



**Analisis Perancangan Sistem Pembangkit
Listrik Tenaga Surya (PLTS) *Off-Grid* Skala
Rumah Tangga di Perumahan Aiko Residence
Menggunakan Perangkat Lunak PVSyst**

Tugas Akhir

Oleh:

Wahyu Supryanto Sihombing (4232101055)

**Program Studi Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi
Jurusan Teknik Elektro
Politeknik Negeri Batam
2026**

Pernyataan Keaslian Tugas Akhir

Saya yang bertandatangan dibawah ini menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya yang berjudul : “Analisis Perancangan Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *Off-Grid* Skala Rumah Tangga di Perumahan Aiko Residence Menggunakan Perangkat Lunak PV Syst” adalah **hasil karya sendiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diizinkan, dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri**. Semua referensi yang dikutip atau dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan saya ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Batam, 9 Juli 2026



Wahyu Supryanto Sihombing
NIM: 4232101055

Lembar Pengesahan

Tugas Akhir disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Sarjana Terapan Teknik (S.Tr.T)
di
Politeknik Negeri Batam

Oleh:
Wahyu Supryanto Sihombing (4232101055)
Tanggal Sidang: 9 Juli, 2026

Disetujui oleh :

Penguji 1



Ir. Fauzun Atabiq, S.T., M.Cs.
NIK: 110073

Pembimbing



Handri Toar, S.ST., M.Tr.T.
NIK: 113114

Penguji 2



Yusiran, S.Si., M.T.
NIK: 123294

Analisis Perancangan Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Off-Grid Skala Rumah Tangga di Perumahan Aiko Residence Menggunakan Perangkat Lunak PVsyst

Abstrak

Peningkatan kebutuhan energi listrik rumah tangga serta pemanfaatan energi terbarukan mendorong penerapan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *off-grid* sebagai alternatif penyediaan energi listrik yang mandiri dan berkelanjutan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kebutuhan energi listrik rumah tangga, menentukan konfigurasi komponen utama sistem PLTS *off-grid*, mengevaluasi kinerja sistem, serta menganalisis kebutuhan luas area pemasangan modul surya pada Perumahan Aiko Residence menggunakan perangkat lunak PVsyst. Metode penelitian dilakukan melalui pengumpulan data beban listrik rumah tangga, identifikasi potensi radiasi matahari, perancangan sistem, dan simulasi menggunakan PVsyst. Hasil penelitian menunjukkan kebutuhan energi listrik sebesar 10,824 kWh/hari atau 324,72 kWh/bulan dapat dipenuhi oleh sistem PLTS *off-grid* yang terdiri atas PV Array 3,30 kWp menggunakan 6 modul JA Solar 550 Wp, *battery bank* LiFePO₄ 48 V 560 Ah, MPPT *Solar Charge Controller*, dan inverter *off-grid* 48 VDC/220 VAC. Konfigurasi PV Array 3S2P memerlukan luas pemasangan sekitar 15,50 m² dengan dimensi total area modul sekitar 6,82 m × 2,27 m. Berdasarkan evaluasi luas efektif atap berbentuk limas sebesar 24,13 m², dengan panjang efektif setiap bidang atap sekitar 7,88 m dan lebar sekitar 3,20 m, dimensi PV Array masih berada dalam batas area pemasangan sehingga enam modul fotovoltaik dapat dipasang tanpa penambahan area instalasi, sehingga konfigurasi PV Array 3,30 kWp dapat diterapkan tanpa penambahan area pemasangan. Hasil simulasi menghasilkan produksi energi sebesar 3.788 kWh/tahun *Performance Ratio* (PR) sebesar 70,4%, *Solar Fraction* (SF) sebesar 95,9%, sehingga sistem yang dirancang dinilai memenuhi kebutuhan energi listrik rumah tangga serta layak diterapkan dari aspek teknis dan ekonomi.

Kata kunci: Analisis tekno-ekonomi, PLTS *off-grid*, *Performance Ratio*, PVsyst, *Solar Fraction*.

Analysis of the Design of an Off-Grid Solar Power Generation System (PLTS) on Household Scale in the Aiko Residence Housing Complex Using PVSyst Software

Abstract

The increasing demand for household electrical energy and the growing utilization of renewable energy sources have encouraged the implementation of off-grid photovoltaic (PV) systems as an alternative solution for independent and sustainable electricity supply. This study aims to analyze household electricity demand, determine the configuration of the main components of an off-grid photovoltaic power generation system, evaluate system performance, and assess the required installation area for photovoltaic modules at Aiko Residence using PVSyst software. The research method consisted of household load data collection, solar radiation, potential assessment, system design, and simulation using PVSyst. The results indicate that the household electricity demand of 10.824 kWh/day or 324.72 kWh/month can be supplied by an off-grid PV system comprising a 3.30 kWp PV array with six JA Solar 550 Wp modules, a 48 V 560 Ah LiFePO₄ battery bank, an MPPT solar charger controller, and a 48 VDC/220 VAC off-grid inverter. The 3S2P PV array configuration requires an installation area of approximately 15.50 m² with overall module dimensions of 6.82 m × 2.27 m. Based on the evaluation of the effective area of the pyramidal roof, totaling 24.13 m², with each roof surface providing an effective length of approximately 7.88 m and a width of approximately 3.20 m, the PV array dimensions remain within the available installation area. Therefore, the installation space, allowing the 3.30 kWp PV array configuration to be implemented. The simulation results indicate an annual energy production of 3,788 kWh, a Performance Ratio (PR) of 70.4% and a Solar Fraction (SF) of 95.9%, demonstrating that the proposed system is capable of meeting household electrical energy demand and is technically and economically feasible for implementation.

Keywords: Off-Grid Photovoltaic System, Performance Ratio, PVSyst, Solar Fraction, techno-economic analysis.

Kata Pengantar

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yesus Kristus atas rahmat dan karunia-Nya sehingga tugas akhir ini dengan judul “Studi Analisis Perancangan Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *Off-Grid* Skala Rumah Tangga di Perumahan Aiko Residence Menggunakan Perangkat Lunak PVSyst” dapat diselesaikan. Tugas akhir ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Terapan Teknik di Program Studi Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Batam.

Penyusunan penelitian ini dilakukan sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan Program Studi D4 Teknologi Rekayasa Energi. Penulis menyadari bahwa dalam proses penyusunan tugas akhir ini, penulis memperoleh banyak dukungan, bimbingan, bantuan, serta kemudahan dari berbagai pihak sehingga tugas akhir ini dapat diselesaikan dengan baik. Oleh karena itu, dengan segala kerendahan hati dan ketulusan, penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Kepada Mamak dan Bapak tercinta yang telah memberikan dukungan moral, finansial, doa, serta semangat yang tidak pernah putus kepada penulis. Segala pengorbanan dan kasi sayang yang diberikan menjadi kekuatan terbesar bagi penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
2. Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada saudara kandung tercinta, Lilis Suryani Sihombing, Adi Kurnia Sihombing, Endang Afriani Sihombing dan Rut Natalia Sihombing, atas segala doa, dukungan, perhatian, semangat serta bantuan finansial yang diberikan kepada penulis selama penyusunan hingga terselesaikannya tugas akhir ini.
3. Bapak Ir. Bambang Hendrawan, S.T., MSM., CIPMP., CISC.P., selaku Direktur Politeknik Negeri Batam.
4. Bapak Ir. Indra Hardian Mulyadi, S.T., M.Eng., Ph.D., selaku Kepala Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Batam.
5. Bapak Irwanto Zarma Putra, S.Pd., M.Eng, selaku Kepala Program Studi Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi Politeknik Negeri Batam.
6. Bapak Handri Toar, S.ST., M.Tr.T., selaku Dosen pembimbing yang senantiasa memberikan bimbingan, arahan, serta dukungan kepada penulis selama proses penyusunan hingga terselesaikan tugas akhir ini.
7. Bapak Fauzun Atabiq, S.T., M.Cs. dan Bapak Yusiran, S.Si., M.T. selaku Dosen penguji I dan II yang memberikan saran dan masukan dalam penyusunan tugas akhir ini.
8. Kepada rekan-rekan RPE yang tidak dapat disebutkan satu persatu, penulis mengucapkan terimakasih atas bantuan, dukungan yang telah diberikan selama proses penyusunan tugas akhir ini.

9. Penulis juga menyampaikan rasa terima kasih kepada seluruh keluarga dan teman-teman yang selalu memberikan dukungan, motivasi, dan bantuan baik secara langsung maupun tidak langsung selama proses penyelesaian tugas akhir.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kata sempurna, oleh karena itu penulis mengharapkan saran dan kritik yang bersifat membangun untuk memperbaiki dan lebih menyempurnakan tugas akhir ini di masa yang akan datang. Semoga tugas akhir ini dapat bermanfaat terkhususnya bagi penulis dan pada segala pihak yang membutuhkan pada umumnya.

Batam, 9 Juli 2026

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Wahyu Supryanto Sihombing', with a stylized flourish at the end.

Wahyu Supryanto Sihombing

Daftar Isi

Pernyataan Keaslian Tugas Akhir	i
Lembar Pengesahan	ii
Abstrak	iii
<i>Abstract</i>	iv
Kata Pengantar	v
Daftar Isi	vii
Daftar Gambar	x
Daftar Tabel	xi
Daftar Lampiran	xii
Bab 1. Pendahuluan	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	3
1.3. Tujuan	3
1.4. Manfaat	4
1.5. Batasan Masalah	4
Bab 2. Tinjauan Pustaka	5
2.1. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)	5
2.2. PLTS <i>Off-Grid</i>	6
2.3. PVSyst	6
2.4. Analisis Kelayakan Teknis	7
2.4.1. <i>Yield Factor</i> (Yf)	7
2.4.2. <i>Reference Yield</i> (Yr)	8
2.4.3. <i>Capacity Utilization Factor</i> (CUF)	8
2.4.4. <i>Performance Ratio</i> (PR)	9
2.4.5. <i>Solar Fraction</i> (SF)	9
2.4.6. Luas Area Pemasangan Modul Fotovoltaik	10
2.5. Analisis Kelayakan Ekonomi	12
2.5.1. Nilai Biaya Rata-rata Produksi Listrik (LCOE)	13

2.5.2. <i>Payback Period</i>	14
2.5.3. <i>Net Present Value (NPV)</i>	14
2.5.4. <i>Internal Rate of Return (IRR)</i>	15
2.5.5. <i>Benefit-Cost Ratio (BCR)</i>	15
2.5.6. <i>Profitability Index (PI)</i>	16
Bab 3. Metodologi Penelitian	17
3.1. Diagram Alir.....	17
3.1.1. Studi Literatur.....	18
3.1.2. Tahapan Penelitian	22
3.2. Pengumpulan Data	22
3.2.1. Data Lokasi Penelitian	22
3.2.2. Data Meteorologi	23
3.2.3. Data Kebutuhan Beban.....	25
3.2.4. Data Spesifikasi Komponen	27
3.3. Perancangan Sistem PLTS.....	28
3.3.1. Orientation	28
3.3.2. PV Array.....	30
3.3.3. Battery Storage.....	30
3.3.4. <i>Solar Charge Controller</i> dan Inverter	31
3.4. Simulasi Menggunakan PVsyst	31
Bab 4. Hasil Dan Pembahasan	32
4.1. Hasil Perancangan Sistem PLTS <i>Off-Grid</i>	32
4.1.1. Orientation Modul Surya	32
4.1.2. Konfigurasi PV Array	33
4.1.3. Battery Storage.....	36
4.1.4. <i>Solar Charge Controller</i> dan Inverter.....	37
4.1.5. Luas Area Pemasangan Modul Surya.....	38
4.1.6. <i>Single Line Diagram</i> PLTS <i>Off-Grid</i> 3,3 kWp.....	40
4.2. Analisis <i>Shading Array</i>	41

4.2.1. Pemodelan Atap dan Array	42
4.2.2. Hasil <i>Shading Factor Table</i>	43
4.2.3. Analisis Pengaruh <i>Shading</i> Terhadap Produksi Energi.....	44
4.3. Hasil Simulasi Menggunakan PVsyst.....	45
4.4. Evaluasi dan Analisis Teknis Perancangan PLTS <i>Off-Grid</i>	47
4.4.1. <i>Yield Factor</i> (Y_f)	48
4.4.2. <i>Reference Yield</i> (Y_r).....	48
4.4.3. <i>Capacity Utilization Factor</i> (CUF).....	49
4.4.4. <i>Performance Ratio</i> (PR)	49
4.4.5. <i>Solar Fraction</i> (SF).....	50
4.5. Evaluasi Kelayakan Ekonomi.....	51
4.5.1. <i>Levelized Cost of Energy</i> (LCOE).....	53
Bab 5. Kesimpulan dan Saran	58
5.1. Kesimpulan	58
5.2. Saran	59
Daftar Pustaka	60
Biodata	64
Lampiran	65

Daftar Gambar

Gambar 1. Ilustrasi Konfigurasi PV Array pada Sistem PLTS	5
Gambar 2. Tampilan PVsyst.....	7
Gambar 3. Diagram Alir	17
Gambar 4. Area Simulasi Sistem PLTS <i>Off-grid</i>	23
Gambar 5. <i>Input Data</i> Kebutuhan Energi Harian Rumah Tangga pada Perangkat Lunak PVsyst.....	27
Gambar 6. Tampilan Konfigurasi <i>Orientation</i> pada Perangkat Lunak PVsyst	28
Gambar 7. Luas Efektif Sisi Kanan Atap	29
Gambar 8. Luas Efektif Sisi Kiri Atap.....	30
Gambar 9. Pengaturan Sudut Kemiringan (<i>Tilt</i>) dan <i>Azimuth</i> Modul Fotovoltaik pada Perangkat Lunak PVsyst.....	32
Gambar 10. Spesifikasi PV Array pada Perangkat Lunak PVsyst.....	33
Gambar 11. Konfigurasi PV Array Sistem PLTS <i>Off-Grid</i> 3,30 kWp (3S2P)	35
Gambar 12. Spesifikasi <i>Battery Storage</i> Cegasa ULTRA 175 48V 280Ah pada perangkat lunak PVsyst	36
Gambar 13. Penentuan Spesifikasi dan Mode Operasi <i>Solar Charge Controller</i> MPPT pada PVsyst.....	37
Gambar 14. Luas Area Pemasangan Modul Surya pada PVsyst.....	38
Gambar 15. <i>Single Line Diagram</i> PLTS <i>Off-Grid</i> 3,3 kWp.....	40
Gambar 16. Model 3D Atap tipe limas dan posisi PV Array pada Perumahan Aiko Residence Menggunakan PVsyst	42
Gambar 17. Diagram Analisis Pengaruh <i>Near Shading</i> terhadap Produksi Energi pada PV Array.....	44
Gambar 18. Ringkasan Produksi Energi Sistem PLTS <i>Off-Grid</i> Berdasarkan Hasil Simulasi PVsyst.....	45
Gambar 19. Diagram Neraca Energi Sistem PLTS <i>off-grid</i>	46
Gambar 20. Grafik <i>Performance Ratio</i> (PR) dan <i>Solar Fraction</i> (SF)	47
Gambar 21. Hasil Analisis Finansial Selama 20 Tahun Ke Depan.....	55

Daftar Tabel

Tabel 1. Penelitian terdahulu yang relevan	18
Tabel 2. Data Radiasi Matahari dan Temperatur Lingkungan Lokasi Penelitian...	23
Tabel 3. Perbandingan Intensitas Radiasi Matahari Bulanan Berdasarkan PVsyst dan GVGIS	24
Tabel 4. Perbandingan Temperatur Lingkungan Bulanan Berdasarkan Data PVsyst dan PVGIS	25
Tabel 5. Data Beban Bulanan Rumah Tangga	26
Tabel 6. Data Spesifikasi Komponen PLTS <i>Off-Grid</i>	28
Tabel 7. <i>Near Shadings Factor Parameter</i>	43
Tabel 8. <i>Installation Cost</i> Sistem PLTS <i>Off-Grid</i>	51
Tabel 9. <i>Operating costs</i>	52
Tabel 10. Arus Kas Keuangan	57

Daftar Lampiran

Lampiran 1. Datasheet Modul Fotovoltaik JA Solar JAM72-S30-550/MR 550 Wp

Lampiran 2. Datasheet MPPT Solar Charge Controller 48 V 100 A

Lampiran 3. Datasheet Baterai LiFePO₄ 51,2 280 Ah

Lampiran 4. Datasheet Inverter Off-grid 3500 W 48 V

Bab 1. Pendahuluan

1.1. Latar Belakang

Kebutuhan energi listrik pada sektor rumah tangga terus mengalami peningkatan seiring pertumbuhan penduduk, perkembangan teknologi, serta meningkatnya penggunaan peralatan elektronik berdaya tinggi. Kondisi tersebut menyebabkan konsumsi energi listrik rumah tangga menjadi semakin besar sehingga diperlukan sistem penyediaan energi yang mampu bekerja secara andal, efisien, dan berkelanjutan [1]. Di sisi lain, ketergantungan terhadap pembangkit listrik berbasis energi fosil masih menimbulkan berbagai permasalahan, seperti peningkatan biaya operasional pembangkitan, emisi karbon, serta keterbatasan keandalan sistem distribusi energi listrik pada beberapa wilayah.

Salah satu teknologi energi terbarukan yang memiliki potensi untuk diterapkan pada sektor rumah tangga adalah sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *off-grid*. Sistem ini bekerja dengan mengkonversi energi radiasi matahari menjadi energi listrik menggunakan modul fotovoltaik (*photovoltaic module*) yang kemudian disimpan pada sistem baterai sebagai media penyimpanan energi. Energi listrik yang tersimpan selanjutnya digunakan untuk menyuplai kebutuhan beban rumah tangga ketika intensitas radiasi matahari menurun maupun pada malam hari [2]. Sistem PLTS *off-grid* umumnya terdiri dari modul surya, *solar charger controller*, baterai, inverter, serta proteksi dan pengkabelan yang saling terintegrasi untuk menjaga kontinuitas suplai energi listrik.

Dalam proses perancangan sistem PLTS *off-grid*, diperlukan analisis teknis terhadap profil kebutuhan energi listrik, potensi radiasi matahari, konfigurasi *PV array*, kapasitas baterai, serta orientasi pemasangan modul surya (*orientation*). Parameter seperti *tilt angle* dan *azimuth* mempengaruhi jumlah radiasi matahari yang diterima permukaan modul fotovoltaik sehingga berdampak terhadap energi keluaran dan efisiensi operasional sistem [3]. Kesalahan dalam menentukan kapasitas sistem dapat menyebabkan ketidakseimbangan antara energi yang dihasilkan dan kebutuhan beban, sehingga sistem menjadi tidak optimal baik dari sisi teknis maupun ekonomis.

Evaluasi performa sistem menjadi aspek penting dalam perancangan PLTS *off-grid* untuk mengetahui tingkat efisiensi operasional sistem. Parameter *Performance Ratio* (PR) digunakan untuk mengevaluasi kualitas performa sistem berdasarkan perbandingan antara energi aktual yang dihasilkan terhadap energi teoritis yang tersedia dari radiasi matahari. Nilai PR juga menunjukkan besarnya *losses* akibat temperatur, inverter, dan sistem pengkabelan [4]. Selain itu, parameter *Solar Fraction* (SF) digunakan untuk mengetahui tingkat kontribusi energi surya dalam memenuhi kebutuhan energi listrik beban rumah tangga [5]. Oleh karena itu, simulasi menggunakan perangkat lunak PVsyst diperlukan untuk

memperoleh konfigurasi sistem yang optimal, efisien, dan sesuai dengan kondisi operasional sebenarnya [6].

Beberapa penelitian mengenai sistem PLTS *off-grid* pada sektor rumah tangga umumnya masih berfokus pada penentuan kapasitas komponen utama seperti modul surya, baterai, dan inverter berdasarkan kebutuhan energi listrik [2], [6]. Namun, pendekatan tersebut masih terbatas pada tahap *sizing* sistem dan belum sepenuhnya mengevaluasi performa operasional secara komprehensif menggunakan parameter seperti *Performance Ratio* (PR) dan *Solar Fraction* (SF). Selain itu, kajian mengenai optimasi konfigurasi sistem, termasuk orientasi modul serta pemanfaatan simulasi berbasis perangkat lunak PVsyst, masih memerlukan pengembangan lebih lanjut untuk meningkatkan akurasi perancangan dan penerapan sistem pada skala rumah tangga [3], [5].

Penelitian ini dilakukan pada salah satu rumah tinggal di Kawasan Perumahan Aiko Residence sebagai lokasi simulasi studi perancangan sistem PLTS *off-grid* skala rumah tangga. Pemilihan lokasi penelitian didasarkan pada tingginya kebutuhan energi listrik harian rumah tangga yang ditunjukkan oleh rata-rata biaya pemakaian listrik mencapai sekitar Rp.500.000,00 setiap periode pembayaran. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa konsumsi energi listrik rumah tangga relatif cukup besar sehingga diperlukan alternatif penyediaan energi listrik yang lebih efisien dan berkelanjutan. Oleh karena itu, penerapan sistem PLTS *off-grid* diharapkan mampu menjadi solusi dalam mengurangi ketergantungan terhadap energi listrik konvensional sekaligus meningkatkan pemanfaatan energi terbarukan pada sektor rumah tangga.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini dilakukan dengan judul **“Analisis Perancangan Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *Off-Grid* Skala Rumah Tangga di Perumahan Aiko Residence Menggunakan Perangkat Lunak PVsyst”**. Penelitian ini bertujuan untuk merancang konfigurasi sistem PLTS *off-grid* yang optimal berdasarkan kebutuhan energi listrik rumah tangga, data radiasi matahari, serta hasil simulasi menggunakan perangkat lunak PVsyst. Hasil penelitian diharapkan dapat menjadi solusi alternatif penyediaan energi listrik mandiri yang efisien, andal, serta mendukung pemanfaatan energi listrik terbarukan pada sektor rumah tangga.

1.2. Rumusan Masalah

Rumusan masalah penelitian ini disusun berdasarkan permasalahan yang telah diuraikan pada latar belakang guna mengarahkan proses analisis dan perancangan sistem PLTS *off-grid* skala rumah tangga.

1. Bagaimana menghitung kebutuhan energi listrik rumah tangga sebagai dasar perancangan sistem PLTS *off-grid* yang efisien dan andal?
2. Bagaimana mengevaluasi konfigurasi komponen utama sistem PLTS *off-grid* menggunakan perangkat lunak PVsyst berdasarkan radiasi matahari dan kebutuhan energi listrik rumah tangga?
3. Bagaimana menganalisis performa sistem PLTS *off-grid* berdasarkan parameter *Performance Ratio* (PR) dan *Solar Fraction* (SF) untuk mengetahui tingkat efisiensi dan kontribusi energi surya terhadap beban rumah tangga?
4. Bagaimana menganalisis kebutuhan luas area pemasangan modul surya terhadap energi listrik yang dihasilkan sistem PLTS *off-grid* serta kemampuan sistem dalam menyuplai kebutuhan beban listrik rumah tangga?

