa menyebabkan intensitas radiasi matahari relatif tinggi sepanjang tahun sehingga sangat mendukung pemanfaatan PLTS berbasis PV [3]. Sistem PV memiliki beberapa keunggulan, seperti sumber energi bersih, biaya operasional rendah, instalasi yang fleksibel, dan mudah dikembangkan pada skala kecil maupun besar. Namun demikian, keluaran daya PV sangat dipengaruhi oleh kondisi cuaca, suhu lingkungan, dan intensitas penyinaran matahari sehingga bersifat intermiten dan fluktuatif. Kondisi ini menyebabkan daya keluaran PV tidak selalu mampu memenuhi kebutuhan beban secara kontinu [[4]–[6].

Untuk mengatasi ketidakstabilan daya keluaran PV, diperlukan sistem penyimpanan energi berupa baterai (*Battery Energy Storage System/BESS*). Baterai berfungsi menyimpan energi berlebih saat produksi PV tinggi dan menyalurkannya kembali ketika daya PV menurun, seperti pada malam hari atau saat cuaca mendung dan hujan. Penggunaan baterai pada sistem mikrogrid terbukti mampu meningkatkan keandalan suplai daya, menjaga kestabilan tegangan, serta meningkatkan efisiensi pemanfaatan energi terbarukan. Namun, performa baterai sangat dipengaruhi oleh pola pengisian dan pengosongan energi. Kondisi *overcharge* dan *overdischarge* dapat menurunkan umur pakai baterai dan menyebabkan kerusakan pada sistem penyimpanan energi [7]–[9].

Integrasi antara PV dan baterai dalam suatu sistem mikrogrid menjadi salah satu pendekatan yang efektif dalam meningkatkan kualitas sistem tenaga listrik. Mikrogrid merupakan sistem kelistrikan skala kecil yang mampu mengintegrasikan berbagai sumber energi terdistribusi seperti PV, baterai, genset, dan jaringan utilitas (PLN), baik dalam kondisi *grid-connected* maupun *islanded mode*. Sistem ini memungkinkan pengelolaan energi secara lokal sehingga mampu meningkatkan efisiensi energi, mengurangi rugi-rugi distribusi, serta meningkatkan keandalan suplai daya pada beban prioritas [10], [11].

Dalam operasinya, sistem mikrogrid membutuhkan strategi *Energy Management System* (EMS) yang mampu mengatur aliran daya secara optimal antara PV, baterai, dan sumber cadangan seperti PLN atau genset. EMS berperan dalam menentukan prioritas penggunaan sumber energi, menjaga nilai *State of Charge* (SOC) baterai, serta mengatur perpindahan sumber daya secara otomatis agar kontinuitas suplai daya tetap terjaga. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa EMS menjadi elemen utama dalam meningkatkan efisiensi, resiliensi, dan keberlanjutan operasi mikrogrid [12].

Berbagai penelitian sebelumnya telah membahas strategi manajemen energi pada sistem mikrogrid berbasis PV dan baterai. Azeroual dkk. menunjukkan bahwa sistem kontrol berbasis *multi-agent system* mampu meningkatkan performa pengaturan energi dibandingkan kontrol terpusat konvensional. Penelitian lain menjelaskan bahwa metode kontrol cerdas seperti *fuzzy logic*, *model predictive control*, dan optimasi berbasis kecerdasan buatan mampu meningkatkan efisiensi pengaturan daya, mempercepat respons sistem, serta mengurangi ketergantungan terhadap jaringan utama [13], [14]. Selain itu, penelitian tentang degradasi baterai juga menunjukkan bahwa strategi pengoperasian yang tepat sangat penting untuk menjaga umur baterai dan menekan biaya operasional sistem [15], [16]. Meskipun metode kontrol cerdas memberikan hasil yang baik, implementasinya pada skala kecil hingga menengah sering terkendala oleh biaya investasi yang tinggi dan kompleksitas sistem. Oleh karena itu, dibutuhkan solusi kontrol yang lebih sederhana, ekonomis, dan mudah diterapkan. Salah satu perangkat yang dapat digunakan adalah Zelio Logic, yaitu *smart relay* berbasis logika kontrol yang mampu melakukan otomatisasi switching sumber daya dengan biaya lebih rendah dibandingkan PLC industri konvensional. Perangkat ini cocok digunakan untuk mengatur prioritas suplai daya antara PV, baterai, dan PLN/genset berdasarkan kondisi daya dan nilai SOC baterai secara real-time [17], [18].

Berdasarkan penelitian sebelumnya, maka pada penelitian ini dirancang strategi manajemen energi pada sistem mikrogrid menggunakan PV berkapasitas 5 kWp, baterai 3000 Ah, dan beban tetap sebesar 2000 W dengan kendali menggunakan Zelio Logic SR3B262BD. Sistem dirancang dengan prioritas sumber daya, yaitu PV sebagai sumber utama, baterai sebagai cadangan kedua, dan PLN sebagai sumber terakhir ketika daya dari PV dan baterai tidak mencukupi. Simulasi dilakukan menggunakan MATLAB untuk menganalisis performa sistem pada berbagai kondisi operasi seperti intensitas PV tinggi, intensitas PV rendah, beban puncak, kondisi baterai penuh, kondisi baterai minimum, serta perpindahan otomatis ke PLN.

2. Tinjauan Literatur

Tujuan utama manajemen energi mikrogrid adalah mengoptimalkan penggunaan sumber energi yang tersedia, menjaga kontinuitas suplai daya, mengurangi ketergantungan terhadap jaringan utama PLN, serta meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem. Dalam sistem berbasis energi terbarukan dengan PV, maka manajemen energi menjadi sangat penting karena sumber energi tersebut bersifat intermiten atau berubah-ubah tergantung kondisi cuaca dan intensitas sinar matahari.

2.1. Photovoltaik (PV)

Photovoltaik (PV) atau panel surya merupakan teknologi yang digunakan untuk mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik secara langsung melalui efek fotovoltaiik. Efek ini terjadi ketika foton dari sinar matahari mengenai permukaan semikonduktor, seperti silikon, sehingga menghasilkan aliran elektron yang membentuk arus listrik searah (DC). Sistem PV terdiri dari beberapa sel surya (*solar cell*) yang dirangkai secara seri maupun paralel untuk menghasilkan tegangan dan arus sesuai kebutuhan. Kumpulan beberapa sel disebut modul surya, sedangkan beberapa modul yang dirangkai membentuk PV array. Prinsip kerja PV dimulai saat iradiasi matahari mengenai permukaan sel surya. Energi foton akan melepaskan elektron dari atom semikonduktor sehingga menghasilkan beda potensial listrik. Listrik yang dihasilkan berupa arus searah (DC), sehingga untuk digunakan pada beban rumah tangga atau industri yang umumnya menggunakan arus bolak-balik (AC), diperlukan inverter sebagai pengubah dari DC ke AC. Kinerja PV dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain intensitas iradiasi matahari, suhu lingkungan, sudut pemasangan panel, kondisi cuaca, serta kebersihan permukaan panel. Semakin tinggi intensitas cahaya matahari, maka daya listrik yang dihasilkan juga semakin besar. Daya keluaran PV dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

$$P_{PV} = I \times V \quad (1)$$

Dimana

P_{PV} = Daya keluaran PV (W)

I = Arus keluaran PV (A)

V = Tegangan keluaran PV (V)

Sedangkan energi harian dan daya maksimum PV dengan persamaan sebagai berikut:

$$E_{PV} = P_{PV} \times t \quad (2)$$

$$P_{max} = I_{mp} \times V_{mp} \quad (3)$$

Dimana

E_{PV} = Energi harian PV (Wh)

P_{PV} = Daya PV (W)

t = Lama penyinaran efektif (jam)

P_{max} = Daya maksimum PV (W)

I_{mp} = Arus pada titik daya maksimum (A)

V_{mp} = Tegangan pada titik daya maksimum (V)

2.2 Baterai

Baterai merupakan perangkat penyimpanan energi listrik dalam bentuk energi kimia yang dapat digunakan kembali saat dibutuhkan. Dalam sistem mikrogrid, baterai berfungsi sebagai *energy storage system* untuk menyimpan kelebihan energi dari PV dan menyuplai energi saat produksi PV menurun, pada malam hari atau saat cuaca mendung. Prinsip kerja baterai terjadi melalui proses reaksi elektrokimia antara elektroda positif (katoda), elektroda negatif (anoda), dan elektrolit. Saat proses pengisian (*charging*), energi listrik dari PV disimpan menjadi energi kimia. Sebaliknya, saat proses pengosongan (*discharging*), energi kimia diubah kembali menjadi energi listrik. Kapasitas baterai biasanya dinyatakan dalam satuan Ampere-hour (Ah), yang menunjukkan jumlah arus yang dapat disuplai dalam waktu tertentu. Pada penelitian ini digunakan baterai dengan kapasitas 3000 Ah. Salah satu parameter penting dalam baterai adalah *State of Charge* (SOC), yaitu persentase kapasitas energi yang masih tersimpan di dalam baterai. SOC digunakan sebagai indikator untuk menentukan kapan baterai harus diisi atau digunakan. Selain itu, perlu diperhatikan batas minimum dan maksimum baterai untuk menghindari kondisi *overcharge* (pengisian berlebih) dan *overdischarge* (pengosongan berlebih), karena kondisi tersebut dapat memperpendek umur baterai dan menurunkan performa sistem. Dalam penelitian ini, baterai berperan sebagai sumber energi cadangan kedua setelah PV. Ketika daya PV tidak mencukupi, baterai akan menyuplai beban secara otomatis melalui kendali Zelio Logic, sehingga kontinuitas suplai daya pada sistem mikrogrid tetap terjaga. Energi yang tersimpan pada baterai dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut

$$E_b = V_b \times K_b \tag{4}$$

Dimana

- E_b = Energi baterai (Wh)
- V_b = Tegangan baterai (V)
- K_b = Kapasitas baterai (Ah)

