

Analysis of Energy Supply Substitution from a Diesel Power Plant System to a Solar Power Plant System Based on Capacity Design for the Office Load of PT XYZ in Karimun Regency, Indonesia

Muhammad Iqbal^{1*}, Andre Kurniawan¹, Arwizet K¹, Yolli Fernanda¹

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Negeri Padang, INDONESIA

*Corresponding author: nuiqbal0203@gmail.com

Received June 15th 2026; Revised June 29th 2026; Accepted July 14th 2026

Abstract

The dependence of the office load at PT XYZ on Diesel Power Plants (DPPs) in a mini-grid electricity system creates the need for an alternative energy supply that is more efficient, reliable, and compatible with local solar potential. The present study aims to design and analyze the performance of a battery-based off-grid Solar Photovoltaic Power Plant (SPP) to independently supply office electricity demand by considering the load profile, photovoltaic module configuration, controller/MPPT converter, battery capacity, module orientation, and system losses. The method consists of daily load profile analysis, the use of Meteonorm meteorological data for the Sungailimau site, fixed module orientation with a tilt angle of 5° and an azimuth of 0°, and stand-alone system simulation using PVsyst V8.1.2. The proposed system consists of 200 Longi Solar modules rated at 560 Wp, with a total installed capacity of 112 kWp. The solar power system is designed in a modular configuration consisting of 4 PV blocks. Each block consists of 5 strings connected in parallel, with each string comprising 10 PV modules connected in series. The total system configuration consists of 20 strings, an MPPT converter-based controller, and a BYD Box Premium HVM 22.1 lithium-ion LFP battery storage system with 368,6 kWh of stored energy. The simulation results show 105.989 kWh/year of useful solar energy, 151.191 kWh/year of available solar energy, 49.213 kWh/year of unused energy, a performance ratio of 56,64%, a solar fraction of approximately 92,33%, and 1.856 kWh/year missing energy. The results show that a battery-based off-grid solar power system design is capable of meeting the majority of an office's energy needs. This study concludes that off-grid solar power systems can serve as a technical solution to reduce dependence on diesel power plants and contribute to the development of renewable energy systems in isolated power grids.

Keywords: Off-Grid Solar PV; PVsyst Simulation; Battery Storage; Diesel Generation; Mini-Grid.

Analisis Substitusi Suplai Energi Sistem PLTD ke Sistem PLTS Berbasis Perancangan Kapasitas pada Beban Perkantoran PT XYZ Kabupaten Karimun, Indonesia

Abstrak

Penelitian ini dilatarbelakangi oleh ketergantungan beban perkantoran PT XYZ terhadap Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) pada sistem kelistrikan mini-grid, sehingga diperlukan alternatif suplai energi yang lebih efisien, andal, dan sesuai dengan potensi energi surya setempat. Penelitian ini bertujuan merancang dan menganalisis kinerja sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *off-grid* berbasis baterai untuk memenuhi kebutuhan energi beban perkantoran secara mandiri, dengan mempertimbangkan profil beban, konfigurasi modul *fotovoltaik*, *controller/MPPT converter*, kapasitas baterai, orientasi modul, serta rugi-rugi sistem. Metode penelitian dilakukan melalui analisis profil beban harian, penggunaan data meteorologi Meteoronorm pada lokasi Sungailimau, penentuan orientasi modul tetap dengan kemiringan 5° dan azimut 0° , serta simulasi sistem *stand-alone* menggunakan perangkat lunak *PVsyst V8.1.2*. Rancangan sistem menggunakan 200 modul Longi Solar berkapasitas 560 Wp dengan total daya terpasang 112 kWp, Sistem PLTS dirancang secara modular menjadi 4 blok PV. Setiap blok terdiri atas 5 string paralel, dengan masing-masing string tersusun dari 10 modul PV secara seri. Total konfigurasi sistem adalah 20 string, *controller* berbasis *MPPT converter*, dan baterai *lithium-ion LFP BYD Box Premium HVM 22.1* dengan kapasitas penyimpanan 368,6 kWh. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem menghasilkan energi berguna dari surya sebesar 105.989 kWh/tahun, energi surya tersedia 151.191 kWh/tahun, energi tidak terpakai 49.213 kWh/tahun, performance ratio 56,64%, solar fraction sekitar 92,33%, serta *missing energy* 1.856 kWh/tahun. Hasil tersebut menunjukkan bahwa rancangan PLTS *off-grid* berbasis baterai mampu memenuhi mayoritas kebutuhan energi perkantoran. Penelitian ini menyimpulkan bahwa PLTS *off-grid* dapat menjadi solusi teknis untuk mengurangi ketergantungan terhadap PLTD dan berkontribusi pada pengembangan sistem energi terbarukan di wilayah kelistrikan terisolasi.

Kata kunci: PLTS *Off-Grid*, Simulasi *PVsyst*, Penyimpanan Baterai, PLTD, *Mini-Grid*.

I. PENDAHULUAN

Sistem penyediaan energi listrik pada kawasan industri dengan jaringan terisolasi atau *mini-grid* memerlukan perencanaan yang mampu menjaga keandalan, kualitas daya, dan kontinuitas suplai karena proses pembangkitan dan pemenuhan beban dilakukan secara lokal. (Heryana et al., 2024) menjelaskan bahwa sistem penyediaan energi listrik tidak hanya berorientasi pada pemenuhan energi, tetapi juga pada keandalan, stabilitas, dan kualitas operasi sistem. Pada jaringan *mini-grid*, kebutuhan tersebut semakin penting karena konfigurasi pembangkit, sumber energi terbarukan, dan sistem penyimpanan energi berpengaruh terhadap kontinuitas pasokan listrik (Alamsyah et al., 2025). Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) masih banyak digunakan pada sistem kelistrikan terpencil karena mampu menyediakan pasokan listrik secara mandiri dan memiliki fleksibilitas terhadap perubahan beban (Samsurizal & Putra, 2023). (Mustayen et al., 2021) menjelaskan bahwa operasi mesin diesel pada *low-load conditions* dapat menyebabkan pembakaran kurang optimal dan penurunan kinerja mesin. Pada generator diesel *fixed-speed*, (Ghorbanzadeh et al., 2023) menunjukkan bahwa pembebanan rendah dapat menimbulkan *underperformance* yang ditandai dengan peningkatan *brake specific fuel consumption* dan penurunan performa termal. Sejalan dengan itu, (Elkelawy et al., 2025) menegaskan bahwa *specific fuel consumption* pada pembangkit diesel cenderung lebih tinggi pada beban rendah dan menurun ketika pembebanan mendekati kondisi optimal.

