

**PERENCANAAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA
DI GUDANG AGO PLN UP3 BERAU MENGGUNAKAN *PV/SYST*
SISTEM *OFF-GRID* 3300 WP
LAPORAN TUGAS AKHIR**

LAPORAN INI DISUSUN UNTUK MEMENUHI SALAH SATU SYARAT
MEMPEROLEH GELAR S1 PADA PRODI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG SEMARANG



Oleh :
MUHAMMAD MUNAZAR RIZKI ARIANTO
NIM. 30602200201

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG
SEMARANG
2025**

**PLANNING OF SOLAR POWER PLANT AT AGO WAREHOUSE
PLN UP3 BERAU USING PVSYST OFF-GRID SYSTEM 3300 WP**

FINAL PROJECT

PROPOSED TO COMPLETE THE REQUIREMENT TO OBTAIN A
BACHELOR'S DEGREE (S1) AT DEPARTEMENT OF INDUSTRIAL
ENGINEERING, FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY,
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG SEMARANG



Arranged By :
MUHAMMAD MUNAZAR RIZKI ARIANTO
NIM. 30602200201

**ELECTRICAL ENGINEERING STUDY PROGRAM
INDUSTRIAL TECHNOLOGY FACULTY
UNIVERSITAS ISLAM SULTAN AGUNG
SEMARANG**

2025

LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING

Laporan Tugas Akhir dengan judul **“PERENCANAAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA DI GUDANG AGO PLN UP3 BERAU MENGGUNAKAN PVSYST SISTEM OFF-GRID 3300 WP”** ini disusun oleh:

Nama : MUHAMMAD MUNAZAR RIZKI
ARIANTO
NIM : 30602200201
Program Studi : Teknik Elektro

Telah disahkan dan disetujui oleh dosen pembimbing pada:

Hari : Rabu
Tanggal : 04 Juni 2025



Jenny Putri Hapsari, S.T., M.T.
NIDN : 0607018501

LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI

Laporan Tugas Akhir dengan judul **“PERENCANAAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA DI GUDANG AGO PLN UP3 BERAU MENGGUNAKAN PVSYST SISTEM OFF-GRID 3300 WP”** ini telah dipertahankan di depan Penguji sidang Tugas Akhir pada:

Hari : Rabu
Tanggal : 04 Juni 2025

Tim Penguji

Tanda Tangan

Dedi Nugroho, S.T., M.T.
NIDN : 0617126602
Ketua

Dr. Eka Nuryanto Budisusila, S.T., M.T.
NIDN : 0619107301
Penguji I

Munaf Ismail, S.T., M.T.
NIDN : 0613127302
Penguji II

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Muhammad Munazar Rizki Arianto

NIM : 30602200201

Fakultas : Fakultas Teknologi Industri

Program Studi : Teknik Elektro

Dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir yang saya buat dalam rangka menyelesaikan Pendidikan Strata Satu (S1) Teknik Elektro di Fakultas Teknologi UNISSULA Semarang dengan judul "ANALISIS POTENSI DAN PERENCANAAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA MENGGUNAKAN PVSYST SISTEM OFF-GRID 3300 WP", adalah asli (orisinal) dan bukan menjiplak (plagiat) dan belum pernah diterbitkan/dipublikasikan dimanapun dalam bentuk apapun baik sebagian atau keseluruhan, kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sadar dan penuh tanggung jawab. Apabila di kemudian hari ternyata terbukti bahwa Karya Tugas Akhir tersebut adalah hasil karya orang lain atau pihak lain, maka saya bersedia dikenakan sanksi akademis.

Semarang, 26, Februari 2025

Yang Menyatakan

Mahasiswa



Munazar Rizki Arianto

NIM. 30602200201

PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Muhammad Munazar Rizki Arianto
NIM : 30602200201
Program Studi : Teknik Elektro
Fakultas : Teknologi Industri

Dengan ini saya menyerahkan karya ilmiah berupa Tugas Akhir dengan judul **“ANALISIS POTENSI DAN PERENCANAAN PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA MENGGUNAKAN PVSYST SISTEM OFF-GRID 3300 WP”** dan menyetujui menjadi hak milik Universitas Islam Sultan Agung serta memberikan hak bebas royalti non-eksklusif untuk disimpan, dialih mediakan, dikelola dalam pangkalan data dan publikasinya di internet atau media lain untuk kepentingan akademis selama tetap mencantumkan nama penulis sebagai pemilik Hak Cipta.

Pernyataan ini saya buat dengan sungguh-sungguh. Apabila dikemudian hari terbukti ada pelanggaran Hak Cipta/ Plagiarisme dalam karya ilmiah ini, maka segala bentuk tuntutan hukum yang timbul akan saya tanggung secara pribadi tanpa melibatkan pihak Universitas Islam Sultan Agung

Semarang, 04 Juni 2025

Yang Menyatakan



Muhammad Munazar Rizki Arianto

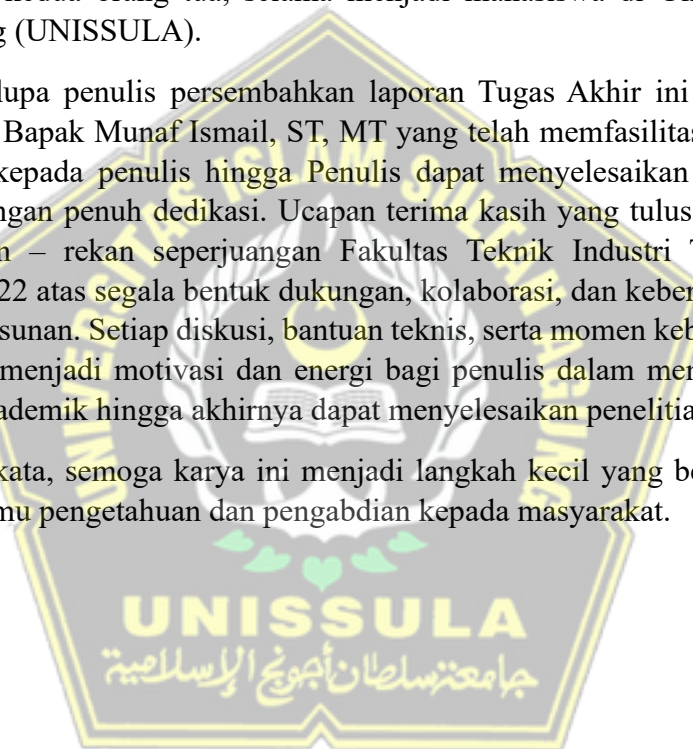
HALAMAN PERSEMBAHAN

Segala puji dan Syukur yang mendalam senantiasa penulis haturkan kepada Allah Subhanahu Wata'ala, atas nikmat iman, nikmat islam, nikmat sehat, yang telah diberikan kepada penulis, sholawat seta salam selalu tercurahkan kepada Baginda Agung, Rasulullah Nabi Muhammad Shallallahu alaihi wassalam, yang syafa'atnya selalu menjadi harapan seluruh umatnya kelak di Yaumul akhir.

Laporan Tugas Akhir ini penulis persembahkan pertama-tama kepada kedua orang tua tercinta. Melalui lembaran ini, penulis ingin mengukir rasa terima kasih atas pengorbanan, doa, serta dukungan material, spiritual, dan motivasi tanpa henti. Keberhasilan ini adalah bukti cinta dan dedikasi penulis untuk membanggakan mereka. Dengan terselesaikannya Tugas Akhir ini, sudah bisa memenuhi kepercayaan kedua orang tua, selama menjadi mahasiswa di Universitas Islam Sultan Agung (UNISSULA).

Tidak lupa penulis persembahkan laporan Tugas Akhir ini kepada Dosen pembimbing Bapak Munaf Ismail, ST, MT yang telah memfasilitasi, memberikan pengarahan kepada penulis hingga Penulis dapat menyelesaikan laporan Tugas Akhir ini dengan penuh dedikasi. Ucapan terima kasih yang tulus juga ditujukan kepada rekan – rekan seperjuangan Fakultas Teknik Industri Teknik Elektro Angkatan 2022 atas segala bentuk dukungan, kolaborasi, dan kebersamaan selama proses penyusunan. Setiap diskusi, bantuan teknis, serta momen kebersamaan yang telah dilalui menjadi motivasi dan energi bagi penulis dalam menghadapi setiap tantangan akademik hingga akhirnya dapat menyelesaikan penelitian ini.

Akhir kata, semoga karya ini menjadi langkah kecil yang bermakna dalam perjalanan ilmu pengetahuan dan pengabdian kepada masyarakat.



HALAMAN MOTTO

"Kemenangan atau kekalahan pahit, semuanya harus kucapai dengan usahaku sendiri. Jika sesuatu yang manis dan tampaknya tak terjangkau meski dengan upaya tanpa henti memang bukan milikku sejak awal, maka aku tak akan terlalu menyesal kehilangannya."

Amy Roswell

"Siapa yang menyampaikan satu ilmu dan ada orang yang mengamalkannya maka walaupun yang menyampaikan sudah tiada (mati) ia akan tetap memperoleh pahala."

H.R Imam Bukhari

"Pengetahuan adalah kunci kesuksesan yang tak ternilai."

Albert Einstein

"Tidak ada yang perlu ditakuti dalam hidup, semuanya hanya perlu dipahami. Sekarang adalah waktu untuk lebih memahami, agar kita semakin sedikit merasa takut.."

Marie Curie

"Masa kini adalah milik mereka, masa depan, yang benar-benar kuusahakan, adalah milikku."

Nikola Tesla

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah Subhanahu Wa Ta'ala atas limpahan rahmat dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul "Analisis Potensi dan Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya Menggunakan PVSyst Sistem *off-grid* 3300 Wp" dengan baik. Skripsi ini disusun sebagai bagian dari pemenuhan syarat akademik untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik di Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Sultan Agung (UNISSULA).

Dalam penyusunan skripsi ini, penulis mendapatkan banyak dukungan, bimbingan, dan bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan segala kerendahan hati, penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar – besarnya kepada :

1. Prof. Dr. H. Gunarto, SH., MH, Rektor Universitas Islam Sultan Agung, yang telah memberikan kesempatan dan fasilitas selama masa studi.
2. Dr. Ir. Novi Marlyana, S.T., M.T., IPU., ASEAN Eng., Dekan Fakultas Teknologi Industri, yang telah memberikan arahan dan dukungan dalam penyusunan skripsi ini.
3. Jenny Putri Hapsari, ST., MT. Ketua Program Studi Teknik Elektro, yang telah memberikan bimbingan dan motivasi selama masa studi dan penyusunan Laporan Tugas Akhir.
4. Dosen Pembimbing Munaf Ismail, ST, MT, yang dengan sabar telah membimbing dan mengarahkan penulis dalam penyusunan skripsi ini.
5. Seluruh dosen dan staf Fakultas Teknologi Industri, yang telah memberikan ilmu dan bantuan selama masa perkuliahan.
6. Orang tua dan keluarga tercinta, yang selalu memberikan doa, dukungan, dan kasih sayang yang tiada henti.
7. Teman – teman seperjuangan, yang telah memberikan semangat dan kebersamaan selama masa studi.

DAFTAR ISI

JUDUL	i
<i>TITLE</i>	ii
LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING	iii
LEMBAR PENGESAHAN PENGUJI	iv
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR.....	v
PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI KARYA ILMIAH.....	vi
HALAMAN PERSEMBAHAN	vii
HALAMAN MOTTO	viii
KATA PENGANTAR.....	ix
DAFTAR ISI	x
DAFTAR TABEL.....	xiv
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR LAMPIRAN	xvii
ABSTRAK	xviii
<i>ABSTRACT</i>	xix
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Pembatasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan	4
1.5 Manfaat	4
1.6 Sistematika Laporan Tugas Akhir.....	4
BAB II PENDAHULUAN.....	6
2.1 Tinjauan Pustaka	6
2.2 Landasan Teori.....	13

2.2.1	Listrik.....	13
2.2.2	Pembangkit listrik tenaga surya (PLTS)	14
2.2.3	Komponen – komponen PLTS.....	15
2.2.4	Pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) <i>On-Grid</i>	23
2.2.5	Pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) <i>Off-Grid</i>	23
2.2.6	Pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) <i>hybrid</i>	24
2.2.7	Perangkat lunak <i>PVsyst</i>	25
2.2.8	Kelebihan dan kekurangan pemanfaatan panel surya.....	27
2.2.9	Perhitungan pembangkit listrik tenaga surya (PLTS)	29
2.2.10	Penggunaan pembangkit listrik tenaga listrik (PLTS) atap di Indonesia	33
BAB III METODE PENELITIAN.....		36
3.1.	Tempat dan Waktu Penelitian	36
3.2.	Alur Penelitian	37
3.3.	Alat dan Bahan.....	40
3.3.1	Alat.....	40
3.3.2	Bahan material	41
3.4.	Blok Sistem.....	41
BAB IV DATA DAN ANALISA		43
4.1	Profil Beban Energi Listrik.....	43
4.2	Data Iklim	44
4.3	Perhitungan Kapasitas Komponen PLTS.....	45
4.4.1	Menentukan besaran daya yang bisa dibangkitkan.....	45
4.4.2	Menghitung jumlah panel terpasang	45
4.4.3	Penyusunan <i>array</i> panel surya.....	46
4.4.4	Menentukan kapasitas dan spesifikasi <i>inverter</i>	47

4.4.5	Menentukan kapasitas baterai	47
4.4	Menentukan Komponen.....	48
4.5.1	Modul surya	48
4.5.2	<i>Inverter</i>	50
4.5.3	<i>Solar charge controller (SCC)</i>	51
4.5.4	Baterai	52
4.5.5	Penghantar dan sistem proteksi.....	53
4.5	Simulasi <i>PVsyst</i>	55
4.6.1	Menu utama <i>PVsyst</i>	55
4.6.2	<i>Orientation</i>	57
4.6.3	Data beban	58
4.6.4	Modul PV <i>array</i> dan <i>solar charge controller (SCC)</i>	59
4.6.5	Penyimpanan energi.....	60
4.6.6	<i>Inverter</i>	60
4.6	Hasil Simulasi <i>PVsyst</i>	61
4.7	Perhitungan Ekonomi PLTS <i>Off-Grid</i>	67
4.8.1	Harga energi PLTS.....	67
4.8.2	Analisa kelayakan investasi PLTS	69
4.8	PLTS <i>Off-Grid</i> Segi Lingkungan	71
4.9.1	Dampak positif.....	72
4.9.2	Dampak negatif.....	73
4.9.3	Mitigasi dampak lingkungan	73
BAB V PENUTUP.....		75
5.1	Kesimpulan	75
5.2	Saran	76
DAFTAR PUSTAKA		77

DAFTAR LAMPIRAN	80
-----------------------	----



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Studi Literatur	10
Tabel 2.2 Pengguna PLTS Atap di Indonesia	34
Tabel 4.1 Estimasi Pemakaian Beban	43
Tabel 4.2 Pemakaian kWh dan Tagihan Bulanan.....	43
Tabel 4.3 Harga Komponen dan Pemasangan PLTS 3.300 Wp.....	67
Tabel 4.4 Arus Kas	70



DAFTAR GAMBAR

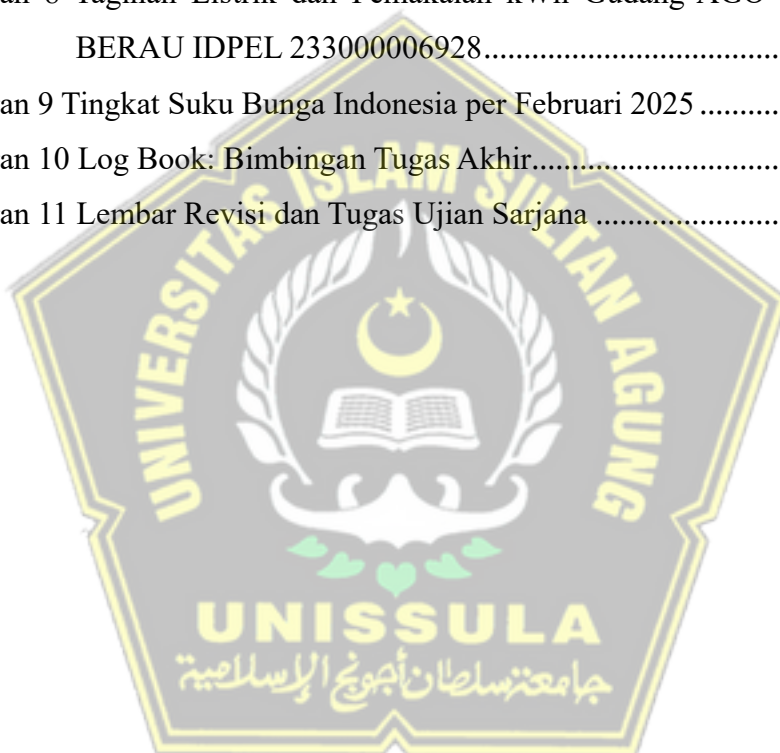
Gambar 1.1 Peta Daerah Potensi PLTS.....	Error! Bookmark not defined.
Gambar 1.2 Lokasi Kabupaten Berau	Error! Bookmark not defined.
Gambar 1.3 Radiasi Kabupaten Berau	2
Gambar 2.1 PLTS Pulau Derawan	15
Gambar 2.2 Panel Surya Pulau Derawan	16
Gambar 2.3 Monocrystalline (Kristal Tunggal)	17
Gambar 2.4 Polycrystalline (Multi Kristal)	17
Gambar 2.5 Inverter Panel Surya	18
Gambar 2.6 Solar Charge Controller (SCC)	21
Gambar 2.7 Baterai PLTS	22
Gambar 2.8 Sistem On-Grid	23
Gambar 2.9 Sistem <i>off-grid</i>	24
Gambar 2.10 Sistem Hybrid.....	25
Gambar 2.11 Tampilan Awal Software PVsyst	26
Gambar 2.12 Tampilan Awal Software PVsyst	26
Gambar 3.1 Lokasi Simulasi.....	36
Gambar 3.2 Alur Penelitian.....	37
Gambar 3.3 Diagram Blok Sistem PLTS <i>off-grid</i>	42
Gambar 4.2 Iradiasi Matahari Tanjung Redeb	44
Gambar 4.3 Array Panel Surya.....	46
Gambar 4.4 Spesifikasi Panel Surya	49
Gambar 4.5 Spesifikasi Inverter.....	50
Gambar 4.6 Spesifikasi MPPT	51
Gambar 4.7 Spesifikasi Baterai.....	53
Gambar 4.8 Kuat Hantar Arus (KHA) Pada Jenis – Jenis Kabel	53
Gambar 4.9 Menu Utama Pvsyst	56
Gambar 4.10 Menu Database	56
Gambar 4.11 Menu Geographical Coordinates	57
Gambar 4.12 Menu Orientation	58
Gambar 4.13 Simulasi Penggunaan Beban	59

Gambar 4.14 Sub-array Design Pada Menu System.....	59
Gambar 4.15 Baterai / Storage	60
Gambar 4. 16 Inverter PRIME 3.000 W	60
Gambar 4.17 Laporan Simulasi PVsyst (1)	61
Gambar 4.18 Laporan Simulasi PVsyst (2)	62
Gambar 4.19 Grafik Normalized Productions	63
Gambar 4.20 Grafik Peformance Ratio (PR) and Solar Fraction (SF)	64
Gambar 4.21 Produksi Energi Tahunan (Balances and Main Results)	65
Gambar 4.22 Loss Diagram	66



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Hasil Simulasi <i>PVsyst</i>	80
Lampiran 2 Spesifikasi Inverter PRIME dengan model LS/LST-T.....	87
Lampiran 3 Spesifikasi Panel Surya JA Solar JAM72S30 525-550/MR/1500V..	88
Lampiran 4 Spesifikasi Inverter Model: LS/LS-T	89
Lampiran 5 Spesifikasi Solar Charge Controller Morningstar model: Tristar TS	90
Lampiran 6 Spesifikasi Baterai ZTE ZXDC48 FB100B3 SmartLi	91
Lampiran 7 Invoice Pembelian PLTS Atap Daya 3300 Wp.....	93
Lampiran 8 Tagihan Listrik dan Pemakaian kWh Gudang AGO PT PLN UP3 BERAU IDPEL 233000006928.....	94
Lampiran 9 Tingkat Suku Bunga Indonesia per Februari 2025	95
Lampiran 10 Log Book: Bimbingan Tugas Akhir.....	96
Lampiran 11 Lembar Revisi dan Tugas Ujian Sarjana	98



ABSTRAK

Penelitian ini menganalisis potensi implementasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *off-grid* di Kabupaten Berau, Kalimantan Timur, untuk mengurangi ketergantungan energi fosil dan meningkatkan pemanfaatan energi terbarukan. Metode penelitian mencakup studi literatur, survei kebutuhan listrik, pengumpulan data radiasi matahari, dan simulasi sistem PLTS menggunakan *PVsyst*. Hasil simulasi menunjukkan sistem 3,3 kWp dengan 6 panel dan 8 baterai menghasilkan 5.229,2 kWh/tahun, memenuhi 36% kebutuhan energi Gudang AGO PLN UP3 Berau (14.527 kWh/tahun), dengan sisa pasokan bergantung pada jaringan PLN. Sistem ini mengurangi emisi karbon sebesar 4,44 Ton CO₂/tahun dan memiliki *payback period* 8,58 tahun. Namun, terdapat energi tak terpakai (172,78 kWh/tahun) dan defisit energi (230,25 kWh/tahun) akibat keterbatasan kapasitas penyimpanan. Rasio Kinerja (PR) sistem mencapai 82,3%, dengan kerugian utama dari efek iradiasi/suhu, inefisiensi inverter/baterai, dan kejenuhan penyimpanan. Penelitian merekomendasikan optimalisasi kapasitas PLTS, peningkatan efisiensi penyimpanan energi, serta penekanan biaya investasi untuk mendukung kemandirian energi dan target *Net Zero Emission* (NZE) Indonesia 2060. Hasil ini menjadi dasar rekomendasi teknis – ekonomi bagi PT PLN UP3 Berau dalam mengembangkan PLTS sebagai solusi berkelanjutan.