Sedangkan SOC pada baterai ditentukan dengan persamaan sebagai berikut

$$SOC = \frac{Q_{akhir}}{Q_{total}} \times 100 \% \tag{5}$$

Dimana

- SOC = State of charge 100 (%)
- Q_{akhir} = Kapasitas tersisa
- Q_{total} = Kapasitas total

2.3 Manajemen Energi Mikrogrid

Sistem manajemen energi (Energy Management System/EMS) telah menjadi komponen fundamental dalam mikrogrid modern seiring dengan meningkatnya penetrasi sumber energi terbarukan dan ketidakpastian operasional yang menyertainya. Studi terbaru menekankan bahwa EMS berperan dalam mengoordinasikan distributed energy resources (DER), sistem penyimpanan energi (energy storage systems/ESS), serta beban untuk menjamin operasi yang optimal, andal, dan berkelanjutan. Variabilitas sumber energi terbarukan seperti photovoltaic (PV) dan angin menuntut strategi kontrol yang mampu menangani sifat stokastik serta dinamika perubahan beban. Operasi dasar EMS dikendalikan oleh kendala keseimbangan daya yang memastikan stabilitas sistem dan kontinuitas suplai energi:

$$P_{gen}(t) + P_{storage}(t) = P_{beban}(t) + P_{rugi}(t) \tag{6}$$

Persamaan tersebut menyatakan bahwa total daya yang dihasilkan dan disimpan harus mampu memenuhi kebutuhan beban serta rugi-rugi sistem secara real-time. Pemeliharaan keseimbangan ini menjadi krusial, terutama pada sistem dengan penetrasi energi terbarukan yang tinggi dan bersifat intermiten. Sistem penyimpanan energi, khususnya baterai, memiliki peran penting dalam EMS untuk meredam fluktuasi daya dan memungkinkan pergeseran

energi (energy shifting). Perilaku dinamis baterai umumnya dimodelkan menggunakan State of Charge (SOC), yang dinyatakan sebagai berikut

$$SOC(t) = SOC(t - 1) + \frac{\eta_{ch}P_{ch} - \frac{P_{dch}}{\eta_{dch}}}{E_b} \Delta t \tag{7}$$

Pengelolaan SOC yang akurat sangat penting untuk menjaga keandalan sistem serta memperpanjang umur baterai, sebagaimana ditunjukkan dalam berbagai pendekatan EMS berbasis optimasi terkini. Pada konfigurasi mikrogrid yang lebih maju, sistem penyimpanan energi hibrida yang mengombinasikan baterai dan superkapasitor semakin banyak digunakan. Arsitektur ini memanfaatkan keunggulan baterai dalam hal densitas energi dan superkapasitor dalam hal densitas daya serta respons cepat. Konfigurasi hibrida ini memungkinkan penerapan strategi manajemen energi secara hierarkis, di mana komponen frekuensi rendah ditangani oleh baterai, sedangkan fluktuasi frekuensi tinggi dikompensasi oleh superkapasitor, sehingga meningkatkan efisiensi sistem dan mengurangi beban kerja komponen. Dari perspektif optimasi, penelitian EMS terkini banyak difokuskan pada formulasi multi-objektif yang mempertimbangkan biaya operasional, emisi, serta degradasi sistem. Fungsi objektif umum dapat dinyatakan sebagai:

$$\min J = \sum_{t=1}^T (C_{gen}P_{gen}(t) + C_{deg}P_b(t)) \tag{8}$$

Pendekatan ini memungkinkan penentuan strategi operasi yang optimal dengan mempertimbangkan aspek ekonomi dan teknis secara simultan. Penelitian terbaru juga menunjukkan bahwa integrasi model ketidakpastian dan optimasi stokastik mampu meningkatkan performa sistem dalam menghadapi variabilitas energi terbarukan. Selain itu, perkembangan strategi kontrol EMS telah bergeser dari metode konvensional berbasis aturan (rule-based control) menuju metode yang lebih cerdas dan prediktif. Literatur terbaru menunjukkan peningkatan penggunaan teknik berbasis kecerdasan buatan seperti fuzzy-neural systems, multi-agent systems, serta reinforcement learning untuk meningkatkan kemampuan adaptasi dan pengambilan keputusan dalam sistem yang kompleks. Di sisi lain, Model Predictive Control (MPC) dan pendekatan optimasi berbasis data juga banyak digunakan karena kemampuannya dalam menangani kendala sistem serta memprediksi kondisi masa depan secara efektif. Strategi pembagian daya (power sharing) dalam mikrogrid hibrida juga menjadi aspek penting dalam koordinasi berbagai sumber energi. Beban sistem umumnya dipenuhi melalui kombinasi sumber energi terbarukan dan sistem penyimpanan, yang dapat dinyatakan sebagai berikut

$$P_{beban} = P_{PV} + P_b + P_{grid} \tag{9}$$

Pendekatan terkini mengintegrasikan teknik dekomposisi frekuensi dan kontrol hierarkis untuk mendistribusikan daya berdasarkan karakteristik dinamisnya. Dengan demikian, efisiensi sistem dapat ditingkatkan sekaligus mengurangi stres operasional pada perangkat penyimpanan energi. Secara keseluruhan, perkembangan sistem manajemen energi menunjukkan pergeseran menuju integrasi optimasi, kecerdasan buatan, dan pemodelan ketidakpastian untuk menjawab tantangan integrasi energi terbarukan. Transformasi ini mencerminkan meningkatnya kompleksitas sistem energi modern serta kebutuhan akan solusi yang adaptif, optimal, dan skalabel.

3. Metode

Metode yang diusulkan pada penelitian ini adalah strategi manajemen energi pada sistem mikrogrid berbasis *Photovoltaic* (PV) dan baterai dengan kendali menggunakan Zelio Logic. Sistem dirancang untuk mengatur aliran daya secara otomatis antara PV, baterai, dan sumber cadangan PLN/genset agar suplai daya ke beban tetap stabil, efisien, dan aman. Prioritas sumber energi yang digunakan adalah PV sebagai sumber utama, baterai sebagai cadangan kedua, dan PLN/genset sebagai sumber terakhir ketika daya dari PV dan baterai tidak mencukupi.

3.1. Parameter Sistem Mikrogrid

Langkah pertama adalah menentukan spesifikasi utama sistem mikrogrid yang digunakan dalam penelitian. Sistem terdiri dari PV berkapasitas 5 kWp, baterai 3000 Ah dengan tegangan sistem 48 V, serta beban tetap sebesar 2000 W. Kapasitas energi dihitung menggunakan persamaan 4. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa kapasitas energi total baterai adalah 144 kWh. Sedangkan daya keluaran PV dipengaruhi oleh intensitas radiasi matahari dan efisiensi sistem panel surya. Secara umum, daya PV dapat dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut

$$P_{PV} = G \times A \times \eta \tag{10}$$

Dimana

- SOC = Daya keluaran PV (W)
- G = Intensitas iradiasi matahari (W/m²)
- A = Luas permukaan panel (m²)
- η = Efisiensi PV

Dalam penelitian ini, profil daya PV disimulasikan berdasarkan kondisi harian normal, intensitas tinggi, dan intensitas rendah.

Nilai *State of Charge* (SOC) digunakan untuk mengetahui kapasitas energi yang masih tersimpan dalam baterai. SOC menjadi parameter utama dalam pengambilan keputusan sistem kendali. Untuk persamaan SOC dinyatakan dengan persamaan 5. Batas operasi baterai ditetapkan sebagai berikut:

- SOC maksimum = 95%
- SOC minimum = 20%

Batas ini digunakan untuk mencegah kondisi *overcharge* dan *overdischarge*.

Untuk menentukan kondisi operasi sistem, dilakukan perhitungan selisih antara daya PV dan daya beban menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\Delta P = P_{PV} - P_{beban} \tag{11}$$

Dimana

- ΔP = Selisih keluaran (W)
- P_{PV} = Daya PV (W)
- P_{beban} = Daya beban (W)

Dalam strategi ini interpretasi kondisi daya menjadi dasar logika switching sumber daya, berdasarkan kondisi sebagai berikut

- Jika $\Delta P > 0$ (terjadi surplus daya)
- Jika $\Delta P < 0$ (terjadi defisit daya)

3.2. Strategi Pengaturan Baterai

Jika daya PV lebih besar dari beban ($\Delta P > 0$), maka kelebihan daya digunakan untuk mengisi baterai. Persamaan pengisian energi sebagai berikut

$$P_{ch} = P_{PV} - P_{beban} \tag{12}$$

Jika SOC masih di bawah batas maksimum ($SOC < 95\%$), maka proses *charging* dilakukan. Jika SOC telah mencapai batas maksimum, maka pengisian dihentikan secara otomatis untuk melindungi baterai.