Beban listrik perkantoran memiliki pola konsumsi yang dipengaruhi oleh jam kerja, tingkat hunian, dan penggunaan peralatan operasional, sehingga profil beban perlu dijadikan dasar utama dalam perancangan sistem suplai energi. (Uddin et al., 2023) menjelaskan bahwa beban pada bangunan perkantoran umumnya bersifat variabel dan intermiten karena dipengaruhi oleh aktivitas pengguna serta penggunaan peralatan kantor yang tidak seragam. (Zhang et al., 2021) menegaskan bahwa karakteristik beban bangunan bersifat dinamis dan perlu direpresentasikan melalui pendekatan berbasis data agar perencanaan sistem lebih realistis. Pada PT XYZ, beban perkantoran memiliki kebutuhan energi sekitar 345–370 kWh/hari pada hari kerja, sehingga diperlukan sistem suplai yang mampu menyesuaikan kapasitas pembangkitan dengan kebutuhan energi aktual. Karakteristik beban yang dominan pada siang hari membuka peluang pemanfaatan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) untuk mengurangi operasi PLTD, sebagaimana (Baranda Alonso et al., 2021) dan (Muhammad Ridho Rohman Zuhri et al., 2025) menunjukkan bahwa integrasi energi surya pada sistem berbasis diesel dapat menurunkan konsumsi bahan bakar, biaya energi, dan emisi karbon. Namun, perancangan PLTS tetap harus mempertimbangkan kesesuaian antara profil beban dan produksi energi agar tidak terjadi *mismatch* kapasitas maupun penurunan keandalan akibat penetrasi energi surya yang tidak terkendali (Abdulrazzaq et al., 2025; Fernandez et al., 2024).

PLTS *off-grid* berbasis baterai menjadi alternatif yang relevan untuk beban perkantoran pada sistem *mini-grid* karena energi surya dapat dimanfaatkan sebagai sumber suplai utama, sedangkan baterai berfungsi menjaga kontinuitas pasokan ketika produksi fotovoltaik menurun atau tidak tersedia. (Kafando et al., 2024) menjelaskan bahwa sistem pembangkit otonom berbasis sumber energi fluktuatif membutuhkan sistem penyimpanan energi untuk meningkatkan keandalan suplai, khususnya pada wilayah terisolasi. Perancangan sistem tersebut perlu mempertimbangkan keseimbangan antara produksi energi PLTS, kebutuhan beban, kapasitas penyimpanan, batas operasi baterai, serta rugi-rugi sistem agar tidak terjadi kelebihan produksi maupun defisit suplai. (Bala et al., 2024) menunjukkan bahwa daya keluaran modul fotovoltaik sangat dipengaruhi oleh intensitas radiasi matahari, sedangkan (Mohammad & Al-Shohani, 2022) menegaskan bahwa kenaikan temperatur modul dapat menurunkan tegangan keluaran dan daya maksimum. Oleh karena itu, estimasi produksi energi PLTS perlu dianalisis dengan memperhitungkan radiasi, temperatur, orientasi modul, kapasitas komponen, dan faktor kehilangan energi sistem. Dalam konteks penelitian ini, simulasi PVsyst digunakan untuk mengevaluasi kapasitas PLTS, kebutuhan baterai, performa sistem, rugi-rugi energi, dan kecukupan suplai terhadap profil beban perkantoran secara lebih realistis.

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa kajian sistem *stand-alone* berbasis penyimpanan energi masih banyak berfokus pada metode *sizing*, manajemen energi, dan evaluasi keandalan secara umum, sehingga penerapan spesifik pada PLTS *off-grid* berbasis baterai untuk beban perkantoran di kawasan industri *mini-grid* masih perlu dikaji lebih lanjut. (Kafando et al., 2024) membahas pentingnya sistem penyimpanan energi, *autonomy*, SOC, DOD, dan manajemen energi pada sistem *stand-alone*, tetapi kajian tersebut belum spesifik pada rancangan PLTS *off-grid* untuk beban perkantoran dengan simulasi PVsyst. Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan menganalisis sistem PLTS *off-grid* berbasis baterai pada beban perkantoran PT XYZ melalui simulasi PVsyst. Analisis dilakukan untuk menentukan kapasitas sistem, konfigurasi modul fotovoltaik, kebutuhan baterai, estimasi produksi energi, rugi-rugi sistem, serta kecukupan suplai terhadap profil beban. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi teknis dalam perancangan PLTS *off-grid* berbasis kebutuhan energi aktual dan menjadi referensi pengembangan energi terbarukan pada sistem kelistrikan terisolasi yang masih bergantung pada PLTD.

II. METODE PENELITIAN

1. Pendekatan Penelitian dan Lokasi Studi

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif analitis-deskriptif berbasis perancangan dan simulasi energi untuk mengevaluasi kemampuan sistem PLTS *off-grid* berbasis baterai dalam memenuhi kebutuhan listrik beban perkantoran. Pendekatan kuantitatif digunakan karena seluruh parameter utama dianalisis dalam bentuk data numerik, seperti kebutuhan energi beban, daya beban, potensi radiasi surya, kapasitas modul fotovoltaik, kapasitas baterai, serta hasil produksi energi sistem.



Gambar 1. Lokasi Studi Perancangan PLTS *Off-Grid*
(Sumber: Google Earth Pro, diolah penulis, 2026)

Lokasi studi berada di koordinat 0.884109° , 103.395539° , dengan objek penelitian difokuskan pada beban perkantoran yang pada kondisi eksisting masih disuplai oleh PLTD sebagai sumber energi utama. Sistem PLTD diposisikan sebagai kondisi eksisting, sedangkan sistem yang dirancang dalam penelitian ini adalah PLTS *stand-alone* berbasis baterai yang dianalisis untuk mengetahui kecukupan suplai energi terhadap profil beban perkantoran.

