

Perancangan Sistem Manajemen Energi PLTS pada Mini Smart Grid Skala Rumah Tangga

Hanif Rifai Adha^{1*}, Yogi Dwi Mahandi², Langlang Gumilar³

^{1,2}Pendidikan Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Negeri Malang

³Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Negeri Malang

Email: ¹hanif.rifai.ft@um.ac.id, ²yogi.mahandi.ft@um.ac.id, ³langlang.gumilar.ft@um.ac.id

*Penulis Korespondensi

Abstract— The energy transition target towards Net Zero Emission (NZE) 2060 encourages the use of new renewable energy, especially solar power plants. The intermittent and variable characteristics of residential loads pose challenges in maintaining reliable energy supply. This study aims to design and evaluate a household-scale mini smart grid solar energy management system with the integration of a fuzzy logic-based Battery Management System (BMS). This method uses an experimental systems engineering approach through simulation, including the design of solar power plants, batteries, household loads, and PLN network interconnections, as well as the implementation of the Mamdani method fuzzy controller. Input variables include solar irradiation, household load, battery State of Charge (SoC), and PLN electricity tariff. A 50-hour simulation showed the solar power plant generated 44.14 kWh of energy to support a load consumption of 52.67 kWh, with energy imports from PLN of 35.52 kWh and energy exports of 22.19 kWh. The battery SoC increases from 50% to approximately 75% without any discharge. The system is capable of adaptive energy management, maximizing solar energy utilization, and lowering household energy costs, potentially supporting the development of reliable and sustainable household solar power plants.

Intisari— Target transisi energi menuju Net Zero Emission (NZE) 2060 mendorong pemanfaatan energi baru terbarukan, khususnya Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) skala rumah tangga. Karakteristik yang intermiten dan variasi beban residensial menimbulkan tantangan dalam menjaga keandalan suplai energi. Penelitian ini bertujuan merancang dan mengevaluasi sistem manajemen energi PLTS mini smart grid skala rumah tangga dengan integrasi Battery Management System (BMS) berbasis logika fuzzy. Metode ini menggunakan pendekatan rekayasa sistem eksperimental melalui simulasi, meliputi perancangan PLTS, baterai, beban rumah tangga, dan interkoneksi jaringan PLN, serta implementasi kontroler fuzzy metode Mamdani. Variabel input terdiri atas iradiasi matahari, beban rumah tangga, State of Charge (SoC) baterai, dan tarif listrik PLN. Hasil simulasi selama 50 jam menunjukkan PLTS menghasilkan energi sebesar 44,14 kWh untuk mendukung konsumsi beban 52,67 kWh, dengan impor energi dari PLN sebesar 35,52 kWh dan ekspor energi sebesar 22,19 kWh. SoC baterai meningkat dari 50% menjadi sekitar 75% tanpa proses pengosongan. Sistem mampu mengelola energi secara adaptif, memaksimalkan pemanfaatan energi surya, serta menurunkan biaya energi rumah tangga, sehingga berpotensi mendukung pengembangan PLTS rumah tangga yang andal dan berkelanjutan.

Kata Kunci— EMS, Fuzzy logic, mini smart grid, SoC.

I. PENDAHULUAN

Perkembangan Ilmu Pengetahuan dan Teknologi (IPTEK) pada sektor energi berkembang secara masif. Berfokus pada pembangunan nasional guna mencapai swasembada energi dan memperkuat pendidikan, sains, teknologi serta digitalisasi [1][2]. Perkembangan tersebut mewujudkan target transformasi *Net Zero Emission (NZE) 2060* melalui peta jalan transisi energi nasional. Transformasi tersebut di dorong oleh lima prinsip utama, yaitu peningkatan pemanfaatan energi baru terbarukan, pengurangan fosil, elektrifikasi sektor transportasi, peningkatan konsumsi listrik di rumah tangga dan industri serta penerapan *Carbon Capture and Storage (CCS)* [3][4]. Pada tahun 2021 kebijakan strategis diterapkan melalui regulasi energi terbarukan dan pengehentian pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). Tahapan transisi mencakup peningkatan bauran energi baru terbarukan hingga 23% pada tahun 2025, serta percepatan pemanfaatan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) sebagai tulang punggung energi nasional. Pada tahun 2060, bauran energi terbarukan ditargetkan mencapai 100% didukung dengan sistem kelistrikan berkelanjutan dan elektrifikasi menyeluruh [5].

PLTS merupakan salah satu teknologi dengan potensi energi yang melimpah, ramah lingkungan, dan biaya operasi rendah untuk skala rumah tangga. Sistem tersebut mengadopsi konfigurasi off grid atau mini smart grid yang menjadi solusi dalam mengatasi keterbatasan jaringan listrik. Sehingga, dapat mengurangi ketergantungan terhadap listrik dari jaringan utama (*grid*) tanpa mengorbankan kontinuitas suplai energi listrik. Sifat intermiten dan fluktuatif menimbulkan tantangan serius dalam memastikan stabilitas suplai energi listrik. Ketergantungan terhadap kondisi cuaca dan intensitas penyinaran matahari menyebabkan variasi output energi yang signifikan. Oleh karena itu diperlukan integrasi sistem penyimpanan energi yang efektif. Baterai sebagai *Energy Storage System (ESS)* menjadi ujung tombak dalam menjaga kontinuitas suplai, meningkatkan *self-consumption*, dan mendukung operasi sistem yang andal. Sehingga manajemen energi yg efektif dapat meningkatkan performa dan reliabilitas sistem [6] [7] [8].

Baterai yang digunakan dipengaruhi oleh *Battery Management System (BMS)* yang mampu mengatur proses *charging dan discharging* baterai. Selain itu, memantau kondisi baterai, serta melakukan penyeimbangan sel (*cell*

balancing) guna memaksimalkan umur pakai baterai dan efisiensi operasional baterai [9]. Pada beberapa penelitian sebelumnya telah membahas mengenai manajemen baterai yang kurang tepat dapat menyebabkan kerusakan pada baterai akibat *overcharge*, *undercharge*, dan ketidakseimbangan antar sel baterai. Hal tersebut berakibat pada performa dan umur baterai [8] [10] [11].