1.3. Tujuan

Tujuan penelitian ini ditetapkan untuk mendukung pelaksanaan analisis dan perancangan sistem PLTS *off-grid* skala rumah tangga sesuai rumusan masalah yang telah disusun.

1. Mengidentifikasi kebutuhan energi listrik rumah tangga berdasarkan karakteristik beban dan pola konsumsi energi sebagai dasar perancangan sistem PLTS *off-grid* yang efisien dan andal.
2. Mengevaluasi konfigurasi komponen utama sistem PLTS *off-grid* menggunakan perangkat lunak PVsyst berdasarkan kondisi radiasi matahari dan kebutuhan energi listrik rumah tangga.
3. Menganalisis performa efisiensi sistem PLTS *off-grid* berdasarkan parameter *Performance Ratio* (PR) dan *Solar Fraction* (SF) untuk mengetahui tingkat kemampuan sistem dalam memenuhi kebutuhan energi listrik rumah tangga.
4. Menganalisis kebutuhan luas area atap pemasangan modul surya terhadap energi listrik yang dihasilkan sistem PLTS *off-grid* serta kemampuan sistem dalam menyuplai kebutuhan beban listrik rumah tangga.

1.4. Manfaat

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi analisis, perancangan, dan evaluasi kinerja sistem PLTS *off-grid* skala rumah tangga.

1. Memberikan manfaat dalam memahami karakteristik kebutuhan energi listrik rumah tangga berdasarkan pola konsumsi energi dan karakteristik beban sebagai dasar perancangan sistem PLTS *off-grid* yang efisien dan andal.
2. Memberikan referensi teknis dalam mengevaluasi konfigurasi komponen utama sistem PLTS *off-grid* menggunakan perangkat lunak PVsyst berdasarkan kondisi radiasi matahari dan kebutuhan energi listrik rumah tangga.
3. Memberikan pemahaman mengenai analisis performa sistem PLTS *off-grid* berdasarkan *Performance Ratio* (PR) dan *Solar Fraction* (SF) untuk mengetahui tingkat efisiensi sistem serta kontribusi energi listrik rumah tangga.
4. Memberikan informasi teknis mengenai kebutuhan luas area atap pemasangan modul surya terhadap energi listrik yang dihasilkan sistem PLTS *off-grid* serta kemampuan sistem dalam menyuplai kebutuhan beban listrik rumah tangga.

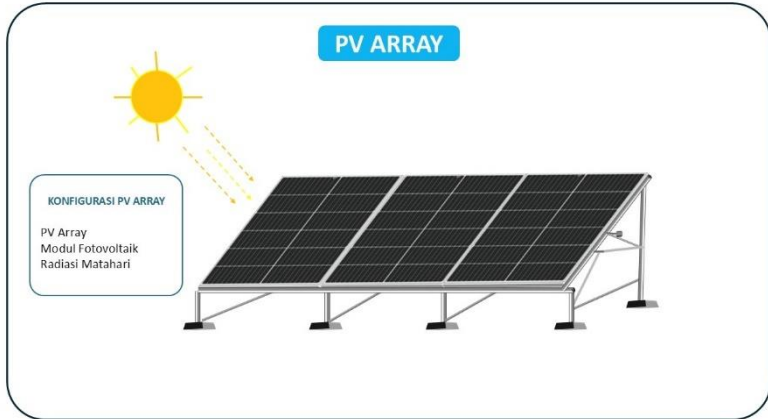
1.5. Batasan Masalah

Ruang lingkup penelitian ini dibatasi pada aspek-aspek yang berkaitan dengan perancangan dan analisis sistem PLTS *off-grid* skala rumah tangga guna menjaga kesesuaian antara tujuan penelitian dan hasil analisis yang diperoleh.

1. Penelitian ini difokuskan pada perancangan sistem PLTS *off-grid* yang diterapkan pada skala rumah tangga, tanpa membahas sistem *on-grid* atau *hybrid*.
2. Penelitian ini dibatasi pada analisis konfigurasi dan kapasitas komponen utama sistem PLTS, meliputi modul surya, baterai, inverter, dan *solar charge controller* berdasarkan data teknis komponen serta kondisi radiasi matahari wilayah penelitian.
3. Penelitian ini difokuskan pada analisis kebutuhan energi listrik, konfigurasi sistem, dan evaluasi performa PLTS berdasarkan parameter *Performance Ratio* (PR) dan *Solar Fraction* (SF) menggunakan perangkat lunak PVsyst tanpa melakukan pengujian eksperimental secara langsung di lapangan.
4. Penelitian ini dibatasi pada analisis kebutuhan luas area atap pemasangan modul surya berdasarkan energi listrik yang dihasilkan sistem PLTS *off-grid* serta kemampuan sistem dalam menyuplai kebutuhan beban listrik rumah tangga.

Bab 2. Tinjauan Pustaka

2.1. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)



Gambar 1. Ilustrasi Konfigurasi PV Array pada Sistem PLTS

Sumber: Ilustrasi penulis menggunakan Microsoft PowerPoint berdasarkan hasil perancangan sistem PLTS off-grid di Perumahan Aiko Residence, 2026.

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan sistem konversi energi yang memanfaatkan radiasi matahari untuk menghasilkan energi listrik melalui sel fotovoltaik (PV). Prinsip dasar kerja sistem ini adalah efek fotovoltaik, di mana foton dari cahaya matahari yang diserap oleh material semikonduktor akan menghasilkan aliran elektron bebas yang kemudian dikonversi energi listrik arus searah (DC).

PLTS secara umum diklasifikasikan menjadi dua jenis utama, yaitu sistem *on-grid* dan sistem *off-grid*. Sistem *on-grid* terhubung ke jaringan listrik PLN, sehingga energi listrik yang dihasilkan dapat dikirim kembali ke jaringan apabila terjadi *surplus* daya. Sebaliknya, sistem *off-grid* berdiri secara mandiri tanpa koneksi ke jaringan utama dan menggunakan sistem penyimpanan energi berupa baterai untuk menjaga kontinuitas suplai listrik saat intensitas matahari rendah atau pada malam hari [7].

Pada skala rumah tangga, PLTS *off-grid* terdiri dari beberapa komponen, yaitu modul surya (*PV module*), solar *charge controller*, baterai penyimpanan energi, dan inverter. Modul surya berfungsi mengubah energi arus pengisian dan perlindungan terhadap baterai, baterai berperan sebagai media penyimpanan

energi, sedangkan inverter berfungsi mengonversi energi DC menjadi AC untuk digunakan oleh peralatan rumah tangga [8]. Kinerja sistem tergantung pada faktor eksternal seperti intensitas matahari, suhu lingkungan, dan sudut kemiringan panel. Efisiensi juga dipengaruhi kualitas komponen dan metode perancangan termasuk penentuan kapasitas modul dan harus mempertimbangkan potensi energi surya lokal, pola konsumsi beban rumah tangga, serta berbagai kerugian sistem (*system losses*).

Implementasi PLTS pada skala rumah tangga berperan penting dalam mendukung transisi energi bersih dan pengurangan ketergantungan terhadap energi fosil. Selain itu memberikan solusi ketahanan energi bagi daerah dengan akses listrik terbatas, sekaligus kontribusi pada penurunan emisi karbon dan peningkatan efisiensi energi nasional [9].

2.2. PLTS Off-Grid

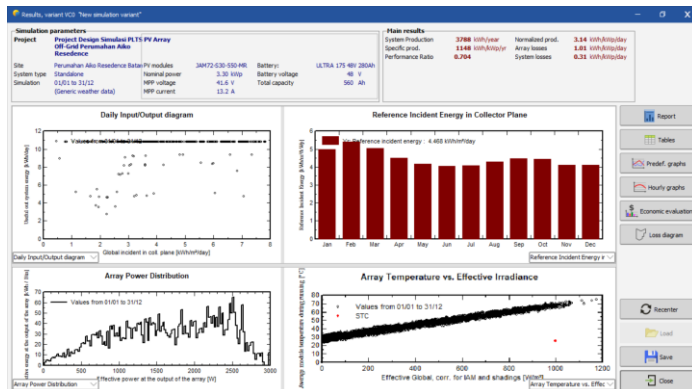
PLTS *off-grid* merupakan sistem penyediaan energi yang menghasilkan daya listrik melalui proses konversi radiasi matahari menggunakan modul fotovoltaik dan beroperasi secara sepenuhnya terlepas dari jaringan listrik nasional. Seluruh kebutuhan energi dipenuhi secara mandiri melalui pemanfaatan sumber energi lokal, sehingga sistem ini mampu bekerja otonom pada kondisi tanpa dukungan jaringan utilitas. Secara struktural, PLTS *off-grid* terdiri atas komponen utama berupa modul fotovoltaik yang berfungsi mengubah radiasi matahari menjadi arus listrik searah, serta rangkaian komponen pendukung seperti baterai sebagai penyimpan energi, solar *charge controller* (SCC) yang mengatur dinamika pengisian dan pengosongan baterai, dan inverter yang mengonversi arus searah menjadi bolak-balik agar kompatibel dengan karakteristik beban rumah tangga. Integrasi seluruh komponen tersebut memungkinkan sistem mencapai operasi yang stabil, berkelanjutan, dan efisien pada lingkungan *off-grid* [10].

2.3. PVSyst

PVSyst merupakan perangkat lunak analitis yang dirancang untuk melakukan pemodelan menyeluruh, penentuan kapasitas (*sizing*), serta evaluasi kinerja sistem fotovoltaik. Perangkat ini dikembangkan oleh Universitas Genewa dan menyediakan modul simulasi untuk berbagai konfigurasi sistem, meliputi sistem terhubung jaringan (*grid-connected*), sistem mandiri (*stand-alone*), sistem pemompaan tenaga surya (*solar pumping*), serta sistem arus searah untuk aplikasi transportasi publik (*DC-grid*).

Selain fitur pemodelan sistem, PVSyst dibekali basis data komprehensif yang mencakup parameter komponen PV (modul, inverter, SCC, baterai) serta data meteorologi multi-sumber. Basis data meteorologi yang tersedia mencakup

Meteonorm V7.1, NASA-SSE, PVGIS (Eropa dan Afrika), *Satel-Light*, TM2/3, SolarAnywhere, EPW untuk wilayah Kanada, serta dataset lain seperti *Ret Screen*, *Helioclim* dan SolarGIS (berlisensi). Integrasi sumber data ini memungkinkan PVsyst menghasilkan simulasi yang lebih akurat berdasarkan karakteristik lokasi dan kebutuhan sistem yang dianalisis [11].



Gambar 2. Tampilan PVsyst

Sumber: Hasil simulasi menggunakan perangkat lunak PVsyst pada perancangan sistem PLTS off-grid skala rumah tangga di Perumahan Aiko Residence, 2025.

2.4. Analisis Kelayakan Teknis

Analisis teknis dalam perancangan sistem PLTS dilakukan dengan mengevaluasi kapasitas daya yang direncanakan sesuai kebutuhan beban, menentukan spesifikasi teknis komponen utama sistem, serta menganalisis konfigurasi pemasangan modul surya meliputi orientasi dan sudut kemiringan. Selain itu, dilakukan estimasi energi listrik yang dapat dihasilkan untuk menilai kinerja dan kelayakan sistem PLTS yang dirancang [12]. Beberapa parameter yang digunakan untuk menganalisis unjuk kerja suatu sistem PLTS mengikuti acuan yang ditetapkan oleh IEC Standard 61724, antara lain: *Yield Factor* (Yf), *Reference Yield* (Yr), *Capacity Utilization Factor* (CUF), dan *Performance Ratio* (PR).

2.4.1. Yield Factor (Yf)

Yield factor pada sistem PLTS didefinisikan sebagai rasio antara energi listrik keluaran arus bolak-balik (AC) yang dihasilkan oleh modul fotovoltaik terpasang terhadap total jam matahari efektif per kapasitas terpasang kilowatt-puncak

(kWp). Parameter ini mengacu pada *Standard Test Conditions* (STC) dengan iradiasi 1000 W/m² dan temperatur sel 25 °C, serta dinyatakan sebagai produksi energi bersih dalam satuan waktu [13].

Berdasarkan parameter produksi energi pada sistem PLTS, nilai *Yield Factor* (Yf) dapat dihitung menggunakan persamaan (1).

$$Yf = \frac{E_{pv}}{P_o} \left(\frac{kWh}{kWp} \right) \quad (1)$$

Yf = *Yield Factor* (h/kWp)

E_{pv} = Energi Bersih (kWh AC)

P_o = Daya Puncak PV (kWp DC)

2.4.2. Reference Yield (Yr)

Reference yield merupakan parameter yang menyatakan rasio antara total energi radiasi matahari yang jatuh pada bidang modul fotovoltaik (H_T) dalam satuan kWh/m² terhadap nilai irradiansi acuan pada STC sebesar 1 kW/m² [14].

Perhitungan nilai *Reference Yield* (Yr) dinyatakan pada persamaan (2).

$$Yr = \frac{H_T}{G_{STC}} \left(\frac{kWh}{kW} \right) \quad (2)$$

Yr = *Yield Reference* (kWh/kW)

H_T = Irradiansi pada bidang array (kWh/m²)

G_{STC} = Irradiansi Referensi STC (1kW/m²)

2.4.3. Capacity Utilization Factor (CUF)

Capacity utilization factor adalah sebagai rasio antara energi listrik aktual yang dihasilkan oleh sistem PLTS dalam kurun waktu satu tahun terhadap energi maksimum yang secara teoritis dapat diproduksi apabila sistem beroperasi secara kontinu pada kapasitas terpasangnya selama seluruh jam dalam satu tahun [15].

Nilai *Capacity Utilization Factor* (CUF) pada sistem PLTS dihitung menggunakan persamaan (3).

$$CUF = \frac{Yf}{24h \times 365} \times 100\% \quad (3)$$

CUF = *Capacity Utilization Factor* (%)

Yf = *Yield Factor* (Kwh/kWp)

2.4.4. Performance Ratio (PR)

Performance Ratio (PR) merupakan salah satu parameter penting dalam evaluasi kinerja sistem PLTS. Parameter ini digunakan untuk menunjukkan tingkat performa operasional sistem fotovoltaik berdasarkan perbandingan antara energi aktual yang dihasilkan sistem terhadap energi teoritis yang tersedia dari radiasi matahari [16].

Hubungan antara *Yield Factor* dan *Reference Yield* dalam menentukan nilai *Performance Ratio* (PR) dirumuskan pada persamaan (4).

$$PR = \frac{Y_f}{Y_r} \times 100\% \quad (4)$$

PR = *Performance Ratio* (%)

Y_f = *Yield Factor* (Kwh/kWp)

Y_r = *Reference Yield* (kWh/kW)

Nilai PR digunakan oleh berbagai *losses* pada sistem PLTS, seperti rugi temperatur modul, rugi inverter, rugi pengkabelan, dan rugi *mismatch*. Oleh karena itu parameter ini digunakan untuk mengevaluasi kualitas performa dan efektivitas operasional sistem fotovoltaik secara keseluruhan.

Pada perangkat lunak PVsyst, parameter *Performance Ratio* (PR) digunakan sebagai indikator utama mengevaluasi kualitas performa sistem PLTS berdasarkan kondisi operasional dan rugi-rugi sistem yang terjadi selama proses konversi energi listrik.

2.4.5. Solar Fraction (SF)

Solar Fraction (SF) merupakan parameter yang digunakan untuk menunjukkan tingkat kontribusi energi listrik yang dihasilkan sistem PLTS terhadap total kebutuhan energi listrik beban. Parameter ini dinyatakan dalam bentuk *presentase* antara energi listrik yang mampu di suplai oleh sistem PLTS terhadap kebutuhan energi listrik pada sistem [17], [18].

Nilai *Solar Fraction* (SF) diperoleh dari perbandingan antara energi listrik yang dihasilkan sistem PLTS terhadap total kebutuhan energi listrik beban sebagaimana ditunjukkan pada persamaan (5),

$$SF = \frac{E_{PV}}{E_{Load}} \times 100\% \quad (5)$$

SF = *Solar Fraction* (%)

E_{PV} = Energi listrik yang dihasilkan sistem PLTS (Kwh)

E_{Load} = Total energi listrik yang dibutuhkan atau konsumsi (kWh)

Nilai SF digunakan untuk mengevaluasi tingkat pemanfaatan energi listrik surya dalam memenuhi kebutuhan energi listrik beban. Parameter ini menunjukkan *presentase* kontribusi energi yang mampu di suplai oleh sistem PLTS terhadap total kebutuhan daya sistem.

Pada perangkat lunak PVsyst, parameter *Solar Fraction* (SF) digunakan sebagai indikator untuk menunjukkan tingkat pemenuhan kebutuhan beban oleh sistem PLTS berdasarkan hasil simulasi performa sistem.

2.4.6. Luas Area Pemasangan Modul Fotovoltaik

Luas area pemasangan merupakan salah satu aspek penting dalam perancangan sistem PLTS atap karena menentukan kapasitas PV Array yang dapat dipasang pada suatu bidang atap. Kapasitas PV Array diperoleh dari total daya nominal modul fotovoltaik yang disusun dalam suatu sistem dan menjadi dasar dalam pemenuhan kebutuhan energi listrik. Penentuan kapasitas tersebut dilakukan berdasarkan jumlah modul yang digunakan dan daya nominal setiap modul sehingga konfigurasi yang diperoleh sesuai dengan kebutuhan energi serta karakteristik komponen sistem [19].

Kapasitas total PV Array dapat dihitung menggunakan persamaan (6)

$$P_{PV} = N \times P_{modul} \quad (6)$$

P_{PV} = Kapasitas total PV Array (Wp)

N = Jumlah modul fotovoltaik (unit)

A_{modul} = Daya nominal satu modul fotovoltaik (Wp)

Setelah kapasitas PV Array ditentukan, konfigurasi modul fotovoltaik disusun secara seri dan paralel untuk memperoleh karakteristik tegangan dan arus sesuai kebutuhan sistem. Pada susunan seri, tegangan keluaran PV Array diperoleh dari penjumlahan tegangan maksimum daya (*maximum power voltage*, V_{mmp}) setiap modul, sedangkan pada susunan paralel arus keluaran merupakan penjumlahan arus maksimum daya (*maximum power current*, I_{mmp}) setiap string. Konfigurasi tersebut digunakan agar karakteristik listrik PV Array sesuai dengan rentang kerja MPPT *Solar Charge Controller* sehingga proses penyerapan daya maksimum dapat berlangsung secara optimal [20].

Tegangan PV Array dihitung menggunakan persamaan (7)

$$V_{Array} = N_S \times V_{mpp} \quad (7)$$

Arus PV Array dihitung menggunakan persamaan (8)

$$I_{Array} = N_P \times I_{mpp} \quad (8)$$

V_{Array} = Tegangan PV Array (V)

I_{Array} = Arus PV Array (A)

N_S = Jumlah modul yang disusun seri

N_P = Jumlah modul yang disusun paralel

V_{mpp} = Tegangan maksimum daya satu modul (V)

I_{mpp} = Arus maksimum daya satu modul (A)

Selain parameter kelistrikan, kebutuhan luas pemasangan juga perlu dievaluasi untuk memastikan konfigurasi modul dapat diterapkan pada area atap yang tersedia. Luas total PV Array diperoleh dari hasil perkalian antara jumlah modul fotovoltaik dan luas permukaan satu modul, sehingga dapat digunakan sebagai acuan dalam menentukan kebutuhan instalasi [21].

Kebutuhan luas total area pemasangan PV Array dihitung menggunakan persamaan (9)

$$A_{Total} = N \times A_{modul} \quad (9)$$

A_{Total} = Luas total PV Array (m²)

N = Jumlah modul fotovoltaik (unit)

A_{modul} = Luas satu modul fotovoltaik (m²)

Selanjutnya, kesesuaian antara kebutuhan area pemasangan dan luas efektif atap dievaluasi menggunakan luas bidang atap yang dapat dimanfaatkan setelah mempertimbangkan bentuk atap, kemiringan bidang, serta hambatan fisik yang mempengaruhi proses instalasi [22], [23].

Jumlah maksimum modul fotovoltaik yang dapat dipasang pada suatu bidang atap dapat dihitung menggunakan persamaan (10)

$$N_{modul} = \frac{A_{atap}}{A_{modul}} \quad (10)$$

Kebutuhan luas area pemasangan modul dapat ditentukan menggunakan persamaan (11)

$$N_{kebutuhan} = N_{modul} \times A_{modul} \quad (11)$$

N_{modul} = Jumlah maksimum modul fotovoltaik (unit)

A_{atap} = Luas area efektif atap (m^2)

A_{modul} = Luas satu modul fotovoltaik (m^2)

$A_{kebutuhan}$ = Luas area yang dibutuhkan untuk pemasangan modul (m^2)

Persamaan tersebut digunakan untuk mengevaluasi kesesuaian antara kebutuhan area pemasangan modul dan luas area atap yang tersedia sehingga sistem PLTS yang dirancang dapat diterapkan secara teknis pada lokasi penelitian.

2.5. Analisis Kelayakan Ekonomi

Analisis ekonomi merupakan metode evaluasi yang digunakan untuk menentukan kelayakan suatu investasi dengan membandingkan berbagai alternatif berdasarkan keuntungan ekonomi yang dihasilkan selama umur operasional sistem. Setiap komponen investasi memiliki umur ekonomis tertentu yang dinyatakan dalam satuan waktu, sehingga penilaian biaya dan manfaat harus mempertimbangkan dimensi waktu. Selain itu, perubahan nilai mata uang akibat inflasi dan faktor ekonomi lainnya menyebabkan nilai uang tidak konstan dari waktu ke waktu, sehingga diperlukan pendekatan ekuivalensi nilai uang untuk menyamakan nilai biaya dan manfaat pada periode yang berbeda agar keputusan investasi dilakukan secara objektif dan rasional [24].

Biaya operasi dan pemeliharaan (*Operation and Maintenance Cost*) yang dikeluarkan secara periodic selama umur operasi sistem PLTS *off-grid* perlu dikonversi menjadi nilai saat ini (*Present Value*) dengan mempertimbangkan tingkat diskonto (*Discount Rate*) dan umur proyek. Konversi tersebut dilakukan menggunakan faktor *Present Worth of Uniform Series* sehingga seluruh biaya operasi tahunan dapat dinyatakan dalam nilai sekarang sebagai dasar analisis ekonomi. Tingkat diskonto digunakan dalam indikator ekonomi, seperti *Net Present Value* (NPV), *Benefit-Cost Ratio* (BCR), *Profitability Index* (PI), dan *Levelized Cost of Energy* (LCOE) [25], [26].

