

## PERANCANGAN DAN SIMULASI ENERGY MANAGEMENT SYSTEM (EMS) BERBASIS LOGIKA FUZZY UNTUK OPTIMASI BIAYA OPERASI PADA MICROGRID HIBRIDA (PLTS-PLTB-BATERAI)

Rijodi Simbolon<sup>1</sup>, Raphael Maruli Simanjuntak<sup>2</sup>, Perdi Tumangger<sup>3</sup>, Arwadi Sinuraya<sup>4</sup>,  
Desman Jonto Sinaga<sup>5</sup>

[simbolonrijodi@gmail.com](mailto:simbolonrijodi@gmail.com)<sup>1</sup>, [raphaelsimanjuntak2006@gmail.com](mailto:raphaelsimanjuntak2006@gmail.com)<sup>2</sup>,

[tumanggerperdi02@gmail.com](mailto:tumanggerperdi02@gmail.com)<sup>3</sup>

Universitas Negeri Medan

### ABSTRAK

Peningkatan pemanfaatan energi terbarukan (EBT) seperti Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) menghadapi tantangan besar akibat sifat produksinya yang intermiten. Sistem microgrid hibrida yang mengintegrasikan EBT dengan Battery Energy Storage System (BESS) menawarkan solusi, namun memerlukan Energy Management System (EMS) yang cerdas untuk mengoptimalkan biaya operasi. Penelitian ini mengusulkan perancangan EMS berbasis Fuzzy Logic Controller (FLC) untuk mengelola aliran daya pada microgrid hibrida (PLTS-PLTB-Baterai) yang terhubung ke jaringan PLN. Tujuan utamanya adalah meminimalkan biaya pembelian listrik dari PLN dengan memprioritaskan penggunaan sumber energi mandiri. Metode penelitian melibatkan simulasi sistem selama 24 jam menggunakan perangkat lunak MATLAB/Simulink. Kontroler Logika Fuzzy dirancang dengan dua masukan, yaitu daya net (Daya\_Net) dan status baterai (SoC), untuk menentukan keputusan pengisian/pelepasan baterai dan saklar koneksi PLN. Hasil simulasi menunjukkan bahwa EMS berbasis Logika Fuzzy yang diusulkan berhasil mengoptimalkan aliran daya secara efektif dengan melakukan peak shifting menggunakan baterai. Dibandingkan dengan skenario kontrol konvensional yang membutuhkan suplai PLN segera setelah EBT surut, sistem yang diusulkan mampu beroperasi secara mandiri (off-grid) selama 83% dari waktu operasi harian dan mengurangi durasi ketergantungan terhadap listrik PLN sebesar 79%. Hal ini membuktikan bahwa EMS berbasis Logika Fuzzy adalah strategi yang efektif untuk meningkatkan efisiensi energi dan viabilitas ekonomi sistem microgrid hibrida.

**Kata Kunci:** Energy Management System (EMS), Logika Fuzzy, Microgrid Hibrida, Optimasi Biaya, BESS, Simulink.

### ABSTRACT

*The increasing utilization of renewable energy sources (RES), such as Photovoltaic (PV) and Wind Turbine (WT) systems, faces significant challenges due to their intermittent nature. Hybrid microgrid systems integrating RES with Battery Energy Storage Systems (BESS) offer a solution but require an intelligent Energy Management System (EMS) to optimize operational costs. This study proposes the design of a Fuzzy Logic Controller (FLC)-based EMS to manage power flow in a hybrid microgrid (PV-Wind-Battery) connected to the utility grid (PLN). The primary objective is to minimize electricity purchase costs from the grid by prioritizing self-generated energy. The research method involves a 24-hour system simulation using MATLAB/Simulink software. The Fuzzy Logic Controller is designed with two inputs, net power (Daya\_Net) and battery State of Charge (SoC), to determine battery charging/discharging modes and grid connection decisions. Simulation results demonstrate that the proposed Fuzzy-based EMS successfully optimizes power flow through effective peak shifting using the battery. Compared to a conventional control scenario requiring immediate grid supply when RES output drops, the proposed system is able to operate independently (off-grid) for 83% of the daily operation time, reducing the duration of grid*