Namun demikian penelitian mengenai EMS masih berorientasi pada *microgrid* atau sistem hibrid skala besar, sedangkan kajian terhadap keputusan yang spesifik residensial masih memerlukan penguatan, terutama pada sistem mini smart grid rumah tangga. Dalam pengambilan keputusan yang dipengaruhi ketidakpastian, logika fuzzy mampu menangani ketidakpresisian data dan memodelkan melalui linguistik IF-THEN. Sehingga cocok untuk strategi manajemen energi adaptif dan robust. Pada studi penelitian yang sudah dilakukan bahwa fuzzy logic dapat meningkatkan kualitas EMS pada mikrogrid/mikrogrid hibrid [12]. Selaras dengan itu, penelitian terkait pemanfaatan fuzzy yang diterapkan pada manajemen energi skala rumah tangga, namun integrasi yang lebih komprehensif dan evaluasi pada skenario residensial masih menjadi pengembangan secara terbatas [13] [14] [15] [16]. Kajian secara spesifik mengangkat terkait mini *smart grid* PLTS skala rumah tangga dengan mempertimbangkan dinamika beban residensial yang fluktuatif. Kondisi SoC baterai serta interaksi adaptif dengan jaringan PLN masih relatif terbatas, khususnya pada dalam hal yang aplikatif dan relevan. Selain itu pemanfaatan *fuzzy logic* dalam Baterai manajemen yang masih digunakan sebagai kontrol tambahan dan belum terintegrasi secara menyeluruh sebagai inti pengambilan keputusan [3].

Oleh karena itu, penelitian ini terletak pada perancangan sistem manajemen baterai berbasis logika fuzzy yang terintegrasi secara langsung dengan arsitektur PLTS mini smart grid rumah tangga dengan mempertimbangkan kondisi operasional nyata.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Tinjauan pustakan disusun untuk memberikan landasan teoretis terkait sistem manajemen energi PLTS mini smart grid skala rumah tangga. Kajian mencakup pemanfaat PLTS, peran sistem penyimpanan energi, serta fungsi *Energy Magement System (EMS)* dalam menjaga keandalan dan keselamatan operasi sistem.

A. PLTS Rumah Tangga

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) rumah tangga merupakan salah satu bentuk pemanfaatan energi baru terbarukan pada skala rumah tangga. Pemanfaatan ini terus berkembang sebagai respon terhadap energi berkelanjutan dan desentralisasi sistem kelistrikan. PLTS rumah tangga memanfaatkan energi radiasi matahari yang dikonversi melalui modul Photovoltaik. Meskipun memiliki potensi besar, PLTS menghadapi keterbatasan seperti sifat produksi energi yang intermiten dan sangat dipengaruhi oleh kondisi cuaca [17]. Sehingga dipengaruhi strategi pengelolaan energi yang tepat untuk menjaga keandalan suplai listrik.

B. Energy Management System

Sistem penyimpanan energi berbasis baterai memiliki peran penting dalam meningkatkan fleksibilitas dan keandalan PLTS. Baterai berfungsi menyimpan energi surplus saat

produksi energi PLTS melebihi kebutuhan beban dan menyuplai saat energi menurun. Keberhasilan pemanfaatan energi ditentukan oleh *Energy Management System (EMS)* atau juga yang bisa disebut *Battery Management System (BMS)*. Manajemen tersebut bertugas memantau parameter baterai seperti tegangan, arus, dan *state of charge (SoC)*[18]. Selain itu juga mengendalikan proses *charging* dan *discharging* agar baterai tetap berada pada batas operasi aman. EMS berperan dalam memperpanjang umur baterai dan meningkatkan efisiensi secara keseluruhan [19].

C. Mini Smart Grid

Mini smart grid merupakan pengembangan dari sistem kelistrikan konvensional yang saling terintegrasi. Integrasinya meliputi pembangkitan terdistribusi, penyimpanan energi, beban, dan jaringan listrik utama dalam satu sistem yang terkoordinasi. Pada kasus skala rumah tangga, mini smart grid memungkinkan terjadinya aliran energi dua arah antara PLTS, baterai beban, dan jaringan listrik. Konsep ini mendukung pengambilan keputusan yang lebih cerdas terkait prioritas penggunaan energi [20]. Sehingga mampu meningkatkan pemanfaatan energi surya dan mengurangi ketergantungan terhadap jaringan listrik.

D. Fuzzy Logic

Logika fuzzy merupakan metode kecerdasan buatan yang dirancang untuk menangani ketidakpastian dan ketidakpresisian data melalui representasi linguistik. Pada sistem manajemen energi, logika fuzzy memungkinkan pemodelan dalam bentuk aturan *IF-THEN* guna menentukan keputusan *charging* dan *discharging* yang berinteraksi dengan jaringan listrik. Logika fuzzy memiliki keunggulan dalam menghasilkan keputusan yang adaptif tanpa memerlukan model matematis yang kompleks [21]. Sehingga sesuai untuk diterapkan pada PLTS rumah tangga yang bersifat dinamis [22].

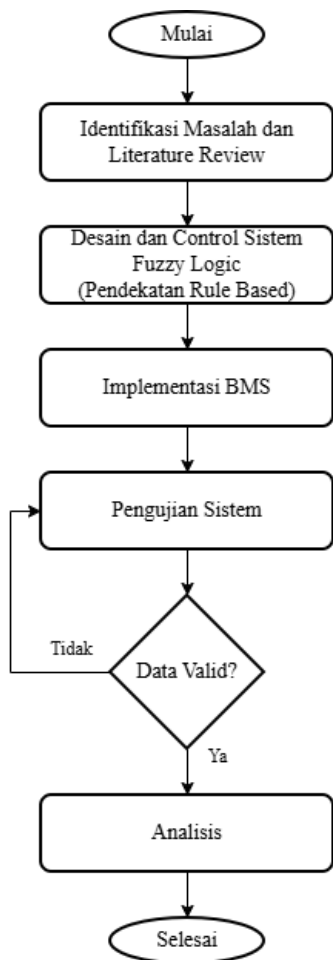
Berdasarkan kajian pustaka yang telah diuraikan bahwa integrasi PLTS rumah tangga, baterai, mini smart grid, dan sistem manajemen adaptif merupakan pendekatan yang relevan dalam mendukung transisi energi. Akan tetapi penerapan logika fuzzy pada pengambilan keputusan EMS masih memerlukan pengkajian lebih lanjut. Oleh karena itu, penelitian ini berfokus pada perancangan sistem manajemen energi berbasis logika fuzzy yang aplikasi sesuai dengan karakteristik operasional PLTS rumah tangga.