Kata Kunci : PLTS, *PVsyst*, Emisi Karbon, Transisi Energi

ABSTRACT

This study analyzes the potential implementation of an off-grid Solar Power Plant (SPP) in Berau Regency, East Kalimantan, to reduce fossil fuel dependence and enhance renewable energy utilization. The research methodology includes literature review, electricity demand surveys, solar radiation data collection, and PVsyst-based SPP system simulation. Simulation results show that a 3.3 kWp system with 6 solar panels and 8 batteries generates 5,229.2 kWh/year, fulfilling 36% of the energy demand (14,527 kWh/year) for the AGO Warehouse of PT PLN UP3 Berau, with the remaining supply relying on the PLN grid. The system reduces carbon emissions by 4.44 tons of CO₂/year and has a payback period of 8.58 years. However, unused energy (172.78 kWh/year) and an energy deficit (230.25 kWh/year) occur due to storage limitations. The system achieves a Performance Ratio (PR) of 82.3%, with losses attributed to irradiation/temperature effects, inverter/battery inefficiencies, and storage saturation. The study recommends optimizing SPP capacity, improving energy storage efficiency, and reducing investment costs to support energy independence and Indonesia's 2060 Net Zero Emission (NZE) target. These findings provide technical-economic recommendations for PT PLN UP3 Berau to develop SPP as a sustainable energy solution.

Keywords: Solar Power Plant (SPP), PVsyst, Carbon Emissions, Energy Transition

BAB I

PENDAHULUAN

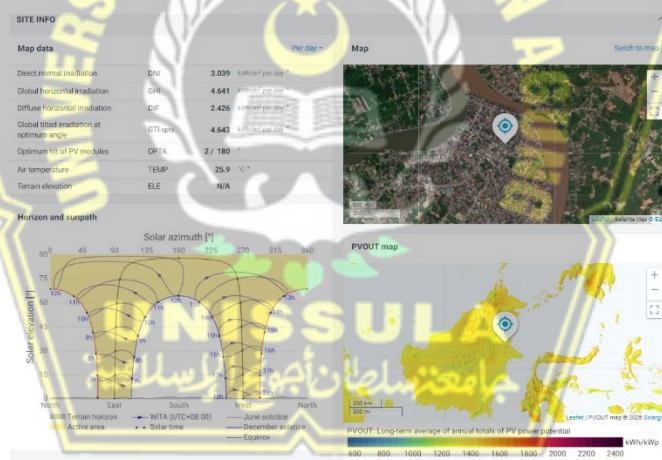
1.1 Latar Belakang

Energi listrik merupakan kebutuhan vital yang mendukung berbagai sektor kehidupan, termasuk rumah tangga, industri, transportasi, dan layanan publik. Di Indonesia, permintaan listrik terus meningkat seiring dengan pertumbuhan penduduk dan perkembangan ekonomi. Berdasarkan data dari Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM), tercatat konsumsi listrik perkapita Indonesia terus meningkat sejak tahun 2017. Teranyar, pada 2023 realisasi konsumsi listrik rata - rata setiap orang di Indonesia mencapai 1.285 kWh/kapita. Angka ini meningkat dari 1.173 kWh/kapita pada 2022 atau 6,15% pertumbuhan [1]. Indonesia masih sangat bergantung pada energi fosil dalam penyediaan energi primer nasional. Berdasarkan data terbaru, bauran energi primer Indonesia masih didominasi oleh batubara sebesar 40,46%, minyak bumi 30,18%, dan gas bumi 16,28%, sedangkan energi baru terbarukan (EBT) hanya menyumbang 13,09%. Kondisi ini menunjukkan bahwa meskipun upaya transisi energi sedang dilakukan, ketergantungan terhadap sumber daya fosil masih sangat tinggi. Meskipun perekonomian Indonesia yang mengalami perlambatan tidak berpengaruh negatif terhadap konsumsi energi nasional. Total pemanfaatan energi nasional meningkat 2% pada 2015 [2]. Ketergantungan ini tidak hanya berdampak pada peningkatan emisi gas rumah kaca tetapi juga menyebabkan kerentanan terhadap fluktuasi harga energi global. Di tengah upaya mengatasi permasalahan tersebut, pemerintah Indonesia telah menetapkan target untuk meningkatkan kontribusi energi baru terbarukan (EBT) dalam bauran energi nasional menjadi 23% pada tahun 2025 [3]. Namun, realisasi EBT masih jauh dari target, hanya mencapai sekitar 12% pada tahun 2022.

Salah satu wilayah di Indonesia yang menghadapi tantangan signifikan dalam penyediaan listrik adalah Kabupaten Berau di Kalimantan Timur. Kabupaten ini dilayani oleh PT PLN (Persero) Unit Pelaksana Pelayanan Pelanggan (UP3) Berau, yang mengandalkan sistem pembangkit *isolated* tanpa interkoneksi dengan jaringan utama. Kapasitas total pembangkit di Berau saat ini mencapai 37 MW, yang berasal

dari Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) Sambaliung (8 MW), PLTD Berau (3 MW), PLTD Sewatama (6 MW), serta Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Berau dan Lati masing-masing sebesar 10 MW. Dengan total beban yang terus meningkat akibat pertumbuhan populasi dan aktivitas ekonomi, kapasitas pembangkit ini sering kali tidak mampu memenuhi kebutuhan listrik masyarakat, terutama jika terjadi gangguan pada salah satu pembangkit. Hal ini menyebabkan pemadaman bergilir yang berdampak pada kenyamanan masyarakat dan produktivitas industri.

Pemanfaatan perangkat lunak seperti PVsyst dapat membantu dalam proses perencanaan dan simulasi sistem PLTS di Berau. PVsyst memungkinkan analisis yang komprehensif, termasuk estimasi produksi energi berdasarkan data radiasi matahari, desain tata letak modul surya, serta evaluasi performa teknis dan ekonomi. Dengan pendekatan berbasis data ini, penelitian mengenai potensi dan perencanaan PLTS di Berau dapat memberikan rekomendasi yang konkret dan implementatif bagi PT PLN (Persero) UP3 Berau.



Gambar 1.1 Radiasi Kabupaten Berau

Tingkat *Global Horizontal Irradiation* (GHI) tercatat sebesar 4,641 kWh/m² per hari, sedangkan *Direct Normal Irradiation* (DNI) berada pada angka 3,039 kWh/m² per hari. Sementara itu, *Global Tilted Irradiation* (GTI) pada sudut optimal menunjukkan nilai 4,643 kWh/m² per hari, yang menunjukkan bahwa penyesuaian sudut kemiringan modul *fotovoltaik* dapat meningkatkan efisiensi penyerapan radiasi matahari. Selain itu, data menunjukkan bahwa kemiringan optimal modul PV (*Optimum Tilt of PV Modules*) adalah 2° - 3° jika dikonversi terhadap vertikal, sudut kemiringannya menjadi 87° - 88°, yang sesuai dengan lokasi geografis daerah

penelitian yang berada di sekitar garis khatulistiwa. Temperatur udara rata - rata tercatat 25,9°C, yang masih berada dalam kisaran optimal untuk operasi modul surya tanpa menyebabkan *overheating* yang signifikan. Faktor-faktor ini menunjukkan bahwa lokasi penelitian memiliki karakteristik yang mendukung pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) sebagai sumber energi alternatif yang dapat dioptimalkan untuk kebutuhan listrik lokal.

Dengan mempertimbangkan potensi energi matahari di Berau, kebutuhan listrik masyarakat yang terus meningkat, dan tantangan yang dihadapi oleh PT PLN UP3 Berau dalam menyediakan pasokan listrik yang andal, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi peluang optimalisasi penggunaan PLTS. Selain mendukung program nasional dalam pengembangan energi terbarukan, hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi nyata terhadap keberlanjutan penyediaan energi di Kabupaten Berau dan menjadi model bagi pengembangan PLTS di wilayah lain dengan karakteristik serupa.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini dirancang untuk menjawab beberapa permasalahan berikut:

1. Bagaimana perencanaan sistem PLTS di Gudang AGO PT PLN (Persero) UP3 Berau menggunakan perangkat lunak *PVsyst* untuk memastikan desain yang optimal?
2. Apa saja keuntungan teknis dan ekonomi dari penerapan PLTS di Gudang AGO PT PLN (Persero) UP3 Berau?
3. Berapa besar pengurangan kadar emisi CO₂ akibat penerapan PLTS di Gudang AGO PT PLN (Persero) UP3 Berau?

1.3 Pembatasan Masalah

Adapun pembatasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini difokuskan pada Gdang AGO PT PLN (Persero) UP3 Berau wilayah Kabupaten Berau, Kalimantan Timur, yang dilayani oleh PT PLN (Persero) UP3 Berau.

2. Penelitian hanya berfokus pada energi surya untuk pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dan tidak membahas jenis energi terbarukan lainnya seperti biomassa, *hidro*, atau angin.
3. Simulasi teknis dan perencanaan sistem PLTS dilakukan menggunakan perangkat lunak *PVsyst*.

1.4 Tujuan

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Merancang sistem PLTS yang optimal menggunakan perangkat lunak *PVsyst*.
2. Mengevaluasi keuntungan teknis dan ekonomi dari penerapan PLTS di Gudang AGO PT PLN (Persero) UP3 Berau.
3. Menghitung pengurangan emisi CO₂ akibat penerapan sistem PLTS di Gudang AGO PT PLN (Persero) UP3 Berau.

1.5 Manfaat

Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Memberikan panduan teknis bagi perencanaan sistem PLTS yang optimal menggunakan perangkat lunak *PVsyst*, sehingga dapat digunakan sebagai acuan dalam implementasi PLTS di wilayah dengan potensi serupa.
2. Mendukung PT PLN UP3 Berau dalam meningkatkan keandalan sistem kelistrikan melalui integrasi PLTS, yang dapat mengurangi risiko pemadaman dan ketergantungan pada pembangkit berbahan bakar fosil.
3. Menghasilkan evaluasi komprehensif tentang keuntungan teknis, ekonomi, dan lingkungan dari penerapan PLTS, termasuk pengurangan emisi karbon dan efisiensi biaya operasional, yang relevan untuk mendukung kebijakan energi terbarukan di Indonesia.

1.6 Sistematika Laporan Tugas Akhir

Sistematika Laporan Tugas Akhir ini terdiri dari:

BAB I PENDAHULUAN

Pada bab ini diuraikan mengenai latar belakang penelitian, identifikasi masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, metode penelitian yang digunakan, manfaat yang diharapkan dari penelitian ini, serta sistematika penulisan laporan. Bab ini menjadi dasar bagi pemahaman yang jelas mengenai penelitian

ini, sehingga dapat memberikan gambaran secara menyeluruh terkait isi dan tujuan utama yang ingin dicapai dalam penelitian ini.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

Bab ini menguraikan kajian teoritis yang bersumber dari berbagai literatur terkait sebagai landasan konseptual dalam pelaksanaan penelitian.

BAB III METODE PENELITIAN / PERANCANGAN

Pada bab ini menjelaskan langkah – langkah sistematis yang digunakan dalam pelaksanaan penelitian ini, mencakup proses pengumpulan data, penyusunan model simulasi, serta pelaksanaan simulasi untuk memperoleh hasil yang sesuai dengan tujuan penelitian. Metode yang diterapkan bertujuan untuk memastikan bahwa penelitian ini dilakukan secara terstruktur dan terarah, sehingga dapat menghasilkan analisis yang valid dan akurat.

BAB IV DATA DAN ANALISA

Bab ini menyajikan hasil simulasi, tahapan pelaksanaan, serta analisis data yang diperoleh terkait pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) *off-grid* dengan menggunakan perangkat lunak PVsyst untuk mengevaluasi performa sistem berdasarkan parameter teknis yang telah ditetapkan.

BAB V PENUTUP

Bab ini berisi kesimpulan yang merangkum temuan utama penelitian sebagai jawaban atas rumusan masalah, serta saran yang memberikan rekomendasi untuk pengembangan dan penerapan lebih lanjut guna meningkatkan efektivitas penelitian di masa mendatang.

BAB II

PENDAHULUAN

2.1 Tinjauan Pustaka

Muhammad Alvin Ridho, Bambang Winardi dan Agung Nugroho [4] telah melakukan penelitian mengenai perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) di Departemen Teknik Elektro Universitas Diponegoro menggunakan perangkat lunak *PVsyst*. Hasil penelitian mereka menunjukkan bahwa faktor bayangan (*shading*) memiliki dampak signifikan terhadap penurunan produksi energi listrik. Temuan ini sejalan dengan studi lain yang mengindikasikan bahwa bayangan dapat menyebabkan penurunan output energi hingga 15,53% dibandingkan dengan kondisi tanpa bayangan. Selain itu, penelitian lain juga mengungkapkan bahwa bayangan pada modul surya dapat mengurangi tegangan dan arus keluaran, sehingga menurunkan efisiensi keseluruhan sistem PLTS

Dimas Satria Ariadita, Agung Nugroho dan Bambang Winardi [5] telah melakukan penelitian mengenai potensi dan kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) di Blok D3 dan F Perumahan Grand Tembalang *Regency*. Dalam studi ini, mereka mengumpulkan data seperti durasi penyinaran harian, kecepatan angin, intensitas radiasi matahari, dan suhu rata – rata, kemudian mensimulasikannya menggunakan perangkat lunak *PVsyst*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin tinggi intensitas radiasi matahari, semakin besar potensi energi listrik yang dapat dihasilkan oleh PLTS, dengan tetap mempertimbangkan efisiensi panel surya dan komponen pendukung lainnya. Secara khusus, simulasi tersebut mengindikasikan bahwa PLTS yang dirancang mampu menghasilkan energi listrik tahunan sebesar 79,272 MWh, dengan 36,333 MWh digunakan untuk memenuhi kebutuhan beban di Blok D3 dan F, sementara 41,767 MWh lainnya disalurkan ke jaringan PLN.

Dalam studi yang dilakukan oleh Mardiansyah, Irfan, dan Saiful Karim [6], perancangan sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *On-Grid* dibandingkan antara perhitungan manual dan simulasi menggunakan perangkat lunak *PVsyst*, baik dengan maupun tanpa penggunaan baterai. Hasil studi tersebut mengindikasikan bahwa konsumsi energi listrik dari jaringan PLN pada skenario

dengan baterai lebih tinggi dibandingkan dengan skenario tanpa baterai. Hal ini sejalan dengan temuan yang menunjukkan bahwa sistem PLTS *on-grid* tanpa baterai dapat menyuplai energi listrik sebesar 68,98% terhadap beban harian, sementara penggunaan baterai dapat meningkatkan ketergantungan pada jaringan PLN karena efisiensi penyimpanan dan konversi energi yang terlibat.

Tarsisius Kristyadi dan Teguh Arfianto [7] telah melakukan penelitian mengenai optimasi perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) terpusat di Desa Air Glubi, Kecamatan Bintan Pesisir, Kabupaten Bintan, Provinsi Kepulauan Riau. Studi ini menggunakan perangkat lunak *PVsyst* untuk mensimulasikan dan mengoptimalkan desain PLTS sistem *off-grid*. Data primer diperoleh melalui survei kebutuhan listrik harian penduduk sebesar 62.492 Wh, pengukuran intensitas sinar matahari, serta analisis bayangan (*shading*) pada modul surya. Hasil optimasi menghasilkan desain PLTS dengan kapasitas 37 kWp, terdiri dari 186 modul surya *monokristalin* berkapasitas 200 Wp per modul, 250 baterai VRLA masing-masing 200 Ah, dan empat *inverter* berkapasitas 10 kW. Faktor – faktor seperti tata letak lahan dan sudut kemiringan modul surya sangat mempengaruhi optimalisasi produksi energi listrik, dengan sudut kemiringan (*tilt*) optimal ditemukan sebesar 9 derajat.

Penelitian yang berjudul "Simulasi Optimasi Kapasitas PLTS Atap untuk Rumah Tangga di Surabaya" oleh Elieser Tarigan [8] yang membahas optimasi kapasitas Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) atap untuk rumah tangga di Surabaya. Penelitian ini bertujuan memberikan gambaran mengenai bagaimana sistem PLTS atap dapat dioptimalkan untuk memenuhi kebutuhan energi listrik rumah tangga, dengan mempertimbangkan kebijakan pemerintah terkait PLTS atap yang berlaku saat ini. Metode utama yang digunakan adalah simulasi numerik dengan perangkat lunak *PVspot* dan *SolarGIS*, yang memprediksi kinerja sistem PLTS atap berdasarkan data iklim 10 tahun terakhir di Surabaya. Studi kasus dilakukan pada rumah dengan beban terpasang 2.200 VA dan konsumsi energi listrik sekitar 13 kWh per hari. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem PLTS atap dengan kapasitas optimal sekitar 3.000 Wp dapat memenuhi hingga 90% kebutuhan energi listrik rumah tangga tersebut, dengan produksi energi bulanan rata – rata 350 kWh, berkisar antara 203 kWh hingga 350 kWh per bulan.