Persamaan yang digunakan untuk menghitung nilai *Present Value* biaya operasi dinyatakan pada Persamaan (12)

$$PV_{Operational} = A \left(\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right) \quad (12)$$

$PV_{Operational}$ = Nilai sekarang biaya operasi (Rp)

A = Biaya operasi tahunan (Rp/tahun)

i = tingkat diskonto (*discount rate*)

n = Umur proyek (tahun)

2.5.1. Nilai Biaya Rata-rata Produksi Listrik (LCOE)

Biaya produksi energi listrik per satuan kilowatt-jam dinyatakan dalam satuan Rp/kWh dan dihitung menggunakan pendekatan *Levelized Cost of Energy* (LCOE). Perhitungan ini mencakup seluruh komponen biaya sepanjang umur sistem, meliputi investasi awal, biaya penggantian komponen, serta biaya operasi dan pemeliharaan [27]. Dari aspek ekonomi, penentuan nilai LCOE memerlukan dua parameter utama yaitu, *Life Cycle Cost* (LCC) sebagai representasi total biaya sepanjang umur sistem dan *Capital Recovery Factor* (CRF) yang digunakan untuk mengonversi biaya investasi menjadi nilai tahunan [28].

Perhitungan nilai *Levelized Cost of Energy* (LCOE) sebagai biaya rata-rata produksi energi listrik sistem PLTS dinyatakan pada persamaan (13)

$$LCOE = \frac{LCC \times CRF}{A \text{ kWh}} \quad (13)$$

LCOE= *Levelized Cost of Energy* (Rp/kWh)

LCC= *Life Cycle Cost*, yaitu total biaya siklus hidup sistem (Rp)

CRF= *Capital Recovery Factor*, faktor pengembalian modal digunakan untuk mengonversi biaya investasi menjadi biaya tahunan

A_{kWh}= Energi listrik yang dihasilkan sistem setiap tahun (kWh/tahun)

2.5.1.1. *Life Cycle Cost* (LCC)

Life Cycle Cost merupakan metode analisis ekonomi yang digunakan untuk menghitung total biaya sistem selama umur operasinya. Hubungan antara biaya investasi awal dan biaya operasional selama umur sistem dalam menentukan nilai *Life Cycle Cost* (LCC) dirumuskan pada persamaan (14).

$$PI = LCC = C + PV_{operational} \quad (14)$$

PI = Nilai investasi total (Rp)

LCC = *Life Cycle Cost*, yaitu total biaya siklus hidup sistem (Rp)

C = Nilai Investasi Awal (Rp)

PV operational = Biaya Operasional dan pemeliharaan (Rp)

2.5.1.2. *Capital Recovery Factor* (CRF)

Capital Recovery Factor merupakan factor konversi yang digunakan untuk mengubah nilai investasi selama umur proyek menjadi biaya tahunan yang ekuivalen. Nilai *Capital Recovery Factor* (CRF) yang digunakan untuk mengonversi biaya investasi menjadi biaya tahunan dihitung menggunakan persamaan (15).

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (15)$$

i = Nilai suku bunga

n = Lama investasi

2.5.2. Payback Period

Payback Period (PP) merupakan indikator yang menyatakan lamanya waktu yang diperlukan menutup kembali investasi awal, dengan mempertimbangkan faktor diskonto. Parameter ini digunakan untuk menentukan periode pengembalian modal berdasarkan akumulasi arus kas bersih selama masa operasi sistem [29].

Periode pengembalian investasi sistem PLTS berdasarkan rata-rata aliran kas bersih dihitung menggunakan persamaan (16).

$$CRPP = \frac{v}{NC_t} \quad (16)$$

CRPP = *Capital Recovery Payback Period*, yaitu waktu yang dibutuhkan untuk mengembalikan biaya investasi (tahun)

V = Nilai investasi awal (Rp)

NC_t = *Net Cash Flow* tahunan, arus kas bersih (Rp/tahun)

2.5.3. Net Present Value (NPV)

Net Present Value didefinisikan sebagai metode analisis kelayakan investasi yang menghitung perbedaan antara nilai sekarang dari arus kas penerimaan dan pengeluaran di masa mendatang dengan menerapkan tingkat diskonto tertentu [30].

Analisis kelayakan investasi berdasarkan nilai sekarang dari arus kas bersih sistem dinyatakan pada persamaan (17).

$$PV = \sum_{t=1}^n \frac{NCF_t}{(1+i)^n} - (II) \quad (17)$$

NCF_t = *Net Cash Flow* periode tahun ke-1 sampai tahun ke-n

II= Investasi awal (Initial Investment)

i = Tingkat diskonto

n = Periode dalam tahun (umur investasi)

2.5.4. Internal Rate of Return (IRR)

Internal Rate of Return (IRR) merupakan tingkat diskonto yang menyebabkan nilai NPV (*Net Present Value*) suatu investasi bernilai nol, yaitu kondisi ketika nilai sekarang dari seluruh arus kas yang diterima sama dengan besarnya investasi awal yang dikeluarkan. Nilai IRR digunakan sebagai indikator untuk menilai tingkat pengembalian aktual yang dihasilkan oleh suatu proyek atau investasi [31].

Tingkat pengembalian investasi berdasarkan kondisi nilai *Net Present Value* (NPV) sama dengan nol dihitung menggunakan persamaan (18).

$$IRR = i_1 + \frac{NPV_1}{(NPV_1 - NPV_2)}(i_2 - i_1) \quad (18)$$

IRR = *Internal Rate of Return* (%)

i_1 = Tingkat suku bunga pertama yang menghasilkan nilai NPV positif (%)

i_2 = Tingkat suku bunga kedua yang menghasilkan nilai NPV negatif (%)

NPV_1 = Nilai NPV pada tingkat suku bunga i_1 (Rp)

NPV_2 = Nilai NPV pada tingkat suku bunga i_2 (Rp)

2.5.5. Benefit-Cost Ratio (BCR)

Benefit Cost Ratio adalah indikator finansial yang menyatakan rasio antara nilai kini total manfaat (*present value of benefits*) dan nilai kini total biaya (*present value of costs*). Suatu proyek dinilai layak secara ekonomis apabila dihasilkan nilai BCR melebihi 1, yang mengindikasikan bahwa manfaat ekonomi yang dihasilkan lebih besar dibandingkan biaya yang dikeluarkan [32].

Perbandingan antara nilai manfaat dan biaya investasi dalam menentukan kelayakan ekonomis sistem dinyatakan pada persamaan (19).

$$\frac{B}{C}_{net} = \frac{\text{Present Value Nett Benefits ...}}{\text{Capital Cost}} \quad (19)$$

$Net\ B/C$ = *Net Benefit-Cost Ratio* (rasio manfaat terhadap biaya)

$PV\ Net\ Benefits$ = Nilai sekarang (*Present Value*) dari seluruh manfaat bersih selama umur proyek (Rp)

$Capital\ Cost\ (CC)$ = Biaya investasi awal sistem PLTS (Rp)

2.5.6. Profitability Index (PI)

Profitability Index (PI) merupakan metode kelayakan investasi yang digunakan untuk menilai perbandingan antara nilai kini (*present value*) seluruh arus kas bersih yang dihasilkan oleh suatu proyek terhadap besarnya investasi awal. Indikator ini menunjukkan tingkat efisiensi penggunaan modal dalam menghasilkan manfaat ekonomi [33].

Tingkat efisiensi investasi berdasarkan perbandingan antara nilai kini arus kas bersih dan investasi awal dirumuskan pada persamaan (20).

$$PI = \sum_{t=1}^n \frac{\sum_{t=1}^n NCF_t(1+i)^{-t}}{II} \quad (20)$$

PI = *Profitability Index*, yaitu indeks tingkat kelayakan investasi

NCF_t = *Net Cash Flow* pada tahun ke -t (Rp/tahun)

I = Tingkat diskonto (%)

t = Periode atau tahun ke -t

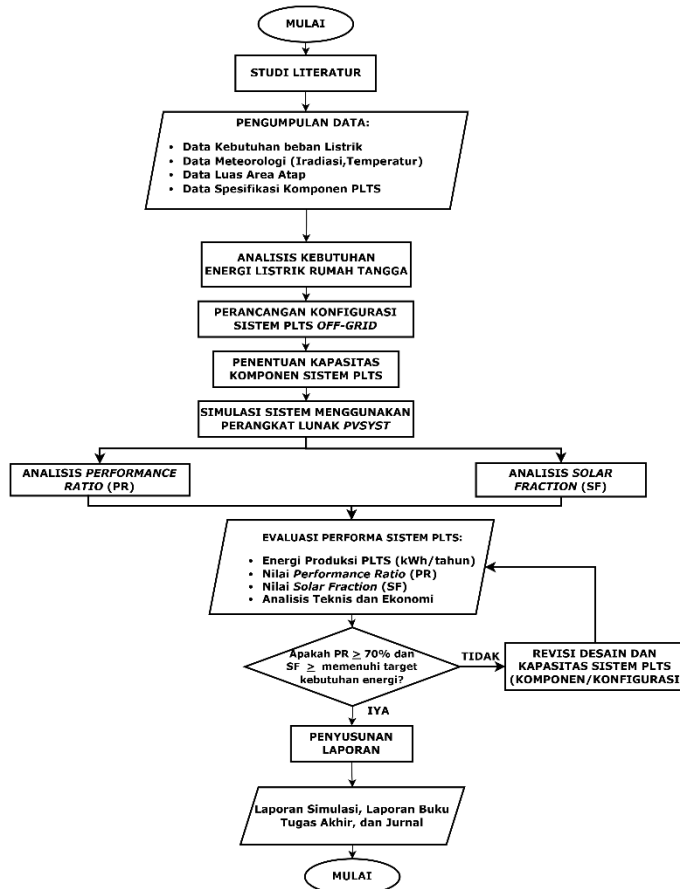
n = Umur proyek atau jumlah periode analisis (tahun)

II = *Initial Investment*, yaitu biaya investasi awal sistem (Rp)

Bab 3. Metodologi Penelitian

3.1. Diagram Alir

Pelaksanaan penelitian dilakukan melalui tahapan yang disusun secara sistematis sebagai pedoman dalam proses pengumpulan data, perancangan, simulasi, analisis, hingga penarikan Kesimpulan. Alur penelitian tersebut disajikan dalam bentuk diagram alir sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Diagram Alir

3.1.1. Studi Literatur

Studi literatur dilakukan sebagai tahap awal penelitian untuk memperoleh dasar teori dan informasi ilmiah yang relevan dengan perancangan sistem PLTS *off-grid*. Referensi diperoleh dari buku, jurnal ilmiah, standar teknis, serta dokumentasi yang membahas komponen PLTS, analisis kinerja sistem, analisis ekonomi, dan penggunaan perangkat lunak PVsyst. Hasil kajian literatur tersebut menjadikan dasar penyusunan metode penelitian, penetapan parameter simulasi, serta penyusunan kerangka analisis terhadap hasil yang diperoleh. Ringkasan penelitian terdahulu yang menjadi acuan dalam penelitian ini disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Penelitian terdahulu yang relevan

NO.	Peneliti dan Judul Peneliti	Metode / Fokus Penelitian	Kelebihan Penelitian	Keterbatasan Penelitian	GAP Penelitian
1.	Yusiran, Faiezel Ewaldo Hasnira, dan Lau Kaisar Wisnu Kita, "Perancangan dan Analisis Tekno-Ekonomi PLTS Atap <i>On-grid</i> Gedung Workshop 7" (2025) [34].	Penelitian difokuskan pada perancangan dan analisis tekno-ekonomis sistem PLTS atap <i>on-grid</i> menggunakan simulasi PVsyst dan Pylon melalui evaluasi produksi energi, parameter performa sistem, serta analisis kelayakan ekonomi berdasarkan indicator investasi jangka panjang.	Penelitian mampu menyajikan analisis teknik dan ekonomi sistem PLTS secara terintegrasi melalui parameter <i>Performance Ratio</i> (PR), <i>Specific Yield</i> , LCOE, NPV, IRR, ROI, dan PI sehingga dapat digunakan sebagai acuan kelayakan implementasi sistem PLTS atas bangunan komersial.	Penelitian masih difokuskan pada sistem PLTS <i>on-grid</i> bangunan Gedung dan belum melakukan evaluasi performa sistem <i>PLTS off-grid</i> rumah tangga menggunakan parameter <i>Solar Fraction</i> (SF) serta analisis konfigurasi sistem berdasarkan kebutuhan energi listrik rumah tangga secara lebih menyeluruh.	Penelitian sebelumnya telah membahas perancangan dan analisis tekno-ekonomis sistem PLTS <i>on-grid</i> berbasis simulasi PVsyst dengan evaluasi parameter teknis dan ekonomi sistem. Namun, penelitian tersebut belum mengintegrasikan analisis performa sistem PLTS <i>off-grid</i> rumah tangga menggunakan parameter PR dan SF secara komprehensif berdasarkan karakteristik kebutuhan energi listrik rumah tangga.
2.	Deni Tri Laksono dkk., "Simulasi dan	Penelitian berfokus pada perancangan dan simulasi sistem	Penelitian mampu melakukan simulasi dan evaluasi	Penelitian belum melakukan analisis performa sistem	Penelitian sebelumnya telah melakukan simulasi

NO.	Peneliti dan Judul Peneliti	Metode / Fokus Penelitian	Kelebihan Penelitian	Keterbatasan Penelitian	GAP Penelitian
	Perancangan PLTS <i>off-grid</i> 3 kW Menggunakan <i>Software</i> PVsyst (2025) [2].	PLTS <i>off-grid</i> 3 kW menggunakan perangkat lunak PVsyst melalui analisis kebutuhan energi listrik, konfigurasi komponen sistem, evaluasi <i>Performance Ratio</i> (PR), serta analisis kelayakan teknis dan ekonomis sistem.	performa sistem PLTS <i>off-grid</i> menggunakan PVsyst dengan analisis parameter PR, konfigurasi komponen sistem, produksi energi tahunan, serta analisis kelayakan investasi sistem PLTS.	menggunakan parameter <i>Solar Fraction</i> (SF) serta belum membahas optimasi konfigurasi sistem PLTS <i>off-grid</i> rumah tangga berdasarkan kebutuhan energi listrik secara lebih komprehensif.	dan evaluasi sistem PLTS <i>off-grid</i> menggunakan parameter PR berbasis PVsyst, namun belum menganalisis parameter <i>Solar Fraction</i> (SF) serta optimasi konfigurasi sistem berdasarkan kebutuhan energi listrik rumah tangga untuk mengetahui tingkat kontribusi energi surya terhadap kebutuhan beban secara lebih menyeluruh.
3.	Ewaldo Gavra Jumpon dkk., “ <i>Performance</i> Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Atap Berkapasitas 1,1 MWp di Industri dalam Konteks Peningkatan Kemandirian Energi dan Pengurangan Biaya Operasional” (2024) [17].	Penelitian berfokus pada analisis performa sistem PLTS atap <i>on-grid</i> berkapasitas 1,1 MWp menggunakan simulasi PVsyst melalui evaluasi produksi, <i>Performance Ratio</i> (PR), <i>Yield Factor</i> (YF), <i>Capacity Utilization Factor</i> (CUF), pengurangan emisi karbon, serta analisis keekonomian sistem PLTS.	Penelitian mampu mengevaluasi performa aktual dan hasil simulasi sistem PLTS menggunakan parameter teknis dan ekonomis secara komprehensif, meliputi produksi energi, pengurangan emisi CO ₂ , <i>payback period</i> , NPV, dan LCOE berbasis simulasi PVsyst.	Penelitian difokuskan pada sistem PLTS <i>on-grid</i> skala industri sehingga belum membahas konfigurasi sistem PLTS <i>off-grid</i> rumah tangga, analisis kebutuhan energi listrik rumah tangga, serta evaluasi parameter <i>Solar Fraction</i> (SF) untuk mengetahui kontribusi energi surya terhadap beban listrik.	Penelitian sebelumnya telah melakukan evaluasi performa sistem PLTS berbasis simulasi PVsyst menggunakan parameter PR, YF, dan CUF pada sistem <i>on-grid</i> skala industri. Namun, penelitian tersebut belum mengkaji performa sistem PLTS <i>off-grid</i> rumah tangga menggunakan parameter <i>Solar Fraction</i> (SF) serta analisis konfigurasi sistem berdasarkan kebutuhan energi listrik rumah

NO.	Peneliti dan Judul Peneliti	Metode / Fokus Penelitian	Kelebihan Penelitian	Keterbatasan Penelitian	GAP Penelitian
					tangga secara terintegrasi.
4.	Jaka Windarta dkk., “Analisis Teknis dan Ekonomis Pembangkit Listrik Tenaga Surya <i>Off-grid</i> Menggunakan <i>Software</i> PVsyst untuk Usaha Mikro Kecil dan Menengah (UMKM) <i>Coffeshop Remote Area</i> ” (2021) [24].	Penelitian difokuskan pada kajian teknis dan ekonomis sistem PLTS <i>off-grid</i> berbasis perangkat lunak PVsyst melalui analisis kebutuhan listrik, penentuan konfigurasi komponen utama sistem, estimasi produksi energi, serta evaluasi kelayakan ekonomi pada sektor UMKM <i>coffeshop</i> di wilayah <i>remote area</i> .	Penelitian mampu menyajikan analisis performa teknis dan aspek keekonomian sistem PLTS <i>off-grid</i> secara terintegrasi melalui simulasi PVsyst, sehingga dapat digunakan sebagai dasar dalam menentukan konfigurasi sistem yang sesuai dengan karakteristik kebutuhan energi pada daerah terpencil.	Penelitian masih terbatas pada analisis teknis dan keekonomian sistem PLTS <i>off-grid</i> untuk sektor UMKM, serta belum mengkaji evaluasi performa sistem menggunakan parameter <i>Performance Ratio</i> (PR) dan <i>Solar Fraction</i> (SF) secara komprehensif untuk mengetahui tingkat efisiensi sistem dan kontribusi energi surya terhadap pemenuhan kebutuhan beban listrik.	Penelitian sebelumnya telah menerapkan analisis teknis dan ekonomis sistem PLTS <i>off-grid</i> pada wilayah <i>remote area</i> . Namun, penelitian tersebut belum mengintegrasikan evaluasi performa sistem menggunakan parameter PR dan SF serta belum melakukan analisis konfigurasi sistem berdasarkan karakteristik konsumsi energi listrik rumah tangga secara lebih menyeluruh.
5.	Derry dan Hasyim, “Analisis Implementasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) untuk Bangunan Residensial Menggunakan <i>Software</i> PVsyst” (2025) [18].	Penelitian difokuskan pada implementasi sistem PLTS pada bangunan residensial menggunakan perangkat lunak PVsyst melalui analisis potensi energi surya, estimasi produksi energi listrik, konfigurasi sistem, serta evaluasi kesesuaian sistem terhadap kebutuhan	Penelitian mampu memberikan analisis implementasi sistem PLTS residensial berbasis simulasi PVsyst dengan mempertimbangkan potensi produksi energi, konfigurasi sistem, dan pemanfaatan energi surya sebagai alternatif penyediaan energi listrik pada sektor perumahan.	Penelitian masih terbatas pada implementasi sistem PLTS pada bangunan residensial dan belum melakukan evaluasi performa sistem PLTS <i>off-grid</i> menggunakan parameter <i>Performance Ratio</i> (PR) dan <i>Solar Fraction</i> (SF) secara komprehensif untuk mengetahui	Penelitian sebelumnya telah membahas implementasi sistem PLTS pada bangunan residensial berbasis simulasi PVsyst. Namun, penelitian tersebut belum mengkaji evaluasi performa sistem PLTS <i>off-grid</i> menggunakan parameter PR dan SF serta belum melakukan analisis

NO.	Peneliti dan Judul Peneliti	Metode / Fokus Penelitian	Kelebihan Penelitian	Keterbatasan Penelitian	GAP Penelitian
		konsumsi energi bangunan residensial.		tingkat efisiensi sistem dan kontribusi energi surya terhadap kebutuhan beban listrik rumah tangga.	konfigurasi sistem berdasarkan karakteristik kebutuhan energi listrik rumah tangga secara lebih terintegrasi.
6.	Dustin Muhammad dkk., “ <i>Determination of Tilt and Azimuth Angles of Solar Panels at Tanjungpura University Solar Power Plant Using PVsyst 7.3</i> ” (2024) [3].	Penelitian difokuskan pada penentuan sudut kemiringan (<i>tilt angle</i>) dan sudut azimuth (<i>azimuth angle</i>) panel surya menggunakan simulasi PVsyst 7.3 untuk memperoleh orientasi panel yang mampu menghasilkan produksi energi listrik optimal pada sistem PLTS.	Penelitian mampu menganalisis pengaruh orientasi panel surya terhadap peningkatan produksi energi listrik sistem PLTS melalui optimasi sudut kemiringan dan azimuth berbasis simulasi PVsyst.	Penelitian masih terbatas pada optimasi orientasi panel surya dan belum mengintegrasikan evaluasi performa sistem menggunakan parameter <i>Performance Ratio</i> (PR) dan <i>Solar Fraction</i> (SF) untuk mengetahui tingkat efisiensi sistem dan kontribusi energi surya terhadap kebutuhan beban listrik.	Penelitian sebelumnya telah membahas optimasi sudut kemiringan dan azimuth panel surya menggunakan simulasi PVsyst untuk meningkatkan produksi energi sistem PLTS. Namun, penelitian tersebut belum melakukan evaluasi performa sistem PLTS <i>off-grid</i> menggunakan parameter PR dan SF serta belum mengkaji konfigurasi sistem berdasarkan kebutuhan energi listrik rumah tangga secara terintegrasi.

3.1.2. Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian dilakukan secara bertahap untuk memperoleh hasil simulasi sistem PLTS *off-grid* yang optimal, efisien, dan ekonomis. Penelitian diawali dengan pengumpulan data lokasi penelitian, data meteorologi, data kebutuhan energi listrik bulanan, serta data spesifikasi komponen yang digunakan pada simulasi.

Setelah data diperoleh, dilakukan proses perancangan sistem PLTS menggunakan perangkat lunak PVsyst dengan menentukan orientasi panel surya, kapasitas modul fotovoltaik, kapasitas baterai, inverter, dan pengendali pengisi baterai. Selanjutnya dilakukan simulasi performa sistem untuk mengetahui kemampuan PLTS dalam memenuhi kebutuhan energi listrik rumah tangga.

Tahap akhir penelitian dilakukan dengan mengevaluasi hasil simulasi berdasarkan parameter *Performance Ratio* (PR), *Solar Fraction* (SF), dan analisis ekonomi guna menentukan tingkat efisiensi dan kelayakan sistem PLTS *off-grid* yang dirancang.

3.2. Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan sebagai dasar dalam proses perancangan dan simulasi PLTS *off-grid* menggunakan perangkat lunak PVsyst. Data yang dikumpulkan meliputi data lokasi penelitian, data meteorologi, data kebutuhan beban listrik, dan spesifikasi komponen sistem PLTS.

Seluruh data yang diperoleh sebagai parameter *input* simulasi agar perancangan mendekati kondisi operasional sebenarnya dan mampu menghasilkan sistem yang efisien serta ekonomis.