III. METODE

Pada penelitian ini menggunakan skema rekayasa sistem dengan metode perancangan dan pengujian eksperimental menggunakan simulasi dengan software matlab R2020a dan dengan perangkat laptop dengan spesifikasi Intel core i5 Nvidia Geforce RTX. Penggunaan tersebut untuk merancang dan mengevaluasi kinerja sistem manajemen baterai pada PLTS mini *smart grid* skala rumah tangga. Metode ini dipilih dikarenakan sistem yang di uji coba menggunakan data uji berdasarkan parameter operasional nyata.

Beberapa langkah untuk mendapatkan hasil dari perancangan manajemen energi PLTS mini *smart grid* skala rumah tangga meliputi identifikasi masalah dan *literature review*, desain dan control system *fuzzy logic* (pendekatan *rule*

based), implementasi EMS, pengujian sistem, dan analisis yang ditunjukkan pada Gambar 1.



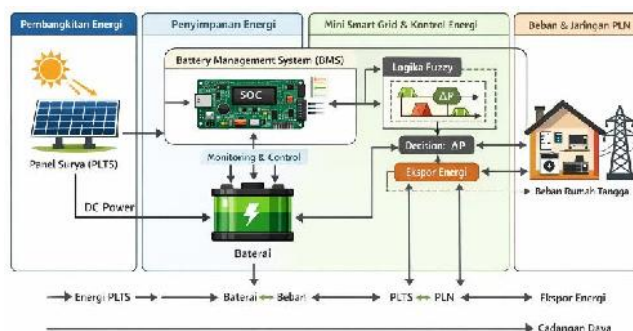
Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

A. Desain PLTS Mini Smart Grid

Sistem ini menjelaskan mengenai skema konfigurasi PLTS mini smart grid yang diimplementasikan dengan EMS. Pada sistem ini mengkoordinasikan interaksi antara PLTS, baterai, beban rumah tangga, serta jaringan PLN sebagai cadangan. Konfigurasi ini memungkinkan sistem dapat beroperasi secara adaptif dalam berbagai fluktuasi beban.

Sistem penyimpanan dikendalikan oleh EMS untuk memantau dan mengatur parameter seperti tegangan, arus, SoC. Apabila dilihat dari sisi fungsionalitas EMS memastikan proses *charging* dan *discharging* baterai dalam operasi yang aman guna mendukung umur pemakaian baterai. Data dari EMS nantinya digunakan sebagai masukan utama dalam sistem untuk melakukan strategi pengelolaan daya berdasarkan kondisi sistem.

Manajemen energi pada sistem ini diterapkan melalui mekanisme pengambilan keputusan dengan mempertimbangkan keseimbangan daya antara PLTS dan beban rumah tangga. Sehingga nanti akan menentukan prioritas penggunaan energi PLTS secara langsung, pengisian atau pengosongan baterai serta interaksi jaringan PLN. Skema konfigurasi ditunjukkan oleh Gambar 2.



Gambar 2. Desain Arsitektur EMS

B. Spesifikasi Sistem

Variabel sistem ini menguraikan mengenai representasi dari kondisi operasional meliputi sumber energi, sistem penyimpanan, beban, serta guna mendukung pengambilan keputusan pada EMS. Sedangkan variabel sistem dikelompokkan menjadi variabel masukan, variabel keluaran, dan variabel evaluasi kinerja.

Pada sistem yang digunakan ada beberapa komponen yang terdapat pada simulasi. Komponen tersebut meliputi panel surya, baterai, beban rumah tangga, dan tarif jaringan PLN. Spesifikasi sistem yang digunakan pada simulasi PLTS mini smart grid dirangkum pada Tabel 1.

TABEL 1. SPESIFIKASI SISTEM

No	Spesifikasi	Satuan	Kapasitas
Panel Surya (PLTS)			
1	Luas panel	m ²	200
2	Efisiensi panel	%	28
3	Efisiensi sistem	%	85
4	Kapasitas maks	kW	3,06
Baterai			
5	Kapasitas baterai	kWh	10
6	State of Charge	%	50
7	Batas charge/discharge	kW	2
8	Efisiensi charge/discharge	%	90
Beban Rumah Tangga			
9	Beban dasar	kW	0,3
10	Beban puncak	kW	2,5 kW
Jaringan PLN			
11	Tarif dasar	Rp/kWh	1500
12	Tarif beban puncak	Rp/kWh	1500 - 3000
13	Tarif beban normal/rendah	Rp/kWh	1000 - 1500

Daya keluaran dari PLTS dihitung menggunakan persamaan.

$$P_{PV} = V_{PV} \cdot I_{PV} \tag{1}$$

Daya beban rumah tangga dihitung dengan persamaan.

$$P_{load} = V_{load} \cdot I_{load} \tag{2}$$

C. Perancangan Sistem Kendali Logika Fuzzy

Logika fuzzy dirancang untuk mengoptimalkan energi pada sistem mini smart grid berdasarkan beberapa variabel utama meliputi variabel input dan variabel output [23], [24]. Variabel input meliputi iradiasi matahari, beban rumah tangga, SoC baterai, dan tarif listrik yang telah dirangkum pada Tabel 2.

Sedangkan untuk parameter output terdapat dua aksi yaitu aksi baterai dengan -1 (*discharge*) dan 1 (*charge*), sedangkan untuk aksi grid -1 (*ekspor*) dan 1 (*import*).

TABEL 2. VARIABEL INPUT

No	Spesifikasi	Satuan	Kapasitas
1	Iradiasi matahari	W/m^2	0 - 1000
2	Beban rumah tangga	kW	0 - 3
3	SOC	%	0 - 100
4	Tarif Listrik PLN	Rp/kWh	1000 - 2000

Setiap variabel dimodelkan dalam tiga himpunan linguistik seperti *low*, *medium*, dan *high* guna merepresentasikan kondisi sistem secara gradual. Derajat keanggotaan dimodelkan secara matematis dengan fungsi keanggotaan segitiga yang dituliskan pada persamaan 3 [25].