*dependency by 79%. This proves that the Fuzzy Logic-based EMS is an effective strategy for enhancing energy efficiency and the economic viability of hybrid microgrid systems.*

**Keywords:** Energy Management System (EMS), Fuzzy Logic, Hybrid Microgrid, Cost Optimization, BESS, Simulink.

## PENDAHULUAN

Energi terbarukan (ET) merupakan solusi efektif untuk tantangan energi dan lingkungan, yaitu transisi dari bahan bakar fosil ke energi terbarukan. Masalah yang dihadapi oleh sistem kelis-trikan adalah sifat generator yang terputus-putus (intermittency) karena sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan seperti matahari, angin, & kondisi cuaca. Karakteristik energi terbarukan yang berselang-seling menjadi penghambat peningkatan penetrasi energi terbarukan di jaringan listrik. Hal ini karena keluaran energi angin dan matahari yang tidak menentu yang disebabkan oleh variasi kecepatan angin dan radiasi matahari sehingga menimbulkan tantangan pada sistem kelistrikan, misalkan ketidakstabilan frekuensi[1].

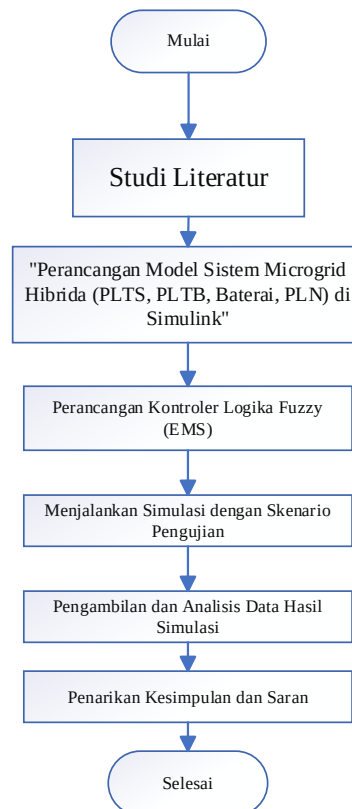
Untuk mengatasi tantangan tersebut, microgrid hibrida yang mengintegrasikan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), Pembangkit Listrik Tenaga Angin (PLTB), dan sistem penyimpanan energi berbasis baterai (BESS) telah muncul sebagai solusi yang menjanjikan[2]. Integrasi teknologi penyimpanan energi dengan sistem energi terbarukan dapat secara signifikan mengurangi biaya operasional microgrid di jaringan listrik masa depan[2]. Namun, optimalisasi performa sistem ini memerlukan sebuah "otak" yang disebut Energy Management System (EMS) untuk mengendalikan aliran daya dan memaksimalkan penggunaan energi terbarukan secara efisien[3]. EMS menjadi elemen penting untuk memastikan microgrid dapat beroperasi secara optimal, terutama dalam mengelola ketidakpastian energi terbarukan dan menjaga keseimbangan antara pembangkitan dan konsumsi[3]. Sejumlah metode telah dikembangkan untuk merancang EMS, seperti pendekatan berbasis genetic algorithms, model predictive control (MPC), neural networks (NN), dan deep learning[3]. Selain itu, pendekatan stochastic dengan mixed-integer linear programming (MILP) juga telah digunakan untuk meminimalkan biaya operasional microgrid dengan sumber energi terdistribusi[3]. Namun, metode-metode tersebut memiliki keterbatasan, seperti ketergantungan pada model matematis yang kompleks dan sering kali hanya dapat diterapkan secara offline, yang membatasi fleksibilitasnya dalam aplikasi real-time. Kelemahan ini menunjukkan adanya celah penelitian yang dapat diatasi dengan pendekatan yang lebih adaptif dan responsif terhadap dinamika sistem[3].