3.2.1. Data Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian berada di Perumahan Aiko Residence, Jalan Perahu Dendang, Batam Center. Lokasi ini dipilih sebagai objek penelitian karena mewakili karakteristik kebutuhan energi Listrik rumah tangga dan mewakili area yang mendukung penerapan sistem PLTS *off-grid*.

Berdasarkan hasil indentifikasi menggunakan Google Eart, lokasi penelitian berada pada koordinat $1,1276328^{\circ}$ *Latitude* dan $104,0601624^{\circ}$ *Longitude*, dimana posisi depan rumah menghadap ke arah timur. Data lokasi tersebut digunakan sebagai parameter masukan dalam perangkat lunak PVsyst untuk memperoleh data meteorologi dan mendukung proses perancangan sistem.



Gambar 4. Area Simulasi Sistem PLTS *Off-grid*

Sumber: Hasil identifikasi lokasi penelitian menggunakan perangkat lunak Google Earth, 2026.

Gambar 4 menunjukkan area simulasi sistem PLTS *off-grid* yang digunakan sebagai lokasi pemasangan modul fotovoltaik (*PV array*). Data lokasi tersebut selanjutnya digunakan sebagai parameter *input* simulasi pada perangkat lunak PVsyst untuk menganalisis performa dan konfigurasi sistem sesuai kebutuhan energi listrik rumah tangga.

3.2.2. Data Meteorologi

Data meteorologi yang digunakan pada penelitian ini diperoleh dari basis data Meteororm yang tersedia pada perangkat lunak PVsyst dan validasi melalui perbandingan dengan data PVGIS pada lokasi penelitian. Parameter meteorologi meliputi radiasi matahari global dan temperature lingkungan yang digunakan sebagai data masukan dalam proses simulasi sistem PLTS *off-grid*.

Tabel 2. Data Radiasi Matahari dan Temperatur Lingkungan Lokasi Penelitian

Awal Interval	GlobHor kWh/m ² /month	T_Amb °C
Januari	146.4	27.06
Febuari	147.1	27.55
Maret	157.2	28.06
April	139.3	28.19
Mei	137.0	28.89
Juni	130.4	28.37
Juli	135.6	28.42
Agustus	138.5	28.36
September	136.1	27.89
Oktober	135.6	28.27
November	118.8	27.30
Desember	121.6	27.27
Tahun	1643.6	27.97

Sumber: Hasil dari database Meteororm pada perangkat lunak PVsyst, 2026.

Tabel 2 menyajikan data radiasi matahari global dan temperatur lingkungan bulanan yang digunakan sebagai parameter masukan simulasi pada perangkat lunak PVsyst.

Tabel 3. Perbandingan Intensitas Radiasi Matahari Bulanan Berdasarkan PVsyst dan GVGIS

Perbandingan Radiasi Matahari Bulanan		
Bulan	PVsyst (kWh/m ²)	PVGIS H(h)_m (kWh/m ²)
Januari	146,4	137,13
Febuari	147,1	143,91
Maret	157,2	162,41
April	139,3	165,82
Mei	137,0	158,37
Juni	130,4	152,19
Juli	135,6	141,88
Agustus	138,5	165,05
September	136,1	167,76
Oktober	135,6	183,26
November	118,8	135,01
Desember	121,6	129,55
Tahunan	1643,6	1842,34

Sumber: Hasil dari database Meeonorm pada perangkat lunak PVsyst dan PVGIS, 2026.

Tabel 3 menunjukkan perbandingan data radiasi matahari antara Meeonorm (PVsyst) dan PVGIS untuk memverifikasi kesesuaian karakteristik radiasi pada lokasi penelitian. Perbandingan nilai dipengaruhi oleh basis data dan metode pengolahan yang digunakan oleh masing-masing platform.

Tabel 4. Perbandingan Temperatur Lingkungan Bulanan Berdasarkan Data PVsyst dan PVGIS

Temperatur Lingkungan Bulanan		
Bulan	PVsyst (°C)	PVGIS (°C)
Januari	27,1	26,9
Febuari	27,6	26,4
Maret	28,1	26,5
April	28,2	27,6
Mei	28,9	28,3
Juni	28,4	28
Juli	28,4	27,7
Agustus	28,4	27,8
September	27,9	27,9
Oktober	28,3	28
November	27,3	27,4
Desember	27,3	26
Tahunan	1643,6	1842,34

Sumber: Hasil dari database Meteonorm pada perangkat lunak PVsyst dan PVGIS, 2026.

Tabel 4 memperlihatkan perbandingan temperature lingkungan berdasarkan data Meteonorm dan PVGIS. Data temperatur digunakan sebagai parameter masukan karena memengaruhi temperatur operasi modul fotovoltaik dan karakteristik keluaran daya selama simulasi

3.2.3. Data Kebutuhan Beban

Pengumpulan data beban listrik dilakukan sebagai dasar proses perancangan sistem PLTS *off-grid* pada Perumahan Aiko Residence Batam menggunakan perangkat lunak PVsyst. Data beban diperlukan untuk mengetahui besarnya kebutuhan energi harian yang wajib dipenuhi oleh sistem PLTS maka kapasitas panel surya, baterai, dan komponen pendukung lainnya dapat dirancang secara optimal, efisien, dan ekonomis.

Proses pengumpulan data dilakukan dengan mengidentifikasi jenis peralatan listrik yang dipakai pada rumah tangga, jumlah peralatan, daya nominal masing-masing peralatan, serta durasi pemakaian harian. Data tersebut kemudian dihitung untuk memperoleh total konsumsi energi listrik harian digunakan sebagai parameter *input* simulasi pada perangkat lunak PVsyst.

Berdasarkan hasil identifikasi beban listrik rumah tangga, diperoleh data kebutuhan energi seperti ditunjukkan pada Tabel 5. Data Beban Bulanan Rumah Tangga.

Tabel 5. Data Beban Bulanan Rumah Tangga

No.	Jenis Beban	Jumlah	Daya / Konsumsi Energi	Lama Pemakaian	Energi Bulanan (kWh/Bulan)
1	Lampu Luar (LED)	2	5 W	12 Jam/Hari	3,6
2	Lampu Dalam (LED)	5	10 W	12 Jam/Hari	18
3	Televisi (TV)	1	50 W	8 Jam/Hari	12
4	Kulkas	1	1.5 kWh/day	24 Jam/Hari	45
5	Komputer	1	90 W	2 Jam/Hari	5,4
6	Air Conditioner (AC)	2	400	10 Jam/Hari	240
7	Stand-by Consumers	1	1	24 Jam/Hari	0,72
Total Energi Bulanan					324,72 kWh/bulan

Sumber: Hasil simulasi menggunakan perangkat lunak PVsyst, 2026.

Berdasarkan data pada Tabel 5. total kebutuhan energi listrik rumah tangga sebesar 10,824 kWh/hari atau setara dengan 324,72 kWh/bulan. Nilai kebutuhan energi tersebut diperoleh dari akumulasi konsumsi energi seluruh beban listrik rumah tangga yang meliputi sistem pencahayaan, peralatan elektronik, pendingin ruangan, kulkas, dan beban *stand-by*.

Data kebutuhan energi tersebut digunakan sebagai dasar dalam proses perancangan sistem PLTS *off-grid*, khususnya untuk menentukan kapasitas modul fotovoltaik (*PV array*), kapasitas baterai, *Solar Charge Controller* (SCC), dan inverter agar mampu memenuhi kebutuhan energi listrik rumah tangga sesuai karakteristik beban yang digunakan.

Selanjutnya, data konsumsi energi listrik dimasukkan ke dalam menu *Daily Household Consumption* pada perangkat lunak PVsyst sebagai parameter *input* simulasi sistem PLTS *off-grid*. Parameter tersebut digunakan menganalisis performa sistem, estimasi produksi energi, serta kesesuaian konfigurasi PLTS terhadap kebutuhan energi listrik rumah tangga. Tampilan *input* data kebutuhan energi pada *software* PVsyst ditunjukkan pada Gambar 5.

Definition of daily household consumptions for the year.

Number	Appliance	Power	Daily use	Hourly distrib.	Daily energy
2	Lampu Luar (LED)	5 W/lamp	12.0 h/day	OK	120 Wh
5	Lampu Dalam (LED)	10 W/app	12.0 h/day	OK	600 Wh
1	TV	50 W/app	8.0 h/day	OK	400 Wh
1	Kulkas	1.50 kWh/day	24.0 h/day	OK	1500 Wh
0	Dish- and Cloth-washer	0.0 W aver.	0.0 h/day		0 Wh
1	Computer	90 W/app	2.0 h/day	OK	180 Wh
2	AC	400 W/app	10.0 h/day	OK	8000 Wh
Stand-by consumers		1 W tot	24 h/day		24 Wh
Total daily energy					10824 Wh/day
Monthly energy					324.7 kWh/mth

Appliances info

Consumption definition by: ☒ Years ☐ Seasons ☐ Months

Week-end or Weekly use: ☐ Use only during days in a week

Model:

Gambar 5. Input Data Kebutuhan Energi Harian Rumah Tangga pada Perangkat Lunak PVsyst.

Sumber: Hasil simulasi menggunakan perangkat lunak PVsyst pada perancangan sistem PLTS *off-grid* skala rumah tangga di Perumahan Aiko Residence, 2026.

Melalui proses data tersebut pada Gambar 5, perangkat lunak PVsyst dapat melakukan simulasi performa sistem berdasarkan profil konsumsi rumah tangga yang telah ditentukan. Hasil simulasi selanjutnya digunakan untuk menganalisis efisiensi sistem, kapasitas komponen, serta tingkat keandalan PLTS *off-grid* yang dirancang pada penelitian ini.

3.2.4. Data Spesifikasi Komponen

Data spesifikasi komponen digunakan sebagai acuan dalam menentukan konfigurasi sistem PLTS *off-grid* yang akan disimulasikan dan dianalisis pada penelitian ini. Komponen utama yang digunakan meliputi modul surya (*PV module*), baterai penyimpanan energi, *solar charge controller* (SCC), dan inverter. Ringkasan komponen yang digunakan beserta tipe atau mereknya disajikan pada Tabel 6, sedangkan datasheet lengkap dari setiap komponen disertakan pada bagian lampiran sebagai dokumen pendukung penelitian.

Tabel 6. Data Spesifikasi Komponen PLTS *Off-Grid*

Lampiran	Komponen (Tipe/Merek)
Lampiran 1	Datasheet Modul PV-JA Solar JAM72S30-550/MR
Lampiran 2	Datasheet MPPT-GensStar GS MPPT 80M-48V
Lampiran 3	Datasheet Baterai-Cegasa Ultra 175
Lampiran 4	Datasheet Inverter-Growatt SPF 5000 ES

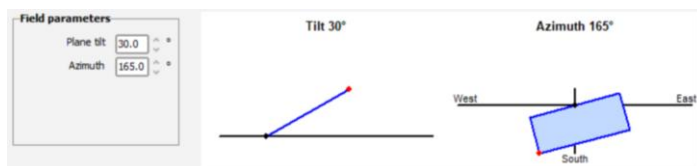
Spesifikasi teknis yang digunakan mencakup kapasitas daya modul surya, tegangan kerja, kapasitas baterai, efisiensi inverter, serta kemampuan pengendali pengisian perangkat lunak PVsyst dan disesuaikan dengan kebutuhan energi sistem.

3.3. Perancangan Sistem PLTS

Tahapan perancangan sistem PLTS dilakukan menggunakan perangkat lunak PVsyst dengan simulasi sistem *off-grid*. Proses perancangan dilakukan dengan menentukan konfigurasi sistem yang sesuai terhadap kebutuhan energi listrik rumah tangga agar diperoleh sistem yang optimal, efisien, dan ekonomis.

3.3.1. Orientation

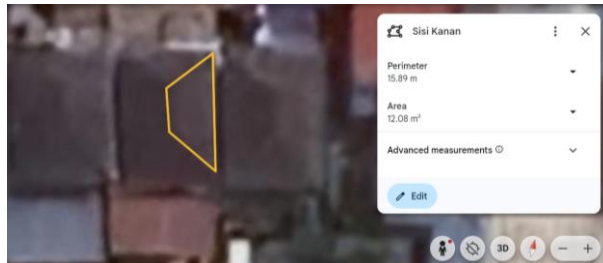
Tahapan *orientation* dilakukan untuk menentukan orientasi pemasangan modul fotovoltaik pada sistem PLTS *off-grid* sesuai dengan kondisi lokasi penelitian. Pengaturan ini meliputi sudut kemiringan (*tilt*) dan arah hadap (*azimuth*) modul sebagai parameter awal dalam simulasi menggunakan perangkat lunak PVsyst guna memperoleh konfigurasi yang sesuai dengan kondisi lapangan. Konfigurasi *orientation* yang digunakan dalam penelitian ini diperlihatkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Tampilan Konfigurasi *Orientation* pada Perangkat Lunak PVsyst

Sumber: Hasil simulasi menggunakan perangkat lunak PVsyst, 2026.

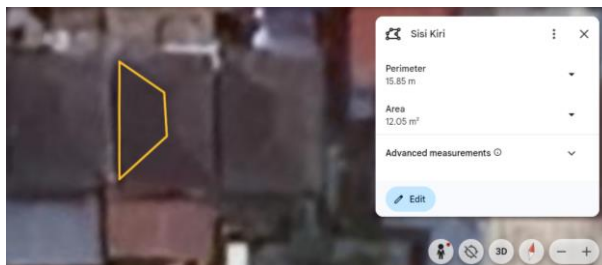
Pengukuran dimensi bidang atap dilakukan menggunakan citra satelit melalui aplikasi Google Earth untuk memperoleh data geometris sebagai dasar perancangan sistem PLTS *off-grid*. Pengukuran ini bertujuan untuk menentukan luas efektif area pemasangan modul fotovoltaik sehingga konfigurasi sistem yang dirancang dapat disesuaikan dengan kondisi fisik bangunan. Salah satu hasil pengukuran bidang atap yang digunakan sebagai acuan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Luas Efektif Sisi Kanan Atap

Sumber: Hasil identifikasi lokasi penelitian menggunakan perangkat lunak Google Earth, 2026.

Gambar 7 memperlihatkan hasil pengukuran luas efektif sisi kanan atap yang digunakan sebagai salah satu area pemasangan modul fotovoltaik. Hasil identifikasi menggunakan Google Earth, bidang atap sisi kanan memiliki luas efektif 12,08 m² dengan keliling 15,89 m. Bersama sisi kiri atap, bidang ini digunakan untuk menempatkan konfigurasi PV Array berkapasitas 3,30 kWp yang memiliki dimensi sekitar 6,83 m x 2,27 m. Berdasarkan hasil evaluasi, kebutuhan area pemasangan sebesar 15,50 m² masih berada di bawah total luas efektif kedua bidang atap, sehingga pemasangan modul pada atap berbentuk limas dapat diterapkan secara teknis.



Gambar 8. Luas Efektif Sisi Kiri Atap

Sumber: Hasil identifikasi lokasi penelitian menggunakan perangkat lunak Google Earth, 2026.

Hasil pengukuran pada Gambar 8 menunjukkan luas efektif sisi kiri atap sebesar $12,05 \text{ m}^2$ dengan keliling $15,85 \text{ m}$. Luas bidang ini melengkapi area pemasangan bidang atap sehingga total luas efektif atap mencapai $24,13 \text{ m}^2$. Nilai tersebut lebih besar dibandingkan kebutuhan area PV Array sebesar $15,50 \text{ m}^2$, sehingga konfigurasi enam modul fotovoltaik pada sistem 3S2P dapat dipasang pada dua bidang atap tanpa memerlukan area instalasi.

3.3.2. PV Array

Pada penelitian ini, Konfigurasi PV Array dirancang menggunakan enam modul surya JA Solar JAM72-S30-550/MR dengan daya nominal 550 Wp per modul sehingga diperoleh kapasitas terpasang sebesar $3,30 \text{ kWp}$. Pemilihan modul didasarkan pada kesesuaian spesifikasi teknis terhadap kebutuhan energi listrik rumah tangga serta kompatibilitas dengan konfigurasi sistem PLTS *off-grid* yang dirancang. Penentuan jumlah modul dan konfigurasi seri-paralel dilakukan melalui simulasi menggunakan perangkat lunak PVsyst untuk memperoleh produksi energi yang sesuai dengan kebutuhan beban sistem. Spesifikasi teknis modul fotovoltaik yang digunakan pada penelitian ini disajikan pada Lampiran 1.

3.3.3. Battery Storage

Sistem penyimpanan energi menggunakan *battery bank* berkapasitas 48 V , 560 Ah dengan kapasitas energi tersimpan sebesar $26,88 \text{ kWh}$. Penentuan kapasitas baterai didasarkan pada kebutuhan energi beban rumah tangga, waktung cadang (*autonomy*), serta batas *Depth of Discharge* (DoD) yang digunakan dalam perancangan sistem PLTS *off-grid*. Konfigurasi baterai ditentukan melalui simulasi menggunakan perangkat lunak PVsyst untuk menjaga kontinuitas

suplai energi dan meningkatkan keandalan operasi sistem. Spesifikasi teknis baterai yang digunakan pada penelitian ini disajikan pada Lampiran 3.

3.3.4. Solar Charge Controller dan Inverter

Pengelolaan energi pada sistem PLTS *off-grid* didukung oleh *MPPT Solar Charger Controller* berkapasitas 100 A dengan tegangan kerja 48 V. Perangkat ini berfungsi mengoptimalkan penyerapan daya dari PV Array melalui metode *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) sehingga proses pengisian baterai berlangsung lebih efisien pada berbagai kondisi radiasi matahari. Kapasitas MPPT ditentukan berdasarkan arus keluaran PV Array dan tegangan sistem yang ditentukan. Spesifikasi teknis MPPT Solar Charger Controller yang digunakan pada penelitian ini disajikan pada Lampiran 2.

Energi listrik selanjutnya disalurkan ke beban melalui inverter *off-grid* berkapasitas 3.500 W dengan tegangan masukan 48 VDC dan tegangan keluaran 220 VAC. Kapasitas inverter dipilih agar mampu melayani kebutuhan daya beban rumah tangga secara kontinu serta sesuai dengan konfigurasi PV Array dan sistem penyimpanan energi yang dirancang menggunakan perangkat lunak PVsyst. Konfigurasi PV Array digunakan terdiri atas 3 modul dalam satu rangkaian seri (3 *module in series*) dan 2 rangkaian paralel (2 *strings*). Spesifikasi teknis inverter disajikan pada Lampiran 4.

3.4. Simulasi Menggunakan PVsyst

Simulasi sistem PLTS *off-grid* pada penelitian ini dilakukan menggunakan perangkat lunak PVsyst untuk menganalisis performa dan evaluasi teknis berdasarkan kondisi lokasi penelitian, kebutuhan energi listrik beban, serta spesifikasi komponen yang digunakan.

Proses simulasi dilakukan dengan memasukkan data lokasi penelitian, data meteorologi, intensitas radiasi matahari, temperatur lingkungan, dan kebutuhan energi listrik rumah tangga sebagai parameter utama simulasi. Selanjutnya dilakukan konfigurasi sistem meliputi *orientation*, *PV array*, kapasitas baterai, inverter, dan *solar charge controller* sesuai kebutuhan sistem PLTS *off-grid*.

Hasil simulasi digunakan untuk memperoleh parameter performa sistem seperti energi listrik yang dihasilkan, *Performance Ratio* (PR), *Solar Fraction* (SF), dan rugi-rugi kelayakan sistem PLTS yang dirancang.

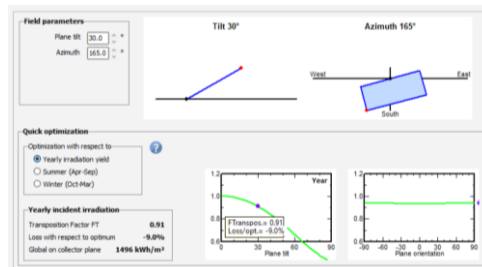
Bab 4. Hasil Dan Pembahasan

4.1. Hasil Perancangan Sistem PLTS *Off-Grid*

Hasil perancangan sistem PLTS *off-grid* diperoleh melalui simulasi menggunakan perangkat lunak PVsyst berdasarkan kebutuhan energi listrik rumah tangga di Perumahan Aiko Residence. Pembahasan mencakup konfigurasi komponen utama, kebutuhan luas area pemasangan modul fotovoltaik, *single line diagram*, serta hasil analisis kinerja teknis dan ekonomi sebagai dasar evaluasi terhadap sistem yang dirancang

4.1.1. Orientation Modul Surya

Penentuan orientasi modul surya merupakan salah satu tahapan penting dalam perancangan sistem PLTS *off-grid* karena mempengaruhi besarnya radiasi matahari yang diterima modul fotovoltaik. Pada penelitian ini, orientasi modul ditetapkan berdasarkan kondisi geografis lokasi penelitian di Perumahan Aiko Residence serta hasil simulasi menggunakan perangkat lunak PVsyst untuk memperoleh konfigurasi yang mampu menghasilkan energi listrik secara optimal.



Gambar 9. Pengaturan Sudut Kemiringan (*Tilt*) dan *Azimuth* Modul Fotovoltaik pada Perangkat Lunak PVsyst

Sumber: Hasil simulasi menggunakan perangkat lunak PVsyst, 2026.

Gambar 9 menunjukkan orientasi modul surya dengan sudut kemiringan (*tilt angle*) 30,0° dan sudut *azimuth* 165,0° menghadap kearah selatan. Pengaturan orientasi tersebut diterapkan pada simulasi untuk menyesuaikan posisi modul terhadap kondisi geografis lokasi penelitian sehingga penerimaan radiasi matahari pada permukaan modul dapat berlangsung secara optimal.

4.1.2. Konfigurasi PV Array

Konfigurasi PV Array ditentukan berdasarkan hasil perancangan menggunakan perangkat lunak PVsyst dengan mempertimbangkan kebutuhan energi listrik, karakteristik modul fotovoltaik, serta spesifikasi komponen pendukung sistem. Susunan modul yang diperoleh dirancang untuk menghasilkan tegangan dan arus operasi yang sesuai dengan kebutuhan sistem PLTS *off-grid* sehingga mampu mendukung kinerja sistem secara optimal.

Gambar 10. Spesifikasi PV Array pada Perangkat Lunak PVsyst

Sumber: Hasil simulasi menggunakan perangkat lunak PVsyst, 2026.

Gambar 10 memperlihatkan konfigurasi PV Array yang digunakan pada sistem PLTS *off-grid*. Array terdiri atas 6 modul surya tipe JA Solar JAM72-S30-550-MR dengan daya nominal 550 Wp per modul. Berdasarkan hasil perancangan perangkat lunak PVsyst, modul disusun dalam konfigurasi 3 modul seri dan 2 cabang paralel (3S2P) untuk menyesuaikan kebutuhan tegangan sistem serta karakteristik *MPPT Solar Charger Controller* yang digunakan.