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b < x < c \\ 0, & x \geq c \end{cases} \quad (3)$$

Persamaan diatas memodelkan terkait fungsi keanggotaan sistem *fuzzy logic* yang merepresentasikan kondisi transisi antar level input secara halus, sehingga keputusan yang diproses lebih adaptif sesuai dengan perubahan kondisi operasi. Basis aturan fuzzy dirancang berdasarkan kombinasi seluruh input untuk mencerminkan berbagai skenario operasi sistem smart grid. Pada perancangan logika fuzzy pada sistem mini smart grid terdapat beberapa fungsi keanggotaan guna memetakan titik input dan output [26], [27].

Fungsi keanggotaan meliputi iradiasi matahari dengan kondisi *low* (0 – 400 W/m^2), *medium* (200 – 800 W/m^2), dan *high* (600 – 1000 W/m^2). Beban rumah tangga dengan kondisi *low* (0 – 1 kW), *medium* (0,5 – 2,5 kW), dan *high* (2 – 3 kW). SOC baterai *low* (0 – 30%), *medium* (20 – 80%), dan *high* (70 – 100%). Tarif listrik PLN dengan kondisi *low* (1000 – 1400 Rp/kWh), *medium* (1300 – 1700 Rp/kWh), dan *high* (1600 – 2000 Rp/kWh). Operasi baterai terdapat tiga kondisi yaitu *Discharge* (-1 hingga -0,3), *hold* (-0,5 – 0,5), dan *charge* (0,3 – 1). Operasi grid memiliki tiga kondisi yaitu *export* (-1 hingga -0,3), *balanced* (-0,5 – 0,5), dan *import* (0,3 hingga 1).

Aturan fuzzy dirancang dalam bentuk IF-THEN guna mengatur aliran energi PLTS, baterai, dan jaringan PLN. Berdasarkan kondisi tersebut maka terdapat beberapa aturan fuzzy yang digunakan. Cuplikan aturan fuzzy yang digunakan sebagai berikut.

1. Jika iradiasi *high*, beban *low*, dan SOC *high*, maka baterai *charging* dan grid *export*.
2. Jika iradiasi *low*, beban *high*, dan SOC *high*, maka baterai *discharge* dan grid *import*.
3. Jika iradiasi *medium*, beban *medium*, dan SOC *medium*, maka aksi baterai *hold* dan grid *import*.
4. Jika iradiasi *high*, beban *high*, SOC *low*, dan tarif *high*, maka baterai *hold* dan grid *import*.
5. Jika iradiasi *low*, beban *low*, SOC *high*, dan tarif *low*, maka aksi baterai *discharge* dan grid *balanced*.

Pemrosesan inferensi fuzzy menggunakan metode *mamdani*, dengan operator minimum sebagai operator logika AND dan operator maksimum sebagai agregasi keluaran

aturan. Hasil inferensi kemudian dikonversi menjadi nilai *crisp* melalui proses defuzzifikasi metode centroid. Metode ini berfungsi untuk menghitung pusat massa dari kurva keanggotaan output yang dituliskan sebagai berikut [28] [29] [30].

$$y^* = \frac{\int y \cdot \mu(y) dy}{\int \mu(y) dy} \quad (4)$$

Berdasarkan persamaan tersebut nilai hasil defuzzifikasi dipergunakan sebagai sinyal keputusan untuk menentukan aksi baterai pada *charging*, *holding*, atau *discharging*, serta aksi pada sistem grid melakukan impor atau ekspor. Oleh karena itu dengan pendekatan logika fuzzy mampu menghasilkan dan mendukung optimalisasi pemanfaatan PLTS, serta menjaga SoC baterai dalam batas aman.

D. Energy Management System (EMS)

Energy Management System (EMS) sebagai bentuk pengelolaan operasi baterai pada PLTS mini smart grid skala rumah tangga supaya beroperasi secara aman, efisien, dan adaptif terhadap perubahan kondisi sistem [18] [31] [32]. Selain itu implementasi pada manajemen energi sebagai pemantauan kondisi baterai, pengendalian proses pengisian dan pengosongan. Pada implementasi EMS memproses akuisisi data secara real terhadap parameter baterai meliputi tegangan baterai, arus baterai, dan *State of Charge (SoC)* dengan spesifikasi yang ditunjukkan pada Tabel 1.

Dalam menghitung daya baterai ditunjukkan persamaan berikut.

$$P_{bat} = V_{bat} \cdot I_{bat} \quad (5)$$

Nilai daya baterai menunjukkan arah dan besarnya aliran energi. Nilai positif (+) menunjukkan proses pengosongan baterai, sedangkan nilai negatif (-) menunjukkan proses pengisian baterai.

Kondisi baterai sebagai penyimpanan energi direpresentasikan dengan SoC dan dihitung menggunakan metode *coloumb counting* di persamaan 4 [32], [33].

$$SOC_{(t)} = SOC_{(t_0)} + \frac{1}{C_{bat}} \int_{t_0}^t I_{bat}(\tau) d\tau \quad (6)$$

Pada persamaan tersebut C_{bat} merupakan kapasitas normal baterai (Ah). Batasan operasi baterai berdasarkan nilai operasi dan tegangan dengan retang sebagai berikut.

$$SOC_{min} \leq SOC \leq SOC_{max} \quad (7)$$

Berdasarkan persamaan 5 operasi baterai akan dihentikan apabila SoC dibawah batas minimum untuk menghindari *deep discharge*. Berlawanan dengan itu baterai akan berhenti beroperasi apabila SoC di atas nilai maksimum untuk mencegah *overcharge*. Keseimbangan daya PLTS dengan beban rumah tangga dihitung dengan persamaan berikut.

$$\Delta P = P_{PV} - P_{load} \quad (8)$$

Nilai ΔP direpresentasikan untuk menentukan aksi BMS, dalam kondisi surplus ($\Delta P > 0$), sedangkan dalam kondisi

defisit ($\Delta P < 0$). Evaluasi kinerja pada EMS sebagai bentuk pengelolaan energi ditunjukkan pada persamaan.