2. Data Penelitian dan Penyusunan Profil Beban

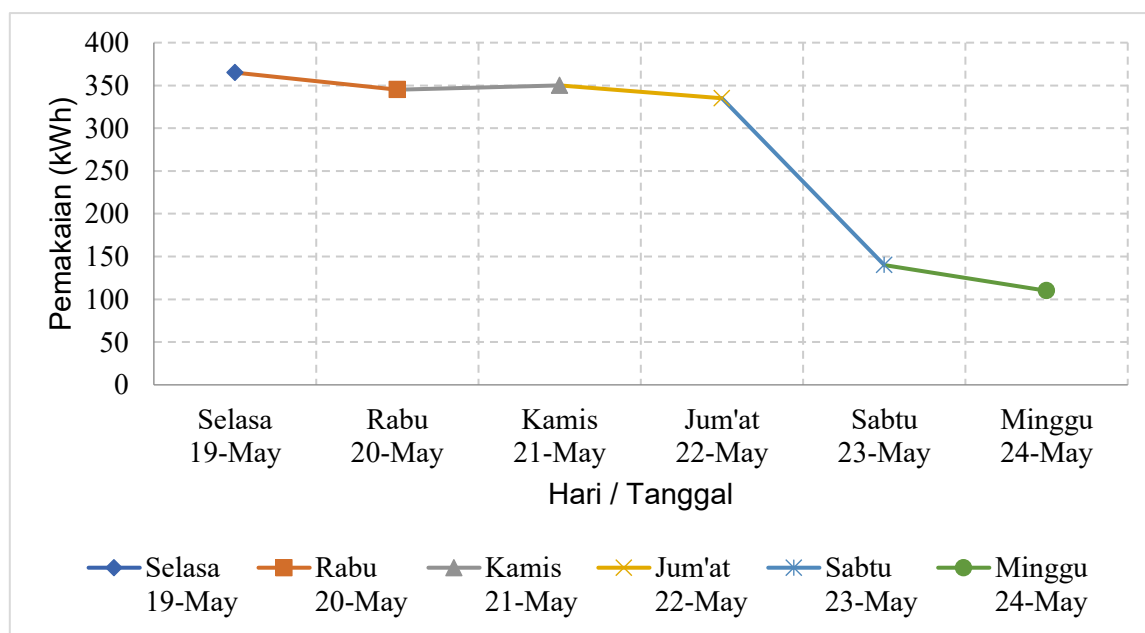
Data penelitian disusun untuk merepresentasikan kebutuhan energi beban, potensi sumber energi surya, serta parameter teknis yang diperlukan dalam simulasi PLTS *off-grid* berbasis baterai. Data primer mencakup konsumsi energi perkantoran, daya beban, jam operasional, hasil observasi, wawancara, dan inventarisasi peralatan listrik, sedangkan data sekunder mencakup radiasi surya, temperatur, data Meteorologi, spesifikasi modul fotovoltaik, baterai, *controller/MPPT converter*, parameter rugi-rugi, dan keluaran simulasi PVsyst. Seluruh data tersebut digunakan untuk menyusun profil beban harian, membangun model sistem, serta mengevaluasi kecukupan suplai energi terhadap kebutuhan beban perkantoran.

Tabel 1. Jenis Data, Sumber Data, dan Kegunaan

Jenis Data	Sumber Data	Kegunaan
Konsumsi energi listrik perkantoran	Data internal perusahaan	Menentukan kebutuhan energi harian dan profil beban sistem
Daya beban perkantoran	Data panel/observasi perhitungan beban	Menentukan kebutuhan kapasitas inverter dan batas daya sistem
Jam operasional kantor	Observasi/data internal	Menyusun pola beban siang, malam, weekday, dan weekend

Jenis Data	Sumber Data	Kegunaan
Data radiasi surya	GSA dan PVGIS	Membandingkan potensi energi surya lokasi
Data Meteonorm 9.0	PVsyst	Input utama simulasi sistem PLTS off-grid
Spesifikasi modul PV	Datasheet/database PVsyst	Menentukan kapasitas dan konfigurasi array PV
Spesifikasi baterai	Datasheet/asumsi teknis/PVsyst	Menentukan kapasitas storage, SOC, DOD, dan autonomy
Controller/MPPT	PVsyst universal controller	Mengatur konversi energi PV ke sistem baterai
Inverter off-grid	Perhitungan manual/datasheet	Menentukan kapasitas inverter berdasarkan daya puncak beban
Parameter losses	PVsyst/literatur teknis	Menghitung rugi-rugi sistem dan performa energi
Hasil simulasi PVsyst	Output PVsyst	Menganalisis produksi energi, unmet load, unused energy, SOC baterai, dan rugi-rugi sistem

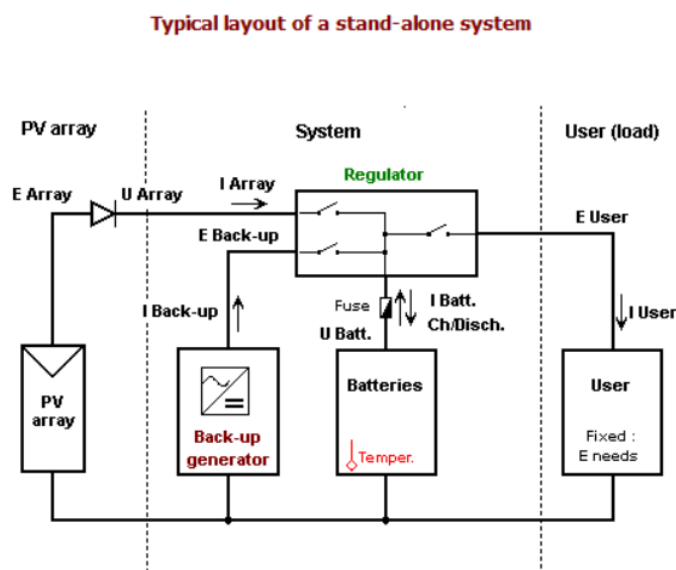
Profil beban harian disusun dengan mengonversi hasil inventarisasi beban per ruangan menjadi distribusi daya per jam selama 24 jam. Penyusunan profil dilakukan dengan membedakan pola konsumsi hari kerja dan akhir pekan, karena kebutuhan energi perkantoran berada pada rentang 345–370 kWh/hari pada hari kerja dan 110–140 kWh/hari pada akhir pekan. Profil tersebut kemudian dimasukkan ke menu *User's Needs* pada PVsyst melalui pengaturan *Daily Profile* dan *Weekly Modulation*, sehingga simulasi tidak hanya merepresentasikan total energi harian, tetapi juga perubahan beban berdasarkan waktu operasi kantor dan beban dasar yang tetap bekerja di luar jam kerja.