Jika daya PV lebih kecil dari beban ($\Delta P < 0$), maka baterai digunakan untuk membantu menyuplai beban. Persamaan daya pelepasan energi baterai dinyatakan sebagai berikut:

$$P_{dch} = P_{beban} - P_{PV} \tag{13}$$

Jika SOC masih di atas batas minimum ($SOC > 20\%$), maka baterai akan melakukan *discharging*. Jika SOC telah mencapai batas minimum, maka baterai tidak diperbolehkan lagi menyuplai daya.

3.3. Pengaturan Daya PLN

Ketika daya PV tidak mencukupi dan SOC baterai mencapai batas minimum, maka sistem secara otomatis mengaktifkan PLN sebagai sumber cadangan terakhir. Persamaan suplai daya PLN dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

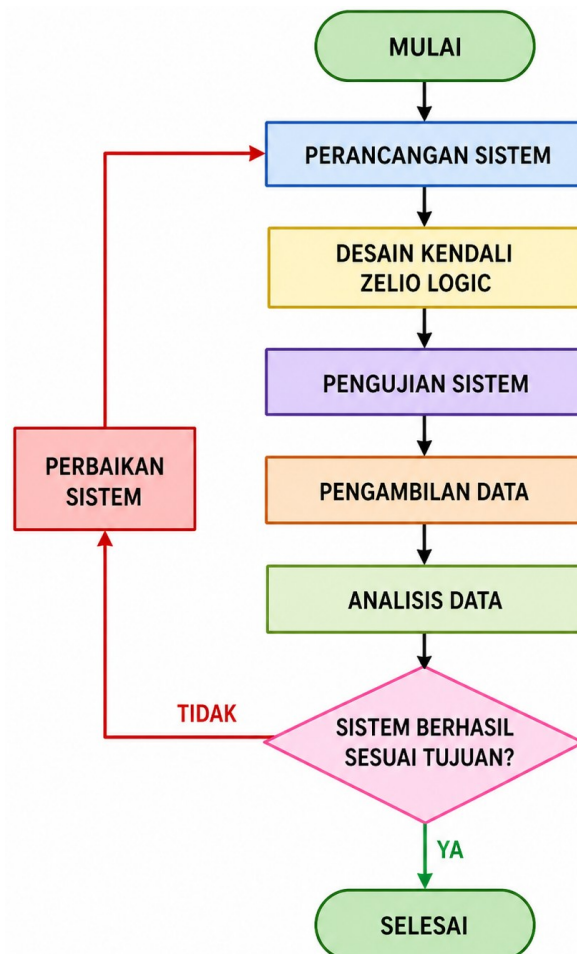
$$P_{PLN} = P_{beban} - (P_{PV} + P_b) \tag{14}$$

Proses switching ini dikendalikan oleh Zelio Logic berdasarkan logika prioritas energi. Sedangkan efisiensi sistem digunakan untuk mengevaluasi tingkat pemanfaatan energi PV terhadap beban. Persamaan efisiensi sistem sebagai berikut

$$\eta = \frac{E_{beban}}{E_{PV}} \times 100 \% \tag{15}$$

Dimana

- ΔP = Efisiensi sistem (%)
- P_{PV} = Energi beban
- P_{beban} = Energi total PV

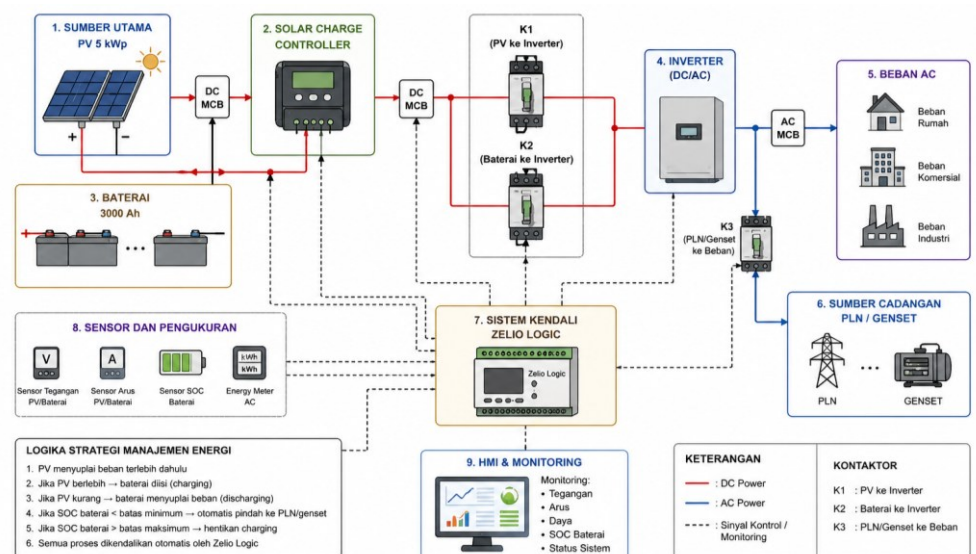


Gambar 1. Flowchart kendali zelio logic.

Flowchart pada Gambar 1 memperlihatkan tahapan sistematis dalam perancangan dan implementasi strategi manajemen energi pada sistem mikrogrid berbasis Photovoltaic (PV) dan baterai dengan kendali menggunakan Zelio Logic. Proses dimulai dengan identifikasi permasalahan terkait kebutuhan sistem kelistrikan yang efisien, stabil, dan mampu memanfaatkan energi terbarukan secara optimal. Tahap berikutnya adalah perancangan sistem, proses menentukan spesifikasi utama sistem mikrogrid yang akan digunakan. Pada tahap ini ditentukan kapasitas PV sebesar 5 kWp sebagai sumber energi utama, baterai 3000 Ah sebagai penyimpanan energi, beban tetap sebesar 2000 W, serta PLN atau genset sebagai sumber cadangan. Selanjutnya tahap desain kendali Zelio Logic, desain logika kontrol otomatis untuk mengatur perpindahan sumber daya berdasarkan kondisi daya PV dan nilai *State of Charge* (SOC) baterai. Pada tahap ini ditentukan prioritas sumber energi, yaitu PV sebagai sumber utama, baterai sebagai cadangan kedua, dan PLN sebagai sumber terakhir. Logika kontrol juga mencakup perlindungan baterai terhadap kondisi *overcharge* dan *overdischarge*. Dalam tahap pengujian sistem, dilakukan simulasi dan pengujian performa sistem berdasarkan beberapa kondisi operasi. Kondisi intensitas PV tinggi, intensitas PV rendah, beban puncak, kondisi baterai penuh, kondisi baterai minimum, serta perpindahan otomatis ke PLN. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui respons sistem terhadap perubahan kondisi sumber daya dan beban. Setelah pengujian dilakukan tahap pengambilan data hasil simulasi berupa data daya PV, daya baterai, daya PLN, perubahan nilai SOC baterai, serta status perpindahan sumber daya. Data ini menjadi dasar dalam proses evaluasi performa sistem. Tahap berikutnya adalah Analisis Data, yaitu melakukan pengolahan dan evaluasi terhadap data hasil pengujian untuk mengetahui tingkat efisiensi sistem, kestabilan suplai daya, kecepatan respon *switching*, serta perlindungan baterai. Analisis ini digunakan untuk menilai apakah sistem yang dirancang telah bekerja sesuai tujuan penelitian. Selanjutnya dilakukan tahap keputusan pada bagian sistem berhasil sesuai tujuan atau tidak. Pada tahap ini dilakukan evaluasi apakah sistem mikrogrid yang dirancang telah memenuhi kriteria keberhasilan, yaitu efisiensi energi yang tinggi, kontinuitas suplai daya yang stabil, dan perlindungan baterai yang optimal. Jika hasil evaluasi menunjukkan Tidak, maka sistem akan masuk ke tahap perbaikan sistem. Pada tahap ini dilakukan perbaikan terhadap desain sistem, algoritma kontrol, atau parameter operasi agar performa sistem menjadi lebih baik. Setelah perbaikan dilakukan, proses akan kembali ke tahap perancangan dan pengujian hingga sistem mencapai hasil yang diharapkan. Jika hasil evaluasi menunjukkan Ya, maka penelitian dinyatakan berhasil dan proses berlanjut ke tahap Selesai, yang menyatakan bahwa sistem telah mampu bekerja sesuai tujuan penelitian dan siap untuk dijadikan hasil akhir penelitian.