Kapasitas PV Array ditentukan menggunakan persamaan (6) berdasarkan jumlah modul fotovoltaik dan daya nominal setiap modul. Hasil perhitungan kapasitas sistem ditunjukkan sebagai berikut.

$$PV_{Array} = N \times P_{modul}$$

$$\begin{aligned}
 PV_{Array} &= 6 \times 550 \\
 PV_{Array} &= 3300 \text{ Wp} \\
 PV_{Array} &= 3,30 \text{ kWp}
 \end{aligned}$$

Tegangan operasi array ditentukan berdasarkan jumlah tegangan maksimum daya (*Voltage at Maximum Power Point/Vmpp*) dari modul fotovoltaik yang disusun secara seri. Berdasarkan spesifikasi modul JA Solar JAM72-S30-MR, nilai V_{mpp} sebesar 41,96 V.

Tegangan operasi PV Array selanjutnya dihitung menggunakan persamaan (7) sebagai berikut:

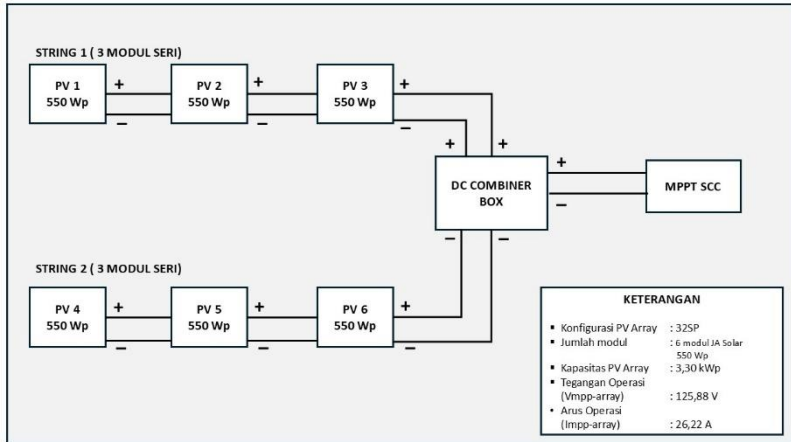
$$\begin{aligned}
 V_{Array} &= N_S \times V_{mpp} \\
 V_{Array} &= 3 \times V_{mpp} \\
 V_{Array} &= 3 \times 41,96 \\
 V_{Array} &= 125,88 \text{ V}
 \end{aligned}$$

Sementara itu, arus operasi array diperoleh dari penjumlahan arus maksimum daya (*Current at Maximum Power Point/Impp*) dari setiap string yang disusun secara paralel. Berdasarkan spesifikasi modul JA Solar JAM72-S30-550-MR, nilai I_{mpp} sebesar 13,11 A.

Arus operasi PV Array kemudian dihitung menggunakan persamaan (8).

$$\begin{aligned}
 I_{Array} &= N_S \times I_{mpp} \\
 I_{Array} &= 2 \times I_{mpp} \\
 I_{Array} &= 2 \times 13,11 \\
 I_{Array} &= 26,22 \text{ A}
 \end{aligned}$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa konfigurasi 3S2P menghasilkan daya terpasang sebesar 3,30 kWp dengan tegangan operasi sekitar 125,88 V dan arus operasi 26,22 A. Konfigurasi sesuai dengan spesifikasi *MPPT Solar Charge Controller* yang digunakan pada sistem PLTS *off-grid*.



Gambar 11. Konfigurasi PV Array Sistem PLTS Off-Grid 3,30 kWp (3S2P)

Gambar 11, menjelaskan tiga modul disusun secara seri pada setiap *string* untuk meningkatkan tegangan keluaran, sedangkan dua *string* dihubungkan secara paralel untuk meningkatkan kapasitas arus sistem. Energi listrik DC yang dihasilkan oleh PV array kemudian dikumpulkan melalui DC *Combiner Box* sebelum disalurkan ke MPPT *Solar Charge Controller*. Konfigurasi tersebut menghasilkan kapasitas sebesar 3,30 kWp dengan tegangan dan arus operasi sesuai dengan spesifikasi sistem, sehingga mampu mendukung proses pengisian baterai dan kebutuhan energi listrik rumah tangga secara optimal.

Berdasarkan spesifikasi fisik modul, setiap panel memiliki dimensi 2278 mm × 1134 mm dengan luas area sebesar 2,583 m². Kebutuhan luas area pemasangan PV Array ditentukan berdasarkan jumlah modul fotovoltaik yang digunakan dan luas permukaan setiap modul.

Besarnya kebutuhan area tersebut dihitung menggunakan persamaan (9).

$$\begin{aligned}
 A_{Total} &= N \times A_{modul} \\
 A_{Total} &= 6 \times 2,583 \\
 A_{Total} &= 15,498 \text{ m}^2 \\
 A_{Total} &= 15,50 \text{ m}^2
 \end{aligned}$$

Dengan demikian, hasil perancangan PV Array tersusun dari 6 Modul fotovoltaik JA Solar JAM72-S30-550 MR dengan spesifikasi daya nominal (Pmax) 550 Wp, tegangan maksimum daya (Vmpp) 41,96 V, dan arus maksimum daya (Impp) 13,11 A. Berdasarkan spesifikasi tersebut, modul dikonfigurasi dalam

susunan 3 modul seri dan 2 string paralel (3S2P) sehingga diperoleh kapasitas terpasang sebesar 26,22 A. Konfigurasi ini telah memenuhi rentang tegangan masuk dan kapasitas arus *Victron SmartSolar* MPPT 250/100, sehingga mendukung proses penelusuran titik daya maksimum (MPPT) dan penyaluran energi listrik secara optimal sesuai hasil simulasi menggunakan perangkat lunak PVsyst.

4.1.3. Battery Storage

Perancangan *battery storage* dilakukan berdasarkan kebutuhan energi listrik, kapasitas penyimpanan, dan karakteristik operasi sistem PLTS *off-grid*. Hasil simulasi menggunakan perangkat lunak PVsyst menghasilkan konfigurasi *battery bank* yang disesuaikan dengan kapasitas beban serta spesifikasi komponen sistem untuk menjamin kontinuitas suplai energi pada saat modul fotovoltaik tidak menghasilkan daya listrik.

The screenshot shows the 'Definitions for a battery' window in PVsyst. The 'Basic data' tab is active, displaying the following information:

- Model:** ULTRA 175 48V 280Ah
- Manufacturer:** Cegasa
- File name:** Cegasa_ULTRA_175_48V_280Ah.BTR
- Data source:** Manufacturer 2023
- Original PVsyst database:** Prod. Since 2021
- Technology:** Lithium-ion, LFP
- Category:** Battery block
- Whole battery / Per element:** Whole battery (selected)

Basic parameters:

- Nb of cells in Series/In parallel: 15 / 1
- Nominal voltage: 48.0 V
- Capacity at C10: 280.00 Ah
- Internal resistance @ ref. temp.: 8.55 mΩ
- Reference temperature: 20.0 °C
- Coulombic efficiency: 96.0 %

Behaviour at limits:

- Charge Cut-Off Voltage: 52.5 V
- Discharge Cut-Off Voltage: 43.5 V
- Maximum charging current: 175 A
- Maximum discharging current: 175 A
- Minimum charging temperature: 0 °C
- Minimum discharging temperature: -20 °C

Info : Renormalization to C10:

- Datasheet Nominal Capacity: 280.0 Ah
- Defined for a discharging rate of: 10.00 Hours
- =>Corresp. C10 acc. to Peukert model: 280.0 Ah

Full battery indicators:

- Stored energy at DOD: 95 %
- Total stored energy (3500 cycles): 12.9 kWh
- Specific energy: 45.3 MWh
- Specific weight: 123 Wh/kg
- Specific weight: 8 kg/kWh

Buttons at the bottom: Copy to table, Print, Cancel, OK.

Gambar 12. Spesifikasi *Battery Storage* Cegasa ULTRA 175 48V 280Ah pada perangkat lunak PVsyst

Sumber: Hasil simulasi menggunakan perangkat lunak PVsyst, 2026.

Gambar 12 menampilkan konfigurasi sistem penyimpanan energi (*battery storage*) yang digunakan pada sistem PLTS *off-grid* berdasarkan hasil simulasi menggunakan perangkat lunak PVsyst. Sistem menggunakan baterai *lithium iron phosphate* (LiFePO_4) tipe Cagasa ULTRA 175 dengan tegangan nominal 48 V dan kapasitas 280 Ah per unit. Konfigurasi baterai disusun dalam 1 seri dan 2 paralel sehingga penyimpanan meningkat untuk memenuhi kebutuhan energi listrik rumah tangga. Pemilihan baterai LiFePO_4 dilakukan karena memiliki efisiensi tinggi, umur siklus yang panjang, serta karakteristik pengisian dan pelepasan energi yang stabil untuk aplikasi PLTS *off-grid*.

Konfigurasi baterai ditentukan berdasarkan hasil perancangan pada perangkat lunak PVsyst dengan mempertimbangkan kebutuhan energi harian, tegangan nominal sistem, serta target lama penyimpanan energi (*autonomy*). Berdasarkan hasil konfigurasi tersebut, sistem menggunakan dua unit baterai berkapasitas 280 Ah yang disusun untuk memenuhi kebutuhan penyimpanan energi pada sistem PLTS *off-grid*.

4.1.4. Solar Charge Controller dan Inverter

Hasil perancangan *Solar Charge Controller* dan inverter diperoleh berdasarkan simulasi menggunakan perangkat lunak PVsyst. Pemilihan kedua komponen dilakukan dengan mempertimbangkan kesesuaian terhadap konfigurasi PV Array, kapasitas *battery bank*, dan kebutuhan daya beban agar proses pengaturan, penyimpanan, serta konversi energi listrik pada sistem PLTS *off-grid* dapat berlangsung secara optimal.

The image shows the PVsyst software interface for configuring a solar charge controller and PV array. The top section, 'Select the control mode and the controller', shows 'Universal controller' selected with a 'Generic' dropdown. Below this, 'Operating mode' has 'MPPT converter' selected. The 'MPPT power converter' section shows 'Max. Charging - Discharging current' with values of 1000 W, 48 V, 75 A, and 20 A. The bottom section, 'PV Array design', shows 'Number of modules and strings' with 'Mod. in series' set to 2 and 'Nb. strings' set to 3. The 'Operating conditions' table lists various parameters like Vmpp, Voc, Plane irradiance, and Impp. The 'Nb. modules' is 6, and the 'Area' is 15 m². The 'Max. operating power' is 3.03 kW, and the 'Array nom. Power (STC)' is 3.30 kWp.

Operating conditions:	
Vmpp (60°C)	73 V
Vmpp (20°C)	85 V
Voc (-10°C)	109 V
Plane irradiance	1000 W/m²
Impp (60°C)	39.8 A
Isc (60°C)	42.6 A
Isc (at STC)	42.4 A

PV Array design	
Nb. modules	6
Area	15 m²
Max. operating power	3.03 kW
Array nom. Power (STC)	3.30 kWp

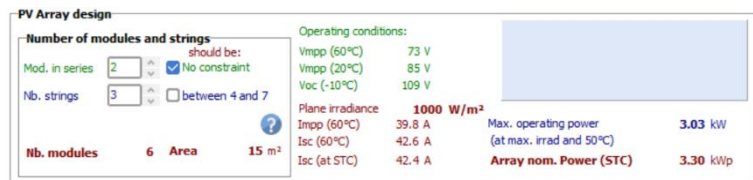
Gambar 13. Penentuan Spesifikasi dan Mode Operasi *Solar Charge Controller* MPPT pada PVsyst..

Sumber: Hasil simulasi menggunakan perangkat lunak PVsyst, 2026.

Gambar 13 menunjukkan konfigurasi MPPT *Solar Charge Controller* dan inverter yang digunakan pada sistem PLTS *off-grid*. Berdasarkan hasil perancangan menggunakan PVsyst, sistem menggunakan *Victron SmartSolar* MPPT 250/100 dengan tegangan masukan yang sesuai terhadap konfigurasi PV Array sebesar 125,88 V serta kapasitas arus pengisian maksimum 100 A untuk mendukung pengisian *battery bank* 48 V, 560 Ah. MPPT berfungsi mengoptimalkan penyerapan daya dari modul surya sehingga energi yang dihasilkan dapat dimanfaatkan secara maksimal.

Pada sisi keluaran sistem, inverter 48 VDC/220 VAC berfungsi mengonversi energi listrik arus searah (DC) yang tersimpan pada *battery bank* menjadi energi listrik arus bolak-balik (AC) untuk menyuplai beban rumah tangga. Kapasitas inverter ditentukan berdasarkan kapasitas PV Array hasil perancangan. Meskipun bangunan penelitian menggunakan atap berbentuk limas, pemasangan modul fotovoltaik hanya dilakukan pada dua bidang atap yang memiliki luas efektif dan orientasi sesuai terhadap kebutuhan sistem, sehingga diperoleh konfigurasi enam modul berdaya 550 Wp dengan kapasitas total 3,30 kWp. Kapasitas inverter ditetapkan berdasarkan konfigurasi sistem hasil simulasi pada perangkat lunak PVsyst dengan mempertimbangkan kapasitas PV Array dan kebutuhan daya beban. Pemilihan komponen ini bertujuan untuk memastikan kesesuaian proses konversi daya DC ke AC sehingga sistem PLTS *off-grid* dapat beroperasi secara andal sesuai dengan hasil perancangan.

4.1.5. Luas Area Pemasangan Modul Surya



Gambar 14. Luas Area Pemasangan Modul Surya pada PVsyst

Sumber: Hasil simulasi menggunakan perangkat lunak PVsyst, 2026.

Gambar 14 memperlihatkan kebutuhan area pemasangan modul fotovoltaik berdasarkan hasil perancangan sistem PLTS *off-grid* menggunakan perangkat lunak PVsyst. Konfigurasi PV Array terdiri atas 6 modul JA *Solar* JAM72-S30-550-MR memerlukan area pemasangan sebesar 15 m².

Untuk memverifikasi ketersediaan area pemasangan, dilakukan perhitungan jumlah maksimum modul yang dapat ditempatkan pada atas berdasarkan luas efektif area yang tersedia dan luas satu modul fotovoltaik sebesar 2,583 m².

1. Perhitungan Jumlah Maksimum Modul pada Atap

Estimasi jumlah modul yang dapat dipasang pada area atap dihitung menggunakan persamaan (10) berdasarkan perbandingan luas area efektif atap dan luas satu modul fotovoltaik.

$$N_{modul} = \frac{A_{atap}}{A_{modul}}$$

Sisi Kanan

$$\begin{aligned} N_{modul} &= \frac{12,08}{2,583} \\ &= 4,68 \approx 4 \text{ modul} \end{aligned}$$

Sisi Kiri

$$\begin{aligned} N_{modul} &= \frac{12,05}{2,583} \\ &= 4,66 \approx 4 \text{ modul} \end{aligned}$$

2. Perhitungan Luas Area yang dibutuhkan Sistem

Kebutuhan area pemasangan sistem PLTS dihitung menggunakan persamaan (11) untuk menentukan total luas yang diperlukan oleh konfigurasi modul yang dirancang.

Jumlah modul yang digunakan :

$$N_{modul} = 6 \text{ modul}$$

Luas satu modul:

$$A_{modul} = 2,583 \text{ m}^2$$

Maka:

$$A_{kebutuhan} = N \times A_{modul}$$

$$A_{kebutuhan} = 6 \times 2,583$$

$$A_{kebutuhan} = 15,50 \text{ m}^2$$

3. Perbandingan dengan Luas Atap Tersedia

$$A_{tersedia} = 12,08 + 12,05$$

$$A_{tersedia} = 24,13 \text{ m}^2$$

Sisa area:

$$A_{sisa} = A_{tersedia} - A_{kebutuhan}$$

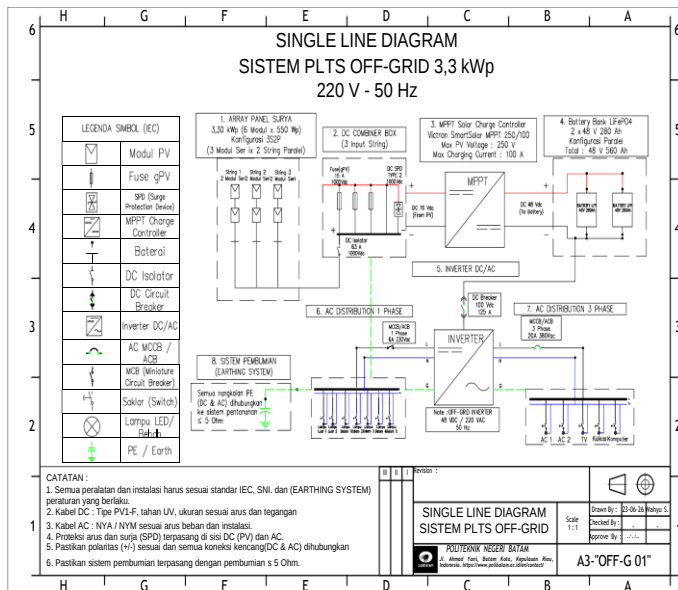
$$A_{sisa} = 24,13 - 15,50$$

$$A_{sisa} = 8,63 \text{ m}^2$$

Berdasarkan hasil perhitungan, total luas yang tersedia sebesar 24,13 m² secara teoritis mampu menampung hingga 10 modul fotovoltaik. Sementara itu, konfigurasi sistem yang dirancang hanya menggunakan 6 modul dengan kebutuhan area pemasangan sebesar 15,50 m². Dengan demikian, luas atap yang tersedia masih mencukupi untuk pemasangan sistem PLTS 3,30 kWp. Meskipun atap rumah di Perumahan Aiko Residence memiliki bentuk atap limas, area efektif yang tersedia tetap mampu mengakomodasi pemasangan enam modul surya secara aman tanpa melebihi batas area pemasangan yang tersedia.

4.1.6. Single Line Diagram PLTS Off-Grid 3,3 kWp

Single Line Diagram (SLD) disusun untuk menggambarkan konfigurasi dan hubungan antara komponen utama pada sistem PLTS *off-grid* berkapasitas 3,3 kWp yang dirancang. Diagram ini menunjukkan alur penyaluran energi listrik mulai dari PV Array, *solar charger controller*, baterai, inverter, hingga beban, sehingga memberikan gambaran mengenai prinsip kerja dan integrasi komponen dalam sistem secara keseluruhan.



Gambar 15. Single Line Diagram PLTS Off-Grid 3,3 kWp

Sumber: Hasil simulasi menggunakan perangkat lunak PVsyst, 2026.

Gambar 15 memperlihatkan *Single Line Diagram* sistem PLTS *off-grid* berkapasitas 3,3 kWp yang dirancang berdasarkan hasil simulasi menggunakan perangkat lunak PVsyst. Sistem terdiri atas PV Array berkapasitas 3,30 kWp yang disusun dalam konfigurasi 3S2P (3 modul seri dan 2 string paralel), kemudian dihubungkan ke DC *Combiner Box* yang dilengkapi perangkat proteksi berupa fuse, *surge protection device* (SPD), dan DC *isolator*.

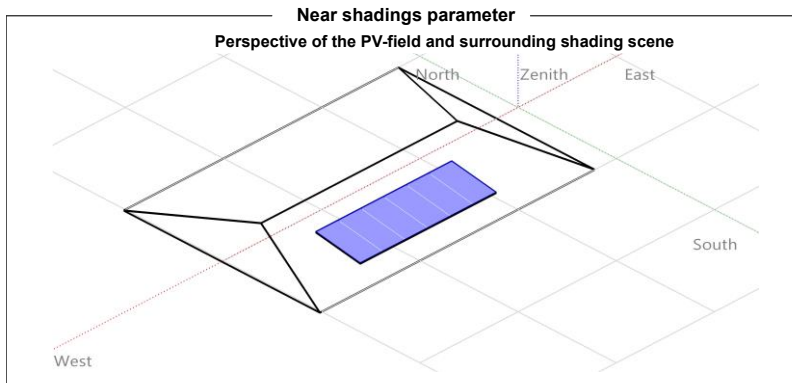
Energi listrik arus searah (DC) dari PV Array selanjutnya dikendalikan oleh MPPT *Solar Charge Controller* Victron SmartSolar MPPT 250/100 untuk mengoptimalkan penyerapan daya modul surya dan mengatur proses pengisian *battery bank* LiFePO₄ berkapasitas total 48 V 560 Ah. Energi listrik yang tersimpan pada baterai kemudian dikonversi oleh *off-grid* inverter 48 VDC/220 VAC menjadi energi listrik arus bolak balik (AC) yang disalurkan ke panel distribusi dan beban rumah tangga. Selain itu, sistem dilengkapi dengan proteksi sisi DC dan AC serta sistem pembumian (*earthing system*) guna meningkatkan keandalan dan keselamatan operasi instalasi PLTS *off-grid* yang dirancang.

4.2. Analisis *Shading Array*

Analisis *shading array* dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh bayangan terhadap kinerja sistem PLTS menggunakan fitur *Near Shading* pada perangkat lunak PVsyst. Tahapan analisis meliputi pemodelan geometri atap dan posisi PV Array, evaluasi melalui *Shading Factor Table*, serta analisis pengaruh *shading* terhadap produksi energi sistem. Hasil analisis ini digunakan untuk memastikan bahwa konfigurasi pemasangan modul surya telah sesuai dengan kondisi atap rumah tipe limas sehingga potensi kehilangan energi akibat bayangan dapat diminimalkan dan kinerja sistem PLTS tetap normal.

4.2.1. Pemodelan Atap dan Array

Pemodelan atap dan PV Array dilakukan sebagai tahap awal dalam analisis *near shading* menggunakan perangkat lunak PVsyst. Model tiga dimensi (3D) yang disusun merepresentasikan kondisi pemasangan modul fotovoltaik pada lokasi penelitian dan digunakan sebagai dasar untuk mengevaluasi potensi bayangan serta pengaruhnya terhadap kinerja sistem PLTS *off-grid*.



Gambar 16. Model 3D Atap tipe limas dan posisi PV Array pada Perumahan Aiko Residence Menggunakan PVsyst

Sumber: Hasil simulasi menggunakan perangkat lunak PVsyst, 2026.

Gambar 16 menunjukkan model tiga dimensi rumah menggunakan atap tipe limas yang dibuat pada fitur *Near Shading* di perangkat lunak PVsyst. Pemodelan ini dilakukan untuk mempresentasikan geometri bangunan sesuai kondisi aktual di Perumahan Aiko Residence sehingga analisis pengaruh bayangan terhadap modul surya dapat dilakukan secara akurat.

PV Array dipasang mengikuti bidang atap sesuai orientasi dan kemiringan atap bangunan. Konfigurasi tersebut digunakan sebagai dasar perhitungan *Shading Factor Table*, sehingga pengaruh bayangan terhadap penerimaan radiasi matahari dan produksi energi listrik dapat dievaluasi melalui simulasi PVsyst.