Gambar 2. Grafik Profil Beban Harian

3. Perancangan dan Pemodelan PLTS *Off-Grid*

Pemodelan sistem PLTS *off-grid* dilakukan menggunakan mode *Standalone* pada PVsyst, sehingga sistem direpresentasikan sebagai hubungan antara *PV array*, *controller/MPPT converter*, baterai, dan beban pengguna. Skema ini digunakan untuk menggambarkan aliran energi dari modul fotovoltaik menuju beban dan sistem penyimpanan, dengan baterai berfungsi sebagai penyangga energi ketika produksi PV lebih rendah daripada kebutuhan beban. Setelah model dasar terbentuk, parameter teknis sistem dimasukkan melalui pengaturan orientasi modul, konfigurasi *sub-array*, kapasitas *storage*, serta rugi-rugi sistem agar simulasi dapat merepresentasikan kondisi operasi PLTS *off-grid* secara lebih realistis.



Gambar 3. *Simplified Sketch Stand Alone System*

4. Simulasi Pvsyst dan Evaluasi Kinerja System

Simulasi sistem dilakukan menggunakan PVsyst V8.1.2 dengan mode *stand-alone system with batteries* dan resolusi simulasi per jam. Parameter input yang digunakan mencakup data lokasi, data meteorologi Meteonorm, profil beban pada menu *User's Needs*, orientasi modul, konfigurasi *PV array*, kapasitas baterai, *controller/MPPT converter*, *horizon*, *near shading*, dan *detailed losses*. Hasil simulasi kemudian dievaluasi melalui energi tersedia dari PLTS, energi yang disuplai ke beban, energi tidak terpenuhi, energi tidak terpakai, *performance ratio*, *solar fraction*, serta kondisi sistem penyimpanan baterai. Evaluasi ini digunakan untuk menilai apakah rancangan PLTS *off-grid* berbasis baterai mampu memenuhi kebutuhan energi perkantoran secara mandiri sesuai profil beban yang telah ditetapkan.

Tabel 2. Parameter Input Utama Simulasi PVsyst

Kelompok Parameter	Parameter yang digunakan	Fungsi
Lokasi dan meteorologi	Koordinat lokasi, elevasi, zona waktu, Meteonorm	Menentukan data radiasi, temperatur, dan kondisi geografis simulasi
Profil beban	<i>Daily profile</i> dan <i>weekly modulation</i>	Merepresentasikan pola kebutuhan energi hari kerja dan akhir pekan
Orientasi sistem	Tipe bidang, sudut kemiringan, azimuth, horizon, <i>near shading</i>	Menentukan radiasi efektif yang diterima bidang modul

Kelompok Parameter	Parameter yang digunakan	Fungsi
Sistem PV	Jenis modul, kapasitas array, jumlah modul, konfigurasi string	Membentuk kapasitas pembangkitan sistem PLTS
Sistem penyimpanan	Jenis baterai, tegangan sistem, kapasitas baterai, batas SOC	Menentukan kemampuan penyimpanan dan kontinuitas suplai energi
Perangkat konversi	<i>Universal controller / MPPT converter</i>	Mengatur aliran energi dari PV menuju baterai dan beban
Rugi-rugi sistem	Termal, <i>soiling</i> , LID, <i>mismatch</i> , kabel, IAM, dan <i>converter loss</i>	Mengoreksi produksi energi agar mendekati kondisi operasi aktual

Tabel 3. Parameter Evaluasi Hasil Simulasi *PVsyst*

Parameter Hasil Simulasi	Satuan	Fungsi Evaluasi
<i>Available solar energy</i>	kWh/tahun	Menunjukkan total energi surya yang tersedia dari sistem PV sebelum seluruh energi dimanfaatkan oleh beban
<i>Useful energy from solar</i>	kWh/tahun	Menunjukkan energi surya yang benar-benar dapat dimanfaatkan sistem
<i>Energy supplied to user</i>	kWh/tahun	Menilai jumlah energi yang berhasil disuplai ke beban perkantoran
<i>Energy need of the user</i>	kWh/tahun	Menunjukkan total kebutuhan energi beban selama periode simulasi
<i>Missing energy</i>	kWh/tahun	Menilai energi beban yang tidak dapat dipenuhi oleh sistem
<i>Loss of load</i>	%	Menilai persentase waktu ketika sistem tidak mampu memenuhi kebutuhan beban
<i>Unused energy</i>	kWh/tahun	Menunjukkan energi berlebih yang tidak dapat digunakan atau disimpan, umumnya ketika baterai penuh
<i>Performance Ratio (PR)</i>	%	Menilai performa sistem terhadap potensi energi teoritis yang diterima modul
<i>Solar fraction</i>	% / rasio	Menilai kontribusi energi surya terhadap total kebutuhan beban
<i>Battery State of Charge (SOC)</i>	%	Mengevaluasi kondisi pengisian dan pengosongan baterai selama operasi
<i>Battery efficiency loss</i>	%	Menilai rugi-rugi energi pada proses penyimpanan baterai
<i>Converter loss</i>	%	Menilai rugi-rugi pada perangkat konversi daya/controller
Rugi-rugi temperatur	%	Menilai penurunan energi akibat temperatur operasi modul
Rugi-rugi <i>shading</i>	%	Menilai pengaruh <i>horizon</i> dan <i>near shading</i> terhadap radiasi efektif
Rugi-rugi <i>soiling</i> , LID, <i>mismatch</i> , dan kabel	%	Menilai akumulasi kehilangan energi teknis pada sisi array PV

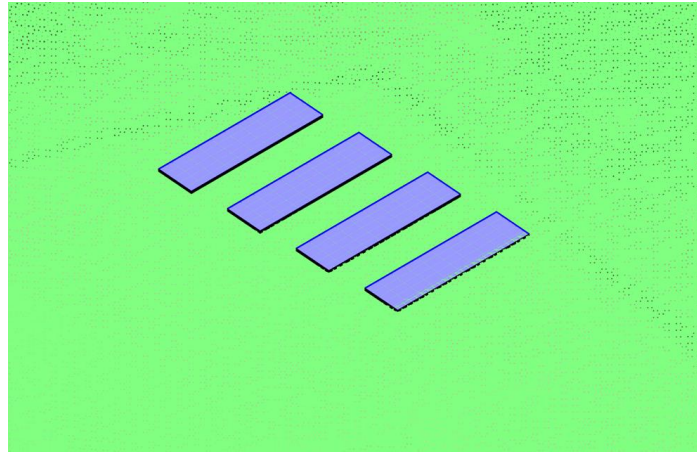
III. HASIL PENELITIAN

1. Hasil Konfigurasi Sistem PLTS *Off-Grid*

Hasil konfigurasi akhir simulasi PVsyst menunjukkan bahwa sistem PLTS *off-grid* berbasis baterai dirancang sebagai *standalone system with batteries* dengan kapasitas terpasang 101 kWp. Secara elektrik, sistem PV disusun dalam 20 string paralel dengan 9 modul seri per string, sedangkan pada pemodelan *near shading* susunan fisik array dibagi menjadi 4 shed, dengan masing-masing *shed* merepresentasikan 9S5P, sehingga total modul tetap berjumlah 180 unit. Sistem ini terdiri atas modul fotovoltaik, *controller/MPPT converter*, dan baterai lithium-ion LFP sebagai media penyimpanan energi, dengan rincian konfigurasi akhir ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Konfigurasi Akhir Sistem PLTS *Off-Grid*