4. Hasil dan Pembahasan

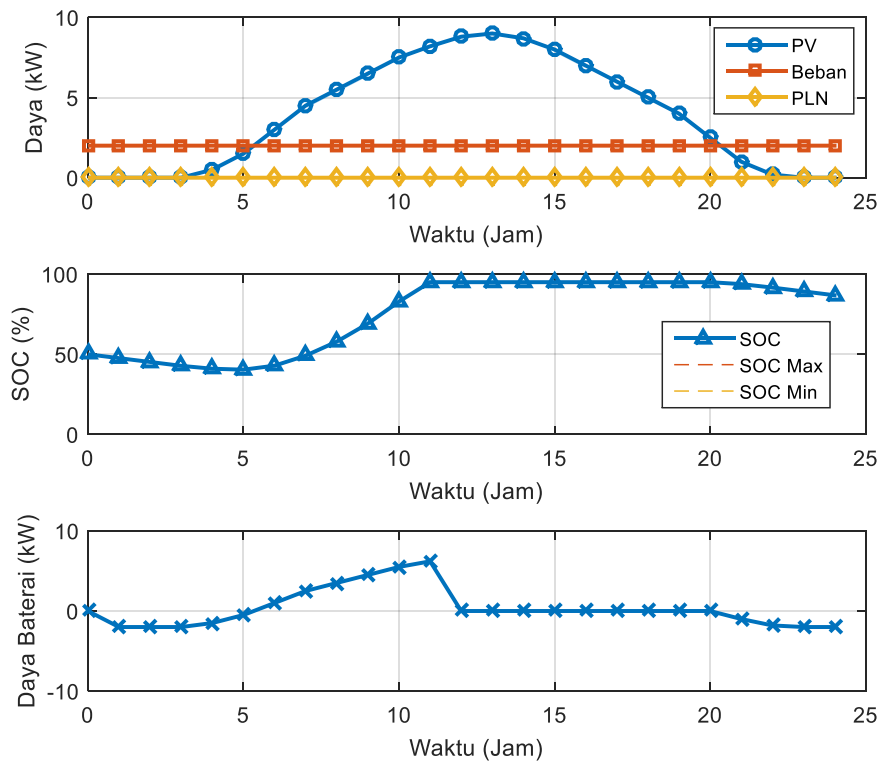
Gambar 2 memperlihatkan sistem mikrogrid yang diusulkan, rancangan strategi manajemen energi antara PV dan baterai dengan kendali Zelio Logic.



Gambar 2. Sistem mikrogrid.

Strategi ini untuk menjaga kontinuitas suplai daya pada beban. Sistem ini dirancang agar penggunaan energi terbarukan dari panel surya dapat dimaksimalkan, sedangkan baterai dan sumber PLN digunakan sebagai penunjang ketika daya utama tidak mencukupi. Sumber utama energi berasal dari sistem Photovoltaic (PV) berkapasitas 5 kWp yang berfungsi menghasilkan energi listrik arus searah (DC) dari energi matahari. Energi yang dihasilkan PV pada saat awal melewati proteksi MCB DC sebelum masuk ke *solar charge controller*. Komponen ini berfungsi mengatur proses pengisian baterai serta menjaga kestabilan tegangan dan arus agar baterai terlindungi dari kondisi *overcharge* maupun *overdischarge*. Baterai dengan kapasitas 3000 Ah digunakan sebagai media penyimpanan energi (*energy storage system*). Ketika daya dari PV melebihi kebutuhan beban, energi surplus akan digunakan untuk mengisi baterai (*charging*). Sebaliknya, ketika daya PV menurun, pada malam hari atau saat cuaca mendung maka baterai akan menyuplai energi ke sistem (*discharging*) agar beban tetap memperoleh suplai listrik secara kontinu. Proses pemilihan sumber daya dikendalikan melalui kontaktor K1 dan K2. Kontaktor K1 berfungsi menghubungkan sumber PV ke inverter, sedangkan kontaktor K2 menghubungkan baterai ke inverter. Inverter berfungsi mengubah arus searah (DC) dari PV maupun baterai menjadi arus bolak-balik (AC) yang dapat digunakan oleh beban rumah tangga, komersial, maupun industri.

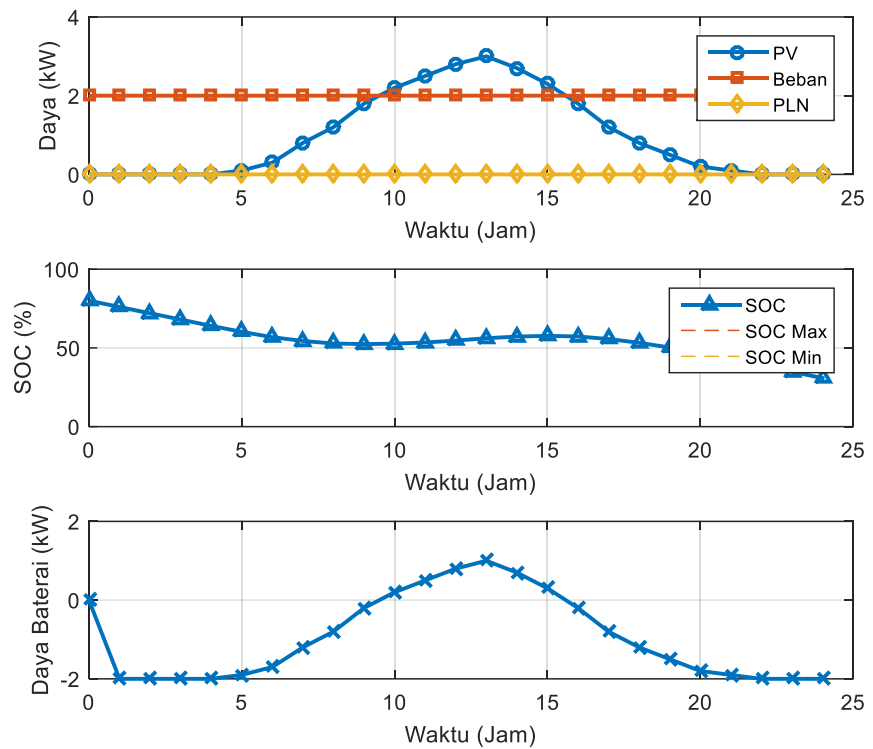
Selain itu, sistem juga dilengkapi dengan sumber cadangan dari PLN yang dihubungkan melalui kontaktor K3. Sumber cadangan ini akan aktif secara otomatis apabila daya dari PV dan baterai tidak mampu memenuhi kebutuhan beban, khususnya saat kondisi *State of Charge* (SOC) baterai berada di bawah batas minimum yang telah ditentukan. Sebagai pusat pengendali utama, Zelio Logic menerima input dari berbagai sensor seperti sensor tegangan, sensor arus, sensor SOC baterai, dan energy meter AC. Data dari sensor digunakan untuk menentukan keputusan kontrol secara otomatis, seperti proses *charging*, *discharging*, perpindahan sumber daya (*switching*), serta proteksi sistem. Strategi manajemen energi yang diterapkan pada sistem ini adalah memprioritaskan PV sebagai sumber utama untuk menyuplai beban. Jika daya PV berlebih, maka baterai akan diisi. Jika daya PV berkurang, baterai akan mengambil alih suplai beban. Apabila kapasitas baterai turun di bawah batas aman, maka sistem akan secara otomatis berpindah ke PLN. Ketika baterai telah mencapai batas maksimum pengisian, proses *charging* akan dihentikan untuk menjaga umur baterai.



Gambar 3. Pengujian sistem intensitas iradiasi tinggi.