$$\eta_{bat} = \frac{E_{dis}}{E_{chg}} \cdot 100\% \quad (9)$$

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini dilakukan dengan tahapan identifikasi masalah, desain dan kontrol *fuzzy logic* dengan pendekatan *rule based*, implementasi BMS, dan analisis. Hasil data yang diuraikan didapatkan dari simulasi sistem menggunakan Matlab R2020a yang di jalankan pada sistem komputasi intel Core i5 dengan Nvidia Geforce RTX. Simulasi dilakukan selama 50 jam guna melihat performa sistem dalam berbagai kondisi operasi. Keluaran hasil simulasi mencakup data iradiasi matahari, produksi PLTS, pola beban rumah tangga, *State of Charge (SOC)* baterai, aliran daya pada grid, dan biaya energi. Parameter utama sistem PLTS *mini smart grid* selama periode simulasi ditunjukkan pada Tabel 3.

TABEL 3. PARAMETER HASIL SIMULASI

Parameter	Satuan	Nilai
Total energi PLTS	kWh	44,14
Total energi beban	kWh	52,67
Total impor grid	kWh	35,52
Total ekspor grid	kWh	22,19
Total daya pengisian baterai	kWh	4,80
Total daya pengosongan baterai	kWh	0,00
Kemandirian energi	%	3256,33
Pemanfaatan PLTS	%	4973,09
Total biaya energi	Rp	

TABEL 4. DISTRIBUSI ENERGI UTAMA

Sumber Energi	Kontribusi (kWh)	Persentase (%)
PLTS	20,00	40,00
Baterai	0,00	0,00
PLN	30,00	60,00

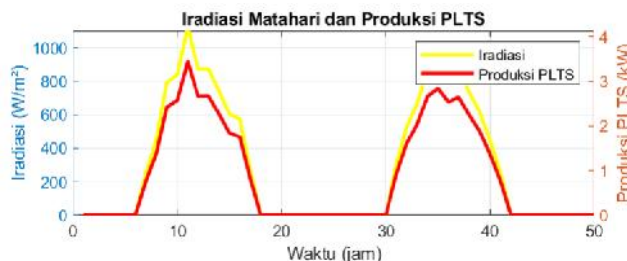
Berdasarkan Tabel 3 dan Tabel 4, total energi yang dihasilkan oleh PLTS selama periode simulasi sebesar 44,14 kWh, sementara total energi yang dikonsumsi rumah tangga sebesar 52,67 kWh. Hal tersebut menunjukkan bahwa produksi PLTS tidak sepenuhnya mencukupi kebutuhan beban, sehingga perlu impor energi dari jaringan PLN sebesar 32,52 kWh. Selain itu ketika produk PLTS melebihi kebutuhan beban dan baterai penuh terjadi ekspor energi ke jaringan PLN sebesar 22,29 kWh.

Distribusi sumber energi menunjukkan bahwa 40% energi berasal dari PLTS dan 60% dari PLN. Meskipun terdapat aktivitas pengisian baterai sebesar 4,80 kWh, tidak ada energi yang diambil dari baterai untuk menyuplai beban selama periode simulasi. Hal tersebut menunjukkan bahwa strategi kontrol *fuzzy logic* lebih memprioritaskan penggunaan PLTS secara langsung dan impor dari grid menggunakan energi dari baterai.

A. Iradiasi Matahari dan Produksi PLTS

Pola iradiasi matahari dan produksi PLTS selama periode 50 jam ditunjukkan pada Gambar 3. Iradiasi matahari mengikuti pola siklus harian dengan nilai maksimum mencapai sekitar

1000 W/m^2 pada siang hari dan menjadi 0 W/m^2 pada malam hari. Produksi PLTS berbanding lurus dengan iradiasi matahari dengan nilai puncaknya mencapai 3 kW saat iradiasi maksimum.



Gambar 3. Grafik Iradiasi Matahari dan Produksi PLTS

Pola produksi PLTS menunjukkan dua siklus harian dengan periode produksi energi yang berlangsung sekitar 12 jam per hari (jam ke-6 sampai jam ke-18). Hal tersebut sesuai dengan karakteristik PLTS yang bersifat intermiten. Sehingga menjadi tantangan dalam integrasi PLTS ke dalam sistem jaringan kelistrikan. Selain itu variasi produksi PLTS disebabkan oleh salah satu faktornya cuaca.

B. Beban Rumah Tangga

Beban rumah tangga selama periode simulasi menunjukkan pola yang fluktuatif dengan beberapa puncak yang terjadi pada waktu-waktu tertentu. Grafik pola beban rumah tangga ditunjukkan pada Gambar (X). Beban dasar berada pada kisaran 0,4 – 0,5 kW, sementara beban puncak sekitar 2,5 kW.

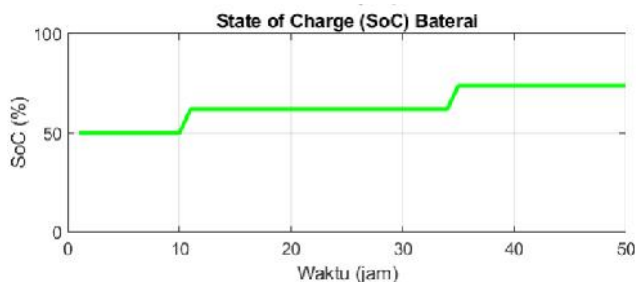


Gambar 4. Grafik Beban Rumah Tangga

Puncak beban terjadi pada beberapa periode, meliputi jam ke-5 hingga jam ke-8, jam ke-15 hingga jam ke-20, jam ke-30 hingga jam ke-33, dan jam ke-40 hingga jam ke-45. Pola tersebut merepresentasikan aktivitas penghuni rumah yang umumnya tinggi di pagi hari, sore hingga malam, dan akhir pekan. Fluktuasi beban yang signifikan menimbulkan tantangan pada pengelolaan energi di tingkat rumah tangga, terutama ketika dikombinasikan dengan sifat intermiten PLTS. Sistem mini smart grid dengan kontroler *fuzzy* dirancang untuk mengatasi tantangan ini dengan mengoptimalkan aliran energi pada berbagai komponen sistem.