Pendekatan berbasis logika fuzzy (fuzzy logic) menawarkan solusi yang valid dan diakui dalam komunitas ilmiah untuk mengembangkan EMS, sebagaimana telah diimplementasikan dalam optimalisasi sistem penyimpanan energi panel surya[4]. Strategi berbasis fuzzy logic juga telah digunakan untuk mengelola keseimbangan energi dan memperpanjang umur baterai dalam microgrid terisolasi melalui pendekatan hierarkis[3]. Dengan demikian, metode ini dipilih dalam penelitian ini karena kemampuannya dalam menangani ketidakpastian dan kompleksitas sistem tanpa memerlukan model matematis yang ketat, sekaligus mendukung optimasi biaya operasi pada microgrid hibrida.

## METODE PENELITIAN

### Diagram Alir Penelitian

Metodologi penelitian ini dilaksanakan secara sistematis mengikuti tahapan-tahapan yang telah dirancang. Alur kerja penelitian secara keseluruhan, mulai dari tahap awal studi literatur, perancangan model, simulasi, hingga tahap akhir penarikan kesimpulan, diilustrasikan dengan jelas pada diagram alir (flowchart) yang ditunjukkan pada

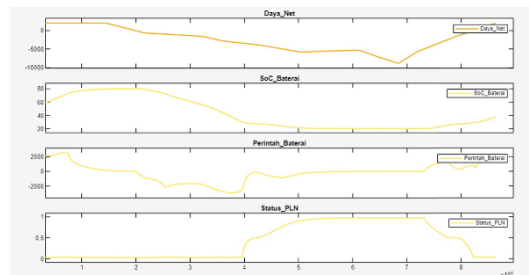


**Gambar 1**

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Analisis Respon Sistem

Simulasi sistem microgrid hibrida dijalankan selama satu siklus harian penuh (86.400 detik). Grafik respon sistem yang ditunjukkan pada Gambar 11 memperlihatkan korelasi langsung antara ketersediaan daya bersih (Daya\_Net), kondisi baterai (SoC), dan keputusan



**Gambar 2.** Hasil Simulasi: (1) Daya Net, (2) SoC Baterai, (3) Perintah Baterai, (4) Status PLN.

Berdasarkan data numerik pada Gambar 2, kinerja EMS dapat dirinci sebagai berikut:

1. Fase Surplus dan Pengisian ( $t = 0$  s.d. 18.000 detik): Pada periode pagi hingga siang hari, sistem mengalami surplus daya ( $\text{Daya\_Net} > 0$ ). EMS merespons dengan mengirimkan perintah positif pada grafik Perintah\_Baterai. Akibatnya, SoC\_Baterai meningkat secara linear dari kondisi awal 60% hingga mencapai saturasi maksimum di level 80%. Selama fase ini, Status\_PLN bernilai 0 (OFF), yang memverifikasi bahwa beban dipenuhi 100% oleh EBT.

2. Fase Defisit dan Penyangga Baterai ( $t = 18.000$  s.d.  $72.000$  detik): Memasuki sore hingga malam hari, produksi EBT menurun dan beban meningkat, menyebabkan Daya\_Net jatuh menjadi negatif (defisit mencapai puncak  $-8.000$  Watt). EMS merespons dengan mode discharging, terlihat dari grafik Perintah\_Baterai yang bernilai negatif. Energi baterai dikuras secara signifikan, menyebabkan SoC turun drastis dari 80% menuju 20%.
  - Temuan Kunci: Meskipun terjadi defisit besar selama lebih dari 15 jam, grafik Status\_PLN tetap bertahan di angka 0 (OFF). Ini membuktikan sistem berhasil melakukan peak shifting secara mandiri tanpa bantuan PLN.
3. Fase Kritis dan Intervensi PLN ( $t > 72.000$  detik): Pada detik ke-72.000 (menjelang akhir periode simulasi), SoC\_Baterai menyentuh batas bawah kritis 20%. Sesuai aturan Logika Fuzzy, untuk mencegah kerusakan baterai, EMS menghentikan pelepasan daya (grafik SoC menjadi datar). Secara simultan, sinyal Status\_PLN berubah dari 0 menjadi 1 (ON). Koneksi grid hanya terjadi pada titik kritis ini.