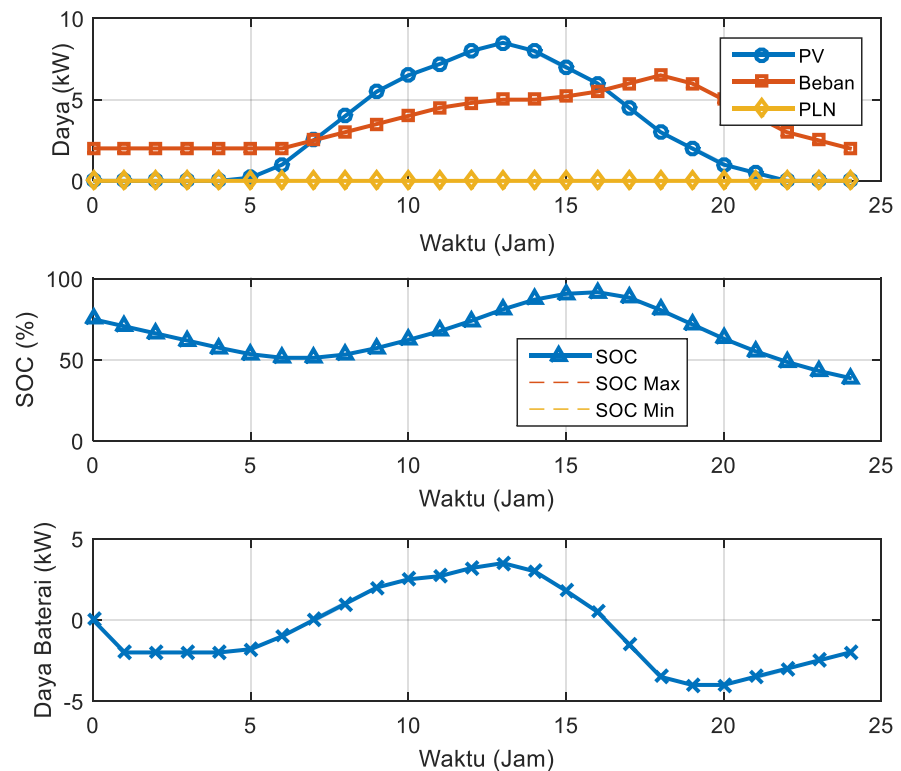
Hasil pengujian intensitas radiasi tinggi pada sistem mikrogrid terlihat pada Gambar 3, menunjukkan bahwa ketika intensitas iradiasi matahari meningkat, daya yang dihasilkan oleh PV menjadi jauh lebih besar dibandingkan kebutuhan beban tetap sebesar 2000 W. Pada studi ini digunakan sistem dengan kapasitas PV 5 kWp, baterai 3000 Ah, serta sumber cadangan PLN yang dikendalikan secara otomatis menggunakan Zelio Logic. Pada grafik pertama terlihat bahwa daya PV mulai meningkat sejak pagi hari, mencapai puncak pada siang hari, kemudian menurun kembali pada sore hingga malam hari. Pada kondisi intensitas tinggi, daya PV berada di atas beban hampir sepanjang siang hari. Hal ini menyebabkan energi dari PV tidak hanya mampu menyuplai beban secara penuh, tetapi juga menghasilkan daya surplus yang dapat digunakan untuk mengisi baterai. Karena suplai dari PV sangat dominan, penggunaan PLN menjadi sangat kecil bahkan hampir tidak digunakan sama sekali. Grafik kedua menunjukkan perubahan *State of Charge* (SOC) baterai. Nilai awal SOC ditetapkan sebesar 50%, kemudian meningkat secara signifikan selama periode siang hari karena baterai mengalami proses charging akibat adanya kelebihan daya dari PV. SOC terus naik hingga mendekati batas maksimum sebesar 95%. Hal ini menunjukkan bahwa pada kondisi intensitas PV tinggi, sistem mampu memaksimalkan penyimpanan energi pada baterai sehingga cadangan energi untuk malam hari menjadi lebih besar. Pada grafik ketiga terlihat daya baterai dalam kondisi positif selama siang hari, yang menandakan proses *charging*. Nilai positif ini menunjukkan bahwa baterai menerima energi dari PV. Saat malam hari atau ketika daya PV menurun, nilai daya baterai mulai menurun dan dapat menjadi negatif jika baterai mulai menyuplai beban melalui proses *discharging*. Namun pada kondisi PV tinggi, durasi *discharging* menjadi lebih kecil karena baterai sudah terisi cukup penuh. Algoritma bekerja berdasarkan logika prioritas energi. Ketika daya PV lebih besar dari beban, sistem secara otomatis mengarahkan surplus daya untuk mengisi baterai. Jika baterai telah mencapai batas maksimum SOC, maka proses pengisian dihentikan untuk mencegah *overcharge*. Sebaliknya, jika daya PV lebih kecil dari beban, baterai digunakan sebagai sumber cadangan selama SOC masih berada di atas batas minimum. Jika SOC turun hingga batas minimum, maka sistem akan mengaktifkan PLN sebagai sumber suplai terakhir. Dari hasil pengujian ini dapat disimpulkan bahwa pada kondisi intensitas PV tinggi, performa sistem mikrogrid menjadi lebih optimal. Pemanfaatan energi surya meningkat, baterai terisi lebih cepat, penggunaan PLN berkurang secara signifikan, dan efisiensi sistem menjadi lebih baik. Kondisi ini menunjukkan bahwa strategi manajemen energi berbasis Zelio Logic mampu bekerja dengan baik dalam memaksimalkan penggunaan energi terbarukan dan menjaga kontinuitas suplai daya secara otomatis.

Hasil pengujian intensitas iradiasi rendah pada sistem mikrogrid terlihat pada Gambar 4, menunjukkan kondisi ketika energi yang dihasilkan PV tidak mampu memenuhi kebutuhan beban secara optimal akibat rendahnya intensitas iradiasi matahari, saat cuaca mendung atau hujan. Pada grafik pertama terlihat bahwa daya PV hanya meningkat sedikit pada siang hari dan sebagian besar nilainya berada di bawah kebutuhan beban sebesar 2 kW. Hal ini menyebabkan energi dari PV tidak cukup untuk menyuplai beban secara penuh. Pada beberapa jam tertentu, terutama pagi, sore, dan malam hari, sistem mengalami defisit daya sehingga baterai harus mengambil alih sebagai sumber energi cadangan. Ketika kapasitas baterai sudah tidak mencukupi, maka PLN akan aktif secara otomatis untuk menjaga kontinuitas suplai daya ke beban. Grafik kedua menunjukkan perubahan *State of Charge* (SOC) baterai selama proses simulasi. Nilai awal SOC ditetapkan sebesar 80% agar baterai memiliki cadangan energi yang cukup saat kondisi PV rendah. Karena daya PV sebagian besar lebih kecil dari beban, baterai lebih sering mengalami proses *discharging* dibandingkan *charging*. Hal ini menyebabkan nilai SOC menurun secara bertahap sepanjang waktu. Ketika SOC mendekati batas minimum sebesar 20%, sistem akan menghentikan penggunaan baterai untuk menghindari kondisi *overdischarge* yang dapat merusak umur baterai. Pada grafik ketiga terlihat bahwa daya baterai lebih banyak bernilai negatif, yang menunjukkan bahwa baterai sedang menyuplai energi ke beban (*discharging*). Nilai negatif ini mendominasi hampir sepanjang hari karena daya PV tidak cukup besar untuk menghasilkan surplus energi. Hanya pada beberapa saat tertentu di siang hari, jika daya PV sedikit melebihi beban, baterai dapat mengalami *charging*, tetapi jumlahnya relatif kecil dibandingkan proses *discharging*. Ketika daya PV lebih kecil dari beban, sistem akan terlebih dahulu menggunakan baterai selama SOC masih berada di atas batas minimum. Jika SOC masih aman, baterai akan terus membantu menyuplai beban. Namun ketika SOC turun hingga batas minimum, sistem secara otomatis mengaktifkan PLN sebagai sumber cadangan terakhir.



Gambar 4. Pengujian sistem intensitas iradiasi rendah.

Strategi ini bertujuan untuk menjaga kontinuitas suplai daya sekaligus melindungi baterai dari kerusakan akibat pengosongan berlebihan. Dari hasil ini memperlihatkan bahwa pada kondisi intensitas PV rendah, peran baterai menjadi sangat penting sebagai penyangga energi untuk menjaga kestabilan sistem mikrogrid. Penggunaan PLN menjadi lebih sering dibandingkan kondisi intensitas PV tinggi karena sumber energi utama tidak cukup kuat untuk memenuhi kebutuhan beban.

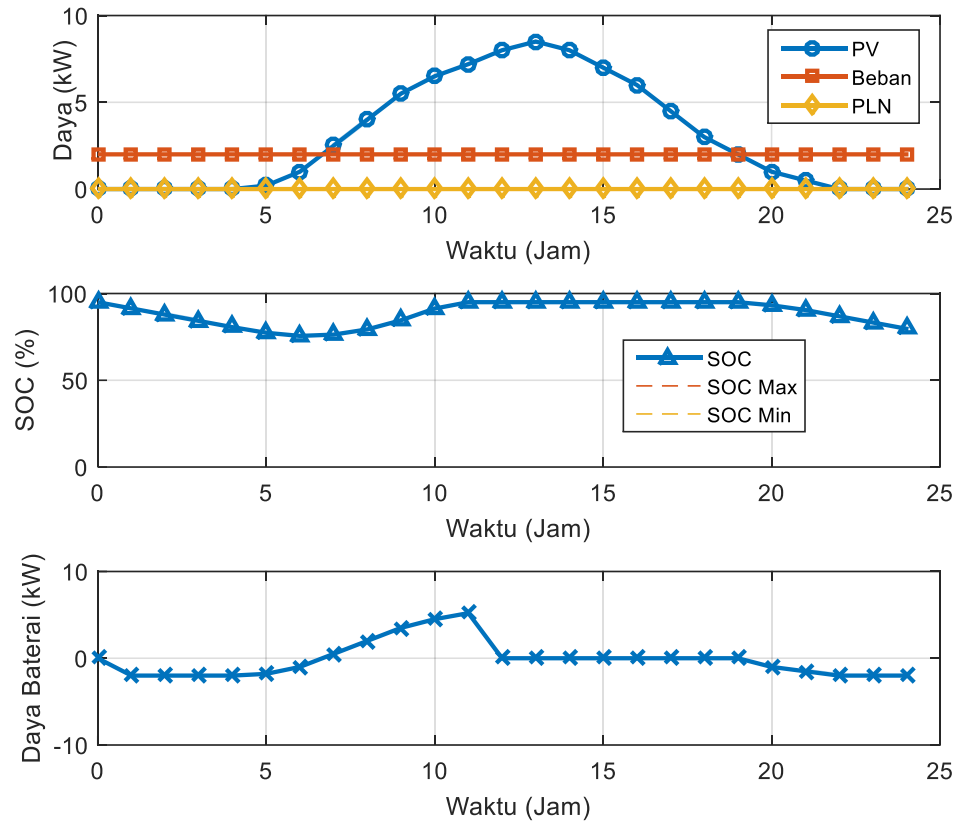


Gambar 5. Pengujian kondisi beban puncak.