Suhardhika Sih Sudewanto dan Munawar Agus Riyadi [9] telah melakukan penelitian yang mengevaluasi kinerja dan manfaat finansial dari sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *On-Grid* berkapasitas 8.000 Wp yang dipasang di Laboratorium B PLN UPDL Pandaan. Penelitian ini bertujuan untuk menilai efisiensi produksi energi dan potensi penghematan biaya listrik melalui analisis data produksi energi yang diukur menggunakan kWh Meter *Ekspor – Impor* (EXIM) serta perhitungan beban listrik di laboratorium tersebut. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa pemasangan PLTS *on-grid* ini berhasil mengurangi biaya tagihan listrik lebih dari 30% per tahun dan memiliki nilai NPV positif, sehingga investasi ini dinilai layak untuk diterapkan dan dikembangkan pada gedung-gedung lain.

Ali Firmansyah, Karnoto, dan Jaka Windarta [10] telah membahas tentang perancangan dan analisis daya Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dengan sistem *On-Grid* di Pondok Pesantren Tanbihul Ghofiliin, Kabupaten Banjarnegara. Tujuan utama dari penelitian ini adalah merancang sistem PLTS *On-Grid* yang optimal serta menganalisis energi yang dihasilkan, dengan mempertimbangkan potensi energi surya, regulasi PLN, dan ketersediaan anggaran. Metodologi yang diterapkan meliputi perancangan dan simulasi sistem menggunakan perangkat lunak *PVsyst 7.2*, yang memungkinkan prediksi produksi energi PLTS berdasarkan parameter lokasi seperti radiasi matahari, suhu, dan sudut kemiringan panel surya. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem PLTS dengan kapasitas 11.700 Wp mampu menghasilkan energi tahunan sebesar 16.136 kWh, sementara kapasitas 3.150 Wp dan 1.350 Wp masing-masing menghasilkan 4.364,3 kWh dan 1.852,4 kWh per tahun. Temuan ini mengindikasikan bahwa implementasi PLTS *On-Grid* dapat menjadi solusi efektif dalam memenuhi kebutuhan energi listrik di Pondok Pesantren tersebut..

Robertus Bellarminus Dhony Prasetya Nugraha (2023) [11] dalam studi tentang Desain *Stand Alone Solar Photovoltaic System* di Gedung Museum Provinsialat Argopuro Semarang menekankan pentingnya perancangan PLTS *stand-alone (off-grid)* untuk memenuhi kebutuhan energi listrik secara mandiri. Dengan menggunakan perangkat lunak *PVsyst 7.2*, penelitian ini melakukan simulasi untuk menentukan kapasitas optimal sistem PLTS guna menyuplai

kebutuhan listrik museum yang mencapai 19.050 kWh/tahun. Hasil simulasi menunjukkan bahwa PLTS berkapasitas 10 kWp hanya mampu memenuhi 42,5% dari total kebutuhan energi, dengan produksi energi sebesar 8097,1 kWh/tahun. Sisanya, masih harus disuplai dari sumber energi lain seperti jaringan PLN.

Penelitian Suprianto (2021) [12] mengenai "Analisa Perhitungan untuk Pemasangan Sistem PLTS untuk *Solar Home System*" menekankan pentingnya perancangan *Solar Home System (SHS)* yang sesuai dengan kebutuhan listrik maksimum rumah tangga. Perhitungan yang tidak akurat dapat mengurangi efisiensi sistem dan kontinuitas pasokan daya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem PLTS dengan kapasitas 1600 Wp, *solar charge controller* 60A 24V, baterai 350 Ah, dan *inverter* 1000W 24V mampu melayani beban rumah tangga secara kontinu selama 12 jam (18.00 – 06.00 WIB) dengan konsumsi energi 1870–2763 Wh. Penambahan jumlah modul surya dua kali lipat mempercepat pengisian baterai hingga penuh pada siang hari, meningkatkan efisiensi sistem. Efisiensi *inverter* 85% dan *Depth of Discharge (DoD)* optimal pada baterai berperan penting dalam menjaga stabilitas daya. Penelitian ini menjadi referensi bagi pengembangan PLTS *off-grid*, terutama di daerah terpencil seperti Kabupaten Berau, guna memastikan pasokan listrik yang handal dan berkelanjutan.

Dalam penelitian yang dilakukan oleh Eldina Megawati, Susatyo Handoko dan Ajub Ajulian Zahra [13] yang berjudul “Analisis Potensi dan Unjuk Kerja Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya Sistem *Hybrid* Pada Atap Kandang Ayam *Closed House* di Tualang Kabupaten Serdang Bedagai” menggunakan perangkat lunak *PVsyst* untuk mengevaluasi potensi dan kinerja sistem PLTS *Hybrid*. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan konfigurasi sistem yang optimal dengan mempertimbangkan intensitas radiasi matahari, suhu lingkungan, serta kebutuhan beban listrik peternakan ayam. Metodologi yang diterapkan mencakup pengumpulan data, perancangan sistem, simulasi, visualisasi desain, dan evaluasi kinerja sistem guna memperoleh solusi energi terbarukan yang efisien dan berkelanjutan.

Tabel 2.1 Studi Literatur

No	Penulis	Tahun	Judul Penelitian	Metode	Hasil
1	Muhammad Alvin Ridho, Bambang Winardi, Agung Nugroho	2019	Perancangan PLTS menggunakan PVSyst 6.43	Analisis faktor bayangan (shading)	Shading memiliki dampak signifikan terhadap penurunan produksi energi listrik.
2	Dimas Satria Ariadita, Agung Nugroho, Bambang Winardi	2022	Potensi dan unjuk kerja PLTS di Perumahan Grand Tembalang Regency	Simulasi menggunakan PVSyst dengan data radiasi matahari dan kecepatan angin	Intensitas radiasi matahari tinggi meningkatkan potensi energi listrik, bergantung pada efisiensi panel.
3	Mardiansyah, Irfan, Saiful Karim	2023	Perbandingan manual dan simulasi PVSyst pada sistem PLTS <i>on-grid</i>	Simulasi menggunakan baterai dan tanpa baterai	Sistem dengan baterai memiliki konsumsi listrik lebih tinggi dari simulasi tanpa baterai.
4	Tarsisius Kristyadi, Teguh Arfianto	2021	Optimasi PLTS terpusat di Desa Air Glubi, Kabupaten Bintan	Simulasi dan optimasi desain PLTS <i>off-grid</i> menggunakan PVSyst	Optimasi layout memperhatikan lahan dan kemiringan modul untuk hasil optimal.
5	Elieser Tarigan	2020	Optimasi kapasitas PLTS atap untuk rumah tangga di Surabaya	Simulasi numerik dengan PVplanner dan PVspot	Menentukan kinerja sistem PLTS berdasarkan data iklim 10 tahun terakhir.
6	Suhardhika Sih Sudewanto, Munawar Agus Riyadi	2022	Evaluasi kinerja dan manfaat finansial PLTS <i>on-grid</i> di Laboratorium B PLN UPDL Pandaan	Evaluasi produksi energi menggunakan kWh Meter Ekspor-Impor	Mengukur penghematan biaya listrik sebelum dan setelah penerapan PLTS.
7	Ali Firmansyah, Karnoto, Jaka Windarta	2021	Perancangan sistem PLTS <i>on-grid</i> di Pondok Pesantren Tanbihul Ghofiliin	Simulasi menggunakan PVSyst 7.2	Memaksimalkan energi listrik berdasarkan radiasi matahari, suhu, dan sudut panel surya.
8	Robertus Bellarminus Dhony	2023	Desain <i>Stand Alone Solar Photovoltaic System</i> di	Simulasi menggunakan PVSyst 7.2	PLTS berkapasitas 10 kWp hanya mampu memenuhi 42,5% dari total

No	Penulis	Tahun	Judul Penelitian	Metode	Hasil
	Prasetya Nugraha		Gedung Museum Provinsialat Argopuro Semarang		kebutuhan energi museum, sisanya masih harus disuplai dari sumber lain.
9	Suprianto	2021	Analisa Perhitungan untuk Pemasangan Sistem PLTS untuk Solar Home System	Analisis teknis sistem PLTS <i>off-grid</i>	PLTS kapasitas 1600 Wp mampu melayani beban rumah tangga selama 12 jam dengan konsumsi energi 1870–2763 Wh
10	Eldina Megawati, Susatyo Handoko, Ajub Ajulian Zahra	2021	Potensi dan unjuk kerja PLTS sistem hybrid pada atap kandang ayam closed house	Simulasi menggunakan <i>PVsyst</i>	Menentukan konfigurasi optimal berdasarkan radiasi, suhu, dan beban listrik kandang ayam.

Penelitian ini berfokus pada simulasi sistem PLTS *off-grid* menggunakan perangkat lunak *PVsyst* dengan kapasitas daya PLTS sebesar 3.300 Wp dan inverter 3.000 W, yang dirancang untuk diaplikasikan di Kabupaten Berau. Kajian ini dilakukan untuk mengevaluasi potensi produksi energi, efisiensi sistem, serta kelayakan ekonomi berdasarkan perhitungan investasi dan periode pengembalian modal (*Payback Period*).

Dibandingkan dengan penelitian yang telah dilakukan dalam tinjauan pustaka, penelitian ini memiliki beberapa perbedaan utama sebagai berikut:

1. Penelitian ini berfokus pada sistem PLTS *off-grid* dengan kapasitas 3.300 Wp, yang bertujuan untuk mengevaluasi kelayakan sistem di daerah yang tidak terhubung dengan jaringan listrik PLN. Beberapa penelitian dalam tinjauan pustaka sebelumnya lebih banyak menyoroti sistem *on-grid*, seperti penelitian yang dilakukan oleh Suhardhika Sih Sudewanto dan Munawar Agus Riyadi (2022) [9] yang mengevaluasi manfaat PLTS *On-Grid* di laboratorium PLN. Selain itu, penelitian lain yang membahas PLTS *off-grid*, seperti yang dilakukan oleh Tarsisius Kristyadi dan Teguh Arfianto (2021) [7], lebih menekankan pada optimasi tata letak panel surya, tanpa membahas secara spesifik performa sistem dengan kapasitas 3.300 Wp. Oleh karena itu, penelitian ini memberikan kontribusi baru dalam analisis teknis dan keekonomian PLTS *off-grid* dengan skala daya menengah.

2. Penelitian ini menggunakan simulasi *PVsyst* untuk menganalisis performa PLTS *off-grid* dengan kapasitas 3.300 Wp, berbeda dengan beberapa penelitian sebelumnya yang menggunakan kapasitas berbeda. Misalnya, penelitian yang dilakukan oleh Robertus Bellarminus Dhony Prasetya Nugraha (2023) [11] yang mensimulasikan sistem PLTS 10 kWp, serta Suprianto (2021) [12] yang menganalisis sistem PLTS *Solar Home System* dengan kapasitas lebih kecil, yaitu 1600 Wp. Dengan kapasitas yang lebih spesifik pada 3300 Wp, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja, keekonomian dan lingkungan sistem PLTS *off-grid* skala menengah, yang belum banyak dibahas dalam penelitian sebelumnya.
3. Penelitian ini berlokasi di Kabupaten Berau, sedangkan mayoritas penelitian dalam tinjauan pustaka dilakukan di wilayah lain dengan segala kebutuhan material lebih terjangkau dan tidak adanya energi PLN yang mengalami *defisit*, seperti Tembalang (Dimas Satria Ariadita, 2022) [5], Surabaya (Elieser Tarigan, 2020) [8], dan Bintan (Tarsisius Kristyadi, 2021) [7]. Dengan lokasi penelitian yang berbeda, studi ini memberikan kontribusi terhadap pemanfaatan energi surya di Kabupaten Berau, yang memiliki kondisi geografis dan iklim yang berbeda dibandingkan dengan daerah lain yang telah dikaji sebelumnya.
4. Penelitian ini tidak hanya berfokus pada analisis teknis, tetapi juga mengevaluasi kelayakan lingkungan dan finansial PLTS *off-grid* dengan mempertimbangkan indikator ekonomi, seperti *probability index* (PI), *return on investment* (RoI), *payback period*, dan emisi karbon. Sebagian besar penelitian sebelumnya, seperti yang dilakukan oleh Suhardhika Sih Sudewanto dan Munawar Agus Riyadi (2022) [9], hanya meninjau aspek teknis dan efisiensi sistem *on-grid* tanpa mengkaji lebih lanjut aspek keekonomian dan lingkungan. Dengan mempertimbangkan analisis keekonomian dan lingkungan yang lebih komprehensif, penelitian ini bertujuan untuk memberikan gambaran mengenai potensi investasi PLTS *off-grid* dalam jangka panjang.

Dengan demikian, penelitian ini memberikan kontribusi baru dalam kajian PLTS *off-grid* dengan daya 3.300 Wp sebagai solusi penyediaan energi di daerah

yang tidak memiliki akses listrik dari jaringan PLN atau sebagai *back-up* pada saat terjadinya gangguan atau pembangkit mengalami defisit oleh PLN. Penelitian ini tidak hanya menitikberatkan pada simulasi performa teknis menggunakan *PVsyst*, tetapi juga menganalisis aspek keekonomian dan kelayakan investasi, sehingga dapat menjadi referensi bagi pengembangan energi surya yang lebih luas, khususnya di wilayah Kabupaten Berau.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Listrik

Energi dapat diartikan sebagai kemampuan suatu sistem untuk melakukan kerja atau usaha. Sementara itu, energi listrik merupakan bentuk energi yang dihasilkan oleh muatan listrik dalam keadaan statis, yang kemudian menyebabkan pergerakan muatan listrik secara dinamis, sehingga memungkinkan terjadinya aliran listrik dalam suatu rangkaian. [14].

Energi listrik merupakan salah satu bentuk energi yang memiliki peran krusial dalam kehidupan modern karena sifatnya yang efisien, fleksibel, dan mudah diaplikasikan. Energi ini dihasilkan dari pergerakan muatan listrik, khususnya elektron yang mengalir melalui penghantar seperti kabel konduktor. Sumber energi listrik dapat diperoleh melalui berbagai mekanisme fisika dan kimia, misalnya baterai yang mengonversi energi kimia menjadi energi listrik, atau pembangkit listrik tenaga air yang memanfaatkan energi kinetik air untuk menggerakkan turbin dalam proses pembangkitan listrik. Selain itu, energi dari radiasi matahari dapat diubah menjadi listrik melalui teknologi *fotovoltaik* pada panel surya, yang memungkinkan pemanfaatan energi baru terbarukan secara langsung.

Dalam sistem kelistrikan, energi listrik dihasilkan di pembangkit listrik kemudian ditransmisikan melalui jaringan distribusi untuk mencapai konsumen akhir. Proses transmisi listrik melibatkan penggunaan tegangan tinggi untuk meminimalkan kerugian energi selama perjalanan panjang. Setelah mencapai lokasi pengguna, energi ini diturunkan tegangannya melalui transformator sehingga aman digunakan dalam peralatan rumah tangga, komersial, maupun industri. Teknologi penyimpanan energi seperti baterai lithium-ion juga menjadi komponen penting untuk mengelola

ketersediaan listrik, khususnya pada sistem berbasis energi terbarukan yang cenderung fluktuatif.

Energi listrik sangat fleksibel karena dapat diubah menjadi berbagai bentuk energi lain sesuai kebutuhan. Sebagai contoh, energi listrik dapat diubah menjadi energi mekanik dalam motor listrik yang digunakan pada peralatan seperti kipas angin dan mesin pabrik. Dalam rumah tangga, energi listrik sering digunakan untuk menghasilkan panas, seperti pada oven listrik, atau cahaya, seperti pada lampu LED. Di sektor industri, energi listrik berperan dalam mendukung operasional mesin-mesin berat, teknologi otomatisasi, dan proses produksi lainnya.

Kemajuan teknologi terus mendorong peningkatan efisiensi dalam pembangkitan, transmisi, dan pemanfaatan energi listrik. Selain itu, upaya global dalam mengurangi emisi karbon telah mempercepat transisi menuju energi terbarukan, seperti tenaga surya, angin, dan air, yang berperan signifikan dalam menghasilkan listrik dengan dampak lingkungan yang lebih minimal.

2.2.2 Pembangkit listrik tenaga surya (PLTS)

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan sistem yang memanfaatkan cahaya matahari sebagai sumber utama dalam menghasilkan energi listrik. Prinsip kerja PLTS didasarkan pada konversi energi matahari menjadi listrik melalui panel *fotovoltaik* (solar panel), yang beroperasi berdasarkan efek *fotovoltaik*. Ketika cahaya matahari mengenai sel surya yang terdapat dalam panel *fotovoltaik*, energi cahaya tersebut menyebabkan pergerakan elektron dalam material semikonduktor, sehingga menciptakan arus listrik yang dapat digunakan sebagai sumber energi.

Panel surya umumnya dipasang dalam posisi tetap menghadap matahari, namun karena pergerakan harian matahari, panel yang diam tidak dapat menyerap energi secara optimal sepanjang waktu. Agar penyerapan energi lebih maksimal, sinar matahari harus mengenai permukaan panel dengan sudut mendekati tegak lurus. Oleh karena itu, diperlukan sistem kontrol yang mampu menyesuaikan orientasi panel surya secara dinamis,

sehingga dapat mengikuti perubahan posisi matahari dan meningkatkan efisiensi konversi energi matahari menjadi listrik.



Gambar 2.1 PLTS Pulau Derawan

PT PLN (Persero) UP3 Berau telah mengoperasikan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) di Pulau Derawan sejak tahun 2012 hingga sekarang. PLTS ini memiliki kapasitas daya maksimum hingga 100 kilo watt peak (kWp) dan kapasitas yang dioperasikan sebesar 50 kW untuk menyuplai warga setempat yang mampu menyerap energi sinar matahari terbaik pada jam 09.00 WITA hingga 14.00 WITA (Lima jam maksimum).

Implementasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) di Pulau Derawan mencerminkan komitmen dalam pemanfaatan sumber energi yang berkelanjutan, sekaligus mendukung peningkatan bauran energi hijau di Indonesia. Inisiatif ini selaras dengan program pemerintah Indonesia dalam upaya transisi energi menuju *Net Zero Emission* (NZE) pada tahun 2060, melalui pengembangan dan pemanfaatan energi baru terbarukan (EBT) sebagai bagian dari strategi dekarbonisasi sektor ketenagalistrikan Indonesia.

2.2.3 Komponen – komponen PLTS

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) terdiri dari beberapa komponen utama, antara lain panel surya sebagai perangkat utama yang mengubah energi matahari menjadi listrik, *inverter* yang berfungsi mengonversi arus searah (DC) menjadi arus bolak – balik (AC), *solar charge controller* (SCC) yang mengatur proses pengisian daya, serta baterai

(*storage*) pada sistem yang memerlukan penyimpanan energi untuk memastikan ketersediaan daya saat tidak ada radiasi matahari.

1. Panel surya terdiri dari kumpulan sel surya yang disusun dalam modul berukuran besar. Setiap sel surya dibuat dari material semikonduktor, seperti silikon, yang memiliki kemampuan untuk menghasilkan energi listrik ketika terkena paparan cahaya matahari. Proses konversi energi ini menghasilkan arus listrik searah (DC), sementara sebagian besar perangkat listrik rumah tangga, seperti lampu dan peralatan elektronik lainnya, memerlukan arus listrik bolak – balik (AC) untuk beroperasi. Oleh karena itu, diperlukan *inverter* sebagai komponen yang bertugas mengubah arus listrik searah (DC) menjadi arus listrik bolak – balik (AC) agar dapat digunakan untuk berbagai kebutuhan listrik sehari – hari.