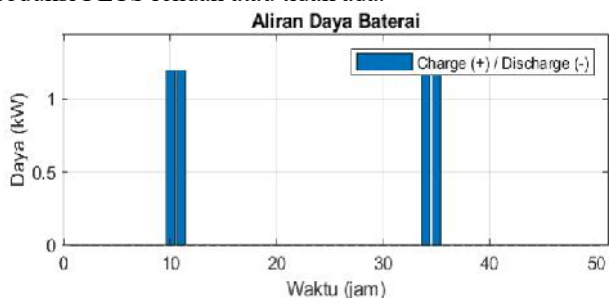
C. State of Charge dan Aliran Daya Baterai

Soc baterai dimulai dari 50% dan mengalami perubahan sesuai dengan aliran daya dari dan ke baterai. SOC baterai cenderung meningkat selama periode simulasi, mencapai 75%. Grafik perubahan Soc ditunjukkan melalui Gambar 5.



Gambar 5. Grafik SoC Baterai

Peningkatan SoC menunjukkan bahwa sistem berhasil mengoptimalkan energi dari PLTS guna mengisi baterai saat produksi PLTS melebihi kebutuhan beban. Hal ini sangat penting karena untuk memastikan ketersediaan energi saat produksi PLTS rendah atau tidak ada.



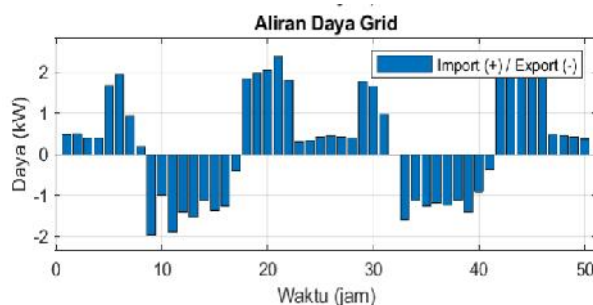
Gambar 6. Grafik Aliran Daya Baterai

Berdasarkan grafik aliran daya baterai pada Gambar 6, pengisian (*charging*) daya baterai terjadi dua periode, sekitar jam ke-10 dan jam ke-35 dengan daya pengisian 1,2 kW. Hal ini konsisten dengan peningkatan SoC yang ditunjukkan pada grafik SoC pada Gambar 5. Berdasarkan perbandingan kedua grafik tersebut menariknya tidak ada aktivitas pengosongan baterai (*discharging*). Hal itu menunjukkan bahwa *fuzzy logic* lebih memprioritaskan penggunaan energi PLTS secara langsung dan impor dari grid menggunakan daya dari baterai.

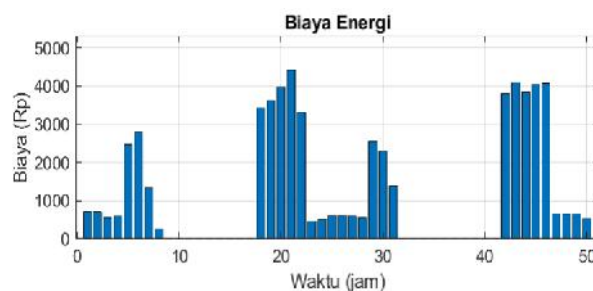
Strategi ini didasarkan pada pertimbangan guna menjaga umur baterai dengan menghindari siklus pengisian dan pengosongan yang terlalu sering. Selain itu didasarkan pada tarif listrik PLN yang relatif rendah pada waktu-waktu tertentu. Sehingga lebih ekonomis melakukan impor dari grid daripada energi dari baterai. Pengelolaan SoC baterai merupakan aspek krusial pada sistem penyimpanan energi. Oleh karena itu FLC digunakan untuk memprioritaskan kesehatan baterai atau optimasi biaya berdasarkan aturan yang ditetapkan.

D. Aliran Daya dan Biaya Energi

Aliran daya pada bagian ini merupakan penjelasan mengenai periode impor yang direpresentasikan nilai positif (+) dan ekspor yang direpresentasikan dengan nilai negatif (-). Sesuai dengan yang ditunjukkan oleh Gambar 7, impor terjadi pada malam hari pada saat beban tinggi tetapi produksi PLTS rendah, seperti jam ke-1 sampai jam ke-7, jam ke-18 sampai jam ke-25, dan jam ke-40 sampai jam ke-48. Ekspor ke grid terjadi pada waktu siang hari ketika produksi PLTS melebihi kebutuhan beban dan kondisi baterai terisi penuh. Kondisi ini terjadi pada jam ke-10 sampai jam ke-15 dan jam ke-35 sampai jam ke-40.



Gambar 7. Grafik Aliran Daya Grid

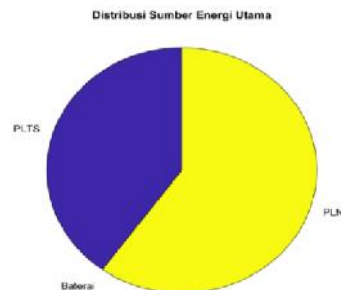


Gambar 8. Grafik Biaya Energi (PLN)

Grafik biaya energi menunjukkan bahwa biaya terjadi saat terdapat impor energi, dengan nilai yang proporsional terhadap jumlah energi dan tarif layanan pada waktu tersebut. Biaya tertinggi terjadi pada periode dengan impor tinggi dan tarif tinggi. Periode tersebut terjadi pada jam ke-18 hingga jam ke-22, dan jam ke-40 hingga jam ke-45. Total biaya energi selama periode sebesar Rp 60.061,00, relatif rendah karena adanya kontribusi energi dari PLTS yang mengurangi kebutuhan impor. Apabila tanpa PLTS, maka total biaya energi akan jauh lebih tinggi karena seluruh kebutuhan beban harus dipenuhi dari grid.