4.2.2. Hasil *Shading Factor Table*

Hasil analisis *shading factor table* digunakan untuk menggambarkan distribusi faktor bayangan (*shading factor*) pada bidang PV Array berdasarkan variasi sudut azimuth dan ketinggian matahari (*sun height*). Tabel ini diperoleh dari simulasi *Near Shading* menggunakan perangkat lunak PVsyst dan menjadi dasar untuk mengevaluasi potensi pengaruh bayangan terhadap penerimaan radiasi matahari pada modul fotovoltaik

Tabel 7. *Near Shadings Factor Parameter*

Azimuth	-180°	-160°	-140°	-120°	-100°	-80°	-60°	-40°	-20°	0°	20°	40°	60°	80°	100°	120°	140°	160°	180°
Height																			
90°	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
80°	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
70°	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
60°	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
50°	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
40°	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
30°	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
20°	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
10°	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000
2°	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000

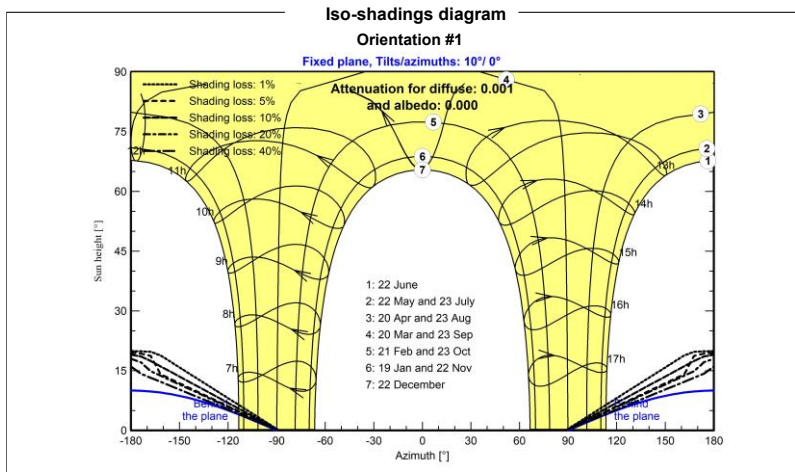
Sumber: Hasil simulasi menggunakan perangkat lunak PVsyst, 2026.

Perhitungan *Shading Factor Table* menggunakan fitur *Near Shading* pada PVsyst ditunjukkan pada Tabel 7. Tabel tersebut menyajikan nilai faktor bayangan terhadap komponen radiasi langsung berdasarkan variasi sudut *azimuth* dan elevasi matahari. Nilai faktor bayangan yang mendekati 0,000 pada hampir seluruh kombinasi sudut menunjukkan bahwa modul fotovoltaik tidak mengalami hambatan bayangan yang signifikan selama periode penerimaan radiasi matahari.

Nilai 1,000 hanya muncul pada sudut elevasi matahari yang sangat rendah, yaitu sekitar 2°-10°, yang mempresentasikan kondisi saat matahari berada di dekat horizon pada waktu terbit maupun terbenam. Kondisi tersebut memiliki kontribusi radiasi yang relative kecil terhadap energi tahunan, sehingga pengaruhnya terhadap produksi energi sistem dapat diabaikan. Selain itu, nilai *shading factor for diffuse* sebesar 0,001 dan *albedo* sebesar 0,000 menunjukkan bahwa kehilangan energi akibat bayangan pada radiasi difus maupun pantulan permukaan berada pada tingkat yang sangat rendah. Berdasarkan hasil tersebut, konfigurasi penempatan PV Array pada penelitian ini dinilai mampu meminimalkan pengaruh bayangan sehingga mendukung kinerja sistem PLTS yang optimal.

4.2.3. Analisis Pengaruh *Shading* Terhadap Produksi Energi

Analisis pengaruh *shading* terhadap produksi energi dilakukan untuk mengevaluasi sejauh mana bayangan dari lingkungan sekitar memengaruhi penerimaan radiasi matahari oleh PV Array. Evaluasi ini didasarkan pada hasil simulasi menggunakan perangkat lunak PVsyst yang menggambarkan kondisi bayangan sepanjang lintas matahari (*sun path*), sehingga dapat digunakan sebagai dasar dalam menganalisis dampaknya terhadap produksi energi serta kinerja sistem PLTS *off-grid*.



Gambar 17. Diagram Analisis Pengaruh *Near Shading* terhadap Produksi Energi pada PV Array

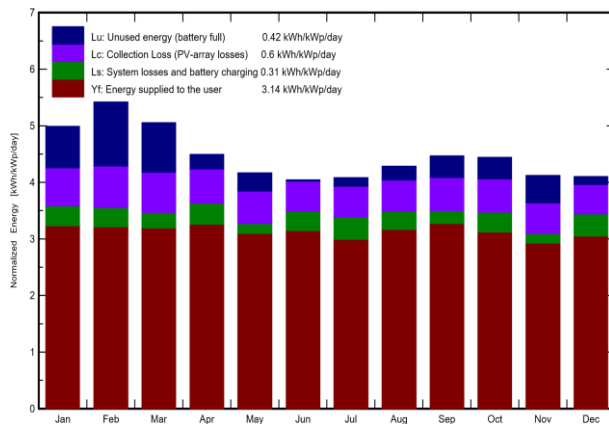
Sumber: Hasil simulasi menggunakan perangkat lunak PVsyst, 2026.

Berdasarkan Gambar 17, hasil analisis *Near Shading* memperlihatkan bahwa bayangan hanya terjadi pada kondisi tertentu, terutama saat posisi matahari berada pada sudut elevasi rendah pada pagi dan sore hari. Sementara itu, pada sebagian besar lintasan matahari, PV Array menerima radiasi tanpa hambatan yang signifikan sehingga kehilangan energi akibat *near shading* relatif kecil.

Kondisi tersebut mendukung kinerja sistem PLTS yang ditunjukkan oleh nilai *Performance Ratio* (PR) yang tetap berada pada kategori baik, *Solar Fraction* (SF) yang tinggi, serta produksi energi tahunan yang mampu memenuhi kebutuhan beban. Dengan demikian, konfigurasi pemasangan PV Array pada bidang atap rumah tipe limas dinilai telah sesuai karena mampu meminimalkan pengaruh bayangan terhadap produksi energi sistem.

4.3. Hasil Simulasi Menggunakan PVsyst

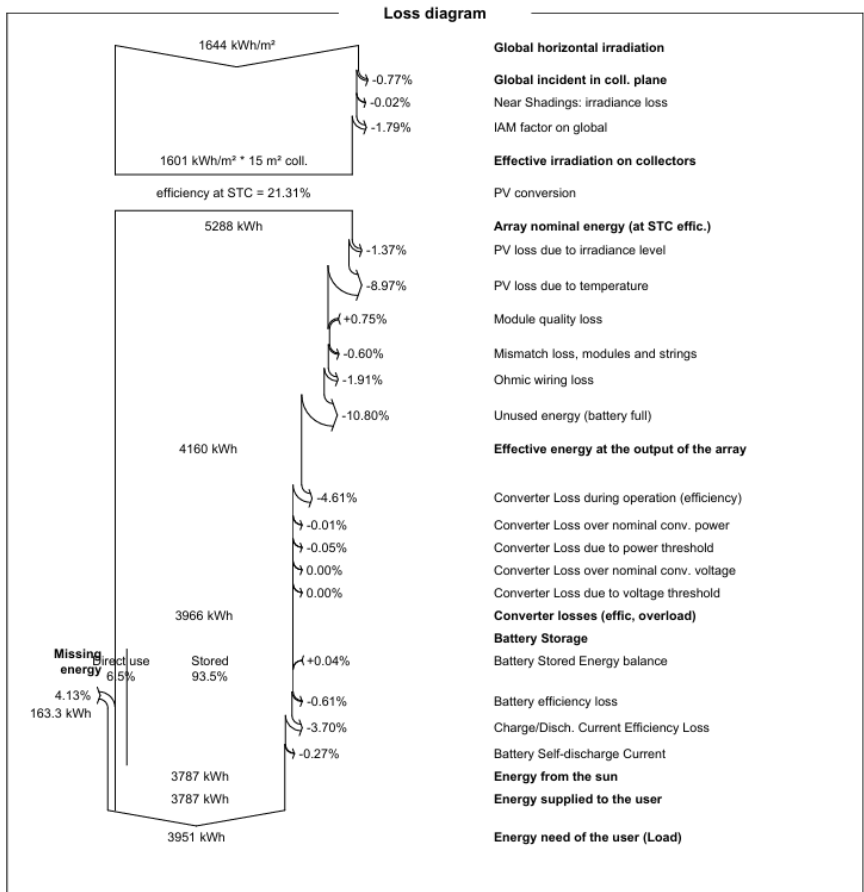
Setelah proses perancangan sistem selesai dilakukan, tahapan berikutnya adalah mengevaluasi kinerja rancangan menggunakan perangkat lunak PVsyst. Simulasi dilakukan berdasarkan konfigurasi sistem yang telah ditetapkan untuk memperoleh parameter produksi energi, distribusi rugi-rugi, serta indikator kinerja selama satu tahun operasi. Hasil simulasi tersebut menjadi dasar dalam mengevaluasi kemampuan sistem PLTS *off-grid* dalam memenuhi kebutuhan energi listrik rumah tangga di Perumahan Aiko Residence.



Gambar 18. Ringkasan Produksi Energi Sistem PLTS *Off-Grid* Berdasarkan Hasil Simulasi PVsyst

Sumber: Hasil simulasi menggunakan perangkat lunak PVsyst, 2026.

Hasil simulasi produksi energi ternormalisasi sistem PLTS *off-grid* selama satu tahun operasi disajikan pada Gambar 18. Energi yang disalurkan ke beban mencapai rata-rata 3,14 kWh/kWp/hari dan menjadi komponen terbesar dari energi yang dihasilkan sistem. Selain itu, terdapat rugi-rugi koleksi array sebesar 0,60 kWh/kWp/hari, rugi-rugi sistem dan proses pengisian baterai sebesar 0,31 kWh/kWp/hari, serta energi yang tidak termanfaatkan akibat kondisi baterai penuh sebesar 0,42 kWh/kWp/hari. Distribusi energi tersebut menunjukkan bahwa sebagian besar energi hasil konversi modul fotovoltaik dapat dimanfaatkan untuk memenuhi kebutuhan.



Gambar 19. Diagram Neraca Energi Sistem PLTS off-grid

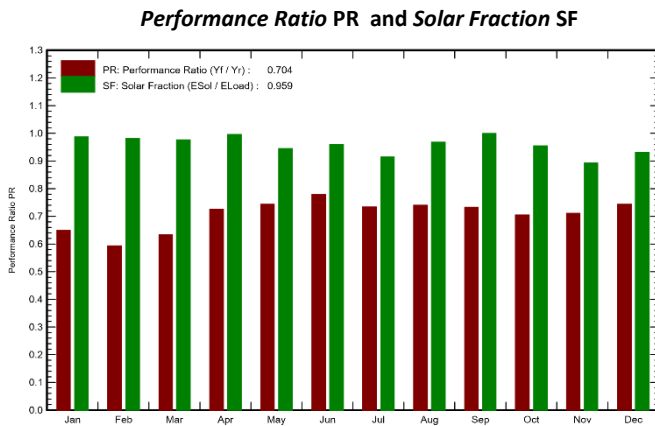
Sumber: Hasil simulasi menggunakan perangkat lunak Pvsyst, 2026.

Aliran energi dan rugi-rugi sistem selama satu tahun operasi disajikan pada Gambar 19. Berdasarkan hasil simulasi Pvsyst, radiasi matahari global yang diterima lokasi penelitian sebesar 1644 kWh/m²/tahun, menghasilkan energi nominal array sebesar 5288 kWh/tahun. Energi tersebut mengalami rugi-rugi pada modul fotovoltaik, proses konversi daya, dan sistem penyimpanan baterai sehingga energi yang berhasil disuplai ke beban mencapai 3787 kWh/tahun.

Hasil simulasi juga menunjukkan adanya *missing energy* sebesar 163,3 kWh atau sekitar 4,13%, sedangkan sebagian besar energi yang dihasilkan berhasil dimanfaatkan oleh pengguna. Dengan demikian rugi-rugi sistem masih berada dalam batas operasional yang wajar, sehingga konfigurasi sistem PLTS *off-grid* yang dirancang dinilai mampu mendukung kebutuhan energi listrik rumah tangga pada lokasi penelitian.

4.4. Evaluasi dan Analisis Teknis Perancangan PLTS *Off-Grid*

Hasil simulasi menggunakan perangkat lunak PVsyst menunjukkan bahwa sistem PLTS *off-grid* yang dirancang pada Perumahan Aiko Residence memenuhi kriteria kelayakan teknis untuk melayani kebutuhan energi listrik rumah tangga. Kinerja sistem ditunjukkan oleh nilai *Performance Ratio* tahunan sebesar 0,704 (70,4%) dan *Solar Fraction* (SF) sebesar 0,959 (9,59%). Nilai tersebut memperlihatkan bahwa sistem mampu memanfaatkan potensi energi beban sesuai parameter yang telah dirancang.



Gambar 20. Grafik *Performance Ratio* (PR) dan *Solar Fraction* (SF)

Sumber: Hasil simulasi menggunakan perangkat lunak PVsyst, 2026.

Gambar 20 menyajikan hasil evaluasi kinerja sistem PLTS *off-grid* selama periode simulasi. Nilai parameter yang diperoleh menunjukkan pola operasi yang relative stabil meskipun dipengaruhi oleh variasi radiasi matahari dan kebutuhan beban. Kehadiran rugi-rugi pada proses konversi energi dan penyimpanan tidak mengurangi kemampuan sistem dalam memenuhi kebutuhan yang direncanakan.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa konfigurasi utama sistem mampu beroperasi sesuai dengan desain yang telah ditetapkan.

4.4.1. Yield Factor (Yf)

Yield Factor (Yf) digunakan untuk menunjukkan besarnya energi listrik yang yang dihasilkan sistem PLTS terhadap setiap satuan kapasitas terpasang modul fotovoltaik.

Berdasarkan data hasil simulasi, nilai Yf diperoleh melalui perhitungan menggunakan persamaan (1) sebagai berikut:

$$Yf = \frac{E_{PV} (kWh)}{P_o (kWp)}$$

$$Yf = \frac{10,36 (kWh)}{3,30 (kWp)}$$

$$Yf = 3,14 \frac{(kWh)}{(kWp)}$$

Perhitungan energi harian sistem:

$$E_{PV} = Yf \times P_o$$

$$E_{PV} = 3,14 \times 3,30$$

$$E_{PV} = 10,36 kWh/hari$$

Konversi nilai Yf harian menjadi tahunan:

$$E_{PV} = 3,14 \times 365$$

$$E_{PV} = 1146, kWh/kWp/tahun$$

Hasil perhitungan menunjukkan nilai *Yield Factor* sebesar 3,14 kWh/Kwp/hari. Nilai tersebut menunjukkan bahwa setiap 1 kWp kapasitas terpasang mampu menghasilkan energi energi listrik rata-rata 3,14 kWh per hari untuk memenuhi kebutuhan beban pada sistem PLTS *off-grid*.

4.4.2. Reference Yield (Yr)

Reference Yield (Yr) ditentukan dari total iradiasi surya yang diterima modul fotovoltaik pada kondisi standar sebagai indikator potensi energi surya di lokasi penelitian. Perhitungan nilai tersebut dilakukan menggunakan persamaan (2).

Perhitungan Tahunan

$$Yr = \frac{H_T (kWh)}{G_{STC} (kW)}$$

$$Yr = \frac{1601,4 (kWh)}{1 (kW)}$$

$$Yr = 1601,4 \frac{(kWh)}{(kW)}$$

Perhitungan Harian

$$Yr = \frac{1601,4 (kWh)}{365 (kW)}$$

$$Yr = 4,39 kWh/kWp/hari$$

4.4.3. Capacity Utilization Factor (CUF)

Capacity Utilization Factor (CUF) dihitung menggunakan persamaan (3) untuk menunjukkan tingkat pemanfaatan kapasitas terpasang sistem PLTS terhadap operasi selama satu tahun.

$$CUF = \frac{Yf}{24 \times 365} \times 100\%$$

$$CUF = \frac{1146,1}{24 \times 365} \times 100\%$$

$$CUF = \frac{1146,1}{8760} \times 100\%$$

$$CUF = 13,08\%$$

4.4.4. Performance Ratio (PR)

Nilai *Performance Ratio* (PR) dihitung menggunakan persamaan (4) untuk mengevaluasi kinerja sistem PLTS dengan membandingkan energi aktual yang dihasilkan terhadap potensi energi yang tersedia berdasarkan kondisi iradiasi surya.

$$PR = \frac{Yf}{Yr} \times 100\%$$

$$PR = \frac{3,14}{4,39} \times 100\%$$

$$PR = 71,53\%$$

Hasil Simulasi PVsyst

$$PR = 70,4\%$$

Hasil perhitungan menunjukkan nilai *Performance Ratio* sebesar 71,53%, sedangkan hasil simulasi PVSyst menghasilkan nilai PR tahunan sebesar 70,4%. Selisih yang kecil antar kedua nilai tersebut menunjukkan bahwa hasil perhitungan memiliki tingkat kesesuaian yang baik dengan hasil simulasi. Nilai PR tersebut termasuk kategori baik dan menunjukkan bahwa sistem mampu memanfaatkan energi surya secara efektif setelah memperhitungkan rugi-rugi pada modul fotovoltaik, baterai, inverter, dan komponen pendukung sistem.

4.4.5. Solar Fraction (SF)

Nilai *Solar Fraction* (SF) dihitung menggunakan persamaan (5) untuk mengetahui kontribusi energi yang dihasilkan sistem PLTS terhadap total kebutuhan energi beban pada objek penelitian. Perhitungan energi beban

$$E_{Load} = \frac{E_{PV}}{SF}$$

$$E_{Load} = \frac{10,36}{0.959}$$

$$E_{Load} = 10,80 \text{ kWh/hari}$$

Substitusi rumus *Solar Fraction*:

$$SF = \frac{E_{PV}}{E_{Load}} \times 100\%$$

$$SF = \frac{10,36}{10,80} \times 100\%$$

$$SF = 95,9\%$$

Hasil perhitungan memperlihatkan nilai *Solar Fraction* sebesar 95,9%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa hampir seluruh kebutuhan energi listrik beban dapat dipenuhi oleh sistem PLTS yang dirancang. Tingginya nilai *Solar Fraction* mengindikasikan bahwa kontribusi energi surya terhadap kebutuhan energi rumah tangga sangat dominan, sehingga ketergantungan terhadap sumber energi tambahan menjadi sangat kecil.

4.5. Evaluasi Kelayakan Ekonomi

Evaluasi kelayakan ekonomi dilakukan untuk menilai aspek finansial dari perancangan sistem PLTS *off-grid* berdasarkan hasil simulasi menggunakan perangkat lunak PVsyst dan perhitungan ekonomi yang dilakukan. Analisis ini mencakup investasi, biaya operasional, serta beberapa indikator ekonomi yang digunakan untuk mengevaluasi tingkat kelayakan dan karakteristik ekonomi sistem selama umur proyek.

Tabel 8. *Installation Cost Sistem PLTS Off-Grid*

Item	Quantity units	Cost IDR	Total IDR
PV modules			
JAM72-530-550-MR	6	2.500.000.00	15.000.000.00
Batteries	2	28.000.000.00	56.000.000.00
Controllers			5.000.000.00
Other components			
Accessories, fasteners	1	1.500.000.00	1.500.000.00
Wiring	1	2.500.000.00	2.500.000.00
Combiner box	1	1.500.000.00	1.500.000.00
Monitoring system, display screen	1	500.000.00	500.000.00
Measurement system, pyranometer	1	500.000.00	500.000.00
Surge arrester	1	750.000.00	750.000.00
Studies and analysis			
Engineering	1	1.500.000.00	1.500.000.00
Permitting and other admin. Fees	1	500.000.00	500.000.00
Installation			
Global installation cost per module	6	150.000.00	900.000.00
Global installation cost per inverter	1	500.000.00	500.000.00
Global installation cost per battery	2	250.000.00	500.000.00
Transport	1	500.000.00	500.000.00
Settings	1	500.000.00	500.000.00
		Total	83.150.000.00
		Depreciable asset	72.500.000.00

Su

mber: Hasil simulasi menggunakan perangkat lunak PVsyst, 2026.

Tabel 8 menunjukkan rincian biaya investasi awal sistem PLTS *off-grid* berdasarkan hasil simulasi menggunakan perangkat lunak PVsyst. Total investasi yang dibutuhkan sebesar Rp.83.150.000,00 atau setara dengan sekitar USD 4.590,71 berdasarkan kurs rata-rata Rp.17.900/USD, yang mencakup biaya modul fotovoltaik, *battery bank*, *solar charger controller*, instalasi, dan komponen pendukung lainnya. Dari keseluruhan komponen, *battery bank* memberikan kontribusi biaya terbesar karena berperan sebagai sistem penyimpanan energi

untuk menjamin kontinuitas suplai listrik pada kondisi tanpa sumber energi surya. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kebutuhan penyimpanan energi merupakan faktor utama yang mempengaruhi besarnya investasi pada perancangan sistem PLTS *off-grid*.

Tabel 9. Operating costs

Item	Total IDR/year
Maintenance	
Repairs	500.000,00
Cleaning	250.000,00
Provision for battery replacement	5.599.937,92
Total (OPEX)	6.349.937,92
Including inflation (3,00%)	9.260.562,60

Sumber: Hasil simulasi menggunakan perangkat lunak PVsyst, 2026.

Tabel 9 memperlihatkan hasil estimasi biaya operasional sistem PLTS *off-grid* berdasarkan simulasi PVsyst. Biaya operasional terdiri atas biaya pemeliharaan (*maintenance*) sebesar RP500.000,00, perbaikan (*repairs*) sebesar RP.250.000,00, serta cadangan penggantian baterai (*provision for battery replacement*) sebesar RP.5.599,937,92. Berdasarkan komponen tersebut, total biaya operasional (OPEX) sistem diperoleh sebesar RP.6.349.937,92. Setelah memperhitungkan inflasi sebesar 3% total biaya operasional menjadi RP.9.260.562,60. Hasil tersebut menunjukkan bahwa biaya operasional sistem lebih banyak dipengaruhi oleh kebutuhan penggantian baterai, sedangkan biaya pemeliharaan rutin dan perbaikan relatif kecil sehingga sistem PLTS masih memiliki biaya operasi yang terkendali selama operasinya.