Gambar 2.2 Panel Surya Pulau Derawan

Panel surya tersedia dalam berbagai bentuk, tipe, dan tingkat efisiensi yang berbeda, berikut ini adalah beberapa jenis panel surya yang umum digunakan :

a. *Monocrystalline* (Kristal Tunggal)

Panel surya jenis ini memiliki efisiensi tertinggi dibandingkan jenis lainnya, dengan kemampuan menghasilkan daya listrik per satuan luas yang lebih besar, mencapai efisiensi hingga 15%. Namun, kelemahan utama dari panel ini adalah sensitivitasnya terhadap intensitas cahaya, sehingga tidak dapat beroperasi secara optimal di lingkungan dengan paparan sinar matahari terbatas, seperti area yang teduh atau dalam kondisi cuaca berawan, di

mana efisiensinya akan mengalami penurunan secara signifikan. [11].



Gambar 2.3 *Monocrystalline* (Kristal Tunggal)

b. *Polycrystalline* (Multi Kristal)

Polycrystalline (*Poly Crystalline/multi-Si*) adalah jenis sel surya yang dibuat melalui peleburan silikon pada suhu tinggi hingga mencapai kemurnian 99,99%, kemudian dicetak dalam bentuk blok dan dipotong menjadi wafer. Proses *doping*, *wiring*, dan *coating* dilakukan untuk membentuk modul *fotovoltaik*. Berbeda dengan *monocrystalline*, *polycrystalline* terdiri dari kumpulan kristal silikon yang disatukan, sehingga memiliki kemurnian lebih rendah dan efisiensi konversi energi sekitar 13–16%. Meski bentuk selnya tidak seragam, *polycrystalline* tetap populer karena biaya produksinya lebih rendah [15].



Gambar 2.4 *Polycrystalline* (Multi Kristal)

2. *Inverter* merupakan komponen utama dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) yang berperan dalam mengonversi arus listrik searah (DC) yang dihasilkan oleh panel surya menjadi arus listrik bolak

– balik (AC). Konversi ini diperlukan karena mayoritas perangkat listrik rumah tangga dan industri menggunakan arus bolak – balik (AC) sebagai sumber daya utama. Tanpa adanya *inverter*, energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya tidak dapat langsung digunakan untuk mengoperasikan perangkat peralatan listrik AC seperti kulkas, televisi, dan peralatan elektronik lainnya. *Inverter* bekerja dengan mengalirkan arus DC melalui rangkaian elektronik, kemudian menghasilkan listrik AC dengan frekuensi dan tegangan yang disesuaikan agar kompatibel dengan kebutuhan daya pada sistem kelistrikan.



Gambar 2.5 Inverter Panel Surya

3. *Solar Charge Controller* (SCC), atau dikenal juga sebagai *Battery Charge Regulator* (BCR), merupakan komponen esensial dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) yang berfungsi untuk mengatur tegangan dan arus listrik selama proses pengisian daya baterai [16]. SCC bekerja dengan menyesuaikan daya keluaran dari modul *fotovoltaik*, sekaligus mempertimbangkan status pengisian baterai (*State of Charge/SoC*) yang berguna untuk memastikan proses pengisian daya berlangsung secara optimal. Pemilihan jenis dan desain SCC yang sesuai memiliki dampak signifikan terhadap efisiensi sistem PLTS dan masa pakai baterai. Dengan pengaturan yang tepat, SCC mampu mencegah risiko *overcharging* dan *deep discharge*, sehingga dapat meningkatkan stabilitas serta daya tahan baterai. Oleh karena itu, penggunaan SCC yang sesuai dengan spesifikasi sistem menjadi aspek penting dalam menjamin keandalan dan kinerja jangka panjang PLTS.

Dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), terdapat dua jenis *Solar Charge Controller* (SCC) yang umum digunakan :

- a. *Pulse Width Modulation* (PWM), teknologi ini mengatur aliran energi ke baterai dengan mengubah lebar pulsa dari sinyal *on* dan *off*, menciptakan bentuk gelombang listrik yang menyerupai gelombang sinusoidal. PWM paling efektif pada sistem dengan panel surya dan baterai yang memiliki tegangan serasi, dan kurang efisien pada kondisi cuaca berawan atau saat intensitas sinar matahari rendah.
- b. *Maximum Power Point Tracker* (MPPT), teknologi yang digunakan dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) untuk mengoptimalkan penggunaan panel surya. Tujuan MPPT adalah untuk menemukan titik kerja maksimal (maximum power point) pada kurva I-V solar panel, di mana dapat menghasilkan daya listrik yang paling besar. Dalam MPPT, solar panel dipantau secara terus-menerus untuk mengetahui tegangan dan arus yang terjadi pada saat tertentu [17]. Sebuah sistem MPPT umumnya terdiri dari beberapa komponen utama yaitu :
 - 1) Sensor tegangan dan arus, untuk membaca kondisi operasional panel surya secara real-time.
 - 2) Mikrokontroler atau prosesor, berfungsi menjalankan algoritma yang menentukan titik daya maksimum.
 - 3) DC-DC *converter* (*chopper*), sebagai pengatur nilai tegangan dan arus ke baterai atau beban.
 - 4) Sakelar elektronik seperti MOSFET atau *Insulated Gate Bipolar Transistor* (IGBT), yang mengatur sirkuit dalam proses *switching* daya.

Untuk mendukung kinerja sistem MPPT dalam menyesuaikan tegangan dan arus agar tetap berada pada titik daya maksimum, diperlukan rangkaian DC-DC *converter* sebagai pengatur daya dari panel surya ke sistem penyimpanan atau beban. Terdapat beberapa jenis konverter yang umum digunakan, masing-masing

memiliki karakteristik dan fungsi yang berbeda sesuai dengan kebutuhan sistem. Jenis-jenis konverter tersebut antara lain *Buck Converter*, *Boost Converter*, dan *Buck-Boost Converter*, yang dijelaskan sebagai berikut:

- 1) *Buck Converter*, Buck converter berfungsi untuk menurunkan tegangan DC dari sumber seperti panel surya agar sesuai dengan tegangan sistem baterai. Proses ini dilakukan dengan mengatur aliran arus melalui rangkaian induktor dan kapasitor sehingga menghasilkan output tegangan yang lebih rendah dari inputnya.
- 2) *Boost Converter*, berperan untuk meningkatkan tegangan input menjadi lebih tinggi dari nilai asalnya. Konverter jenis ini sering digunakan ketika tegangan yang dihasilkan oleh panel surya terlalu rendah, sementara sistem atau beban memerlukan tegangan yang lebih besar.
- 3) *Buck-boost Converter*, merupakan jenis konverter yang serbaguna karena mampu menaikkan atau menurunkan tegangan sesuai dengan kebutuhan sistem. Teknologi ini memungkinkan sistem tetap beroperasi secara stabil meskipun tegangan dari panel surya berubah-ubah, sehingga sangat ideal untuk digunakan pada sistem tenaga surya yang menghadapi perubahan intensitas cahaya secara dinamis.

Dalam sistem PLTS yang terhubung dengan jaringan atau sistem pembangkit lainnya, *inverter* harus melakukan sinkronisasi tegangan dan frekuensi dengan parameter jaringan yang ada. Salah satu teknologi utama yang mendukung proses ini adalah *Maximum Power Point Tracking (MPPT)*. *MPPT* berfungsi untuk memastikan bahwa panel surya selalu bekerja pada titik daya maksimum dengan menyesuaikan tegangan dan arus agar daya yang dihasilkan tetap optimal, meskipun terjadi perubahan intensitas cahaya matahari. Setelah energi listrik dioptimalkan oleh *MPPT*, *inverter* kemudian melakukan sinkronisasi

frekuensi dan tegangan dengan jaringan listrik. Proses ini dimulai dengan pengukuran tegangan dan frekuensi jaringan menggunakan *Phase-Locked Loop (PLL)*, yang memungkinkan *inverter* menyesuaikan fase dan frekuensinya agar sejalan dengan jaringan. Setelah parameter tegangan dan frekuensi telah tersinkronisasi, *inverter* mulai mengatur aliran daya yang masuk ke jaringan, memastikan tidak ada lonjakan tegangan atau ketidakseimbangan beban. *Inverter* modern juga dilengkapi dengan fitur-fitur canggih, seperti pemantauan kinerja sistem, perlindungan terhadap arus lebih atau tegangan berlebih, serta kemampuan untuk beroperasi secara efisien bahkan pada kondisi cahaya matahari yang tidak optimal. Jika terdeteksi gangguan seperti pemadaman atau tegangan yang tidak stabil, *inverter* akan otomatis memutuskan hubungan dengan jaringan untuk mencegah kerusakan sistem. Dengan kombinasi *MPPT* dan sistem sinkronisasi *inverter*, PLTS dapat bekerja lebih efisien, stabil, dan aman dalam memenuhi kebutuhan listrik yang berkelanjutan.



Gambar 2.6 Solar Charge Controller (SCC)

4. Baterai (*storage*) dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) berfungsi untuk menyimpan energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya, yang kemudian digunakan pada malam hari atau saat cuaca mendung, ketika produksi listrik dari panel surya menurun. Penyimpanan energi sangat penting untuk memastikan pasokan listrik yang stabil dan berkelanjutan, terutama pada sistem rumah tangga atau instalasi di daerah yang tidak terhubung dengan jaringan listrik utama. Baterai *lithium-ion* sering digunakan dalam sistem PLTS karena

memiliki umur pakai lebih lama, efisiensi yang tinggi, dan ukuran yang lebih kompak dibandingkan dengan baterai konvensional seperti baterai timbal – asam (*lead-acid*). Baterai *lithium-ion* menyimpan energi listrik dalam bentuk energi kimia, yang kemudian dapat dilepaskan saat dibutuhkan. Ketika panel surya menghasilkan lebih banyak energi daripada yang digunakan oleh konsumen, energi berlebih akan disalurkan ke baterai untuk disimpan. Sebaliknya, ketika kebutuhan listrik melebihi kapasitas panel surya, energi yang disimpan dalam baterai akan digunakan. Penggunaan baterai dalam sistem PLTS ini meningkatkan otonomi energi dan memastikan stabilitas pasokan listrik, meskipun dipengaruhi oleh faktor cuaca atau waktu seperti pada malam hari.



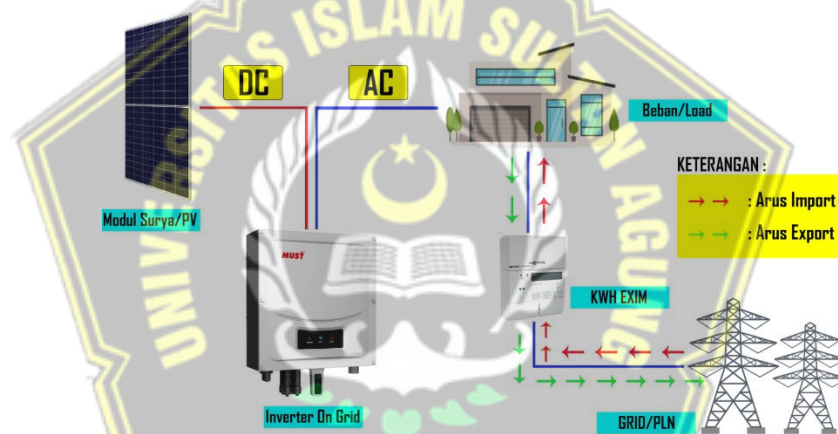
Gambar 2.7 Baterai PLTS

Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dapat dirancang untuk berbagai skala, baik skala kecil untuk memenuhi kebutuhan rumah tangga maupun skala besar untuk aplikasi komersial dan industri. Pada skala rumah tangga, sistem PLTS biasanya dipasang di atap rumah atau bangunan, sementara pada skala yang lebih besar, sistem ini dapat dipasang di area terbuka yang luas, seperti ladang surya, waduk hingga laut. Salah satu keuntungan utama dari PLTS adalah kemampuannya untuk menghasilkan energi bersih dan terbarukan, tanpa menghasilkan polusi atau emisi gas rumah kaca yang berpotensi merusak lingkungan. Selain itu, PLTS memiliki potensi besar untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil, yang semakin terbatas dan berisiko mencemari lingkungan. PLTS juga dapat

diandalkan di daerah dengan tingkat paparan sinar matahari tinggi, seperti di wilayah tropis, termasuk Indonesia.

2.2.4 Pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) *On-Grid*

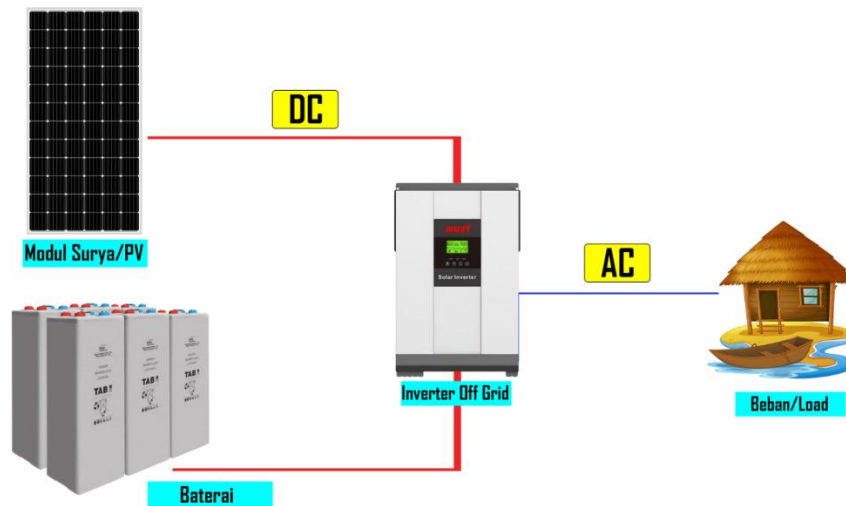
Sistem *Grid-Connected* PV atau PLTS terhubung dengan jaringan merupakan solusi energi berkelanjutan yang ideal untuk wilayah perkotaan, termasuk perumahan dan perkantoran. Sistem ini memanfaatkan panel surya *fotovoltaik* untuk menghasilkan listrik ramah lingkungan yang bebas dari emisi karbon. Dengan menerapkan sistem ini, pengguna dapat mengurangi biaya listrik bulanan sekaligus meningkatkan nilai ekonomi properti. Berdasarkan prinsip kerjanya, PLTS terhubung dengan jaringan PLN, memungkinkan penggunaan energi surya secara maksimal untuk menghasilkan listrik dalam kapasitas yang optimal.



Gambar 2.8 Sistem *On-Grid*

2.2.5 Pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) *Off-Grid*

Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *Off-grid* atau *Stand Alone* (berdiri sendiri) merupakan solusi alternatif untuk menyediakan listrik di wilayah terisolasi atau pedesaan yang belum terhubung ke jaringan PLN. Sistem ini, dikenal pula sebagai PLTS Terpusat, beroperasi secara mandiri dengan memanfaatkan energi surya sebagai sumber tenaga primer tunggal. Melalui susunan panel surya *fotovoltaik*, sistem ini mengonversi cahaya matahari menjadi energi listrik untuk memenuhi kebutuhan pengguna tanpa bergantung pada sumber energi lain. Secara umum konfigurasi PLTS sistem terpusat dapat dilihat pada gambar 2.



Gambar 2.9 Sistem off-grid

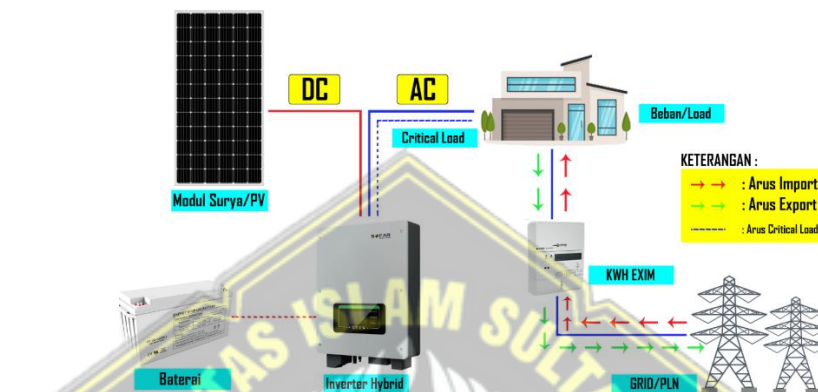
Prinsip kerja sistem PLTS terpusat dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Pada sistem ini, energi listrik yang dihasilkan oleh modul surya (PV) selama siang hari disimpan dalam baterai. Proses pengisian energi dari modul surya ke baterai diatur oleh *Solar Charge Controller* untuk mencegah pengisian berlebih (*overcharging*). Jumlah energi yang dihasilkan oleh modul PV sangat dipengaruhi oleh intensitas cahaya matahari yang diterima oleh panel surya dan efisiensi sel surya. Dengan intensitas cahaya matahari maksimal sebesar 1000 W/m^2 dan efisiensi sel sebesar 14%, daya yang dapat dihasilkan oleh modul surya mencapai 140 W/m^2
2. Setelah energi terkumpul dalam baterai, energi tersebut akan digunakan untuk menyuplai beban melalui *inverter* saat dibutuhkan. *Inverter* berfungsi untuk mengubah tegangan DC dari baterai menjadi tegangan AC yang dapat digunakan untuk kebutuhan listrik rumah tangga atau instalasi lainnya..

2.2.6 Pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) *hybrid*

Sistem *hybrid* merupakan kombinasi dua atau lebih sumber energi pembangkit, yang biasanya mencakup genset, Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), mikrohidro, tenaga angin, dan sumber energi lainnya. Oleh karena itu, sistem *hybrid* dapat mencakup kombinasi seperti PLTS dengan genset, PLTS dengan mikrohidro, PLTS dengan tenaga angin, atau kombinasi

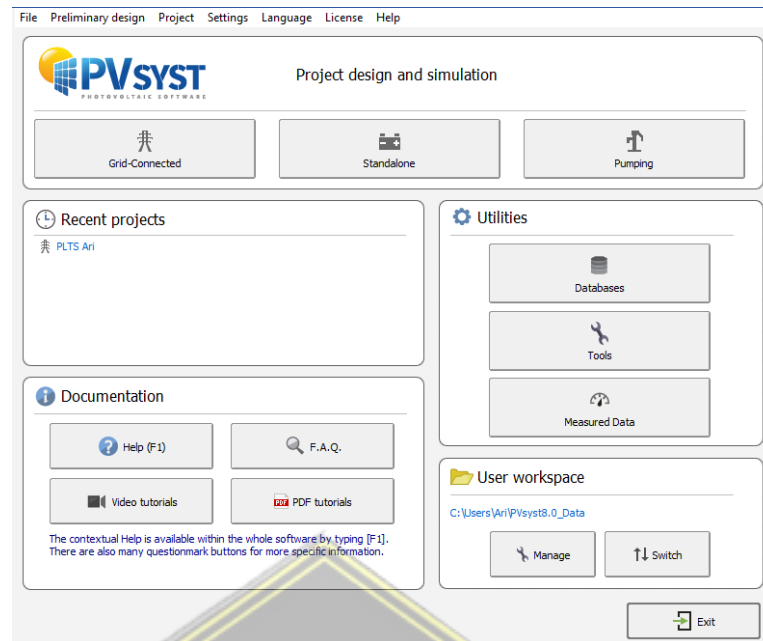
lainnya. Di Indonesia, penerapan sistem *hybrid* sudah cukup luas, meliputi kombinasi PLTS dan genset, PLTS dan mikrohidro, serta kombinasi PLTS dengan tenaga angin dan mikrohidro. Seperti di Desa Sungai Aur, Sumatera Barat, kombinasi PLTS dan mikrohidro diterapkan untuk meningkatkan akses terhadap listrik yang lebih ramah lingkungan. Mikrohidro menyediakan energi ketika air mengalir deras, sementara PLTS mendukung saat sumber air terbatas atau saat siang hari.