Hasil pengujian kondisi beban puncak terlihat pada Gambar 5 pada sistem mikrogrid, menunjukkan respon sistem ketika kebutuhan daya listrik meningkat secara signifikan melebihi kondisi normal. Pada grafik pertama terlihat perbandingan antara daya PV, beban, dan daya dari PLN. Pada pagi hingga siang hari, daya PV meningkat dan masih mampu membantu menyuplai sebagian besar kebutuhan beban. Namun ketika memasuki sore hingga malam hari, beban meningkat tajam hingga mencapai nilai puncak sekitar 6 hingga 6,5 kW, sedangkan daya PV justru menurun karena intensitas iradiasi matahari berkurang. Kondisi ini menyebabkan terjadinya defisit daya yang cukup besar sehingga sistem harus memanfaatkan baterai sebagai sumber energi cadangan utama. Jika daya dari baterai tidak lagi mencukupi, maka PLN akan aktif untuk menutupi kekurangan daya. Grafik kedua menunjukkan perubahan *State of Charge* (SOC) baterai selama simulasi. Nilai awal SOC ditetapkan sebesar 75% agar baterai memiliki cadangan energi yang cukup untuk menghadapi lonjakan beban. Pada siang hari, ketika daya PV relatif tinggi dan beban belum terlalu besar, baterai masih dapat mengalami proses *charging* sehingga SOC sedikit meningkat. Namun saat beban puncak mulai terjadi, baterai mengalami proses *discharging* secara intensif karena harus membantu menyuplai kekurangan daya dari PV. Akibatnya, nilai SOC menurun lebih cepat hingga mendekati batas minimum sebesar 20%. Grafik ketiga menunjukkan daya baterai selama proses operasi sistem. Nilai positif menandakan baterai sedang melakukan *charging*, sedangkan nilai negatif menunjukkan baterai sedang menyuplai daya ke beban (*discharging*). Pada kondisi beban puncak, nilai negatif lebih dominan terutama pada sore dan malam hari, yang menunjukkan bahwa baterai bekerja lebih berat dibandingkan kondisi normal. Hal ini membuktikan bahwa beban puncak sangat memengaruhi penggunaan energi cadangan dan mempercepat penurunan kapasitas baterai. Ketika daya PV lebih besar dari beban, sistem akan menggunakan surplus daya untuk mengisi baterai. Namun ketika beban meningkat dan daya PV tidak mencukupi, baterai akan segera digunakan untuk menutupi kekurangan daya selama SOC masih berada di atas batas minimum. Jika SOC mencapai batas minimum, sistem secara otomatis mengaktifkan PLN sebagai sumber suplai terakhir agar kontinuitas daya tetap terjaga. Dari hasil pengujian ini memperlihatkan kondisi beban puncak memberikan pengaruh besar terhadap performa sistem mikrogrid. Baterai menjadi lebih cepat habis karena harus bekerja lebih intensif, dan penggunaan PLN menjadi lebih sering dibandingkan kondisi normal. Hal ini menunjukkan pentingnya strategi manajemen energi yang tepat agar sistem tetap stabil, efisien, dan mampu menjaga suplai daya secara kontinu.

Hasil pengujian kondisi baterai penuh pada sistem mikrogrid terlihat pada Gambar 6, memperlihatkan sistem bekerja ketika baterai berada pada kapasitas maksimum sejak awal operasi. Nilai awal *State of Charge* (SOC) baterai ditetapkan sebesar 95%, yang merupakan batas maksimum pengisian baterai. Pada grafik pertama terlihat hubungan antara daya PV, beban, dan daya dari PLN. Daya PV meningkat pada pagi hingga siang hari dan menurun kembali pada sore hingga malam hari, sedangkan beban dijaga tetap konstan sebesar 2 kW. Karena baterai sudah berada pada kondisi penuh, maka ketika daya PV lebih besar dari beban, sistem tidak lagi melakukan proses *charging*. Energi dari PV hanya digunakan untuk menyuplai beban secara langsung, sedangkan kelebihan daya tidak dialirkan ke baterai untuk menghindari kondisi *overcharge*. Pada kondisi ini, penggunaan PLN sangat kecil karena baterai masih tersedia sebagai sumber cadangan utama. Grafik kedua menunjukkan perubahan nilai SOC baterai selama simulasi. Pada awal sistem, SOC berada pada 95% dan tetap stabil selama periode ketika daya PV mampu memenuhi kebutuhan beban. Hal ini terjadi karena baterai tidak menerima tambahan pengisian lagi. Ketika daya PV mulai menurun dan tidak lagi mencukupi kebutuhan beban, baterai mulai digunakan untuk membantu menyuplai daya melalui proses *discharging*. Hal ini menyebabkan nilai SOC mulai menurun secara bertahap dari batas maksimum menuju batas minimum yang telah ditentukan. Grafik ketiga menunjukkan daya baterai selama proses operasi. Pada siang hari, nilai daya baterai cenderung nol karena baterai tidak melakukan *charging* akibat kondisi penuh. Saat memasuki sore dan malam hari, nilai daya baterai berubah menjadi negatif, yang menandakan bahwa baterai mulai menyuplai energi ke beban (*discharging*). Nilai negatif ini menunjukkan bahwa baterai berfungsi sebagai cadangan energi utama ketika produksi daya dari PV menurun. Ketika daya PV lebih kecil dari beban, sistem akan menggunakan energi dari baterai selama SOC masih berada di atas batas minimum. Jika SOC turun hingga batas minimum sebesar 20%, maka sistem akan mengaktifkan PLN sebagai sumber daya terakhir agar kontinuitas suplai tetap terjaga. Dari hasil pengujian ini memperlihatkan kondisi baterai penuh memberikan keuntungan besar terhadap keandalan sistem mikrogrid karena baterai siap digunakan sebagai sumber cadangan

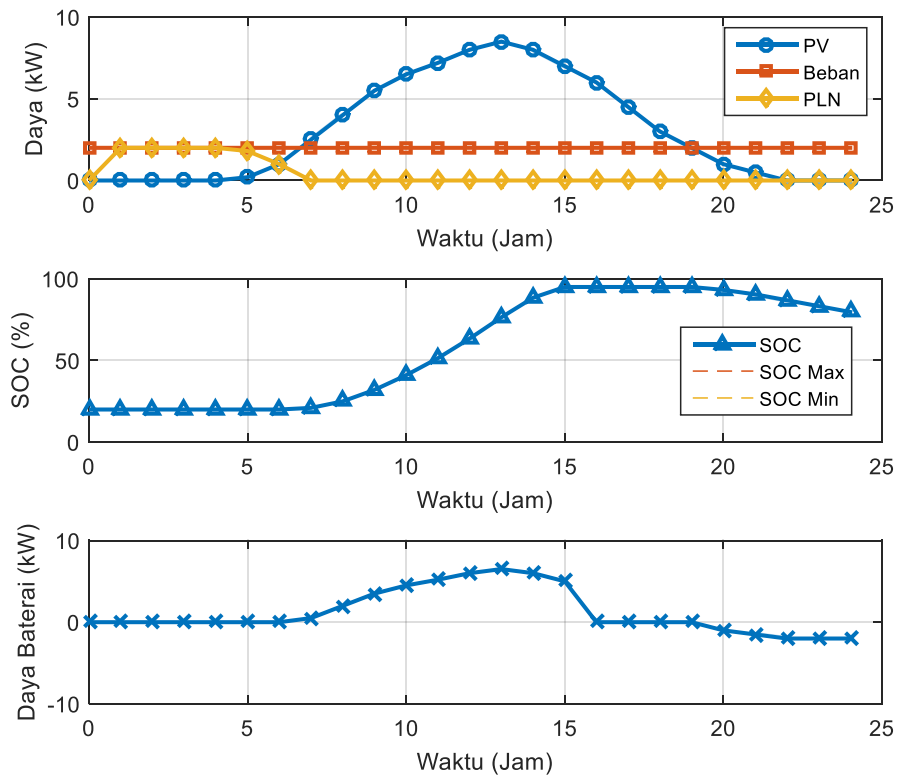
utama kapan saja dibutuhkan. Sistem menjadi lebih stabil, penggunaan PLN dapat ditekan seminimal mungkin, dan efisiensi energi meningkat karena prioritas tetap diberikan pada pemanfaatan energi dari PV dan baterai. Dengan kendali otomatis menggunakan Zelio Logic, sistem mampu mengatur pengisian dan pengosongan baterai secara aman serta menjaga performa operasi mikrogrid secara optimal.



Gambar 6. Kondisi baterai penuh.