E. Distribusi Energi Utama

Gambar 9 menunjukkan mengenai distribusi energi utama dengan representasi warna kuning merupakan kontribusi dari jaringan PLN sebesar 60%. Warna biru merepresentasikan kontribusi energi dari PLTS sebesar 40%. Baterai tidak memiliki kontribusi sebagai energi utama karena hasil analisis sebelumnya menunjukkan tidak ada aktivitas pengosongan baterai selama periode berjalan.



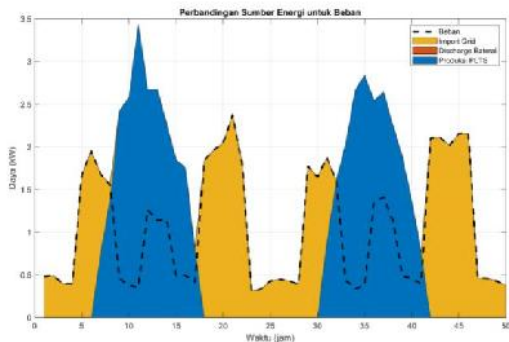
Gambar 9. Distribusi Energi Utama

Meskipun kontribusi PLTS sebesar 40% hasil ini cukup signifikan. Dikarenakan PLTS bersifat yang intermiten dari energi surya yang hanya tersedia pada siang hari. Berkat optimasi lebih lanjut pada sistem kendali dan kapasitas

komponen, kontribusi PLTS dapat ditingkatkan, sehingga mengurangi ketergantungan pada jaringan PLN dan menurunkan biaya energi

F. Perbandingan Sumber Energi dengan Beban

Gambar 10 menunjukkan perbandingan kontribusi sumber energi dalam memenuhi kebutuhan beban rumah tangga selama periode operasi sistem.



Gambar 10. Grafik Perbandingan Sumber Energi dengan Beban

Berdasarkan gambar tersebut warna biru merepresentasikan produksi PLTS, warna kuning merepresentasikan impor dari jaringan yang dominan pada malam hari dan pagi hari, warna oranye merepresentasikan proses discharge baterai yang tidak terlihat. Hal itu menandakan bahwa baterai jarang beroperasi untuk menyuplai beban secara langsung. Grafik tersebut menunjukkan bahwa pada beberapa periode produksi PLTS melebihi beban yang direpresentasikan oleh area biru diatas garis putus-putus hitam. Area tersebut menunjukkan adanya kelebihan energi yang dapat disimpan dalam baterai untuk diekspor ke grid.

V. KESIMPULAN

Sistem manajemen energi PLTS mini smart grid skala rumah tangga dengan intergrasi *Battery Management System (BMS)* berbasis *fuzzy logic* dinilai berhasil untuk perancangan dan evaluasi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa selama periode pengujian PLTS menghasilkan energi sebesar 44,14 kWh untuk mendukung beban sebesar 52,67 kWh. Selama pengujian sistem memerlukan impor energi dari jaringan PLN sebesar 35,52 kWh. Pada kondisi surplus, sistem mampu mengekspor energi ke jaringan sebesar 22,19 kWh. Kontroler fuzzy memprioritaskan pemanfaatan energi PLTS secara langsung dan menjaga baterai tetap berada pada kondisi aman. Sesuai dengan peningkatan SoC dari 50% menjadi 75% tanpa terjadi proses pengosongan baterai.

Secara keseluruhan penerapan *fuzzy logic control* pada sistem manajemen baterai terbukti mampu meningkatkan pemanfaatan energi surya, menjaga kesehatan baterai, serta menurunkan biaya energi rumah tangga menjadi Rp 60.061,00 selama pengujian. Hal ini menunjukkan bahwa sistem yang diusulkan berpotensi menjadi solusi aplikatif dalam mendukung pengembangan PLTS rumah tangga yang lebih andal dan selaras dengan transisi energi nasional.

REFERENSI

[1] L. Cozzi, "An Energy Sector Roadmap to Net Zero Emissions in Indonesia," 2022. [Online]. Available: www.iea.org

[2] B. P. Resosudarmo, J. F. Rezki, and Y. Effendi, "Prospects of Energy Transition in Indonesia," vol. 4918, 2023, doi: 10.1080/00074918.2023.2238336.

[3] S. Nurbaya, "Indonesia Long-Term Strategy for Low Carbon and Climate Resilience 2050 (Indonesia LTS-LCCR 2050)," 2021.

[4] A. Prasetyo, "Strategi Implementasi RUEN-RUED Untuk Mewujudkan Transisi Energi Indonesia," 2022, pp. 1–27.

[5] F. Ulfatun, B. Manumayoso, E. Ayu, and P. Adi, "Implementasi Peraturan Presiden (PERPRES) No . 22 Tahun 2017 Tentang Rencana Umum Energi Nasional (RUEN)," vol. 3, no. 1, pp. 13–17, 2025.

[6] M. Habib, E. Bollin, and Q. Wang, "Battery Energy Management System Using Edge-Driven Fuzzy Logic," *Energies*, vol. 16, no. 8, 2023, doi: 10.3390/en16083539.

[7] I. Sulistiyowati, J. Jamaaluddin, I. Anshory, Y. W. Pratama, and S. Romadhoni, "Optimal Power Distribution Strategy for Intermittent Solar-Powered Hybrid Energy Storage Systems: Strategi Distribusi Daya yang Optimal untuk Sistem Penyimpanan Energi Hibrida Bertenaga Surya yang Bersifat Intermitten," *Acad. Open*, vol. 8, no. 1 SE-Energy, p. 10.21070/acopen.8.2023.7283, Aug. 2023, doi: 10.21070/acopen.8.2023.7283.

[8] Zahir Zulkifly, S. H. Yusoff, Nor Liza Tumeran, and Nur Syazana Izzati Razali, "Battery Energy Storage System (BESS) Modeling for Microgrid," *IJUM Eng. J.*, vol. 24, no. 1 SE-Electrical, Computer and Communications Engineering, pp. 57–74, Jan. 2023, doi: 10.31436/iijumej.v24i1.2435.

[9] J. Nelson, "Battery Management Systems for Renewable Energy Microgrids Author," Oct. 2025.

[10] T. Elektro and S. Itn, "SIMULASI SISTEM MANAGEMENT ENERGI BATERAI DAYA PLTS," vol. 08, pp. 169–182, 2024.