Gambar 2.10 Sistem *Hybrid*

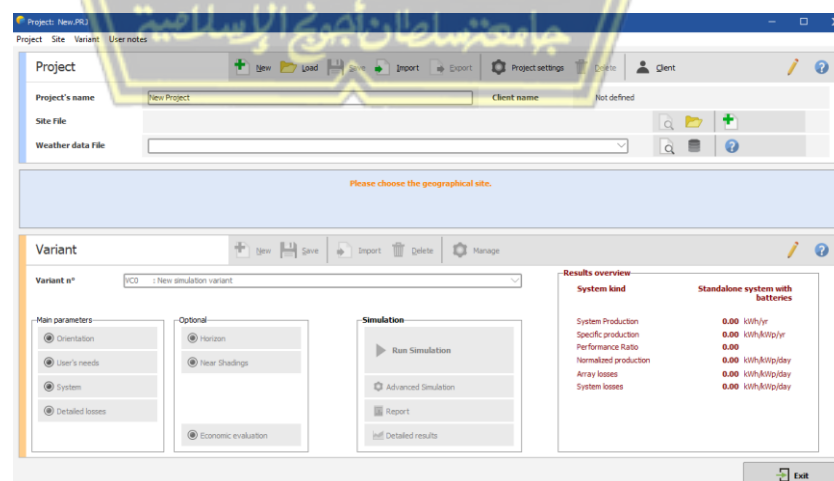
2.2.7 Perangkat lunak *PVsyst*

PVsyst adalah versi perangkat lunak simulasi sistem *fotovoltaik* (PV) yang sangat populer di kalangan para profesional di industri energi terbarukan. *PVsyst* dikembangkan untuk membantu perancang, insinyur, dan pengembang proyek dalam menganalisis dan mendesain sistem tenaga surya, baik untuk aplikasi skala kecil, seperti sistem atap rumah, maupun proyek besar seperti pembangkit listrik tenaga surya (PLTS). Versi memperkenalkan sejumlah fitur baru dan peningkatan untuk meningkatkan keakuratan dan efisiensi desain serta analisis sistem.



Gambar 2.11 Tampilan Awal Software PVsyst

Salah satu keunggulan utama *PVsyst* adalah kemampuannya untuk melakukan simulasi yang mendalam, termasuk perhitungan aliran daya, efisiensi konversi energi, dan estimasi kinerja sepanjang tahun berdasarkan kondisi iklim lokal. *PVsyst* memungkinkan pengguna untuk memasukkan data dari berbagai panel surya, *inverter*, dan komponen sistem lainnya untuk menyesuaikan desain dengan kebutuhan spesifik proyek. Dengan antarmuka yang user-friendly, perangkat lunak ini memudahkan pengguna dalam mengimpor data cuaca historis atau memilih dari database global yang ada.



Gambar 2.12 Tampilan Awal Software PVsyst

2.2.8 Kelebihan dan kekurangan pemanfaatan panel surya

Pemerintah saat ini aktif mendorong transisi menuju energi baru terbarukan (EBT) guna memitigasi dampak perubahan iklim. Di antara sumber EBT yang potensial, energi surya—yang bersumber dari sinar matahari—menjadi pilihan utama untuk menghasilkan listrik melalui teknologi panel surya. Meski memiliki manfaat efisiensi yang signifikan, penerapan panel surya tidak sepenuhnya bebas dari kelemahan. Di satu sisi, teknologi ini mampu mengurangi ketergantungan pada energi fosil, tetapi di sisi lain, tingginya biaya instalasi sering kali menjadi sorotan dan dikritisi masyarakat sebagai tantangan utama.

Mengutip situs *GreenMatch*, berikut ini beberapa kelebihan dan kekurangan penggunaan panel surya.

1. Kelebihan

a. Sumber Energi Baru Terbarukan

Energi matahari merupakan sumber daya berkelanjutan yang tak akan habis, terutama di Indonesia yang beriklim tropis dengan paparan sinar matahari melimpah. Berdasarkan riset ilmiah, matahari diprediksi tetap menyediakan energi hingga 5 miliar tahun ke depan. Teknologi panel surya mampu mengubah energi ini menjadi listrik ramah lingkungan tanpa emisi karbon. Meski potensinya mencapai ratusan gigawatt per tahun, pemanfaatan energi surya di Indonesia masih di bawah 1%. Dengan keunggulan ketersediaan jangka panjang dan ramah lingkungan, energi matahari menjadi solusi strategis untuk mengurangi ketergantungan pada energi fosil.

b. Mengurangi Tagihan Listrik

Adopsi energi surya sebagai pengganti sumber listrik konvensional berpotensi mengurangi biaya listrik secara signifikan. Besaran penghematan bergantung pada kapasitas sistem panel surya yang dipasang. Dengan demikian, penggunaan sumber energi terbarukan ini tidak hanya menghemat anggaran rumah tangga, tetapi juga memungkinkan partisipasi aktif dalam

mengurangi beban jaringan listrik nasional sambil memaksimalkan keuntungan finansial sekaligus kontribusi lingkungan.

c. Aplikasi Beragam

Energi surya memiliki beragam pemanfaatan, mulai dari penghasil listrik (*photovoltaic*) atau panas matahari. Sumber energi ini dapat dimanfaatkan untuk menyediakan listrik di lokasi terpencil yang tidak terhubung ke jaringan listrik, memurnikan air di wilayah dengan akses air bersih terbatas, hingga menjadi sumber daya operasional satelit di luar angkasa. Dengan fleksibilitasnya, energi matahari tidak hanya menjawab kebutuhan dasar energi, tetapi juga mendukung inovasi teknologi di bidang antariksa dan pengelolaan sumber daya alam.

d. Biaya Perawatan Rendah

Meskipun biaya investasi teknologi panel surya tergolong tinggi, perawatannya relatif mudah dan tidak memerlukan perhatian khusus. Pengguna hanya perlu memastikan panel tetap bersih, dengan pembersihan beberapa kali dalam setahun sudah cukup. Sebagian produsen bahkan memberikan garansi hingga 20-25 tahun, karena panel surya tidak memiliki komponen bergerak yang dapat mengalami keausan. Komponen yang memerlukan penggantian berkala hanyalah *inverter* dan kabel, mengingat keduanya terus beroperasi dalam mengubah energi matahari menjadi listrik dan panas dalam jangka waktu yang cukup lama.

e. Pengembangan Teknologi

Panel surya merupakan teknologi yang terus mengalami kemajuan pesat dan diperkirakan akan semakin banyak diterapkan di masa depan. Inovasi dalam bidang fisika kuantum dan nanoteknologi berpotensi meningkatkan efisiensi panel surya, yang pada gilirannya dapat meningkatkan produksi listrik secara signifikan, bahkan hingga dua hingga tiga kali lipat dibandingkan dengan sistem tenaga surya tradisional.

2. Kekurangan

a. Biaya Investasi Mahal

Panel surya dikenal memiliki biaya investasi awal yang cukup tinggi, mencakup pembelian panel, *inverter*, baterai, kabel, serta biaya pemasangan. Namun, seiring dengan perkembangan teknologi tenaga surya, harga panel surya diperkirakan akan semakin terjangkau di masa depan.

b. Sangat Bergantung Pada Cuaca

Meskipun panel surya masih dapat menghasilkan energi saat cuaca mendung atau hujan, efisiensinya akan berkurang. Karena panel surya mengandalkan sinar matahari untuk mengumpulkan energi secara optimal, kondisi cuaca yang berawan dalam beberapa hari dapat berdampak signifikan pada kinerja sistem. Selain itu, energi matahari tidak dapat dihasilkan pada malam hari, sementara kebutuhan listrik justru cenderung lebih tinggi pada waktu tersebut.

c. Penyimpanan Energi Surya Mahal

Meskipun kinerja panel surya dipengaruhi oleh faktor cuaca, sistem *off-the-grid* memungkinkan penyimpanan energi dalam baterai, yang dapat digunakan saat malam hari. Namun, teknologi ini memiliki biaya yang relatif tinggi dan memerlukan instalasi yang rumit.

d. Menggunakan banyak ruang

Jumlah panel surya yang diperlukan berbanding lurus dengan kapasitas listrik yang ingin dihasilkan, karena peningkatan jumlah panel memungkinkan penyerapan sinar matahari yang lebih optimal. Panel surya *fotovoltaik* (PV) memerlukan area yang luas, sementara beberapa atap mungkin tidak memiliki cukup ruang untuk menampung jumlah panel yang dibutuhkan. Sebagai alternatif, panel surya dapat dipasang di lahan terbuka untuk memastikan akses maksimal terhadap sinar matahari.

2.2.9 Perhitungan pembangkit listrik tenaga surya (PLTS)

Kapasitas daya panel surya dapat ditentukan berdasarkan berbagai faktor, di antaranya total kebutuhan energi rata-rata dan intensitas radiasi matahari, yang bervariasi di setiap wilayah. Data intensitas radiasi ini dapat diperoleh melalui dua metode, yaitu pengukuran langsung di lapangan atau dengan menggunakan data sekunder yang disediakan oleh lembaga atau otoritas yang berwenang dalam menerbitkan informasi iradiasi.

$$\text{Kebutuhan Panel Surya} = \frac{\text{Kebutuhan Energi (Wh)}}{\text{Peak Sun Hours (h)}} \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

$$\text{Jumlah Panel Surya} = \frac{\text{Kebutuhan Panel Surya (Wh)}}{\text{Kapasitas Panel Surya (Wp)}} \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

Perhitungan kapasitas inverter yang diperlukan dilakukan dengan mengalikan total kebutuhan daya maksimum sebesar 125% atau faktor 1,25. Inverter dirancang untuk beroperasi dalam kondisi normal, rata - rata, maupun saat terjadi lonjakan daya puncak. Oleh karena itu, diperlukan faktor keamanan (*safety factor*) untuk mengantisipasi beban puncak dan menyediakan daya cadangan guna memenuhi kebutuhan awal (starting) peralatan listrik.

$$\text{Kapasitas Inverter} = P_{MPP} \times \text{Safety Factor} \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

Keterangan :

P_{MPP} = Daya maksimal *array* (W)

Safety Factor = Faktor keamanan (1,25 atau 125%)

Kedalaman pengosongan baterai, atau *Depth of Discharge* (DoD), biasanya dinyatakan dalam persentase untuk menunjukkan proporsi energi yang dapat digunakan sebelum pengisian ulang diperlukan. Sebagai contoh, jika sebuah baterai memiliki DoD sebesar 80%, maka hanya 80% dari kapasitas energi yang tersedia dapat dimanfaatkan, sementara 20% sisanya tetap tersimpan sebagai cadangan. Pengaturan DoD memiliki peran penting dalam memperpanjang masa pakai baterai, karena semakin besar kedalaman pengosongan yang diterapkan, semakin pendek siklus hidup baterai tersebut.

Kapasitas baterai (*storage*) yang diperlukan untuk memenuhi kebutuhan energi harian dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$C = \frac{EL \times N}{V_s \times DoD \times \eta} \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

Keterangan :

C	= Kapasitas baterai yang dibutuhkan (Ah)
EL	= Energi rata - rata di malam hari (kWh)
N	= Jumlah hari otonom (hari)
V _s	= Tegangan Sistem (V)
DoD	= <i>Depth of Discharge</i> (%)
η	= Efisiensi baterai (%)

Untuk menentukan jumlah baterai yang perlu disusun secara seri dan paralel guna mencapai tegangan sistem yang diinginkan, dapat digunakan persamaan berikut:

$$\text{Baterai Seri} = \frac{\text{Tegangan Kerja Sistem}}{\text{Tegangan Kerja Baterai}} \quad (2.5)$$

$$\text{Baterai Paralel} = \frac{\text{Kapasitas yang dibutuhkan}}{\text{Kapasitas Baterai}} \quad (2.6)$$

$$\text{Total Baterai} = \text{Baterai Seri} \times \text{Baterai Paralel} \quad (2.7)$$

Dalam perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), analisis ekonomi menjadi faktor penting untuk menilai kelayakan investasi. Berikut adalah beberapa aspek ekonomi yang digunakan dalam evaluasi biaya dan profitabilitas PLTS :

1. Biaya Pokok

Biaya pokok merupakan biaya rata - rata tahunan yang diperoleh dengan membagi total biaya investasi dengan masa operasional (lama tahun). Nilai ini mencerminkan beban biaya tahunan yang harus ditanggung dalam pengoperasian PLTS.

$$\text{Biaya Pokok} = \frac{\text{Total Biaya}}{\text{Lama Tahun}} \quad (2.8)$$

2. Biaya Bunga Kredit

Biaya bunga kredit adalah biaya tambahan akibat penggunaan skema pembiayaan kredit dalam investasi PLTS. Biaya ini dihitung berdasarkan suku bunga yang berlaku terhadap biaya pokok investasi dan berpengaruh terhadap biaya produksi listrik per kWh.

$$\text{Biaya Bunga Kredit} = \text{Biaya Pokok} \times \text{Suku Bunga Kredit} \quad (2.9)$$

3. Biaya Pokok Listrik PLTS (*LCOE - Levelized Cost of Energy*)

Biaya Pokok Listrik PLTS adalah indikator yang digunakan untuk menghitung biaya rata-rata produksi listrik per kWh selama masa operasional PLTS.

$$LCOE = \frac{\text{Biaya Pokok} + \text{Biaya Bunga Kredit}}{\text{Total Produksi Energi PLTS}} \dots\dots\dots (2.10)$$

4. Biaya Operasional dan Pemeliharaan (O&M)

Biaya operasional dan pemeliharaan adalah komponen yang diperlukan untuk menjaga kinerja sistem PLTS. Dalam perhitungan ini, biaya O&M diasumsikan sebesar 1% dari total biaya komponen yang digunakan dalam sistem.

$$\text{Biaya O\&M} = \frac{1\% \times \text{Total Biaya Komponen}}{\text{Lama Tahun}} \dots\dots\dots (2.11)$$

5. *Profit* (Keuntungan)

Keuntungan dari PLTS dihitung berdasarkan produksi energi listrik yang dihasilkan dikalikan dengan harga jual listrik per kWh. Profit ini menjadi indikator utama dalam menilai tingkat pengembalian investasi dari PLTS.

$$\text{Profit} = \text{Produksi Energi PLTS} \times \text{Harga kWh} \dots\dots\dots (2.12)$$

6. Balik Modal (*Payback Period*)

Payback period mengukur waktu yang dibutuhkan untuk mengembalikan modal awal investasi melalui keuntungan yang diperoleh. Rumusnya adalah modal awal dibagi dengan profit tahunan. Semakin singkat periode balik modal, semakin cepat investasi mulai menghasilkan keuntungan bersih.

$$\text{Balik Modal} = \frac{\text{Modal Awal}}{\text{Profit}} \dots\dots\dots (2.13)$$

7. *Probability Index* (PI)

Probability Index (PI) digunakan untuk menilai profitabilitas investasi dengan membandingkan total profit kumulatif terhadap investasi awal. Jika nilai PI lebih besar dari 1, maka investasi dianggap menguntungkan.

$$Probability\ Index\ (PI) = \frac{Profit\ Kumulatif}{Investasi\ Awal} \dots\dots\dots (2.14)$$

8. *Return on Investment (ROI)*

RoI adalah indikator efektivitas investasi yang dihitung dengan mengalikan PI dengan 100. Nilai RoI menunjukkan persentase keuntungan dibandingkan dengan investasi awal, sehingga semakin tinggi RoI, semakin menarik investasi dalam PLTS.

$$Return\ of\ Investment\ (RoI) = PI \times 100\% \dots\dots\dots (2.15)$$

Emisi karbon merupakan jumlah karbon dioksida (CO₂) yang dilepaskan ke atmosfer akibat konsumsi energi dari sumber berbahan bakar fosil. Dalam konteks PLTS off-grid, pengurangan emisi karbon dihitung berdasarkan jumlah energi yang dihasilkan oleh PLTS yang menggantikan konsumsi listrik dari jaringan PLN atau generator berbahan bakar fosil. Berdasarkan *Press Release* PT PLN (Persero) Nomor 775.PR/STH.00.01/X/2022 tanggal 13 Oktober 2022 [18], faktor emisi listrik yang ditopang oleh Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) di Indonesia rata – rata sebesar 0,85 kg CO₂/kWh untuk sistem ketenagalistrikan nasional.

$$Emisi\ Karbon = Produksi\ Energi\ PLTS \times Faktor\ Emisi \dots\dots\dots (2.16)$$

Keterangan :

Faktor Emisi = 0,85

2.2.10 Penggunaan pembangkit listrik tenaga listrik (PLTS) atap di Indonesia

Peningkatan jumlah pelanggan PLTS Atap di Indonesia menunjukkan tren yang semakin positif dalam transisi energi menuju sumber yang lebih bersih dan terbarukan. Berdasarkan data terbaru, jumlah pelanggan PLTS Atap meningkat dari 3.152 pelanggan pada tahun 2020 menjadi 4.562 pelanggan pada tahun 2021 (+44,8%), lalu terus naik hingga 6.522 pelanggan pada tahun 2022 (+42,98%) dan mencapai 8.491 pelanggan pada tahun 2023 (+30,18%). Peningkatan ini menunjukkan bahwa kesadaran masyarakat dan sektor industri terhadap pemanfaatan energi surya semakin berkembang.

Tabel 2.2 Pengguna PLTS Atap di Indonesia

No.	Tahun	Jumlah Pelanggan	Kenaikan	Sumber Berita
1	2020	3.152	-%	Pelanggan PLTS Atap Tumbuh 44%, Eh Skema Ekspor Listrik Dihapus - Bisnis.com
2	2021	4.562	45%	Energi Surya Digadang-Gadang Menjadi Masa Depan EBT Indonesia - Transisi Energi Berkeadilan
3	2022	6.522	43%	Peraturan Terbaru Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Atap - AP Law Solution
4	2023	8.491	30%	Realisasi Pengembangan PLTS Atap Masih Jauh di Bawah Target Pemerintah Realisasi Pengembangan PLTS Atap Masih Jauh di Bawah Target Pemerintah - Katadata.co.id

Dukungan pemerintah melalui berbagai regulasi, insentif pemasangan PLTS, serta penyederhanaan aturan teknis juga turut mendorong perkembangan ini. Selain itu, kemajuan teknologi telah menyebabkan penurunan harga panel surya dan sistem penyimpanan energi (baterai), menjadikan investasi PLTS semakin ekonomis dan menarik. Dengan tren yang terus meningkat, pengembangan PLTS tidak hanya mendukung target pemerintah dalam bauran energi terbarukan, tetapi juga menawarkan solusi energi yang efisien dan berkelanjutan bagi masa depan sistem kelistrikan nasional.

Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral (Permen ESDM) Nomor 2 Tahun 2024 mengatur mengenai Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Atap yang terhubung dengan jaringan listrik dari penyedia tenaga

listrik yang memiliki izin usaha untuk kepentingan publik. Peraturan ini bertujuan untuk mendorong pemanfaatan energi surya yang ramah lingkungan melalui sistem PLTS Atap yang digunakan untuk kebutuhan pribadi atau komersil sesuai dengan kuota kapasitas PLTS. Salah satu kebijakan yang diterapkan dalam peraturan ini adalah penghapusan pembatasan kapasitas, *ekspor – impor* energi listrik, dan biaya kapasitas, serta penambahan ketentuan tentang kuota pengembangan PLTS Atap.

Dengan diberlakukannya Permen ESDM Nomor 2 Tahun 2024, diharapkan terjadi peningkatan adopsi PLTS Atap di kalangan masyarakat dan industri, sehingga dapat mengurangi ketergantungan pada energi fosil dan mendukung pencapaian target bauran energi terbarukan nasional. Peraturan ini juga memberikan kepastian hukum bagi pelanggan PLTS Atap dalam mengoperasikan sistem mereka yang terhubung dengan jaringan listrik umum.