Hasil pengujian kondisi baterai minimum pada sistem mikrogrid terlihat pada Gambar 7, memperlihatkan sistem bekerja ketika baterai berada pada batas kapasitas terendah sejak awal operasi. Nilai awal *State of Charge* (SOC) baterai ditetapkan sebesar 20%, yang merupakan batas minimum pengoperasian baterai. Pada grafik pertama terlihat hubungan antara daya PV, beban, dan daya dari PLN. Daya PV meningkat pada pagi hingga siang hari dan menurun kembali pada sore hingga malam hari, sedangkan beban tetap dijaga sebesar 2 kW. Karena baterai berada pada kondisi minimum, sistem tidak mengizinkan baterai untuk melakukan proses *discharging* agar terhindar dari kondisi *overdischarge* yang dapat merusak baterai. Oleh karena itu, ketika daya PV lebih kecil dari beban, sistem langsung mengaktifkan PLN sebagai sumber cadangan utama untuk menjaga kontinuitas suplai daya ke beban. Pada saat siang hari, ketika daya PV lebih besar dari beban, kelebihan energi dari PV digunakan untuk mengisi baterai melalui proses *charging*. Hal ini menyebabkan baterai mulai pulih dari kondisi minimum dan nilai SOC meningkat secara bertahap. Dengan demikian, sistem memberikan prioritas untuk memulihkan kapasitas baterai terlebih dahulu agar baterai kembali siap digunakan sebagai sumber cadangan pada periode berikutnya. Grafik kedua menunjukkan perubahan nilai *State of Charge* (SOC) baterai selama simulasi. Pada awal simulasi, SOC berada tepat pada batas minimum sebesar 20%. Nilai ini tetap stabil pada periode ketika daya PV belum cukup untuk mengisi baterai. Saat produksi daya PV meningkat dan melebihi kebutuhan beban, baterai mulai mengalami *charging* sehingga nilai SOC naik secara perlahan menuju kondisi yang lebih aman. Karena baterai tidak digunakan untuk *discharging* pada kondisi awal, penurunan SOC dapat dicegah dan umur baterai lebih terjaga. Grafik ketiga menunjukkan daya baterai selama proses operasi sistem. Pada awal simulasi, nilai daya baterai berada pada nol karena baterai tidak diperbolehkan melakukan *discharging*. Saat siang hari, nilai daya baterai berubah menjadi positif yang menandakan proses *charging* dari energi surplus PV. Tidak adanya nilai

negatif pada periode awal menunjukkan bahwa sistem proteksi berjalan dengan baik karena baterai tidak dipaksa untuk menyuplai daya saat SOC berada pada batas minimum. Jika SOC berada pada atau di bawah batas minimum sebesar 20%, maka proses *discharging* dihentikan sepenuhnya dan sistem langsung mengaktifkan PLN sebagai sumber suplai cadangan. Setelah PV menghasilkan daya lebih besar dari beban, baterai kembali diisi hingga mencapai kondisi aman. Strategi ini sangat penting untuk menjaga kesehatan baterai dan memperpanjang umur operasional sistem penyimpanan energi. Dari hasil pengujian ini memperlihatkan bahwa kondisi baterai minimum menyebabkan sistem lebih bergantung pada PLN pada tahap awal operasi. Namun, dengan strategi manajemen energi yang tepat, baterai dapat dipulihkan secara bertahap menggunakan energi dari PV tanpa mengalami kerusakan akibat *overdischarge*.



Gambar 7. Kondisi baterai minimum.

* Tabel dapat memiliki footer.

5. Perbandingan

Untuk mengetahui kontribusi dan kebaruan penelitian Strategi Manajemen Energi PV, baterai, PLN pada Sistem Mikrogrid dengan Kendali Zelio Logic, dilakukan perbandingan dengan beberapa penelitian dalam lima tahun terakhir pada bidang Energy Management System (EMS) mikrogrid berbasis Photovoltaic (PV) dan baterai. Perbandingan ini bertujuan untuk melihat perkembangan metode pengendalian, efisiensi sistem, serta keunggulan penelitian yang diusulkan. Penelitian oleh [19] membahas strategi manajemen energi pada sistem PV-baterai skala kecil menggunakan pendekatan optimasi berbasis prediksi beban dan produksi energi surya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem mampu meningkatkan efisiensi energi hingga sekitar 88%, namun implementasinya memerlukan algoritma kontrol yang cukup kompleks dan perangkat komputasi yang lebih tinggi. Selanjutnya, penelitian oleh [20] menggunakan metode multi-agent system untuk mengatur aliran daya pada sistem mikrogrid berbasis PV, turbin angin, dan baterai. Penelitian ini menghasilkan pengaturan daya yang lebih fleksibel dan efisiensi sistem mencapai lebih dari 90%, tetapi membutuhkan kontrol terdistribusi yang rumit serta biaya investasi yang lebih besar. Penelitian oleh [21] menerapkan Artificial Neural Network (ANN) sebagai strategi EMS untuk mengoptimalkan pengisian dan pengosongan baterai pada mikrogrid PV-baterai. Hasilnya menunjukkan peningkatan efisiensi

sistem dan pengurangan penggunaan daya dari jaringan utama, namun sistem sangat bergantung pada kualitas data pelatihan dan komputasi yang cukup tinggi. Selanjutnya [22] melakukan kajian tentang berbagai metode EMS pada sistem mikrogrid dan menyimpulkan bahwa metode berbasis fuzzy logic, model predictive control (MPC), dan kecerdasan buatan memberikan efisiensi tertinggi, bahkan dapat mencapai lebih dari 90%. Akan tetapi, penerapan metode tersebut membutuhkan integrasi sensor, perangkat lunak, dan biaya operasional yang lebih besar. Berbeda dengan penelitian-penelitian tersebut, penelitian ini menggunakan Zelio Logic sebagai pengendali utama berbasis logika sederhana dan *automatic switching*. Sistem dirancang dengan prioritas sumber daya yaitu PV sebagai sumber utama, baterai sebagai cadangan kedua, dan PLN sebagai sumber terakhir. Pendekatan ini tidak memerlukan algoritma optimasi yang kompleks maupun perangkat komputasi tinggi, sehingga lebih ekonomis dan mudah diterapkan pada sistem mikrogrid skala kecil hingga menengah. Berdasarkan hasil penelitian, sistem yang dirancang menghasilkan efisiensi rata-rata sebesar 85,7% atau sekitar $\pm 86\%$. Nilai ini memang sedikit lebih rendah dibandingkan metode berbasis kecerdasan buatan yang dapat mencapai efisiensi di atas 90%, namun tetap tergolong baik untuk sistem berbasis relay otomatis. Selain itu, penelitian ini memberikan keunggulan pada aspek perlindungan baterai melalui pengaturan batas maksimum dan minimum *State of Charge* (SOC), sehingga mampu mencegah kondisi *overcharge* dan *overdischarge* secara efektif. Keunggulan lain dari penelitian ini adalah kemampuan perpindahan otomatis ke PLN ketika daya PV tidak mencukupi dan SOC baterai mencapai batas minimum. Fitur ini meningkatkan keandalan sistem karena kontinuitas suplai daya tetap terjaga tanpa gangguan pada beban. Pada beberapa penelitian sebelumnya, fokus utama lebih banyak pada optimasi efisiensi energi, sedangkan aspek switching sumber daya secara praktis belum menjadi fokus utama. Secara keseluruhan, jika dibandingkan dengan penelitian lima tahun sebelumnya, penelitian ini menawarkan solusi yang lebih sederhana namun tetap efektif. Meskipun efisiensi sistem sedikit lebih rendah dibandingkan metode berbasis kecerdasan buatan, penggunaan Zelio Logic memberikan keunggulan pada aspek biaya, kemudahan implementasi, keandalan operasional, serta perlindungan baterai. Hal ini menjadikan penelitian ini lebih realistis untuk diterapkan pada sistem mikrogrid skala rumah tangga, fasilitas pendidikan, maupun daerah terpencil.

6. Kesimpulan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa strategi manajemen energi yang diterapkan berhasil menjalankan prioritas penggunaan sumber daya sesuai perancangan, yaitu PV sebagai sumber utama, baterai sebagai sumber cadangan kedua, dan PLN sebagai sumber terakhir. Pada kondisi intensitas PV tinggi, daya dari PV mampu menyuplai beban secara penuh sekaligus mengisi baterai sehingga nilai *State of Charge* (SOC) meningkat dan penggunaan PLN hampir tidak diperlukan. Sebaliknya, pada kondisi intensitas PV rendah dan saat terjadi beban puncak, baterai berfungsi sebagai penyangga energi melalui proses *discharging*, sedangkan PLN akan aktif secara otomatis ketika SOC mencapai batas minimum. Sistem juga mampu memberikan perlindungan terhadap baterai melalui pengaturan batas maksimum dan minimum SOC. Ketika baterai mencapai kondisi penuh, proses *charging* dihentikan secara otomatis untuk mencegah *overcharge*. Sebaliknya, ketika baterai berada pada batas minimum, proses *discharging* dihentikan dan sistem langsung beralih ke PLN untuk mencegah *overdischarge*. Hal ini sangat penting untuk menjaga umur pakai baterai dan meningkatkan keandalan sistem penyimpanan energi dalam jangka panjang. Penggunaan Zelio Logic sebagai pengendali utama terbukti efektif dalam melakukan proses switching sumber daya secara cepat, tepat, dan aman berdasarkan kondisi daya PV dan kapasitas baterai. Sistem mampu menjaga kontinuitas suplai daya tanpa gangguan terhadap beban, sehingga kestabilan operasi mikrogrid tetap terjamin. Dari hasil analisis efisiensi, sistem yang dirancang memiliki efisiensi rata-rata sebesar 85,7% atau sekitar $\pm 86\%$, yang menunjukkan bahwa pemanfaatan energi surya dapat dilakukan secara optimal dan ketergantungan terhadap jaringan listrik utama dapat dikurangi secara signifikan. Untuk pengembangan penelitian selanjutnya, sistem ini dapat ditingkatkan dengan menambahkan pemantauan berbasis IoT (*Internet of Things*) agar kondisi PV, baterai, dan beban dapat dipantau secara real-time melalui perangkat komputer atau smartphone. Selain itu, penggunaan metode kontrol yang lebih cerdas seperti *fuzzy logic*, *artificial neural network* (ANN), atau *machine learning* dapat diterapkan untuk meningkatkan akurasi pengambilan keputusan dalam manajemen energi. Pengembangan lainnya juga dapat dilakukan dengan menambahkan