Komponen/Parameter	Nilai/Spesifikasi
Jenis sistem	<i>Standalone system with batteries</i>
Lokasi simulasi	Sungailimau, Indonesia
Data meteorologi	Meteonorm 9.0, <i>synthetic</i>
Kapasitas PLTS terpasang	112 kWp
Jenis orientasi modul	<i>Fixed plane</i>
Kemiringan / azimut modul	5° / 0°
Jumlah <i>sheds</i>	4 unit
Jarak antar <i>sheds</i>	12,0 m
<i>Ground Coverage Ratio</i> (GCR)	48,1%
Produsen modul	Longi Solar
Tipe modul	LR5-72HPH-560M G2_30mm Frame
Daya nominal per modul	560 Wp
Jumlah modul	200 unit
Konfigurasi modul	4 blok, 5 string x 10 modul seri
Luas modul	517 m ²
Luas sel	477 m ²
Jenis <i>controller</i>	<i>Universal controller</i>
Teknologi <i>controller</i>	<i>MPPT converter</i>
Efisiensi maksimum / <i>EURO converter</i>	98,0% / 96,5%
Produsen baterai	BYD
Tipe baterai	Battery Box Premium HVM 22.1
Teknologi baterai	Lithium-ion, LFP
Jumlah baterai	20 unit paralel
Tegangan baterai	410 V
Kapasitas baterai	1000 Ah
Energi tersimpan baterai	368,6 kWh
Minimum SOC pengosongan	10,0%
Profil beban simulasi	<i>Daily profile dan weekly modulation</i>
Rata-rata kebutuhan beban	295 kWh/hari



Gambar 4. Pemodelan *near shading* 3D susunan array
PLTS *off-grid* pada *PVsyst*
(Sumber: *PVsyst* 8.1.2, diolah penulis, 2026)

2. Hasil Energi Tahunan dan Bulanan

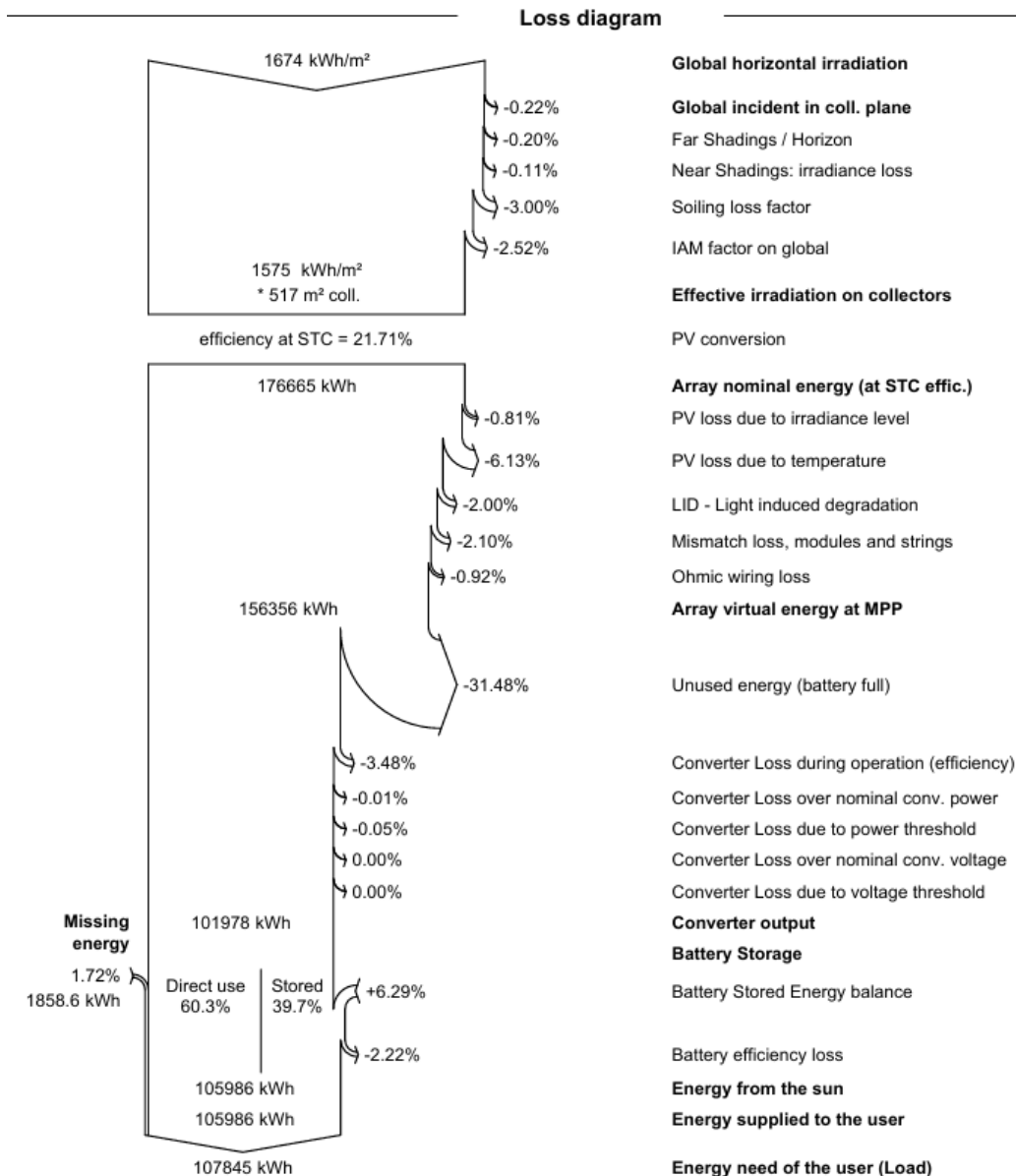
Hasil simulasi energi diperoleh dari keluaran utama *PVsyst* pada bagian *Main Results* dan *Balances and Main Results*. Data hasil mencakup energi surya tersedia, energi yang disuplai ke beban, energi tidak terpakai, energi tidak terpenuhi, *performance ratio*, dan *solar fraction*. Ringkasan hasil simulasi tahunan ditunjukkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Simulasi Energi Tahunan