BAB III

METODE PENELITIAN

3.1. Tempat dan Waktu Penelitian

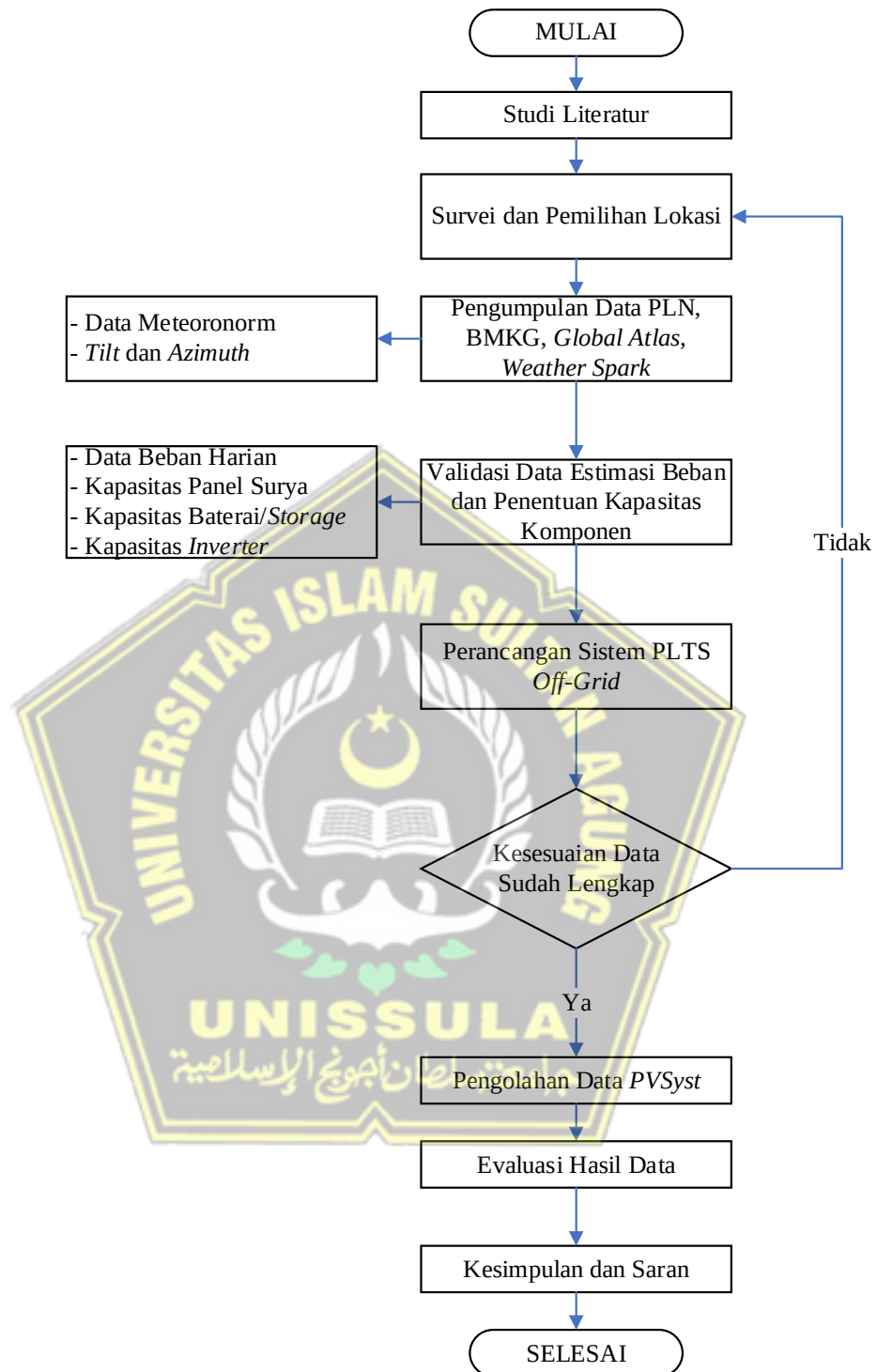
Penelitian ini dilaksanakan di Wilayah Kabupaten Berau, Kalimantan Timur, yang merupakan di Gudang AGO PT PLN (Persero) UP3 Berau wilayah operasional PT PLN (Persero) Unit Pelaksana Pelayanan Pelanggan (UP3) Berau berada pada koordinat $2^{\circ}09'16.2''\text{N}$ $117^{\circ}30'05.7''\text{E}$.

Pemilihan lokasi ini didasarkan pada tantangan kelistrikan yang dihadapi, seperti keterbatasan kapasitas pembangkit *isolated* dan kebutuhan akan solusi energi baru terbarukan. Pengumpulan data terkait potensi radiasi matahari, kondisi geografis, serta sistem kelistrikan existing dilakukan untuk mendukung analisis dan simulasi perencanaan PLTS. Penelitian ini dilaksanakan dalam kurun waktu November 2024 – Februari 2025, yang mencakup tahap pengumpulan data, analisis menggunakan perangkat lunak *PVsyst*, serta penyusunan hasil dan rekomendasi.



Gambar 3.1 Lokasi Simulasi

3.2. Alur Penelitian



Gambar 3.2 Alur Penelitian

Penelitian ini dilakukan secara terstruktur dengan tahapan yang saling terintegrasi untuk mencapai tujuan yang telah ditetapkan. Tahap pertama dimulai dengan studi literatur, yaitu pengumpulan informasi dari berbagai sumber seperti

jurnal, buku, dan dokumen lainnya yang relevan untuk memahami dasar teori, metode, dan perkembangan terkini terkait pengembangan PLTS dan perangkat lunak *PVsyst*. Selanjutnya, dilakukan pemilihan lokasi penelitian yang difokuskan di Kabupaten Berau, Kalimantan Timur, karena memiliki potensi energi surya yang tinggi serta tantangan dalam sistem kelistrikan *isolated* yang membutuhkan solusi energi baru terbarukan.

Tahap berikutnya adalah survei data kebutuhan listrik masyarakat di wilayah Berau untuk mengetahui pola konsumsi energi, kapasitas beban, serta kendala penyediaan listrik yang ada. Data ini menjadi dasar untuk menentukan kebutuhan sistem PLTS yang akan dirancang. Selain itu, pengumpulan data radiasi matahari dan klimatologi dilakukan melalui sumber-sumber terpercaya seperti BMKG dan *Global Atlas*, yang memberikan gambaran potensi energi surya yang tersedia di wilayah penelitian.

Berdasarkan data yang terkumpul, dilakukan validasi data yang ada untuk dilanjutkan perancangan sistem PLTS menggunakan perangkat lunak *PVsyst*, yang mencakup simulasi produksi energi, visualisasi tata letak modul surya, dan analisis efisiensi teknis. Data yang diolah melalui *PVsyst* menghasilkan estimasi performa sistem, termasuk potensi output energi dan efisiensi operasional, yang digunakan untuk mengevaluasi kelayakan teknis dan ekonomis. Tahap terakhir adalah evaluasi hasil data yang digunakan untuk menyusun kesimpulan dan saran berdasarkan hasil analisis dan simulasi. Kesimpulan ini mencakup potensi dan rencana implementasi PLTS di Berau, sedangkan saran diberikan untuk mendukung pembangunan PLTS dengan pendekatan teknis, ekonomis, dan berkelanjutan.

1. Pengumpulan Data

Pengumpulan data dalam penelitian ini dilakukan secara terencana dan terstruktur untuk memastikan bahwa data yang diperoleh relevan dan dapat mendukung analisis pengembangan PLTS di Kabupaten Berau. Data yang dikumpulkan dibagi menjadi dua kategori utama, yaitu data primer dan data sekunder.

a. Data Primer

Data primer diperoleh melalui survei langsung di lapangan. Survei ini mencakup pengumpulan informasi terkait kebutuhan listrik

di Kabupaten Berau, seperti pola konsumsi energi harian. Survei juga dilakukan untuk mengidentifikasi kondisi sistem kelistrikan existing yang saat ini menggunakan sistem pembangkit *isolated*. Hal ini bertujuan untuk memahami kendala teknis yang dihadapi, termasuk risiko pemadaman bergilir akibat keterbatasan kapasitas pembangkit.

b. Data Sekunder

Data sekunder diperoleh dari berbagai sumber terpercaya, seperti Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG), *Global Atlas*, dan laporan PT PLN (Persero) UP3 Berau. Data dari BMKG mencakup informasi klimatologi dan radiasi matahari di Kabupaten Berau, seperti *Global Horizontal Irradiance* (GHI), intensitas sinar matahari, dan durasi penyinaran harian. Data ini digunakan untuk menganalisis potensi energi surya di wilayah tersebut. Sementara itu, *Global Atlas* digunakan untuk mendukung pengolahan data energi terbarukan, seperti estimasi output energi berdasarkan potensi radiasi matahari. Laporan dari PT PLN UP3 Berau memberikan informasi terkait pola pemakaian listrik dan proyeksi kebutuhan energi di masa depan.

2. Pengolahan Data

Pengolahan data dalam penelitian ini dilakukan melalui berbagai tahapan yang sistematis untuk memastikan bahwa data yang terkumpul dapat memberikan hasil analisis yang akurat dan mendukung perencanaan sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) di Kabupaten Berau. Proses pengolahan data diawali dengan menganalisis data radiasi matahari yang diperoleh dari *software PVsyst Meteonorm*. Data radiasi ini, termasuk parameter *Global Horizontal Irradiance* (GHI), durasi penyinaran matahari, dan variasi radiasi sepanjang tahun, diproses untuk memahami potensi energi surya di wilayah penelitian. Data radiasi ini kemudian menjadi input utama dalam perangkat lunak *PVsyst* untuk mensimulasikan performa sistem PLTS, sehingga dapat menghasilkan gambaran realistis mengenai produksi energi listrik yang dihasilkan sepanjang tahun.

Selanjutnya, data kebutuhan listrik yang telah dikumpulkan dari survei lapangan diproses untuk menganalisis pola konsumsi energi di Kabupaten Berau. Analisis ini mencakup informasi mengenai beban harian dan beban rata – rata sepanjang tahun. Data ini digunakan untuk menentukan kapasitas sistem PLTS yang dibutuhkan, sehingga mampu memenuhi kebutuhan listrik masyarakat, bisnis dan industri tanpa mengganggu stabilitas jaringan kelistrikan *isolated* yang ada. Selain itu, data ini juga memberikan gambaran tentang seberapa besar PLTS dapat mengurangi ketergantungan pada pembangkit listrik berbahan bakar fosil yang saat ini mendominasi sistem kelistrikan di Berau.

Tahap selanjutnya adalah simulasi menggunakan perangkat lunak *PVsystem*. Data radiasi matahari, kebutuhan listrik, dan kondisi geografis Kabupaten Berau dimasukkan ke dalam perangkat lunak ini untuk merancang sistem PLTS yang optimal. Simulasi dilakukan untuk menentukan kapasitas pembangkit yang ideal, tata letak modul surya, dan estimasi produksi energi tahunan. Perangkat lunak ini juga digunakan untuk menganalisis efisiensi sistem, potensi kerugian energi akibat *shading*, suhu, atau faktor teknis lainnya, serta memperkirakan performa sistem dalam kondisi nyata. Hasil simulasi ini memberikan informasi penting mengenai potensi *output* energi dan keandalan sistem PLTS yang dirancang.

Setelah simulasi selesai, dilakukan analisis lanjutan untuk mengevaluasi kelayakan teknis, ekonomis, dan lingkungan dari penerapan PLTS. Analisis teknis mencakup evaluasi efisiensi sistem, stabilitas pasokan energi, dan integrasi PLTS dengan jaringan kelistrikan existing. Dari sisi ekonomis, dilakukan perhitungan biaya investasi awal, biaya operasional, dan penghematan yang dihasilkan dari pengurangan penggunaan bahan bakar fosil. Analisis lingkungan melibatkan estimasi pengurangan emisi karbon sebagai salah satu dampak positif dari penerapan energi terbarukan. Ketiga aspek ini dievaluasi secara komprehensif untuk memberikan gambaran menyeluruh mengenai manfaat penerapan PLTS di Kabupaten Berau.

3.3. Alat dan Bahan

3.3.1 Alat

Dalam penelitian ini, penggunaan perangkat dan bahan material tertentu sangat penting untuk mendukung kelancaran proses analisis.

Beberapa perangkat dan bahan material yang digunakan dalam penelitian ini meliputi :

1. Laptop atau Komputer yang berfungsi sebagai antarmuka manusia – mesin (*Human Machine Interface*).
2. Perangkat lunak (*software*) *PVsyst* yang memiliki kemampuan untuk menghitung dan mensimulasikan data yang diperlukan dalam perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *off-grid*.

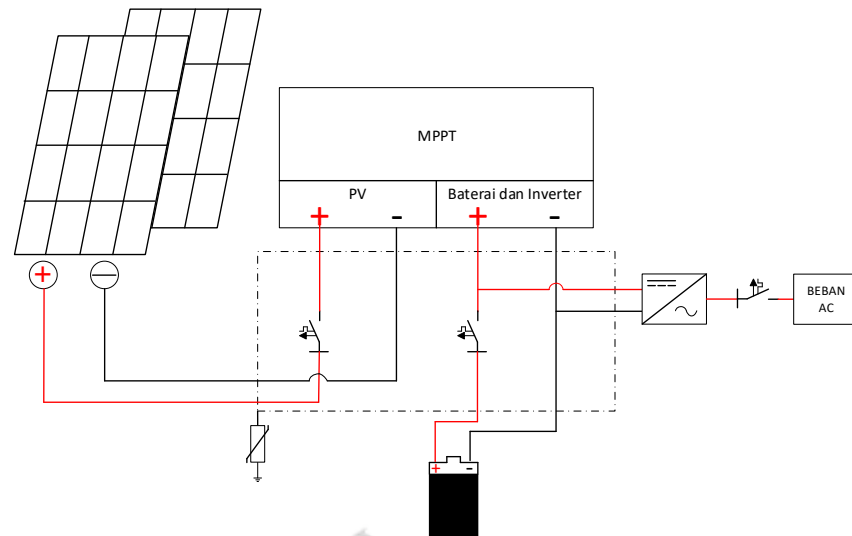
3.3.2 Bahan material

Dalam penelitian ini, terdapat material pendukung yang telah dikumpulkan dan disiapkan oleh peneliti. Material – material tersebut meliputi:

1. Data konsumsi beban listrik dengan sumber PLN pada lokasi perencanaan penelitian.
2. Informasi iklim yang mencakup radiasi matahari dan suhu pada rencana lokasi yang digunakan dalam simulasi penelitian.
3. Informasi mengenai harga dan rincian teknis setiap komponen yang diperlukan dalam pembangunan PLTS *off-grid* yang akan diproyeksikan pada lokasi penelitian menggunakan *software PVsyst*.

3.4. Blok Sistem

Pemanfaatan energi surya di salah satu bangunan di Kecamatan Tanjung Redeb melalui sistem PLTS menunjukkan potensi yang signifikan. Mengingat melimpahnya sinar matahari serta tingginya konsumsi listrik di kawasan tersebut, sistem yang diimplementasikan adalah PLTS *off-grid*. Sistem ini tidak hanya mengandalkan panel surya sebagai sumber utama energi, tetapi juga memanfaatkan baterai untuk menyuplai listrik pada malam hari atau sebagai cadangan saat dibutuhkan.



Gambar 3.3 Diagram Blok Sistem PLTS *off-grid*

Pada sistem PLTS *off-grid* di atas, panel surya menghasilkan energi DC yang kemudian dioptimalkan dan diatur pengisiannya oleh MPPT, sehingga baterai terjaga dari *overcharge* maupun *overdischarge*. Selanjutnya, inverter mengambil energi DC dari MPPT serta baterai dan mengubahnya menjadi energi AC untuk memenuhi kebutuhan beban. Dengan konfigurasi ini, PLTS dapat beroperasi mandiri tanpa terhubung ke jaringan listrik, karena baterai menyimpan energi yang dihasilkan panel surya untuk digunakan ketika intensitas matahari rendah atau pada malam hari.

BAB IV DATA DAN ANALISA

4.1 Profil Beban Energi Listrik

Konsumsi energi harian di Gudang AGO PLN UP3 Berau mencakup berbagai beban listrik, seperti lampu, komputer, kulkas, penanak nasi, AC 1/2 PK, dan lainnya. Perkiraan penggunaan beban tersebut dapat dilihat pada Tabel 4.1 dan pemakaian energi yang tercatat pada sistem PLN dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4.1 Estimasi Pemakaian Beban

No	Beban	Daya	Jumlah	Daya Beban (Watt)	Penggunaan Harian (Jam)	Energi (Wh)
a	b	c	d	$e = c \times d$	f	$g = e \times f$
1	Lampu Rumah	20	7	140	12	1.680
2	Laptop / PC / HP	350	1	350	6	2.100
3	Kulkas	100	1	100	24	2.400
4	AC 1/2 PK	350	1	350	12	4.200
5	Rice Cooker	300	1	300	4	1.200
6	Dll	130	1	130	24	2.520
Jumlah Energi						14.100

Tabel 4.2 Pemakaian kWh dan Tagihan Bulanan

No	Bulan	Pemakaian kWh	Tagihan (Rp)
1	Februari 2024	1.017	Rp 1.728.422
2	Maret 2024	1.008	Rp 1.713.126
3	April 2024	989	Rp 1.680.835
4	Mei 2024	1.203	Rp 2.044.535
5	Juni 2024	1.474	Rp 2.505.107
6	Juli 2024	1.175	Rp 1.996.948
7	Agustus 2024	1.033	Rp 1.755.614
8	September 2024	1.147	Rp 1.949.361
9	Oktober 2024	1.196	Rp 2.032.638

No	Bulan	Pemakaian kWh	Tagihan (Rp)
10	November 2024	1.042	Rp 1.770.910
11	Desember 2024	1.641	Rp 2.788.929
12	Januari 2025	1.602	Rp 2.722.647
TOTAL		14.527	Rp 24.689.072

4.2 Data Iklim

Data radiasi matahari dan suhu udara yang diperoleh melalui perangkat lunak (*software*) *PVsyst* (*Meteronorm* 8.2, 1994-2004) menghasilkan data meteorologi yang disajikan pada Gambar 4.2.

	Global horizontal irradiation kWh/m ² /day	Horizontal diffuse irradiation kWh/m ² /day	Temperature °C	Wind Velocity m/s	Linke turbidity [-]	Relative humidity %
January	4.73	2.10	26.4	1.40	3.237	84.0
February	4.83	2.76	26.7	1.50	3.311	81.6
March	4.88	2.80	27.0	1.51	3.308	81.1
April	5.08	2.64	26.8	1.40	3.256	85.1
May	5.03	1.98	27.3	1.40	3.184	84.5
June	5.28	2.24	26.6	1.40	3.227	86.2
July	5.41	2.39	26.8	1.50	3.288	83.7
August	5.42	2.62	26.8	1.59	3.926	84.0
September	5.04	2.69	26.6	1.50	4.402	84.8
October	4.66	2.57	26.9	1.49	4.859	84.5
November	4.69	2.54	26.5	1.41	3.465	87.0
December	4.48	2.35	26.7	1.39	3.227	85.4
Year	4.96	2.47	26.7	1.5	3.558	84.3

Global horizontal irradiation year-to-year variability 9.1%

Gambar 4.1 Iradiasi Matahari Tanjung Redeb

Pada parameter meteorologi yang dihasilkan oleh *software PVsyst* pada koordinat 2°09'16.2"N 117°30'05.7"E, *Global Horizontal Irradiation* (GHI) rata-rata tahunan mencapai 4,96 kWh/m²/hari, dengan nilai tertinggi pada Juli (5,41 kWh/m²/hari) dan terendah pada Desember (4,48 kWh/m²/hari). Radiasi difus (DHI) memiliki rata – rata tahunan 2,47 kWh/m²/hari, dengan puncaknya di Juli (2,62 kWh/m²/hari) dan nilai terendah pada Mei (1,98 kWh/m²/hari).