sumber energi terbarukan lain seperti turbin angin (*wind turbine*) atau mikrohidro agar sistem mikrogrid menjadi lebih fleksibel dan memiliki keandalan yang lebih tinggi. Dengan pengembangan tersebut, sistem diharapkan mampu memberikan performa yang lebih optimal dan dapat diterapkan pada skala industri maupun masyarakat luas.

Kontribusi Penulis: Penulis berkontribusi secara penuh dalam mendesain dan melaksanakan penelitian. Kontribusi penulis meliputi: (1) Desain sistem mikrogrid; (2) Menentukan kapasitas PV, Baterai, dan SCC; (3) Desain kendali zelio logic; (4) Pengambilan serta analisis data PV, baterai, PLN; dan (5) Interpretasi hasil penelitian untuk mengetahui capaian tujuan penelitian.

Pendanaan: Harap tambahkan: Penelitian ini dilaksanakan secara mandiri dan tidak menerima pendanaan eksternal.

Pernyataan Ketersediaan Data: Data pendukung hasil penelitian ini dapat diperoleh dengan mudah. Data tersebut meliputi data identifikasi atau observasi, data hasil simulasi serta data pendukung lain yang digunakan untuk analisis dan pembahasan

Ucapan Terima Kasih: Penulis mengucapkan terima kasih atas dukungan yang diberikan Program Studi Teknik Elektro Universitas PGRI Semarang atas penggunaan fasilitas laboratorium serta dukungan teknis selama pelaksanaan penelitian. Ucapan terima kasih juga ditujukan kepada LPPM Universitas PGRI Semarang atas bimbingan dan masukan, sehingga penelitian ini dapat diselesaikan.

Konflik Kepentingan: Penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan dalam pelaksanaan penelitian dan tidak ada hubungan pendanaan maupun kepentingan pribadi yang dapat berpengaruh terhadap hasil dan interpretasi penelitian.

Referensi

- [1] M. Hamidi, A. Raihani, and O. Bouattane, "Sustainable Intelligent Energy Management System for Microgrid Using Multi-Agent Systems: A Case Study," *Sustain.*, vol. 15, no. 16, August 2023, doi: 10.3390/su151612546.
- [2] K. Sayed, "Buildings Energy Management System," *Energy Conserv. in Resid., Commercial and Industrial*, pp. 15–81, 2016, doi: 10.1002/9781119422099.ch2.
- [3] Y. Qi, R. Liu, H. Lin, J. Zhong, and Z. Chen, "Distributed hybrid energy storage photovoltaic microgrid control based on MPPT algorithm and equilibrium control strategy," *Energy Informatics*, vol. 7, no. 1, December 2024, doi: 10.1186/s42162-024-00454-9.
- [4] M. Alsolami, A. Alferidi, and B. Lami, "Real-Time Energy Management of a Microgrid Using MPC-DDQN-Controlled V2H and H2V Operations with Renewable Energy Integration," *Energies*, vol. 18, no. 17, August 2025, doi: 10.3390/en18174622.
- [5] Z. Cabrane, M. Ouassaid, D. Choi, and S. H. Lee, "Control and Management of Multi-Agent Systems Using Fuzzy Logic for Microgrids," *Batteries*, vol. 11, no. 7, pp. 1–16, July 2025, doi: 10.3390/batteries11070279.
- [6] C. H. Yoo, I. Y. Chung, H. J. Lee, and S. S. Hong, "Intelligent control of battery energy storage for multi-agent based microgrid energy management," *Energies*, vol. 6, no. 10, pp. 4956–4979, September 2016, doi: 10.3390/en6104956.
- [7] J. A. Rodriguez-Gil *et al.*, *Energy management system in networked microgrids: an overview*, vol. 17, no. 1. Springer Berlin Heidelberg, July 2024. doi: 10.1007/s12667-024-00676-6.
- [8] S. Behera and N. B. Dev Choudhury, "Optimal battery management in PV + WT micro-grid using MSMA on fuzzy-PID controller: a real-time study," *Sustain. Energy Res.*, vol. 11, no. 1, November 2024, doi: 10.1186/s40807-024-00136-w.
- [9] N. Castañeda-Arias, N. L. Díaz-Aldana, A. L. Hernandez, and A. L. Jutinico, "Energy Management in Microgrid Systems: A Comprehensive Review Toward Bio-Inspired Approaches for Enhancing Resilience and Sustainability," *Electricity*, vol. 6, no. 4, pp. 1–42, December 2025, doi: 10.3390/electricity6040073.
- [10] O. Kucukkor, U. Durak, and T. H. Karakoc, "Evaluation of P&O algorithm efficiency under varying conditions for solar powered unmanned aerial vehicle," *CEAS Aeronaut. J.*, November 2025, doi: 10.1007/s13272-025-00918-y.
- [11] A. Kusumantoro and I. Farikhah, "Power management on DC microgrid with new DC coupling based on fuzzy logic," *Indones. J.*

- Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 32, no. 2, pp. 620–631, November 2023, doi: 10.11591/ijeecs.v32.i2.pp620-631.
- [12] Adhi Kusumantoro and Ardyono Priyadi, “Strategi Peningkatan Kinerja DC Microgrid dengan Konfigurasi DC/AC Coupling,” *J. Nas. Tek. Elektro dan Teknol. Inf.*, vol. 12, no. 3, pp. 175–180, Agustus 2023, doi: 10.22146/jnteti.v12i3.7151.
- [13] A. Kusumantoro, “Multi-Inverter Coordinated Control on AC Microgrid for Increased Load Power,” *2023 6th Int. Conf. Vocat. Educ. Electr. Eng. Integr. Scalable Digit. Connect. Intell. Syst. Green Technol. Educ. Sustain. Community Dev. ICVEE 2023 - Proceeding*, pp. 90–95, December 2023, doi: 10.1109/ICVEE59738.2023.10348326.
- [14] A. Kusumantoro and T. Hiyama, “Effect of fuzzy logic controller on voltage stability of parallel boost converter configuration,” *J. Soft Comput. Explor.*, vol. 4, no. 2, pp. 87–98, June 2023, doi: 10.52465/josce.v4i2.153.
- [15] A. Kusumantoro and I. Farikhah, “Real-Time Microgrid Centralized Control For Consuming Water Pump,” *E3S Web Conf.*, vol. 465, December 2023, doi: 10.1051/e3sconf/202346502003.
- [16] A. Kusumantoro, 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, May 2021, doi: 10.22266/ijies2021.0430.45.
- [17] A. Kusumantoro, Ardyono Priyadi, Vita Lystianingrum Budiharto Putri, and Mauridhi Hery Purnomo, “Kinerja Micro Grid Menggunakan Photovoltaic-Baterai dengan Sistem Off-Grid,” *J. Nas. Tek. Elektro dan Teknol. Inf.*, vol. 9, no. 2, pp. 211–217, Mei 2020, doi: 10.22146/jnteti.v9i2.155.
- [18] A. Kusumantoro and T. Hiyama, “Simulation Coordination Control of PV And Battery on Microgrid With PI Controller,” *Sci. J. Informatics*, vol. 10, no. 2, pp. 187–198, May 2023, doi: 10.15294/sji.v10i2.43929.
- [19] D. Azuatalam, K. Paridari, Y. Ma, M. Förstl, A. C. Chapman, and G. Verbič, “Energy management of small-scale PV-battery systems: A systematic review considering practical implementation, computational requirements, quality of input data and battery degradation,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 112, no. April, pp. 555–570, June 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.06.007.
- [20] N. Altin, S. E. Eyimaya, and A. Nasiri, “Multi-Agent-Based Controller for Microgrids: An Overview and Case Study,” *Energies*, vol. 16, no. 5, March 2023, doi: 10.3390/en16052445.
- [21] Y. Gupta and M. Amin, “A Neural Network-Based Energy Management System for PV-Battery Based Microgrids,” no. M1, pp. 1–10, June 2022, [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/2206.06716>
- [22] S. E. Eyimaya and N. Altin, “Review of Energy Management Systems in Microgrids,” *Appl. Sci.*, vol. 14, no. 3, pp. 1–20, February 2024, doi: 10.3390/app14031249.