Parameter Hasil Simulasi	Nilai	Satuan
<i>Available solar energy</i>	151.191	kWh/tahun
<i>Useful energy from solar</i>	105.989	kWh/tahun
<i>Energy supplied to user</i>	105.989	kWh/tahun
<i>Energy need of the user</i>	107.845	kWh/tahun
<i>Excess / unused energy</i>	49.213	kWh/tahun
<i>Missing energy</i>	1.856	kWh/tahun
<i>Loss of load</i>	1,8	%
<i>Specific production</i>	946	kWh/kWp/tahun
<i>Performance Ratio (PR)</i>	56,64	%
<i>Solar Fraction (SF)</i>	92,33	%
<i>Cycles State of Wear</i>	97,1	%
<i>Static State of Wear</i>	90	%

Berdasarkan hasil tahunan dan bulanan, nilai *missing energy* pada seluruh bulan bernilai 1.856 kWh, sedangkan total energi yang disuplai ke pengguna s dengan total kebutuhan energi beban, yaitu 107.845 kWh/tahun. Hasil ini menjadi dasar untuk bagian kecukupan suplai energi.

3. Hasil Rugi-Rugi Energi Sistem



Gambar 5. Loss Diagram

Hasil rugi-rugi energi sistem diperoleh dari *loss diagram* PVsyst yang menunjukkan alur energi mulai dari radiasi global horizontal hingga energi akhir yang disuplai ke beban. Pada simulasi ini, nilai *global horizontal irradiation* tahunan sebesar 1.674 kWh/m² menghasilkan *effective irradiation on collectors* sebesar 1.575 kWh/m². Energi nominal array pada kondisi STC tercatat sebesar 176.665 kWh, kemudian menjadi 156.356 kWh pada *array virtual energy at MPP*. Setelah melalui rugi-rugi sistem, keluaran *converter* sebesar 101.978 kWh dan energi akhir yang disuplai ke beban sebesar 105.986 kWh/tahun. Ringkasan rugi-rugi energi sistem ditunjukkan pada gambar 5.

4. Hasil Kecukupan Suplai Energi terhadap Beban

Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem PLTS *off-grid* berbasis baterai mampu memenuhi mayoritas kebutuhan energi beban perkantoran selama periode simulasi tahunan. Total kebutuhan energi beban (E_{Load}) tercatat sebesar 107.845 kWh/tahun dan 98,28% dapat disuplai oleh sistem dengan nilai energi ke pengguna (E_{User}) sebesar 105.989 kWh/tahun. Nilai energi tidak terpenuhi (E_{Miss}) pada setiap bulan adalah bervariasi, sehingga total *missing energy* tahunan bernilai 1.856 kWh/tahun dengan *loss of load* sebesar 1,8%. Nilai *solar fraction* tahunan tercatat sebesar 0,923 atau sekitar 92,33%, yang menunjukkan bahwa kontribusi energi surya terhadap kebutuhan beban berada pada tingkat yang cukup tinggi sesuai profil simulasi. Secara bulanan, nilai E_{User} berbeda dengan E_{Load} , karena pada beberapa bulan seperti Januari dan Desember memiliki *missing energy* yang cukup tinggi. Dengan demikian, hasil kecukupan suplai menunjukkan bahwa konfigurasi PLTS 112 kWp dengan baterai 368,6 kWh mampu menyuplai mayoritas energi perkantoran selama periode simulasi.

IV. PEMBAHASAN

1. Kesesuaian Konfigurasi Sistem terhadap Profil Beban

Konfigurasi sistem PLTS *off-grid* sebesar 112 kWp dengan 200 modul Longi Solar 560 Wp dalam susunan secara modular menjadi 4 blok PV. Setiap blok terdiri atas 5 string paralel, dengan masing-masing string tersusun dari 10 modul PV secara seri. Total konfigurasi sistem adalah 20 string dan baterai lithium-ion LFP berkapasitas penyimpanan 368,6 kWh dinilai sesuai terhadap profil beban perkantoran karena simulasi PVsyst tidak menggunakan beban konstan 295 kWh/hari, melainkan *daily profile* dan *weekly modulation* yang membedakan konsumsi hari kerja dan akhir pekan. Berdasarkan input profil beban PVsyst, total beban hari kerja adalah sekitar 361 kWh/hari dengan puncak daya 36–38 kW, sedangkan beban akhir pekan sekitar 131 kWh/hari dengan puncak sekitar 13 kW; kombinasi 5 hari kerja dan 2 hari akhir pekan menghasilkan rata-rata mingguan sekitar 295 kWh/hari. Nilai beban hari kerja tersebut masih berada dalam rentang kebutuhan energi aktual hasil inventarisasi, yaitu 345–370 kWh/hari, sehingga konfigurasi sistem tidak hanya diuji terhadap nilai rata-rata, tetapi juga terhadap pola beban tinggi pada hari kerja. Kesesuaian rancangan diperkuat oleh hasil simulasi tahunan yang menunjukkan *energy user* = 105.989 kWh dan *energy load* = 107.845 kWh/tahun, *missing energy* = 1.856 kWh/tahun, dan *loss of load* 1,8%, sehingga kapasitas PV dan baterai mampu mengikuti profil beban yang dimasukkan dalam simulasi selama periode satu tahun.