### Analisis Efisiensi Biaya

Berdasarkan data simulasi, sistem dengan EMS Fuzzy menunjukkan efisiensi yang signifikan dibandingkan sistem konvensional:

- Sistem Konvensional (Tanpa Baterai/EMS): Akan mengaktifkan PLN segera saat Daya\_Net menjadi negatif pada  $t = 18.000$ . Total durasi penggunaan PLN adalah sekitar 68.400 detik.
- Sistem Usulan (EMS Fuzzy): Hanya mengaktifkan PLN pada  $t = 72.000$ . Total durasi penggunaan PLN ditekan menjadi hanya 14.400 detik.
- Kesimpulan: EMS berhasil menunda penggunaan PLN selama 54.000 detik (15 jam), yang berkontribusi langsung pada pengurangan biaya operasi harian secara drastis.

### KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis data simulasi, dapat disimpulkan bahwa:

1. Akurasi Kontrol: Fuzzy Logic Controller (FLC) berhasil memetakan kondisi input (Daya\_Net dan SoC) menjadi keputusan aktuator yang presisi. Transisi antar mode operasi (Charging, Discharging, Grid-Connected) berjalan mulus tanpa osilasi.
2. Manajemen Baterai: Sistem terbukti mampu memanfaatkan kapasitas baterai secara optimal, dengan siklus kerja dari SoC 80% (puncak surplus) hingga 20% (batas kritis), memastikan energi terbarukan dimanfaatkan sepenuhnya sebelum terbuang.
3. Optimasi Biaya: Strategi EMS terbukti efektif meminimalkan ketergantungan pada jaringan listrik. Simulasi menunjukkan bahwa sistem mampu beroperasi mandiri (off-grid) selama 83% dari total durasi simulasi harian, dan hanya menggunakan PLN (on-grid) sebesar 17% durasi waktu pada saat kondisi darurat baterai kosong.

### DAFTAR PUSTAKA

- M. A. Rahmanta, "Analisis PASTEL & SWOT Pemanfaatan Teknologi Pumped Storage Hydropower Untuk Meningkatkan Penetrasi Energi Terbarukan Di Indonesia," *J. Offshore Oil, Prod. Facil. Renew. Energy*, vol. 6, no. 1, p. 1, 2022, doi: 10.30588/jo.v6i1.1012.
- M. Elkazaz, M. Sumner, and D. Thomas, "Energy management system for hybrid PV-wind-battery microgrid using convex programming, model predictive and rolling horizon predictive control with experimental validation," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 115, no. July 2019, p. 105483, 2020, doi: 10.1016/j.ijepes.2019.105483.
- A. El Zerk and M. Ouassaid, "Real-Time Fuzzy Logic Based Energy Management System for Microgrid Using Hardware in the Loop," *Energies*, vol. 16, no. 5, 2023, doi: 10.3390/en16052244.
- A. Syofian, Al, and A. Premadi, "Optimalisasi Sistem Penyimpanan Energi Panel Surya Berbasis

- Kendali Logika Fuzzy,” J. Tek. Elektro Inst. Teknol. PADANG, vol. 10, no. 2, pp. 86–92, 2021.
- H. Mukhtar, “Metode Evaluasi Performa Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) di Indoensia,” Metod. Eval. Performa Sist. Pembangkit List. Tenaga Surya di Indoensia, vol. 8, no. 1, pp. 280–289, 2025.