Perhitungan biaya operasi (*Present Value*) sebagai komponen analisis kelayakan ekonomi dilakukan menggunakan Persamaan (12)

$$PV_{Operational} = A \left(\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right)$$

$$PV_{Operational} = 6.349.937 \left(\frac{(1+0,10)^{20} - 1}{0,10(1+0,10)^{20}} \right)$$

$$\text{Hitung terlebih dahulu: } (1 + 10)^{20} = 6,7275$$

$$PV_{Operational} = \frac{6,7275-1}{0,10 \times 6,7275} = 8,5136$$

$$PV_{Operational} = 6.349.937,92 \times 8,5136$$

$$PV_{Operational} = Rp54.056.272$$

4.5.1. Levelized Cost of Energy (LCOE)

Perhitungan *Levelized Cost of Energy* (LCOE) dilakukan menggunakan parameter *Life Cycle Cost* (LCC) dan *Capital Recovery Factor* (CRF). Berdasarkan hasil perancangan, nilai LCC sistem PLTS selama umur operasi 20 tahun sebesar Rp.137.206.272 atau setara dengan USD 7.575,16 yang digunakan sebagai dasar dalam analisis biaya pembangkitan energi listrik sistem.

A. Perhitungan *Life Cycle Cost* (LCC)

Nilai *Life Cycle Cost* (LCC) dihitung menggunakan persamaan (14) untuk menentukan total biaya yang dikeluarkan selama seumur operasi sistem PLTS, yang terdiri atas biaya investasi awal dan biaya operasional.

$$\begin{aligned}LCC &= C + PV_{operational} \\LCC &= 83.150.000 + 55.056.272 \\LCC &= Rp137.206.272\end{aligned}$$

B. Perhitungan *Capital Recovery Factor* (CRF)

Nilai *Capital Recovery Factor* (CRF) diperoleh menggunakan persamaan (15) berdasarkan tingkat suku bunga dan umur proyek guna mengonversi biaya investasi menjadi biaya tahunan yang ekuivalen.

$$\begin{aligned}CRF &= \left(\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right) \\CRF &= \left(\frac{0,10(1+0,10)^{20}}{(1+0,10)^{20} - 1} \right) \\CRF &= \frac{0,10(6,7275)}{6,7275 - 1} \\CRF &= \frac{0,67275}{5,7275} \\CRF &= 0,11746\end{aligned}$$

C. Perhitungan *Levelized Cost of Energy* (LCOE)

Nilai *Levelized Cost of Energy* (LCOE) ditentukan menggunakan persamaan (13) untuk mengetahui biaya pembangkitan energi listrik per satuan kWh yang dihasilkan selama masa operasi sistem.

$$LCOE = \frac{LCC \times CRF}{A_{kWh}}$$

$$LCOE = \frac{137.206.272 \times 0,11746}{3.787}$$

$$137.206.272 \times 0,11746 = 16.155.488$$

$$LCOE = \frac{16.155.488}{3.787}$$

$$LCOE = Rp4.255,08/kWh$$

Hasil

$$LCOE = Rp4.255,08/kWh$$

Validasi

Hasil simulasi PVsyst:

$$LCOE = Rp4.632,474/kWh$$

$$\text{Selisih: } 4.632,474 - 4.255,08 = 377,394$$

$$\text{Presentase selisih: } \frac{377,394}{4.632,474} \times 100\% = 8,15\%$$

Berdasarkan hasil perhitungan, diperoleh nilai *Life Cycle Cost* (LCC) sebesar RP.137.206.272 yang terdiri atas biaya investasi awal dan nilai sekarang biaya operasional selama umur proyek 20 tahun. Dengan *Capital Recovery Factor* (CRF) sebesar 0,11746, dan *Levelized Cost of Energy* (LCOE) sebesar RP.4.255/kWh dengan produksi energi tahunan 3.787 kWh. Hasil Perhitungan manual memiliki selisih sebesar 8,15% terhadap hasil simulasi PVsyst sebesar RP.4.632,474/kWh. Perbedaan tersebut dipengaruhi oleh metode perhitungan PVsyst yang mempertimbangkan parameter ekonomi dan operasional secara lebih komprehensif, seperti inflasi, eskalasi biaya operasi, dan penggantian komponen. Meskipun demikian, hasil perhitungan manual menunjukkan kesesuaian yang baik dengan hasil simulasi sehingga layak digunakan sebagai validasi analisis kelayakan ekonomi sistem PLTS *off-grid* pada penelitian ini.

Financial analysis				
Simulation period				
Project lifetime	25 years	Start year	2027	
Income variation over time				
Inflation			3.00 %/year	
Production variation (aging)			0.55 %/year	
Discount rate			10.00 %/year	
Depreciable assets				
Asset	Depreciation method	Depreciation period (years)	Salvage value (IDR)	Depreciable (IDR)
PV modules				
JAM72-S30-550-MR	Straight-line	20	0.00	15.000.000.00
Batteries	Straight-line	20	0.00	56.000.000.00
Accessories, fasteners	Straight-line	20	0.00	1.500.000.00
		Total	0.00	72.500.000.00
Financing				
Own funds		83.150.000.00 IDR		
Self-consumption				
Consumption tariff		1.669.53000 IDR/kWh		
Tariff evolution		+3.0 %/year		
Return on investment				
Payback period		Unprofitable		
Net present value (NPV)		-79.831.809.13 IDR		
Internal rate of return (IRR)		-7.81 %		
Return on investment (ROI)		-96.0 %		

Gambar 21. Hasil Analisis Finansial Selama 20 Tahun Ke Depan

Sumber: Hasil simulasi menggunakan perangkat lunak PVsyst, 2026.

Gambar 21 menunjukkan hasil analisis finansial sistem PLTS *off-grid* berdasarkan simulasi menggunakan perangkat lunak PVsyst. Analisis dilakukan dengan mempertimbangkan umur proyek selama 20 tahun, tingkat inflasi sebesar 3%/tahun, laju degradasi modul fotovoltaik sebesar 0,55%/ tahun, dan tingkat diskonto sebesar 10%/tahun. Parameter tersebut digunakan sebagai dasar dalam mengevaluasi biaya investasi, biaya operasional, penyusutan asset, serta indikator kelayakan ekonomi sistem selama masa operasi.

- Simulasi ekonomi dilakukan dengan umur proyek 20 tahun dan tahun awal operasi 2027. Periode tersebut digunakan sebagai dasar perhitungan biaya operasional, penurunan kinerja modul akibat penuaan, serta nilai waktu terhadap uang dalam analisis ekonomi sistem PLTS.
- Parameter ekonomi yang digunakan meliputi tingkat inflasi sebesar 3% /tahun, laju degradasi modul sebesar 0,55%/tahun, dan *discount rate* sebesar 10%/tahun. Parameter tersebut mempresentasikan perubahan biaya operasional, penurunan produksi energi modul selama umur operasi, serta nilai waktu terhadap uang dalam analisis sistem PLTS.

- Aset yang mengalami penyusutan terdiri atas modul fotovoltaik, baterai, serta komponen pendukung (*accessoris* dan *fasteners*). Seluruh asset dihitung menggunakan metode depresiasi *Straight-line* dengan umur penyusutan 20 tahun dan nilai residu sebesar Rp0,00, sehingga biaya penyusutan didistribusikan secara merata selama masa operasi.
- Investasi sistem sepenuhnya berasal dari modal sendiri (*Own Funds*) sebesar RP.83.150.000,00, sehingga analisis tidak memperhitungkan pembiayaan melalui pinjaman maupun beban bunga selama umur proyek.
- Berdasarkan hasil simulasi *Payback Period* menunjukkan status *Unprofitable*, dengan NPV sebesar -RP.79.831.809,13, IRR sebesar -7,81% dan ROI sebesar -96,0%. Nilai NPV yang bernilai negative menunjukkan bahwa nilai sekarang dari manfaat ekonomi yang dihasilkan sistem masih lebih rendah dibandingkan total biaya investasi selama umur proyek. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa investasi PLTS *off-grid* pada konfigurasi yang disimulasikan belum layak secara finansial apabila hanya ditinjau dari aspek penghematan biaya listrik. Hasil ini dipengaruhi oleh tingginya investasi awal, biaya penggantian baterai, serta produksi energi tahunan yang relatif terbatas dibandingkan total biaya sistem.

Secara keseluruhan, hasil analisis simulasi ekonomi menunjukkan bahwa sistem PLTS *off-grid* yang dirancang telah memenuhi aspek kelayakan teknis, namun masih menghadapi keterbatasan pada aspek finansial sehingga diperlukan optimasi konfigurasi sistem atau penurunan biaya investasi untuk meningkatkan kelayakan ekonominya.

Tabel 10. Arus Kas Keuangan

Year	Own funds	Run Costs	Self-cons. saving	Cumul. profit	% amorti.
0	83.150.000	0	0	-83.150.000	0.0%
1	0	6.350.000	6.323.444	-83.174.142	0.0%
2	0	6.540.500	6.548.969	-83.167.143	0.0%
3	0	6.736.715	6.782.538	-83.132.715	0.0%
4	0	6.938.816	7.024.437	-83.074.235	0.1%
5	0	7.146.981	7.274.964	-82.994.767	0.2%
6	0	7.361.390	7.534.426	-82.897.094	0.3%
7	0	7.582.323	7.803.141	-82.783.732	0.4%
8	0	7.809.699	8.081.440	-83.656.963	0.6%
9	0	8.043.990	8.369.664	-82.518.845	0.8%
10	0	8.285.310	8.668.169	-82.371.237	0.9%
11	0	8.533.869	8.977.319	-82.215.810	1.1%
12	0	8.789.885	9.297.495	-82.054.070	1.3%
13	0	9.053.582	9.629.090	-81.887.366	1.5%
14	0	9.325.189	9.972.512	-81.716.906	1.7%
15	0	9.604.945	10.328.181	-81.543.769	1.9%
16	0	9.893.093	10.696.536	-81.368.916	2.1%
17	0	10.189.886	11.078.028	-81.193.202	2.4%
18	0	10.495.582	11.473.126	-81.017.382	2.6%
19	0	10.810.450	11.882.315	-81.842.124	2.8%
20	0	11.134.763	12.306.097	-80.668.013	3.0%
Total	83.150.000	170.626.878	180.051.889	-80.688.013	3.0%

Sumber: Hasil simulasi menggunakan perangkat lunak PVsyst, 2026.

Tabel 10, nilai *self-consumption saving* mengalami peningkatan setiap tahun akibat penyesuaian tarif listrik sebesar 3%/tahun, dari RP.6.323.444 pada tahun pertama menjadi RP.12.306.097 pada tahun ke-20. Meskipun demikian, nilai *cumulative profit* tetap bernilai negatif hingga akhir periode hasil simulasi sebesar -RP.80.668.013, sedangkan tingkat amortisasi hanya mencapai 3,0%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pendapatan penghematan energi belum mampu menutupi investasi awal dan biaya operasional selama umur proyek. Kondisi dipengaruhi oleh tingginya biaya investasi, biaya penggantian baterai, serta karakteristik sistem PLTS *off-grid* yang tidak memperoleh tambahan pendapatan dari ekspor energi ke jaringan listrik.

Bab 5. Kesimpulan dan Saran

5.1. Kesimpulan

Kesimpulan penelitian disusun berdasarkan hasil perancangan, simulasi, dan evaluasi sistem PLTS *off-grid* pada Perumahan Aiko Residence menggunakan perangkat lunak PVsyst. Kesimpulan tersebut dirumuskan dari rumusan masalah sesuai dengan tujuan penelitian sebagai rangkuman terhadap hasil analisis teknis dan ekonomi sistem yang telah diperoleh.

1. Identifikasi beban listrik di Perumahan Aiko Residence menghasilkan profil kebutuhan energi harian sebesar 10,824 kWh atau akumulasi bulanan sebanyak 324,72 kWh. Penentuan parameter beban ini menjadi basis fundamental dalam proses *sizing* komponen sistem PLTS *off-grid* untuk memastikan kapasitas pembangkitan mampu memikul beban puncak domestik serta menjaga kontinuitas pasokan daya secara mandiri.
2. Konfigurasi sistem yang dirancang memiliki kapasitas total 3,30 kWp yang terdiri dari 6 modul fotovoltaik JA Solar 550 Wp dengan susunan 3 seri dan 2 paralel (3S2P). Sistem penyimpanan energi menggunakan *battery bank* LiFePO₄ berkapasitas 48 V 560 Ah (26,88 kWh), yang diintergrasikan dengan MPPT *Solar Charge Controller* 100 A dan inverter *off-grid* 3.500 W guna menjamin stabilitas tegangan dan efisiensi pengisian daya.
3. Evaluasi performa sistem melalui simulasi PVsyst menghasilkan nilai *Performance Ratio* (PR) sebesar 70,4% dan *Solar Fraction* (SF) mencapai 95,9%. Nilai PR tersebut menunjukkan efektivitas konversi energi matahari menjadi energi listrik setelah memperhitungkan rugi-rugi teknis (*system losses*), sementara nilai SF yang tinggi mengindikasikan bahwa sistem mampu menyuplai hampir seluruh kebutuhan beban rumah tangga dengan ketergantungan minimal pada sumber energi eksternal.
4. Analisis spasial dan kelayakan menunjukkan bahwa kebutuhan luas area pemasangan sebesar 15,50 m² dapat diimplementasikan sepenuhnya pada luas efektif atap limas yang tersedia sebesar 24,13 m² tanpa modifikasi struktur. Meskipun sistem dinyatakan layak secara teknis, analisis ekonomi menunjukkan status *unprofitable* dengan NPV negatif sebesar -Rp.79.831.809,13 dan IRR -7,81%, akibat tingginya biaya investasi awal serta biaya penggantian baterai selama umur proyek 20 tahun.

5.2. Saran

Saran disusun berdasarkan hasil perancangan, simulasi, dan evaluasi sistem PLTS *off-grid* yang telah dilakukan. Rekomendasi ini diharapkan dapat menjadi acuan dalam pengembangan penelitian selanjutnya maupun penyempurnaan implementasi sistem agar kinerja teknis dan aspek ekonomi PLTS *off-grid* dapat ditingkatkan.

1. Penelitian ini masih terbatas pada tahap simulasi menggunakan perangkat lunak PVsyst, sehingga penelitian selanjutnya disarankan melakukan implementasi sistem PLTS *off-grid* secara langsung atau melalui pengujian prototipe di lokasi penelitian. Pengujian eksperimental tersebut diperlukan untuk memvalidasi kesesuaian hasil simulasi terhadap kondisi operasional aktual, termasuk pengaruh variasi cuaca, degradasi komponen, serta rugi-rugi teknis yang terjadi selama sistem beroperasi di lapangan.
2. Berdasarkan hasil evaluasi ekonomi, sistem PLTS *off-grid* yang dirancang memiliki kinerja teknis yang baik dengan nilai *Solar Fraction* (SF) sebesar 95,9%, namun aspek kelayakan finansial masih menunjukkan kondisi belum menguntungkan akibat tingginya biaya investasi awal dan penggantian baterai. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan mengkaji alternatif pembiayaan, seperti pemberian subsidi energi terbarukan, insentif pemerintah, atau penggunaan komponen dengan rasio biaya dan kinerja yang lebih optimal untuk meningkatkan kelayakan ekonomi sistem.
3. Pengembangan penelitian juga dapat dilakukan melalui komparatif antara sistem PLTS *off-grid*, *on-grid*, dan *hybrid*. Perbandingan tersebut bertujuan untuk mengevaluasi perbedaan kinerja teknis dan ekonomi dari masing-masing konfigurasi, khususnya pada wilayah yang telah terhubung dengan jaringan listrik. Pendekatan sistem *hybrid* berpotensi mengurangi ketergantungan terhadap kapasitas baterai yang relatif mahal, sekaligus mempertahankan keandalan pasokan energi saat terjadi gangguan pada jaringan utilitas.
4. Selain itu hasil analisis menunjukkan masih tersedia luas area atap efektif sebesar 8,63 m² setelah pemasangan enam modul fotovoltaik. Ketersediaan area tersebut dapat dimanfaatkan untuk penambahan kapasitas PV Array apabila kebutuhan energi listrik rumah tangga meningkat di masa mendatang. Dengan demikian, pengembangan kapasitas sistem dapat dilakukan tanpa memerlukan perubahan struktur atap yang signifikan sehingga pemanfaatan ruang instalasi menjadi lebih optimal.

Daftar Pustaka

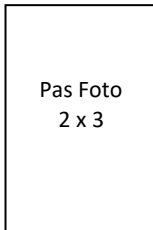
- [1] V. V. Gernaat, de Boer, Dammeier, "The role of residential rooftop photovoltaic in long-term energy and climate scenarios," *Appl. Energy*, vol. 279, p. 115705, 2020, [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306261920312009>
- [2] D. T. Laksono *et al.*, "Simulasi dan Perancangan PLTS Offgrid 3 kW Menggunakan Software PVsyst," *JTE UNIBA*, vol. 9, no. 2, pp. 581–588, 2025, doi: 10.36277/jteuniba.v9i2.1264.
- [3] D. Muhammad and A. Hiendro, "Determination of Tilt and Azimuth Angles of Solar Panels at Tanjungpura University Solar Power Plant Using PVsyst 7.3," vol. 1, no. 3, 2024, doi: 10.26418/telectrical.v1i3.72983.
- [4] K. Ramanan, Kalidasa Murgavel, "Performance analysis of standalone PV system using PVSYST software," *Sustain. Energy Technol. Assessments*, 2019, [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0973082618313036>
- [5] I. Factors and M. Techniques, "Performance , Influencing Factors , and Mitigation Techniques," 2022, doi: 10.3390/en15207595.
- [6] K. Aceng Daud, Ramelan, "PENGEMBANGAN SISTEM PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA," *J. Tek. Energi*, vol. 11, no. April, pp. 1–6, 2022, doi: <https://doi.org/10.35313/.v11i1.3515>.
- [7] M. I. Mosaad, "Grid-Connected PV System Statistics and Evaluation; Review," *Yanbu J. Eng. Sci.*, vol. 19, no. 1, pp. 1–10, 2025, doi: 10.53370/001c.33236.
- [8] N. Sitorus *et al.*, "Engineering , Environment , and Technology Design and Performance Evaluation of a 200 Wp Off-Grid Solar Photovoltaic Module for Renewable Energy in Indonesia," vol. 10, no. 3, 2025, doi: 10.25299/jgeet.2025.10.3.24694.
- [9] C. Boodoo, "The True Cost of Off-Grid Solar Power: Evaluating Solar Energy in a Dense Tropical Forest," *Eur. J. Energy Res.*, vol. 4, no. 2, pp. 17–27, 2024, doi: 10.24018/ejenergy.2024.4.2.141.
- [10] S. T. Elektro, F. Teknik, U. N. Surabaya, S. T. Elektro, F. Teknik, and U. N. Surabaya, "Pemodelan Pembangkit Listrik Tenaga Surya Off-Grid untuk Skala Rumah Tangga Tiris Mega Putri Unit Three Kartini , Joko , Raden Roro Hapsari Peni Agustin Tjahyaningtjas," *J. Tek. Elektro*, 2023, doi: 10.26740/jte.v14n1.p16-22.
- [11] E. A. Karuniawan, "Analisis Perangkat Lunak PVSYST , PVSOL dan HelioScope dalam Simulasi Fixed Tilt Photovoltaic," vol. 12, no. 3, pp. 100–105, 2021, doi: 10.22441/jte.2021.v12i3.001.

- [12] F. F. Ramadhan, I. P. Elba, D. Nugraha, and I. G. N. Janardana, "ANALISA TEKNIS DAN EKONOMIS PEMANFAATAN PLTS OFF-GRID PADA PENGLIPURAN," *J. SPEKTRUM*, vol. 11, no. 2, pp. 65–73, 2024, doi: 10.24843/SPEKTRUM.2024.v11.i02.p7.
- [13] M. Program, S. Teknik, F. Teknik, and U. Udayana, "ANALISIS UNJUK KERJA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA PERUSAHAAN FARMASI PADA KAWASAN PT JAKARTA," *J. SPEKTRUM*, vol. 10, no. 2, pp. 70–81, 2023, doi: 10.24843/SPEKTRUM.2023.v10.i02.p9.
- [14] L. Asdiyan, S. Ayu, I. Ayu, D. Giriantari, and I. N. Setiawan, "ANALISIS UNJUK KERJA PEMBANGKIT LISTRIK DI RESIDENSIAL BUKIT GADING MEDITERANIA ," *J. SPEKTRUM*, vol. 10, no. 1, pp. 32–43, 2025, doi: 10.24843/SPEKTRUM.2023.v10.i01.p5.
- [15] K. R. Panjaitan, I. Ayu, D. Giriantari, and I. N. Setiawan, "ANALISIS UNJUK KERJA PLTS CARPORT KEMENTERIAN ESDM REPUBLIK," *J. SPEKTRUM*, vol. 10, no. 1, 2023, doi: 10.24843/SPEKTRUM.2023.v10.i01.p4.
- [16] M. M. Cortez, "Design and Analysis Performance Solar Power Plant 15 kW By Maximizing Final Yield and Performance Ratio In Small-Medium Office Design and Analysis Performance Solar Power Plant 15 kW By Maximizing Final Yield and Performance Ratio In Small-Medium Office", doi: 10.1088/1757-899X/1096/1/012082.
- [17] A. Ewaldo, Deria, "PERFORMANCE PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA (PLTS) ATAP BERKAPASITAS 1 , 1 MWP DI INDUSTRI DALAM KONTEKS PENINGKATAN," *J. Tek. Elektro*, vol. 7, no. 1, 2024, doi: 10.30596/rele.v7i1.20594.
- [18] H. Saputro, Derry Fitriani Asy'ari, "Analisis Implementasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) untuk Bangunan Residensial Menggunakan Software PVsyst," 2025, [Online]. Available: <http://eprints.ums.ac.id/id/eprint/138072>
- [19] F. Q. Alenezi, J. K. Sykulski, and M. Rotaru, "Grid-connected photovoltaic module and array sizing based on an iterative approach," *Int. J. Smart Grid Clean Energy*, 2013.
- [20] P. K. Bonthagorla, "Performance analysis of PV array configurations (SP , BL , HC and TT) to enhance maximum power under non-uniform shading conditions," no. May, 2020, doi: 10.1002/eng2.12214.
- [21] "Design and simulation of a 1-GWp solar photovoltaic power station in Sudan," no. December 2020, pp. 57–78, 2021, doi: 10.1093/ce/zkaa030.
- [22] J. Zeng, M. Yang, X. Tang, X. Guan, and T. Ma, "Intelligent Segmentation of Urban Building Roofs and Solar Energy Potential Estimation for Photovoltaic Applications," pp. 1–25, 2025.
- [23] Andrés Bonilla, "Cara Menghitung Total Luas yang Dibutuhkan untuk Pemasangan Panel Surya," *Calculators Conversion*. Accessed: Jun. 22, 2026. [Online]. Available:

- <https://www.calculatorsconversion.com/en/total-area-required-for-solar-panel-installation-calculator/>
- [24] J. Windarta, S. Handoko, K. N. Irfani, and S. M. Masfuha, "Analisis Teknis dan Ekonomis Pembangkit Listrik Tenaga Surya Off-grid Menggunakan Software PVsyst untuk Usaha Mikro Kecil dan Menengah (UMKM) Coffeeshop Remote Area," *J. Ilm. Ilmu Kerekayasaan*, vol. 42, no. 3, pp. 290–298, 2021, doi: 10.14710/teknik.v42i3.40242.
 - [25] F. Unda, Rivan, Indra, Putra, "ANALISIS KELAYAKAN USAHA DENGAN METODE DISKONTO DAN TANPA DISKONTO: STUDI KASUS UMKM RUMAH MAKAN UNI IDA," *E-journal F. Econ. Business, Entrep.*, vol. 3, 2025, doi: 10.23960/efebe.v3i5.312.
 - [26] T. G. Eschenbach, *ENGINEERING ECONOMY APPLYING THEORY TO PRACTICE*. 2011.
 - [27] I. N. C. Erawan, I. N. Setiawan, and I. W. Sukerayasa, "KEEKONOMIAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA (PLTS) ATAP ON GRID 463 , 25 kWp DI PERUSAHAAN FARMASI PADA KAWASAN PT JAKARTA INDUSTRIAL ESTATE PULOGADUNG , JAKARTA TIMUR," *J. SPEKTRUM*, vol. 10, no. 3, pp. 29–37, 2023, doi: :10.24843/SPEKTRUM.2023.v10.i02.p9.
 - [28] D. Herliyanso and O. A. Rozak, "Perencanaan Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya Off-grid Sebagai Suplai Daya Listrik Perpustakaan Universitas Pamulang Planning for an Off-grid Solar Power Generation System as a Power Supply for the Universitas Pamulang Library," vol. 5, pp. 20–29, [Online]. Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/Perencanaan-Sistem-Pembangkit-Listrik-Tenaga-Surya-Herliyanso-Rozak/9bfca152ecad112220d35d2a6f37c4e4f963349f>
 - [29] M. Effendy, M. Nasar, M. Abduh, and A. Ad, "Studi Kelayakan Teknis dan Ekonomi Pembangkit Listrik Tenaga Surya Rooftop di Hotel Rayz Universitas Muhammadiyah Malang," *J. Ilm. Elektrotek.*, pp. 95–106, doi: 10.31358/techne.v23i1.455.
 - [30] K. A. Manik, W. G. Ariastina, I. Ayu, and D. Giriantari, "RANCANGAN PLTS ATAP GEDUNG GEREJA METHODIST INDONESIA MANNA HELVETIA," *J. SPEKTRUM*, vol. 10, no. 1, pp. 64–76, 2023, doi: 10.24843/SPEKTRUM.2023.v10.i01.p8.
 - [31] M. A. Putra and E. Prabowo, "Analisis Kelayakan Proyek Pembangunan Pusat Listrik Tenaga Surya (PLTS) Apung Tembesi 40 MWp di Sistem Kelistrikan Batam – Bintan," vol. 15, no. 1, pp. 9–18, 2025, doi: 10.33369/jamplifier.v15i1.35885.
 - [32] Y. Hamdani, "Analisa kelayakan ekonomi pembangunan kolam retensi sematang borang kota palembang," *J. Tekno Glob.*, vol. 6, no. 02, pp. 6–10, 2017, doi: <https://doi.org/10.36982/jtg.v6i2.397>.
 - [33] M. Program *et al.*, "KAJIAN EKONOMI PEMANFAATAN PLTS ATAP DI

- GEDUNG GUBERNUR PROVINSI BALI,” *J. SPEKTRUM*, vol. 10, no. 4, pp. 281–287, 2023, doi: 10.24843/SPEKTRUM.2023.v10.i04.p33.
- [34] Y. Yusiran, F. Ewaldo, H. Hasnira, and L. K. W. Kita, “Perancangan dan Analisis Tekno-Ekonomi PLTS Atap On-Grid Gedung Workshop 7 Politeknik Negeri Batam Menggunakan Software Pylon dan PVsyst,” *Elektron J. Ilm.*, vol. 17, no. 1, pp. 19–26, 2025, doi: 10.30630/eji.17.1.581.

Biodata



Nama	: Wahyu Supriyanto Sihombing
TTL	: Batam, 14 Oktober 2002
Agama	: Kristen Protestan
Alamat	: Bengkong Abadi II
Email	: wahyusupryantasihombing@gmail.com
Riwayat Pendidikan	SMA : Negeri 8 Batam
	SMP : Negeri 30 Batam

Lampiran

Lampiran 1

Datasheet Modul Fotovoltaik JA Solar JAM72-S30-550/MR 550 Wp



Harvest the Sunshine

DEEP BLUE 3.0

Mono

550W MBB Half-cell Module

JAM72S30 525-550/MR/1500V Details

Introduction

Assembled with 118B PERC cells, the half-cell configuration of the modules offers the advantages of higher power output, better temperature-dependent performance, reduced shading effect on the energy generation, lower risk of hot spot, as well as enhanced tolerance for mechanical loading.





Higher output power



Lower LCOE



Less shading and lower resistive loss

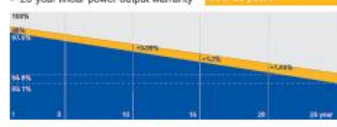


Better mechanical loading tolerance

Superior Warranty

- + 12-year product warranty
- + 25-year linear power output warranty

0.55% Annual Degradation Over 25 years



■ New linear power warranty
 ■ Standard module linear power warranty

Comprehensive Certificates

- + IEC 61215, IEC 61730
- + ISO 9001: 2015 Quality management systems
- + ISO 14001: 2015 Environmental management systems
- + ISO 45001: 2018 Occupational health and safety management systems



www.jasolar.com

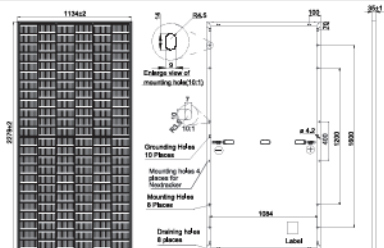
Specifications subject to technical changes and tests.
JA Solar reserves the right of final interpretation.
Shanghai JA Solar Technology Co., Ltd.

Datasheet Modul Fotovoltaik JA Solar JAM72-S30-550/MR 550 Wp

JA SOLAR

JAM72S30 525-550/MR/1500V Starten

MECHANICAL DIAGRAMS



Remark: customized frame color and cable length available upon request

SPECIFICATIONS

Cell	Mono
Weight	28.8kg±3%
Dimensions	2279±2mm×1134±2mm×35±1mm
Cable Cross Section Size	4mm ² (IEC) , 12 AWG(UL)
No. of cells	144(6×24)
Junction Box	IP68, 3 diodes
Connector	Genuine MC4-EVO2 QC 4.10-35/45
Cable Length (Including Connector)	Portrait: 300mm(+/-400mm); Landscape: 1300mm(+/-1300mm)
Country of Manufacturer	China/Vietnam

ELECTRICAL PARAMETERS AT STC

TYPE	JAM72S30-525 -525/MR/1500V	JAM72S30-530 -530/MR/1500V	JAM72S30-535 -535/MR/1500V	JAM72S30-540 -540/MR/1500V	JAM72S30-545 -545/MR/1500V	JAM72S30-550 -550/MR/1500V
Rated Maximum Power(P _{max}) [W]	525	530	535	540	545	550
Open Circuit Voltage(V _{oc}) [V]	49.15	49.30	49.45	49.60	49.75	49.90
Maximum Power Voltage(V _{mp}) [V]	41.15	41.31	41.47	41.64	41.80	41.96
Short Circuit Current(I _{sc}) [A]	13.85	13.72	13.79	13.86	13.93	14.00
Maximum Power Current(I _{mp}) [A]	12.76	12.83	12.90	12.97	13.04	13.11
Module Efficiency [%]	20.3	20.5	20.7	20.9	21.1	21.3
Power Tolerance	0→±5W					
Temperature Coefficient of I _{sc} (α_{Isc})	+0.045%/°C					
Temperature Coefficient of V _{oc} (β_{Voc})	-0.275%/°C					
Temperature Coefficient of P _{max} (γ_{Pmp})	-0.350%/°C					

STC Irradiance 1000W/m², cell temperature 25°C, AM1.5G
Remark: Electrical data in this catalog do not refer to a single module and they are not part of the offer. They only serve for comparison among different module types.
Measurement tolerance at STC: P_{max} ±3%, V_{oc} ±2% and I_{sc} ±4%.

ELECTRICAL PARAMETERS AT NOCT

TYPE	JAM72S30-525 -525/MR/1500V	JAM72S30-530 -530/MR/1500V	JAM72S30-535 -535/MR/1500V	JAM72S30-540 -540/MR/1500V	JAM72S30-545 -545/MR/1500V	JAM72S30-550 -550/MR/1500V
Rated Max Power(P _{max}) [W]	397	401	405	412	416	419
Open Circuit Voltage(V _{oc}) [V]	46.05	46.18	46.31	46.43	46.55	46.68
Max Power Voltage(V _{mp}) [V]	38.36	38.57	38.78	38.99	39.20	39.43
Short Circuit Current(I _{sc}) [A]	10.97	11.01	11.05	11.09	11.13	11.17
Max Power Current(I _{mp}) [A]	10.35	10.39	10.43	10.47	10.51	10.55
NOCT	Irradiance 800W/m ² , ambient temperature 20°C, wind speed 1m/s, AM1.5G					
Fire Performance	UL Type 1					

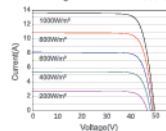
*For NextTracker installations, Maximum Static Load, Front is 2000Pa while Maximum Static Load, Back is 2000Pa.

OPERATING CONDITIONS

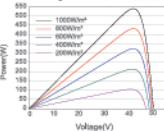
Maximum System Voltage	1500V DC (IEC)
Operating Temperature	-40°C~+85°C
Maximum Series Fuse Rating	25A
Maximum Static Load, Front*	3000Pa, 1.5
Maximum Static Load, Back*	1600Pa, 1.5
NOCT	45±2°C
Safety Class	Class II

CHARACTERISTICS

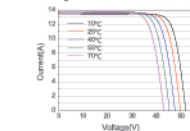
Current-Voltage Curve JAM72S30-540/MR/1500V



Power-Voltage Curve JAM72S30-540/MR/1500V



Current-Voltage Curve JAM72S30-540/MR/1500V



Premium Cells, Premium Modules

Version No.: Global_EN_20210607A

Lampiran 2

Datasheet MPPT Solar Charge Controller 48 V 100 A



SmartSolar MPPT RS 450|100 & 450|200 - Isolated

5.76 kW & 11.52 kW Solar Charge Controller with 450 V PV input

www.victronenergy.com



SmartSolar MPPT RS 450|100



Inside the SmartSolar MPPT RS 450|100

Ultra-fast Maximum Power Point Tracking (MPPT) Solar Charge Controller
 The MPPT RS SmartSolar is a 48 V Solar charge controller with up to 450 VDC PV input and either 100 A, or 200 A output. It is used in on-grid and off-grid solar applications where maximum battery charging power is required.

Multiple independent MPPT tracking inputs
 With multiple MPPT trackers, you can optimize your solar panel design for maximum performance for your specific location.

Isolated PV connections for additional safety
 Full galvanic isolation between PV and battery connections provide additional overall system safety.

Wide MPPT voltage range
 65 - 450 VDC PV operating range, with a 120 VDC PV startup voltage.

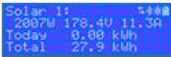
Light weight, efficient and quiet
 Thanks to high frequency technology and a new design this powerful charger weighs only 7.9 kg for the 100 A model. In addition to this it has an excellent efficiency, low standby power, and a very quiet operation.

Display and Bluetooth
 The display reads battery, and controller parameters. The parameters can be accessed with a smartphone or other Bluetooth enabled device. In addition, Bluetooth can be used to set up the system and to change settings with VictronConnect.

PV isolation resistance monitoring for peace of mind at higher voltages
 The MPPT RS continuously monitors the PV array and can detect if there are faults that reduce the isolation of the panels to unsafe levels.

VE Can and VE Direct port
 For connection to a GX device for system monitoring, data logging, and remote firmware updates. VE Can allows for up to 25 units to be connected together in parallel and synchronize their charging.

I/O Connections
 Programmable Relay, temperature sensor, auxiliary, digital input and voltage sensor connections. The remote input can accept the Victron smallBMS, and other BMS with allow-to-charge signal.



Configure and monitor with VictronConnect →

The built-in Bluetooth Smart connection allows for quick monitoring and settings adjustment.

The built-in 30-day history shows individual performance of the separate MPPT trackers.

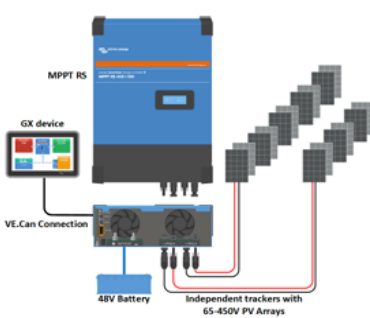
Try the VictronConnect demo to see the full range of configuration and display options with sample data.



Victron Energy B.V. | De Paal 35 | 1351 JG Almere | The Netherlands
 E-mail: sales@victronenergy.com
www.victronenergy.com



Datasheet MPPT Solar Charger Controller 48 V 100 A



VRM Portal

When the MPPT RS is connected to a GX device with internet connection, or the GlobalLink S20 with built-in 4G connectivity, you can access our free remote monitoring website (VRM). This will display all your system data in a comprehensive graphical format. Alarms can be received by e-mail.

Victron Longterm ESS Test



Historical data



Isolated SmartSolar MPPT RS	450/100	450/100
CHARGER		
Battery voltage	48 V	
Rated charge current	100 A	200 A
Maximum charge power	5.8 kW at 57.6 V	11.5 kW at 57.6 V
Charge voltage 'absorption'	Default setting: 57.6 V (adjustable)	
Charge voltage 'float'	Default setting: 55.2 V (adjustable)	
Programmable voltage range	Minimum: 36 V Maximum: 60 V ¹⁾	
Charge algorithm	Multi-stage adaptive (adjustable)	
Battery temperature sensor	Included	
Maximum efficiency	96 %	
Self-consumption	15 mA	
SOLAR		
Maximum DC PV voltage	450 V	
Start-up voltage	1.20 V	
MPPT operating voltage range	65 – 450 V ¹⁾	
Number of trackers	2	4
Max. PV operational input current	16 A per tracker	
Max. PV short circuit current ²⁾	20 A per tracker	
Max. DC output charging power	4000 W per tracker	4000 W per tracker
Maximum PV array size per tracker ³⁾	5760 W total	11520 W total
PV isolation fail level ⁴⁾	7200 Wp (450 V x 20 A)	100 kΩ
GENERAL		
Synchronised Parallel Operation	Yes, up to 25 units with VE.Can	
Programmable relay ⁵⁾	Yes	
Protection	PV reverse polarity Output short circuit Over temperature	
Data communication	VE.Direct port, VE.Can port & Bluetooth ⁶⁾	
Bluetooth frequency	2402 – 2480 Mhz	
Bluetooth power	40dBm	
General purpose analogue/digital in port	Yes, 2x	
Remote on-off	Yes	
Operating temperature range	-40 to +60 °C (fan assisted cooling)	
Humidity (non-condensing)	max 95 %	
ENCLOSURE		
Material & Colour	steel, blue RAL 5012	
Protection category	IP21	
Battery-connection	2x M8 bolts, 1x positive and 1x negative	4x M8 bolts, 2x positive and 2x negative
Power terminals PV input	1 pair of male and female MC4 connectors per tracker	
Weight	7.9 kg	13.7 kg
Dimensions (h x w x d) in mm	440 x 313 x 126	487 x 434 x 146
STANDARDS		
Safety	EN IEC 62109-1	
Country of Origin	Designed in The Netherlands made in India	

1) MPPT operating voltage range is constrained by battery voltage - PV VDC should not exceed 48 V battery float voltage. For example, a 52.8 V float voltage results in a maximum PV VDC of 422.4 V. See product manual for further information.

2) A higher short circuit current may damage the controller if PV array is connected in reverse polarity.

3) Max. 450 VDC result in approx. 360 Vmppt, therefore the maximum PV array is approx. 360 V x 20 A = 7200 Wp.

4) The SmartSolar MPPT RS will test for sufficient resistive isolation between PV+ and GND, as well as PV- and GND. If the resistance falls below the threshold, the unit will report an error and send an error signal to the GX device (if connected) for audible and email notification. Despite the error the product will continue charging the battery.

5) Programmable relay which can be set for general alarm, DC under voltage or general start/stop function. DC rating: 4 A up to 35 VDC and 1 A up to 70 VDC.

6) The MPPT RS is currently not compatible with VE Smart Networks.

7) The Charger set-point (float and absorption) can be set to max 60 V. The output voltage at the charger terminals can be higher, due to temperature compensation as well as compensation for voltage drop over the battery cables. The maximum output current is reduced on a linear basis from full current at 60 V to 5 A at 62 V. The equalization voltage can be set to max 62 V, the equalization current percentage can be set to max 6%.

Lampiran 3

Datasheet Baterai LiFePO₄ 51,2 280 Ah

LiFePO₄ Lithium Battery LPW48V280H 51.2V 280Ah



LPW Series Brief Introduce

LPW Series Wall Mounted ESS (energy storage system) is a LiFePO₄ battery Pack ideal for new installation of household energy storage. It's stores energy for Solar Power System or Back up Power System. It ranges from 25.6V/48.0V/51.2V and is available in 50Ah to 320Ah capacities. It's rechargeable lithium-ion battery pack. It has a longer cycle life and higher energy density than traditional lead-acid batteries. The compact design allows for easy installation and space-saving. The battery is suitable for off-grid and on-grid solar PV systems, residential and commercial energy storage, and backup power supply. It's one of the best replacement for Tesla PowerWall.

Long Life

Lithium Iron Phosphate

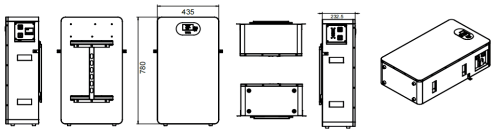
Deep Cycle



Applications

- BTS Stations, Telecom System
- Internet data center(IDC)
- Solar Energy/Off-Grid System
- Access net work system
- UPS System, EPS System
- Terminal of FTTX
- Indoor distribution system

Dimensions & Weight



Technical Specifications

Electrical Characteristics	Nominal Voltage	51.2V
	Nominal Capacity	280Ah
	Energy	14336Wh
	BMS with internal cell balancing	YES
	Cycle Life	>6000cycles 800%DOD
	Months Self Discharge	<3%
	Efficiency of Charge	100%@0. 2C
Standard Charge	Efficiency of Discharge	96~99%@0.5C
	Charge Voltage	57.6V ± 0. 2
	Charge Mode	0.2C to 57.6V, then 57.6V, charge current to 0.02C(CC/CV)
	Charge Current	50A
	Max. Charge Current	100A
Standard Discharge	Charge Cut-off Voltage	57.6V ± 0. 2
	Continuous Current	50A
	Max continuous discharge current	100A
	Discharge Cut-off Voltage	43.2V ± 0. 1
Environmental	Charge Temperature	0 ℃ to 45 ℃ (32F to 113F) @60 ± 25% Relative Humidity
	Discharge Temperature	-20 ℃ to 60 ℃ (-4F to 140F) @60 ± 25% Relative Humidity
	Storage Temperature	0 ℃ to 40 ℃ (32F to 104F) @60 ± 25% Relative Humidity
	Water Dust Resistance	IP21
Mechanical	Cell & Method	Prismatic Cell 3.2V280ah 16S1P
	Case	Iron
	Dimensions (in./mm.)	780*435*232.5mm/30.72*17.13*9.16ins
	Weight (lbs./kg.)	Approx: 114kgs/251.3lbs
	Gravimetric specific energy	125.75WH/KG
	Protocol (optional)	ModBus: CAN/RS485/RS232(OPT)
	SOC (optional)	LCD

Inverters Support Brands: GROWATT, SOLIS, PYLONTECH, SMA, SUNTECH, HANWHA, MUST 美世乐, VICTRON ENERGY, GOODWE, SACOLAR, KSTAR 科士达, INVT 英威腾, SCHNEIDER ELECTRIC, Deye 德业, SUNGANG, SOFAR, LUOWATT, FOX, SAMSUNG, SRNE

Durable Lithium Battery use CSSUN

Copyright© 2023 CSSUN Energy Co., LTD

Lampiran 4

Datasheet Inverter Off-grid 3500 W 48 V

SPF 3500~5000 ES

- Integrated MPPT charge controller.
- Equalization charging function.
- Work with or without battery
- PV input voltage up to 450VDC.
- Configurable grid or solar input priority.
- Optional WIFI/GPRS remote monitoring
- Support parallel operation for capacity expansion up to 30kW.
- PV and grid power the load jointly if PV energy is insufficient.
- Flexibly schedule the Inverter charging and discharging time.



GROWATT

en.growatt.com

P O W E R
- I N G O
T O M O -
R R O W O

Datasheet Inverter Off-grid 3500 W 48 V

Datasheet	SPF 3500 ES		SPF 5000 ES
Battery voltage	48VDC		
Battery type	Lithium/Lead-acid		
Inverter output			
Rated power	3500VA/ 3500W		5000VA/ 5000W
Parallel capability	Yes, 6 units maximum		
AC voltage regulation (Battery mode)	230VAC $\pm$ 5% @ 50/60Hz		
Surge power	7000VA		10000VA
Efficiency (Peak)	93%		
Waveform	Pure sine wave		
Transfer time	10ms typical, 20ms Max		
Solar charger			
Maximum PV array power	4500W		6000W
MPPT Range@operating voltage	120VDC ~ 430VDC		
Number of Independent MPPT trackers/ strings per MPPT tracker	1/1		
Max. Input current per MPPT tracker	22A		
Maximum PV array open circuit voltage	450VDC		
Maximum solar charge current	80A		100A
AC charger			
Charge current	60A		80A
AC Input voltage	230 VAC		
Selectable voltage range	170-280 VAC (For Personal Computers) ; 90-280 VAC (For Home Appliances)		
Frequency range	50Hz/60Hz (Auto sensing)		
Physical			
Protection degree	IP20		
Dimension (W/H/D)	330/485/135mm		330/485/135mm
Net weight	11.5kg		12kg
Operating environment			
Humidity	5% to 95% Relative Humidity(Non-condensing)		
Altitude	<2000m		
Operating temperature	0°C ~ 55°C		
Storage temperature	-15°C ~ 60°C		

SHENZHEN GROWATT NEW ENERGY CO.,LTD. A: 4-13/F,Building A,Sino-German(Europe)Industrial Park,Huagangcheng Ave,Bao'an District,Shenzhen,China
T: + 86 755 2747 1900 F: + 86 755 2749 1440 E: info@growatt.com