2. Kinerja Produksi Energi dan Kecukupan Suplai

Kinerja produksi energi sistem menunjukkan bahwa konfigurasi PLTS *off-grid* mampu menghasilkan *available solar energy* sebesar 151.191 kWh/tahun, dengan *useful energy from solar* sebesar 105.989 kWh/tahun dan *specific production* sebesar 946 kWh/kWp/tahun. Nilai E_{User} yang berbeda dengan E_{Load} , yaitu, menunjukkan bahwa masih ada dari kebutuhan energi beban pada profil simulasi hanya 98,28% yang bisa disuplai oleh sistem, sedangkan *missing energy* sebesar 1.856 kWh/tahun dan *loss of load* sebesar 1,8% menunjukkan adanya defisit suplai selama periode simulasi. Secara bulanan, E_{Miss} berbeda pada seluruh bulan, sehingga kecukupan suplai hanya terjadi pada bulan tertentu. Nilai *solar fraction* sebesar 92,33% memperkuat bahwa kebutuhan energi beban dapat mayoritas dapat dipenuhi oleh sistem PLTS berbasis baterai, sementara *performance ratio* sebesar 56,64% menunjukkan performa akhir sistem setelah memperhitungkan batas pemanfaatan energi, rugi-rugi konversi, penyimpanan baterai, temperatur, dan rugi teknis lainnya. Dengan demikian, hasil ini menjawab tujuan penelitian terkait estimasi produksi energi dan kecukupan suplai PLTS *off-grid* terhadap beban perkantoran, karena sistem tidak hanya menghasilkan energi tahunan yang cukup, tetapi juga mampu menyalurkan energi sesuai kebutuhan beban pada periode simulasi.

3. Rugi-rugi Energi dan Implikasi terhadap Performa Sistem

Nilai *performance ratio* sebesar 56,64% menunjukkan bahwa kinerja akhir sistem dipengaruhi oleh karakteristik operasi PLTS *off-grid* berbasis baterai, terutama karena tidak seluruh energi PV yang tersedia dapat dimanfaatkan langsung oleh beban atau disimpan ke baterai. Dari *loss diagram*, rugi terbesar berasal dari *unused energy* akibat baterai penuh sebesar 31,48%, yang menunjukkan adanya energi PV berlebih ketika produksi melebihi kebutuhan beban dan kapasitas penerimaan baterai pada saat tertentu. Rugi teknis lain yang memengaruhi energi keluaran meliputi rugi temperatur sebesar 6,13%, *converter loss during operation* sebesar 3,48%, *soiling loss* sebesar 3,00%, IAM sebesar 2,52%, LID sebesar 2,00%, *mismatch loss* sebesar 2,10%, *ohmic wiring loss* sebesar 0,92%, serta *battery efficiency loss* sebesar 2,22%. Secara aliran energi, radiasi global horizontal sebesar 1.674 kWh/m² menghasilkan iradiasi efektif pada kolektor sebesar 1.575 kWh/m², energi nominal array sebesar 176.665 kWh, energi array pada MPP sebesar 156.356 kWh, keluaran *converter* sebesar 101.978 kWh, dan energi akhir yang disuplai ke beban sebesar 105.989 kWh/tahun. Dengan demikian, PR yang diperoleh tidak hanya mencerminkan rugi teknis modul, tetapi juga batas pemanfaatan energi pada sistem *stand-alone*, khususnya ketika baterai telah penuh dan beban tidak dapat menyerap seluruh produksi PV.

4. Implikasi terhadap Sistem PLTD Eksisting

Hasil simulasi menunjukkan bahwa rancangan PLTS *off-grid* berbasis baterai memiliki implikasi teknis terhadap pengurangan ketergantungan beban perkantoran pada PLTD karena mayoritas kebutuhan energi pada profil simulasi dapat dipenuhi oleh sistem surya dan baterai. Nilai $E_{User} = 105.989$ kWh dan $E_{Load} = 107.845$ kWh/tahun, *missing energy* 1.856 kWh/tahun, dan *loss of load* 1.8% menunjukkan bahwa sistem mampu menyuplai kebutuhan beban selama periode simulasi. Pada sistem eksisting yang masih mengandalkan PLTD, kebutuhan energi perkantoran menyebabkan generator diesel tetap harus beroperasi untuk melayani beban harian, termasuk saat beban berada pada kondisi parsial. Dengan konfigurasi PLTS 112 kWp dan baterai 368,6 kWh, sistem dapat mengambil alih mayoritas suplai energi perkantoran sesuai profil beban yang dimodelkan, sehingga operasi PLTD berpotensi dikurangi terutama pada beban perkantoran yang dominan terjadi pada jam kerja. Namun, karena penelitian ini menggunakan skema PLTS *stand-alone* dalam simulasi PVsyst, hasil yang diperoleh menunjukkan kelayakan teknis suplai energi PLTS terhadap beban, bukan analisis operasional paralel PLTS-PLTD atau perhitungan langsung penghematan bahan bakar. Dengan demikian, kontribusi utama penelitian ini adalah memberikan rancangan teknis awal PLTS *off-grid* berbasis baterai yang dapat dijadikan dasar pengembangan sistem energi terbarukan pada kawasan industri *mini-grid* yang masih bergantung pada PLTD.

V. KESIMPULAN

Hasil perancangan dan simulasi menunjukkan bahwa, sistem PLTS *off-grid* berbasis baterai dapat dirancang untuk memenuhi kebutuhan energi beban perkantoran PT XYZ yang memiliki karakteristik konsumsi berbeda antara hari kerja dan akhir pekan. Profil beban yang dimasukkan ke PVsyst tidak berupa beban konstan, melainkan *daily profile* dan *weekly modulation* dengan rata-rata simulasi sebesar 295 kWh/hari, di mana beban hari kerja berada sekitar 361 kWh/hari dan masih sesuai dengan rentang kebutuhan aktual 345–370 kWh/hari. Konfigurasi akhir sistem terdiri atas PLTS berkapasitas 112 kWp menggunakan 200 modul Longi Solar 560 Wp. Sistem PLTS dirancang secara modular menjadi 4 blok PV. Setiap blok terdiri atas 5 string paralel, dengan masing-masing string tersusun dari 10 modul PV secara seri. Total konfigurasi sistem adalah 20 string, *controller/MPPT converter*, serta baterai lithium-ion LFP berkapasitas penyimpanan 368,6 kWh. Hasil simulasi menunjukkan energi surya tersedia sebesar 151.191 kWh/tahun, energi berguna dari surya sebesar 105.989 kWh/tahun, dan energi yang disuplai ke beban 105.989 kWh/tahun dengan kebutuhan beban, yaitu 107.845 kWh/tahun.

Nilai *missing energy* sebesar 1.856 kWh/tahun dan *loss of load* sebesar 1,8% menunjukkan bahwa sistem mampu memenuhi mayoritas kebutuhan energi perkantoran pada profil simulasi. Meskipun *performance ratio* tercatat sebesar 56,64%, nilai tersebut dipengaruhi oleh karakteristik sistem *stand-alone*, terutama adanya *unused energy* sebesar 49.213 kWh/tahun ketika produksi PV melebihi kebutuhan beban dan kapasitas penerimaan baterai. Dengan demikian, penelitian ini menyimpulkan bahwa rancangan PLTS *off-grid* berbasis baterai secara teknis mampu menjadi alternatif suplai energi mandiri bagi beban perkantoran dan dapat mengurangi ketergantungan terhadap PLTD pada sistem kelistrikan *mini-grid*, dengan catatan hasil penelitian ini masih terbatas pada analisis teknis berbasis simulasi PVsyst, bukan analisis operasi paralel PLTS-PLTD atau penghematan bahan bakar secara langsung.