Suhu rata-rata tahunan tercatat 26,7°C, dengan variasi kecil antara 26,6°C hingga 27,3°C. Kecepatan angin berkisar antara 1,39 – 1,59 m/s, dengan nilai tertinggi pada Agustus (1.59 m/s) dan terendah pada Desember (1,39 m/s). Tingkat kejernihan atmosfer (*Linke Turbidity*) rata – rata sebesar 3,558, dengan kondisi

paling jernih di Januari (3,237) dan paling berpolusi di Oktober (4,859). Kelembaban udara rata – rata 84,3%, dengan nilai tertinggi pada November (87,0%) dan terendah pada Februari (81,6%).

Berdasarkan analisis ini, bulan Juli dan Agustus merupakan periode optimal untuk pemanfaatan energi surya karena memiliki tingkat radiasi matahari yang tinggi. Sementara itu, bulan dengan kelembaban tinggi seperti November dan Desember berpotensi mempengaruhi efisiensi sistem *fotovoltaik* akibat peningkatan difusi cahaya dan reduksi intensitas sinar matahari langsung.

4.3 Perhitungan Kapasitas Komponen PLTS

4.4.1 Menentukan besaran daya yang bisa dibangkitkan

Berdasarkan total konsumsi energi listrik harian pada lokasi perencanaan proyeksi yang sebesar 14,1 kWh/hari pada Tabel 4.1, dan *Peak Sun Hours* (PSH) di Kabupaten Berau terendah di bulannya adalah :

$$\begin{aligned}
 \text{Peak Sun Hours (PSH)} &= \frac{\text{GHI Terendah}}{1 \text{ kW/m}^2} \\
 &= \frac{4,48 \text{ kWh/m}^2/\text{hari}}{1 \text{ kW/m}^2} \\
 &= 4,48 \text{ h} \approx 4 \text{ h } 29 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Maka kapasitas daya yang perlu dibangkitkan oleh PLTS dapat dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \text{Kebutuhan Panel Surya} &= \frac{\text{Kebutuhan Energi (Wh)}}{\text{Peak Sun Hours (h)}} \\
 &= \frac{14.100 \text{ Wh}}{4,48 \text{ h}} \\
 &= 3.147 \text{ W}
 \end{aligned}$$

4.4.2 Menghitung jumlah panel terpasang

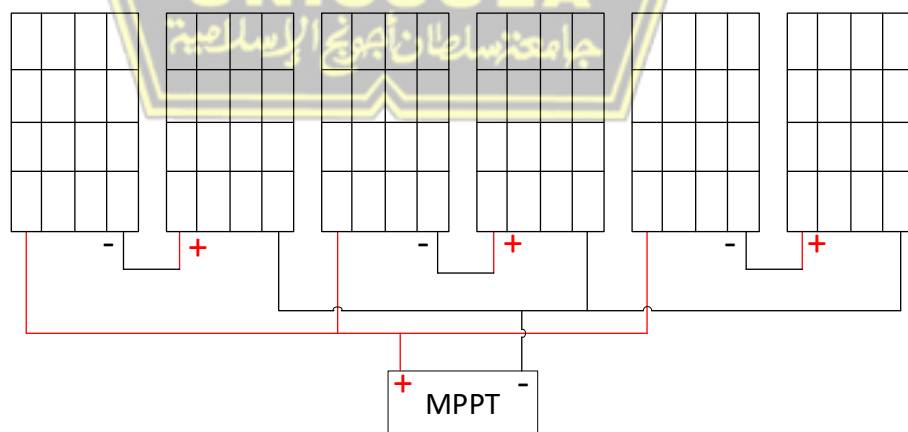
Berdasarkan kapasitas daya yang diperlukan dan kapasitas modul panel surya yang akan digunakan sebesar 550 Wp dalam proyeksi penelitian, maka jumlah panel surya yang dibutuhkan dapat dihitung sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 \text{Jumlah Panel Surya} &= \frac{\text{Kebutuhan Panel Surya (Wh)}}{\text{Kapasitas Panel Surya (Wp)}} \\
 &= \frac{3.147 \text{ W}}{550 \text{ Wp}} \\
 &= 5,72 \text{ (6 unit pembulatan)}
 \end{aligned}$$

Dengan demikian, jumlah panel surya yang diperlukan dan sesuai untuk memenuhi kebutuhan daya pada objek rumah tersebut adalah enam (6) unit panel surya tipe *Monokristalin* dengan masing – masing kapasitas panel surya tersebut adalah 550 Wp, yang memiliki spesifikasi tegangan V_{mp} sebesar 41,96 V dan arus I_{mp} sebesar 13,11 A.

4.4.3 Penyusunan *array* panel surya

Dalam merancang sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS), konfigurasi *array* panel surya perlu mempertimbangkan tegangan operasional yang dibutuhkan serta keterbatasan ruang pada atap bangunan. *Array* PLTS terdiri dari sejumlah panel surya yang terhubung dalam konfigurasi seri atau paralel. Tujuan dari penyusunan ini adalah untuk meningkatkan kapasitas tegangan dan daya keluaran, sehingga memungkinkan pemilihan komponen kabel yang sesuai serta distribusi energi listrik yang efisien dalam sistem. Berikut adalah metode konfigurasi panel surya secara seri dan paralel dalam *array* untuk mencapai tegangan, arus, dan daya yang optimal.



Gambar 4.2 *Array* Panel Surya

Berdasarkan rancangan penyusunan *array* PLTS pada atap rumah yang menjadi objek penelitian, terdapat total 6 unit panel fotovoltaik (PV) yang dibagi menjadi 2 *array* (kelompok), dengan 2 unit disusun seri dan 3 unit disusun paralel. Dengan konfigurasi tersebut, tegangan *array* yang dihasilkan adalah 83,92 V_{DC}, yang sesuai dengan tegangan *rating* MPPT yang memiliki batas maksimal hingga 150 V_{DC} serta *rating* arus maksimum sebesar 60 Ampere.

$$\begin{aligned}
 P_{MPP} &= V_{MPP \text{ Array}} \times I_{MPP \text{ Array}} \\
 &= (V_{MP} \times \text{Jumlah Seri}) \times (I_{MP} \times \text{Jumlah Paralel}) \\
 &= (41,96 \text{ V} \times 2) \times (13,11 \times 3) \\
 &= 3.300 \text{ Watt}
 \end{aligned}$$

4.4.4 Menentukan kapasitas dan spesifikasi *inverter*

Setelah menentukan jumlah *array* dan daya yang dapat dihasilkan masing-masing, langkah berikutnya adalah menghitung serta menentukan kapasitas *inverter*. Proses ini dilakukan dengan menerapkan *safety factor* sebesar 1,25, sesuai dengan Persamaan 2.3.

$$\begin{aligned}
 \text{Kapasitas } Inverter &= P_{MPP \text{ Array}} \times \text{safety factor} \\
 &= 3.300 \text{ Watt} \times 1,25 \\
 &= 4.125 \text{ W} \approx 4,1 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

4.4.5 Menentukan kapasitas baterai

Baterai berperan sebagai komponen penyimpan energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya dalam bentuk energi kimia. Kapasitas baterai yang digunakan harus disesuaikan dengan kebutuhan sistem. Kapasitas baterai yang digunakan adalah :

$$\begin{aligned}
 C &= \frac{EL \times N}{V_s \times DoD \times \eta} \\
 &= \frac{14.100 \text{ W} \times 2}{48 \times 0,85 \times 0,9} \\
 &= 773,026 \text{ Ah}
 \end{aligned}$$

Tegangan baterai yang kompatibel dengan MPPT yang akan diterapkan pada sistem ini adalah 48 V_{DC}.

$$\begin{aligned}
 \text{Baterai Seri} &= \frac{\text{Tegangan Kerja Sistem}}{\text{Tegangan Kerja Baterai}} \\
 &= \frac{48 \text{ V}}{48 \text{ V}} \\
 &= 1 \text{ Buah} \\
 \text{Baterai Paralel} &= \frac{\text{Kebutuhan Panel Surya (Wh)}}{\text{Kapasitas Panel Surya (Wp)}} \\
 &= \frac{773,026 \text{ Ah}}{100 \text{ Ah}} \\
 &= 7,73 \approx 8 \text{ Buah} \\
 \text{Total Baterai} &= \text{Baterai Seri} \times \text{Baterai Paralel} \\
 &= 1 \times 8 \\
 &= 8
 \end{aligned}$$

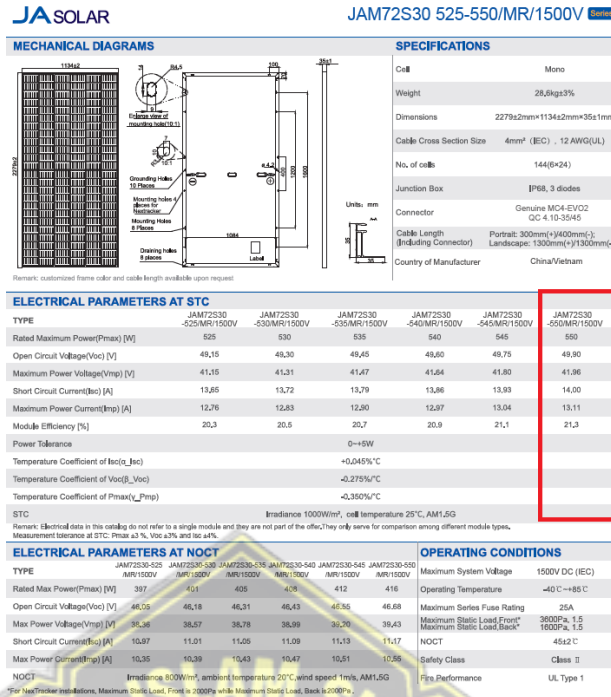
Berdasarkan hasil perhitungan, untuk memenuhi kebutuhan energi pada perencanaan pelaksanaan PLTS *off-grid* pada objek penelitian, diperlukan delapan (8) unit baterai dengan tegangan 48 Volt dan kapasitas 100 Ah, yang dirancang untuk menyimpan energi selama dua hari ($N = 2$).

4.4 Menentukan Komponen

Selanjutnya, penelitian ini berfokus pada pemilihan komponen utama untuk desain sistem PLTS *off-grid*, yaitu panel surya, *inverter*, SCC, dan baterai. Pemilihan komponen tersebut disesuaikan dengan profil beban energi listrik yang ada, serta mempertimbangkan harga pasar yang sesuai dengan komponen aslinya. Berikut merupakan daftar komponen utama yang akan digunakan dalam sistem PLTS yang dirancang.

4.5.1 Modul surya

Tingkat efisiensi modul surya sangat dipengaruhi oleh jenis material sel fotovoltaik serta metode produksinya. Panel surya berbasis silikon monocrystalline terbukti lebih unggul karena penampangannya mampu menyerap sinar matahari secara optimal dibandingkan dengan material sel lainnya. Untuk perencanaan kali ini, digunakan panel surya dari pabrikan JA Solar dengan tipe JAM72S30 550/MR/1500V yang dibuat dengan bahan silikon *monocrystalline*, dengan spesifikasi sebagai berikut:



Gambar 4.3 Spesifikasi Panel Surya

Gambar 4.4, modul surya JA Solar JAM72S30 550/MR/1500V merupakan panel fotovoltaik berbasis sel monokristalin dengan efisiensi 21,3% dan daya keluaran maksimum 550 W pada kondisi STC (*Standard Test Conditions*). Panel ini memiliki dimensi 2.279 mm × 1.134 mm × 35 mm (Panjang x lebar x tinggi) dengan berat 28,6 kg, serta terdiri dari 144 sel (6×24). Tegangan *open circuit* (V_{OC}) mencapai 49,90 V, yang menggambarkan tegangan maksimum yang dapat dihasilkan oleh panel surya tersebut saat tidak ada beban yang terhubung (*open circuit*). V_{OC} ini penting karena menunjukkan potensi tegangan tertinggi yang bisa dihasilkan oleh panel dalam kondisi terbuka, yang kemudian digunakan untuk mendesain sistem surya yang efisien dalam memenuhi kebutuhan daya.

Selain V_{OC}, tegangan maksimum daya (V_{MP}) pada panel ini berada pada 41,90 V dengan arus maksimum 13,14 A, yang menunjukkan kinerja panel ketika terhubung dengan beban dan beroperasi pada titik daya maksimum (*Maximum Power Point* - MPP). Koefisien suhu untuk daya maksimum (P_{MAX}) sebesar -0,350%/°C, menunjukkan performa panel terhadap perubahan suhu lingkungan, yang mempengaruhi kinerja panel di berbagai kondisi cuaca. Modul ini mendukung sistem tegangan maksimum hingga

1500 V_{DC} dan memiliki rating ketahanan mekanis terhadap tekanan hingga 5.400 Pa (depan) dan 2.400 Pa (belakang), menjadikannya pilihan optimal untuk aplikasi pembangkit listrik tenaga surya dalam berbagai kondisi lingkungan.

4.5.2 Inverter

Inverter yang direncanakan untuk digunakan dalam proyeksi sistem PLTS *off-grid* ini adalah produk dari PRIME dengan model LS/LST-T 30224/48.

Model: LS/LS-T	10212/24/48	15212/24/48	20212/24/48	30224/48	40224/48	50248	60248
Rated Power	1000W	1500W	2000W	3000W	4000W	5000W	6000W
Battery Voltage	12/24/48VDC			24/48VDC	48VDC		
Size(L*W*Hmm)	500*300*140			530*335*150			
Package Size(L*W*Hmm)	565*395*225			605*430*235			
N.W.(kg)	12	14	18	20	22	24	26
G.W.(kg)(Carton Packing)	13.5	15.5	19.5	21.5	23.5	25.5	27.5
Installation Method	Wall-Mounted						
Input	DC Input Voltage Range 10.5-15VDC(Single battery voltage)						
	AC Input Voltage Range 85VAC-138VAC(110VAC) / 95VAC-148VAC(120VAC) / 170VAC-275VAC(220VAC) / 180VAC-285VAC(230VAC) / 190VAC-295VAC(240VAC)						
	AC Input Frequency Range 45Hz-55Hz(50Hz) / 55Hz-65Hz(60Hz)						
	Max AC charging current 0-30A(Depending on the model)						
	AC charging method Three-stage (constant current, constant voltage, floating charge)						
Output	Efficiency(Battery Mode) ≥85%						
	Output Voltage(Battery Mode) 110VAC±2% / 120VAC±2% / 120VAC±2% / 230VAC±2% / 240VAC±2%						
	Output Frequency(Battery Mode) 50/60Hz±1%						
	Output Wave(Battery Mode) Pure Sine Wave						
	Efficiency(AC Mode) ≥99%						
	Output Voltage(AC Mode) 110VAC±10% / 120VAC±10% / 220VAC±10% / 230VAC±10% / 240VAC±10%						
	Output Frequency(AC Mode) Tracking Automatically						
	Output waveform distortion (Battery Mode) ≤3%(Linear load)						
	No load loss(Battery Mode) ≤0.5% rated power						
	No load loss(AC Mode) ≤2% rated power (charger does not work in AC mode)						
	No load loss(Energy saving Mode) ≤10W						
Battery Type	VRLA Battery Charge Voltage: 14.2V; Float Voltage: 13.8V(Single battery voltage)						
Protection	Battery low voltage alarm Factory default: 11V(Single battery voltage)						
	Battery low voltage protection Factory default: 10.5V(Single battery voltage)						
	Battery overvoltage alarm Factory default: 15V(Single battery voltage)						
	Battery overvoltage protection Factory default: 13V(Single battery voltage)						
	Battery overvoltage recovery voltage Factory default: 14.5V(Single battery voltage)						
	Overload power protection Automatic protection (battery mode); circuit breaker or insurance (AC mode)						
	Inverter output short circuit protection Automatic protection (battery mode); circuit breaker or insurance (AC mode)						
	Temperature protection >90°C(Shut down output)						

Gambar 4.4 Spesifikasi Inverter

Menyesuaikan dengan kebutuhan kapasitas daya sistem, digunakan satu *inverter* berkapasitas 3 kW dengan tegangan masukan 48 V_{DC}, sesuai dengan tegangan keluaran dari *Solar Charge Controller*. *Inverter* LS/LS-T 30224/48 ini dirancang untuk aplikasi tenaga surya atau cadangan listrik, dengan efisiensi tinggi dan keluaran gelombang *Pure Sine Wave*. Perangkat ini mendukung rentang tegangan input AC antara 85 V hingga 295 V, bergantung pada konfigurasi tegangan, serta menggunakan metode pengisian baterai tiga

tahap (arus konstan, tegangan konstan, dan floating charge) untuk memastikan pengisian daya yang optimal. Selain itu, *inverter* ini dilengkapi dengan berbagai fitur perlindungan, termasuk proteksi tegangan rendah (10,5V), tegangan berlebih (15,5V), perlindungan terhadap *overload*, hubungan pendek, serta suhu berlebih yang akan mematikan sistem jika melebihi 90°C. Dengan efisiensi mode baterai $\geq 85\%$ dan efisiensi mode AC $\geq 99\%$, inverter ini menjadi pilihan yang andal dalam sistem kelistrikan berbasis energi terbarukan.

4.5.3 Solar charge controller (SCC)

Solar charge controller (SCC) yang akan digunakan dalam perencanaan PLTS merupakan produksi Morningstar model: Tristar TS-MPPT-60M.