[11] A. Shofa and M. R. Adi, "MENGUNAKAN DATA PENGUKURAN DI GARDU INDUK," pp. 36–45, 2025, doi: 10.30659/pulse-jeib.

[12] H. Singh and E. Annapoorna, "Fuzzy logic-based energy management in smart grids for renewable integration," *MATEC Web Conf.*, vol. 392, p. 01191, Mar. 2024, doi: 10.1051/mateconf/202439201191.

[13] O. Ibrahim *et al.*, "Development of fuzzy logic-based demand-side energy management system for hybrid energy sources," *Energy Convers. Manag. X*, vol. 18, p. 100354, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.ecmx.2023.100354.

[14] M. A. Alghassab, "Fuzzy-based smart energy management system for residential buildings in Saudi Arabia: A comparative study," *Energy Reports*, vol. 11, pp. 1212–1224, Jun. 2024, doi: 10.1016/j.egy.2023.12.039.

[15] P. Powroźnik, P. Szcześniak, and M. Suliga, "Fuzzy Logic in Smart Meters to Support Operational Processes in Energy Management Systems," *Electronics*, vol. 14, no. 12, p. 2336, Jun. 2025, doi: 10.3390/electronics14122336.

[16] P. Dimitroulis and M. Alamaniotis, "A fuzzy logic energy management system of on-grid electrical system for residential prosumers," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 202, p. 107621, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.epsr.2021.107621.

[17] E. Hossain, H. Faruque, M. Sunny, N. Mohammad, and N. Nawar, "A Comprehensive Review on Energy Storage Systems: Types, Comparison, Current Scenario, Applications, Barriers, and Potential Solutions, Policies, and Future Prospects," *Energies*, vol. 13, no. 14, p. 3651, Jul. 2020, doi: 10.3390/en13143651.

[18] A. Kudzin, S. Takayama, and A. Ishigame, "Energy Management Systems (EMS) for a Decentralized Grid: A Review and Analysis of the Generation and Control Methods Impact on EMS Type and Topology," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 19, no. 1, pp. 1–29, 2025, doi: 10.1049/rpg2.70008.

[19] B. Zine, H. Bia, A. Benmouna, M. Becherif, and M. Iqbal, "Experimentally Validated Coulomb Counting Method for Battery State-of-Charge Estimation under Variable Current Profiles," *Energies*, vol. 15, no. 21, p. 8172, Nov. 2022, doi: 10.3390/en15218172.

[20] Q. H. Altaf, "Aalborg Universitet Smart Home Energy Management System - A Review Publication date: Smart Home Energy Management System - A Review," 2022.

[21] T. J. ROSS, *Fuzzy Logic With Engineering Application*. 2010.

[22] Ö. C. KIVANÇ, B. T. AKGÜN, S. BİLGİN, S. B. ÖZTÜRK, S. BAYSAN, and R. N. TUNCA, "Residential energy management system based on integration of fuzzy logic and simulated annealing," *Turkish J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 30, no. 4, pp. 1539–1554,

- May 2022, doi: 10.55730/1300-0632.3864.
- [23] M. A. A. H. Arigo, Sofi Berliana Rizky, Zainu Rafsanjani, Isa Rachman, Noorman Rinanto, and Agus Khumaidi, "Optimasi Penghematan Energi Listrik Menggunakan Metode Fuzzy Logic Pada Sistem Pendingin Udara Berbasis IoT." *J. Elektron. dan Otomasi Ind.*, vol. 11, no. 2, pp. 363–375, Jul. 2024, doi: 10.33795/elkolind.v11i2.5467.
- [24] M. Ula, A. Rusadi, and M. Daud, "Enhancing Resource Efficiency in Urban Agriculture: A GA-Fuzzy Logic IoT-Based Smart Hydroponic Greenhouse," *J. Artif. Intell. Softw. Eng.*, vol. 5, no. 3, pp. 1254–1264, 2025, doi: 10.30811/jaise.v5i3.7799.
- [25] X. Zhang and J. Jiang, "Measurement, modeling, reduction of decision-theoretic multigranulation fuzzy rough sets based on three-way decisions," *Inf. Sci. (Ny).*, vol. 607, pp. 1550–1582, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.ins.2022.05.122.
- [26] A. K. Varshney and V. Torra, "Literature Review of the Recent Trends and Applications in Various Fuzzy Rule-Based Systems," *Int. J. Fuzzy Syst.*, vol. 25, no. 6, pp. 2163–2186, 2023, doi: 10.1007/s40815-023-01534-w.
- [27] F. A. Sihombing, "Kajian Fuzzy Metode Mamdani dan Fuzzy Metode Sugeno serta Implementasinya," *Innov. J. Soc. Sci. Res.*, vol. 4, no. 4, pp. 4940–4955, 2024.
- [28] F. Mamdani, K. Karyawan, and F. Logic, "Decision Support System for Employee Selection At the Central," vol. 1, no. 3, pp. 14–19, 2025.
- [29] D. Y. B. K. Teti, G. S. Mada, N. K. F. Dethan, and L. F. Obe, "Penentuan Metode Defuzzifikasi Terbaik Fuzzy Inference System Mamdani Dalam Diagnosa Pre-Eklampsia Pada Ibu Hamil," *J. Difer.*, vol. 6, no. 1, pp. 78–90, 2024, doi: 10.35508/jd.v6i1.12680.
- [30] P. N. Kanimalar and R. Balakumar, "The Art of Fuzzy: Crafting Defuzzification with Centroid of Maxima and Minima," *Int. J. Fuzzy Syst.*, 2025, doi: 10.1007/s40815-025-01996-0.
- [31] I. Microgrids, "and Industrial Microgrids," 2022.
- [32] J. A. Basantes, D. E. Paredes, J. R. Llanos, D. E. Ortiz, and C. D. Burgos, "Energy Management System (EMS) Based on Model Predictive Control (MPC) for an Isolated DC Microgrid," *Energies*, vol. 16, no. 6, pp. 1–22, 2023, doi: 10.3390/en16062912.
- [33] J. Lee and J. Won, "Enhanced Coulomb Counting Method for SoC and SoH Estimation Based on Coulombic Efficiency," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 15449–15459, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3244801.