Saran penelitian ini ditujukan kepada PT XYZ sebagai bahan pertimbangan teknis awal dalam pengembangan sistem energi terbarukan pada beban perkantoran. Perusahaan disarankan melakukan verifikasi lanjutan terhadap profil beban aktual melalui pengukuran energi harian dan beban puncak secara kontinu, terutama untuk memastikan kondisi beban maksimum sekitar 370 kWh/hari dapat tetap dipenuhi pada periode radiasi rendah. Sebelum implementasi, rancangan ini juga perlu dilanjutkan ke tahap *detail engineering design* yang mencakup perencanaan sistem proteksi, *grounding*, tata letak instalasi, sistem kontrol, spesifikasi perangkat konversi daya, serta standar keselamatan instalasi. Selain itu, simulasi tambahan dengan skenario sensitivitas beban, degradasi modul, umur baterai, variasi cuaca, dan analisis ekonomi perlu dilakukan agar kelayakan teknis dapat dilengkapi dengan evaluasi biaya, potensi penghematan bahan bakar, dan strategi operasi terhadap sistem PLTD eksisting. Bagi peneliti selanjutnya, kajian ini dapat dikembangkan dengan membandingkan skema PLTS *off-grid*, PLTS-PLTD hibrida, dan PLTS dengan kapasitas baterai berbeda untuk memperoleh konfigurasi yang paling optimal dari sisi keandalan, efisiensi energi, dan biaya sistem.

VI. REFERENSI

- Abdulrazzaq, O. A., Almamori, A., Ibraheem, R. K., Atewi, S. N., & Hussein, H. S. (2025). Efficient Energy Solution: Implementing a Smart PV-Generator Hybrid System for Enhanced Fuel Savings. *Tikrit Journal of Engineering Sciences*, 32(3). <https://doi.org/10.25130/tjes.32.3.15>
- Alamsyah, H., Ardiansyah, & Sunardi. (2025). Review of Reliability of Solar Hybrid Generator System as Temporary Power Supply for Offshore Industry for Sustainable Platform Application of Environmentally Friendly Energy Sources. *Advance Sustainable Science, Engineering and Technology*, 7(1). <https://doi.org/10.26877/asset.v7i1.1116>
- Bala, A., Babatunde Alao, M., Oyedun, A. O., Omotayo Alabi, O., & Adamu, M. (2024). Performance Evaluation of a Solar Photovoltaic (PV) Module at Different Solar Irradiance. *International Journal of Engineering and Applied Sciences*, 16(2), 63–75. <https://doi.org/10.24107/ijeas.1430556>
- Baranda Alonso, J., Sandwell, P., & Nelson, J. (2021). The potential for solar-diesel hybrid mini-grids in refugee camps: A case study of Nyabiheke camp, Rwanda. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 44. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101095>
- Elkelawy, M., Draz, A. M., Seleem, H. E., & Hamouda, M. A. (2025). Performance Characteristics of Diesel Engine Power Plants: Efficiency, Emissions, and Operational Flexibility. *Pharos Engineering Science Journal*, 2(1), 1–11. <https://doi.org/10.21608/pesj.2025.352971.1009>
- Fernandez, M. I., Go, Y. I., Wong, D. M. L., & Früh, W. G. (2024). Review of challenges and key enablers in energy systems towards net zero target: Renewables, storage, buildings, & grid

- technologies. In *Heliyon* (Vol. 10, Number 23). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40691>
- Ghorbanzadeh, M., Issa, M., & Ilinca, A. (2023). Experimental Underperformance Detection of a Fixed-Speed Diesel–Electric Generator Based on Exhaust Gas Emissions. *Energies*, 16(8). <https://doi.org/10.3390/en16083537>
- Heryana, N., Soebagio, Atmonobudi, & Qamaruzzaman. (2024). Studi Peningkatan Kualitas Daya Sistem Distribusi Tenaga Listrik Di Daerah Terdepan, Tertinggal Dan Terluar Dengan Menggunakan Konfigurasi Transformator Delta-Wye. *Journal of Renewable Energy, Electrical Engineering, and Artificial Intelligence*, 1(1), 1–8.
- Kafando, J. G., Yamegueu, D., & Houdji, E. T. (2024). Review on sizing and management of stand-alone PV/WIND systems with storage. In *Heliyon* (Vol. 10, Number 18). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e38080>
- Mohammad, A. T., & Al-Shohani, W. A. M. (2022). Numerical and experimental investigation for analyzing the temperature influence on the performance of photovoltaic module. *AIMS Energy*, 10(5), 1026–1045. <https://doi.org/10.3934/energy.2022047>
- Muhammad Ridho Rohman Zuhri, Abdullah Umar, & Faiz Husnayain. (2025). Hybrid Power System Optimization for Cost and Emission Reduction: A Case Study from Indonesia. *International Journal of Electrical, Energy and Power System Engineering*, 8(2), 190–207. <https://doi.org/10.31258/ijeepse.8.2.190-207>
- Mustayen, A. G. M. B., Wang, X., Rasul, M. G., Hamilton, J. M., & Negnevitsky, M. (2021). Theoretical Investigation of Combustion and Performance Analysis of Diesel Engine under Low Load Conditions. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 838, Number 1). IOP Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/838/1/012013>
- Samsurizal, S., & Putra, A. (2023). Keandalan Jaringan Distribusi Di Pulau Panjang Dengan Pembangkit Listrik Tenaga Diesel. *SUTET*, 13(1), 23–34. <https://doi.org/10.33322/sutet.v13i1.1850>
- Uddin, M., Mo, H., Dong, D., Elsayah, S., Zhu, J., & Guerrero, J. M. (2023). Microgrids: A review, outstanding issues and future trends. In *Energy Strategy Reviews* (Vol. 49). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2023.101127>
- Zhang, L., Wen, J., Li, Y., Chen, J., Ye, Y., Fu, Y., & Livingood, W. (2021). A review of machine learning in building load prediction. *Applied Energy*, 285. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116452>