Versions	TS-MPPT-30	TS-MPPT-45	TS-MPPT-60	TS-MPPT-60M	Certifications: • CE and RoHS Compliant • ETL Listed (UL1741) • cETL (CSA C22.2 No. 1071-01) • FCC Class B Part 15 Compliant • Manufactured in a certified ISO 9001 facility • IEC 62109-1 (UL/CSA/IEC requires ambient temperature limited to 45°C)
Meter					
TS-M2	Optional	Optional	Optional	Included	
TS-RM2	Optional	Optional	Optional	Optional	
Electrical					
Maximum Battery Current	30 amps	45 amps	60 amps		
Nominal Maximum Output Power*	400 Watts 12 Volt 800 Watts 24 Volt 1600 Watts 48 Volt	600 Watts 1200 Watts 2400 Watts	Max Output 800 Watts 1600 Watts 3200 Watts	Max PV Input* 1100 Watts 2100 Watts 4200 Watts	
Max Recommended Solar PV Input*	~ 130% of Nominal Max Output Power (60 Amp models shown above)				
Peak Efficiency	99%				
Nominal System Voltage	12, 24, or 48 volts DC				
Maximum PV Open Circuit Voltage**	150 volts DC (without damage to unit)				
Battery Operating Voltage Range	8-72 volts DC				
Maximum Self-consumption	2.7 Watts				
Transient Surge Protection	4500 Watts/port				
Battery Charging					
Charging Algorithm	4-stage				
Charging Stages	Bulk, Absorption, Float, Equalize				
Temperature Compensation:	Coefficient Range Set Points	-5mV/°C/cell (25° ref) -30°C to +80°C Absorption, Float, Equalize, HVD			
Remote Temperature Sensor (RTS)	Included				

Communication Ports	TS-MPPT-30	TS-MPPT-45	TS-MPPT-60	TS-MPPT-60M
MeterBus	Yes	Yes	Yes	Yes
RS-232	Yes	Yes	Yes	Yes
EIA-485	No	No	Yes	Yes
Ethernet	No	No	Yes	Yes
EMC-1	Yes	Yes	Yes	Yes

Electronic Protections	
Solar	Overload, Short Circuit, High Voltage
Battery	High Voltage
High Temperature	
Lightning & Transient Surges	
Reverse Current at Night	

Mechanical	
Dimensions	29.1 x 13.0 x 14.2 cm 11.4 x 5.1 x 5.6 in
Weight	4.2 kg / 9.2 lbs
Maximum Wire Size	35 mm² / 2 AWG
Conduit Knockouts	M20; ½, 1, 1 ¼ in
Enclosure	Type 1 (indoor and vented) IP 20

Gambar 4.5 Spesifikasi MPPT

Berdasarkan kapasitas daya yang perlu dipenuhi, dalam perancangan ini digunakan satu unit MPPT dengan rentang tegangan input antara 12 V_{DC} hingga 48 V_{DC}, yang disesuaikan dengan spesifikasi baterai dan kebutuhan beban yang digunakan. Salah satu perangkat yang digunakan adalah Tristar TS-MPPT-60M, sebuah *solar charge controller* berbasis *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) yang dirancang untuk meningkatkan efisiensi sistem tenaga surya. Perangkat ini memiliki efisiensi puncak hingga 99% dan mampu menangani daya input PV maksimum sebesar 4200 W untuk sistem 48V. *Solar charge controller* ini mendukung sistem tegangan 12 V_{DC}, 24 V_{DC}, dan 48 V_{DC}, dengan tegangan *open circuit* PV maksimum 150V_{DC}, serta dilengkapi perlindungan terhadap tegangan berlebih, hubungan pendek, suhu tinggi, dan lonjakan petir hingga 4500 W/port. Sistem pengisian baterai menggunakan algoritma 4 tahap (*bulk*, *absorption*, *float*, dan *equalize*) dengan kompensasi suhu otomatis untuk mengoptimalkan umur baterai. Dengan fitur keamanan yang lengkap serta dukungan operasi pada rentang suhu ekstrem -40°C hingga 60°C, perangkat ini menjadi solusi andal dalam sistem penyimpanan energi berbasis tenaga surya.

4.5.4 Baterai

Baterai berfungsi sebagai penampung energi sementara (*buffer*) untuk menyelaraskan perbedaan antara pasokan listrik yang dihasilkan oleh modul fotovoltaik dan kebutuhan listrik yang ada. Umur pakai baterai sangat dipengaruhi oleh pola penggunaan serta kondisi temperatur operasionalnya. Sebagai contoh, baterai *lithium-ion* umumnya memiliki usia pakai hingga sekitar 10 tahun, namun jumlah siklus hidupnya akan menurun jika nilai DoD (*depth of discharge*) semakin tinggi. Selain itu, peningkatan temperatur ruangan juga akan mengurangi siklus umur baterai. Penting pula untuk mengatur tegangan pengisian dengan tepat, karena tegangan yang melebihi batas yang ditetapkan dapat menyebabkan pengisian berlebih pada baterai dan berpotensi menurunkan kinerjanya. Baterai yang digunakan pada simulasi PLTS ini adalah produksi dari ZTE dengan model: ZXDC48 FB100B3 *SmartLi Battery*.

Technical Parameters

Item	Parameters
Rated capacity	100Ah(C ₂₀ ,25°C)
Energy (Wh)	4800Wh
Cathode material	LiFePO ₄
Charge voltage	54.5Vdc
Charge current	0A~100A
Charge temperature	0°C~+55°C
Discharge voltage	40Vdc ~ 56Vdc, adjustable
Discharge current	0A~100A
Discharge temperature	-20°C~+55°C
Storage temperature	0°C~+45°C
Dimensions(W*D*H mm)	442×410×130.5(excluding mounting ear, handle, terminal)
Net weight	45kg
Self discharge	≤3%/per month@25°C
Altitude	0m~4000m

Item	Parameters
Relative humidity	5%RH~95%RH
Atmospheric pressure	70kPa~106kPa
Protection grade	IP40
Design life	15 years
Cycle life	3500 cycles@80%DOD, 0.5C,35°C
Max. quantity of parallel connection	RS485:24
BMS Cell balancing feature	Resistance balance
Communication protocol	YD/T 1363.3-2013, Modbus
Interface	Dry Contact*2,RS485,CAN
Certification	UN38.3

Gambar 4.6 Spesifikasi Baterai

4.5.5 Penghantar dan sistem proteksi

Menurut PUIL (2020) [19], dalam menentukan ukuran penghantar yang dibutuhkan pada perencanaan PLTS dapat mengacu pada Gambar 4.8.

Jenis kabel	Luas penampang mm ²	KHA terus menerus					
		Inti tunggal		2-inti		3-inti dan 4-inti	
		di tanah	di udara	di tanah	di udara	di tanah	di udara
1	2	3	4	5	6	7	8
	1,5	40	26	31	20	26	18,5
	2,5	54	35	41	27	34	25
	4	70	46	54	37	44	34
	6	90	58	68	48	56	43
	10	122	79	92	66	75	60
	16	160	105	121	89	98	80
NYBY							
NYFGbY							
NYRGbY	25	206	140	153	118	128	106
NYCY	35	249	174	187	145	157	131
NYCWFY	50	296	212	222	176	185	159
NYSY							
NYCEY	70	365	269	272	224	228	202
NYSEY	95	438	331	328	271	275	244
NYHSY	120	499	386	375	314	313	282
NYKY							
NYKBY	150	561	442	419	361	353	324
NYKFGbY	185	637	511	475	412	399	371
NYKRGbY	240	743	612	550	484	464	436
	300	843	707	525	590	524	481
	400	986	859	605	710	600	560
	500	1125	1000	-	-	-	-

Gambar 4.7 Kuat Hantar Arus (KHA) Pada Jenis – Jenis Kabel

1. Penentuan ukuran kabel yang menghubungkan panel surya ke inverter dapat dilakukan dengan menggunakan nilai arus hubung singkat (*short circuit current*/ I_{SC}) sebesar 14 A sesuai dengan spesifikasi yang tertera pada modul panel surya. Dengan demikian, total arus hubung singkat (I_{SC}) dapat dihitung melalui persamaan berikut:

$$\begin{aligned} I_{SC} \text{ Total} &= I_{SC} \text{ String 1} + I_{SC} \text{ String 2} + I_{SC} \text{ String 3} \\ &= 14 \text{ A} + 14 \text{ A} + 14 \text{ A} \\ &= 42 \text{ A} \end{aligned}$$

Dengan menggunakan persamaan diperoleh nilai KHA sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{KHA} &= 1,25 \times I_{SC} \text{ Total} \\ &= 1,25 \times 42 \text{ A} \\ &= 52,6 \text{ A} \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil perhitungan yang telah dilakukan, diperoleh nilai kuat hantar arus (KHA) penampang sebesar 52,6 A. Mengacu pada Gambar 4.8, maka ukuran penampang kabel penghantar yang digunakan adalah 6 mm² dengan jenis kabel NYY untuk instalasi listrik dari panel surya menuju *Solar Charge Controller* (SCC).

2. Jenis Penghantar *Solar Charge Controller* (SCC) ke Baterai dan Inverter

Dalam menentukan jenis penghantar yang menghubungkan *Solar Charge Controller* (SCC) ke baterai dan *inverter*, dengan mempertimbangkan daya maksimum panel surya sebesar 3.300 W dan tegangan baterai 48 V, arus maksimum dapat dihitung menggunakan rumus berikut:

$$\begin{aligned} I_{\text{Max}} &= \frac{P}{V} \\ &= \frac{3.300 \text{ W}}{48 \text{ V}} \\ &= 68,76 \text{ A} \end{aligned}$$

Berdasarkan total arus hubung singkat (I_{sc}) yang dihasilkan panel surya, dipilih *Miniature Circuit Breaker* (MCB) DC berkapasitas 63 A. Dengan mengacu pada tegangan rangkaian terbuka (V_{OC} / *open-circuit*) array sebesar 41,9 V_{DC}, perhitungan *Surge Protection Device* (SPD) DC dapat dilakukan menggunakan rumus berikut:

$$\begin{aligned} V_{Rating} &= V_{OC} \times \text{safety factor} \times \text{jumlah seri} \\ &= 41,9 \text{ V} \times 1,25 \times 2 \\ &= 124,75 \text{ V} \approx 150 \text{ V} \end{aligned}$$

Dari analisis perhitungan yang telah dilakukan, dipilih *Surge Protection Device* (SPD) dengan kapasitas tegangan sebesar 150 V_{DC}.

3. Jenis Penghantar *Inverter* ke Beban

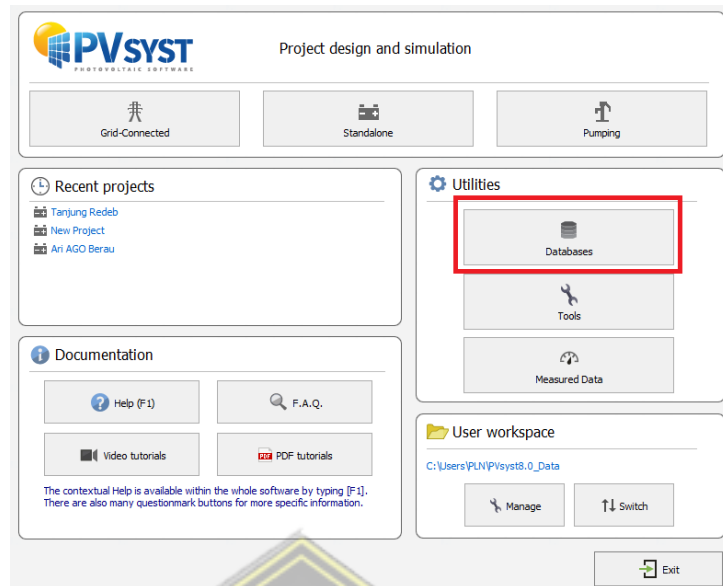
Dengan daya maksimum yang dihasilkan panel surya sebesar 3.300 W dan tegangan keluaran *inverter* sebesar 220 V, sehingga arus maksimum yang mengalir ke beban dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\begin{aligned} I &= \frac{\text{Daya Maksimum Panel Surya (W)}}{\text{Volt Inverter (V)}} \\ &= \frac{3.300 \text{ W}}{220 \text{ V}} \\ &= 15 \text{ A} \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil perhitungan sebelumnya dan merujuk pada Tabel 4.8, ukuran kabel yang digunakan adalah 1,5 mm² dengan jenis kabel NYY. Dengan mempertimbangkan besar arus listrik yang mengalir, dipilih *Miniature Circuit Breaker* (MCB) AC berkapasitas 8 A.

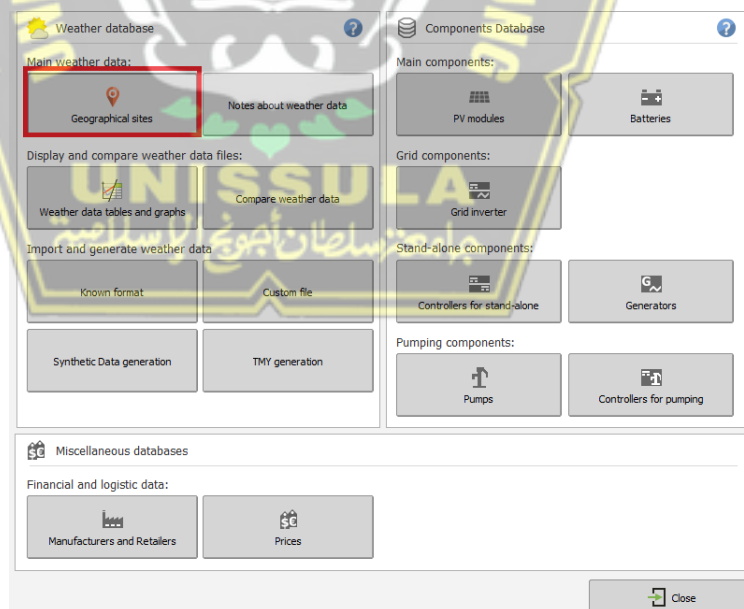
4.5 Simulasi *PVsyst*

4.6.1 Menu utama *PVsyst*



Gambar 4.8 Menu Utama Pvsyst

Tahap awal dilakukan dengan mengumpulkan data iradiasi dan klimatologi dari lokasi yang telah ditentukan. Pada menu utama, pilih menu *Databases*, yang menyediakan opsi *Meteo Databases* dan *Components Databases* beserta submenunya. Selanjutnya, pada kategori *Meteo Databases*, pilih menu *Geographical Sites*.



Gambar 4.9 Menu Database

Perencanaan sistem PLTS ini menggunakan sistem *off-grid*, sehingga dalam perangkat lunak *PVsyst* dipilih opsi *Stand Alone*. Setelah itu, dilakukan

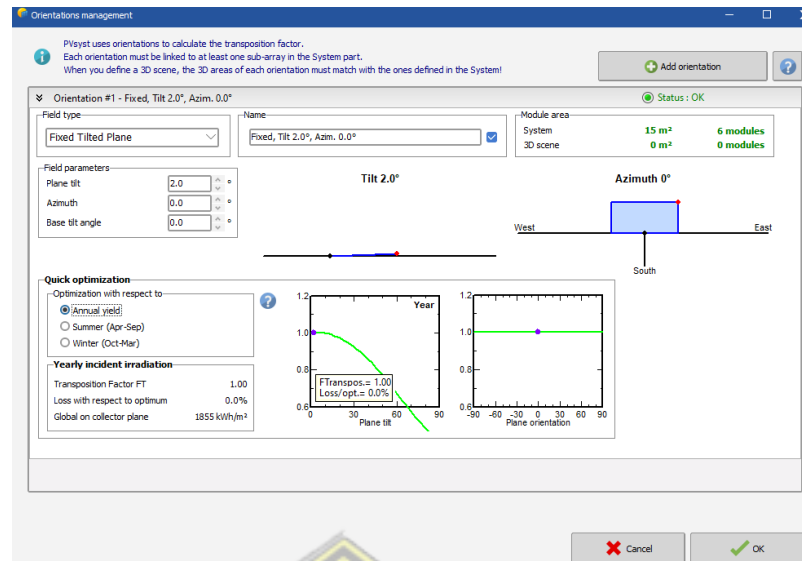
pemilihan lokasi (site) yang sesuai dengan letak perencanaan untuk analisis lebih lanjut.

Gambar 4.10 Menu *Geographical Coordinates*

Pada Gambar 4.11, menu ini memungkinkan pengguna untuk mencari dan menentukan koordinat lokasi rumah yang menjadi objek perencanaan, dengan posisi Latitude 2.1546° S dan Longitude 117.5017° E. Alternatif lain, lokasi juga dapat dipilih langsung melalui fitur *Interactive Map* yang tersedia dalam perangkat lunak *PVsyst*. Dalam perencanaan ini, data input meteorologi yang digunakan berasal dari *Meteonorm 8.2*.

4.6.2 Orientation

Agar energi yang dihasilkan dapat tetap maksimal, permukaan panel surya perlu selalu berada dalam posisi tegak lurus terhadap sinar matahari yang jatuh. Oleh karena itu, penentuan sudut kemiringan (*tilt angle*) dan *azimuth* menjadi faktor yang sangat penting untuk mempertahankan efisiensi penyerapan energi dari matahari yang dikonversi oleh panel surya.

Gambar 4.11 Menu *Orientation*

Metode pemasangan panel surya yang digunakan dalam perencanaan ini adalah *Fixed Tilted Plane*, di mana panel surya ditempatkan pada struktur penyangga khusus atau dipasang menyatu dengan struktur atap bangunan. Pemasangan dengan posisi tetap sering dipilih karena lebih sederhana dalam proses instalasi dan memerlukan biaya yang lebih rendah dibandingkan sistem yang dapat bergerak.

Tilt (sudut kemiringan panel) merupakan sudut optimal untuk memastikan panel surya dapat menyerap radiasi matahari secara maksimal, sehingga energi yang dihasilkan menjadi lebih efisien. Sementara itu, *azimuth* (sudut orientasi objek) menggambarkan arah rumah klien terhadap mata angin.

Dalam *software PVsyst*, sudut kemiringan panel dan orientasi *azimuth* dapat ditentukan melalui menu "*Main Parameter Orientation*". Pada menu ini, sistem akan menampilkan titik *tilt* dan *azimuth* dari posisi panel surya. Penyesuaian sudut kemiringan dilakukan dengan menggerakkan titik merah hingga mencapai nilai *losses* sebesar 0,0%, sehingga diperoleh sudut *tilt* sebesar 2° dan *azimuth* 0° yang menghadap ke utara. Data ini diperoleh melalui data *Global Solar Atlas*.

4.6.3 Data beban

Definition of daily household consumptions for the year.

Consumption ☒ Hourly distribution

Daily consumptions

Number	Appliance	Power	Daily use	Hourly distrib.	Daily energy
7	Lampu Rumah	20 W/lamp	12.0 h/day	OK	1680 Wh
1	TV / PC / Mobile	350 W/app	6.0 h/day	OK	2100 Wh
0	Domestic appliances	0 W/app	0.0 h/day		0 Wh
1	Kulkas	2.40 kWh/day	24.0 h/day	OK	2400 Wh
0	Dish- and Cloth-washer	0.0 W aver.	0.0 h/day		0 Wh
1	AC 1/2 PK	350 W/app	12.0 h/day	OK	4200 Wh
1	Rice Cooker	300 W/app	4.0 h/day	OK	1200 Wh
	Stand-by consumers	105 W tot	24 h/day		2520 Wh
Total daily energy					14100 Wh/day
Monthly energy					423.0 kWh/mth

Appliances info

Consumption definition by:

☒ Years

☐ Seasons

☐ Months

Week-end or Weekly use:

☐ Use only during

☐ 7 days in a week

Daily global consumption

Gambar 4.12 Simulasi Penggunaan Beban

Masukkan data beban pada menu *User's Needs* pada *software PVsyst*, dan didapatkan konsumsi energi pada museum adalah sebesar 14,1 kWh/hari dan 423 kWh/bulan.

4.6.4 Modul PV array dan solar charge controller (SCC)

List of subarrays

Name	#Mod	#String
JA_Solar_JAM72_530_530_MR_PAN	2	3
Morningstar_Tristar_TS_MPPT60_48_RLT	1	

Sub-array name and Orientation

Name: PV Array

Orient.: Fixed, Tilt 2.0°, Azim. 0.0°

Select the PV module

Sort modules: Power

Module: JA Solar 550 Wp 35V Si-mono JAM72-530-530-MR Since 2021

String voltages: V_{mpp} (60°C) 36.6 V V_{oc} (-10°C) 54.6 V

Select the control mode and the controller

Controller: Morningstar

Operating mode: ☒ MPPT converter

MPPT 3200 W 48 V 60 A 21 A Tristar TS MPPT 60 - 48V

Number of controllers: 1

MPPT Operating voltage: 50-120 V

Input maximum voltage: 150 V

Controller's power: 3.20 kW

Associated Battery: 48 V

Design the array

Number of modules and strings: 2 should be: between 2 and 2

Nb. strings: 3

Overload loss: 0.0%

Prom ratio: 1.03

Nb. modules: 6 Area: 15 m²

Operating conditions:

V_{mpp} (60°C) 73 V V_{mpp} (20°C) 85 V V_{oc} (-10°C) 109 V

Plane irradiance: 1000 W/m²

I_{mp} (60°C) 39.8 A I_{sc} (60°C) 42.6 A I_{sc} (at STC) 42.4 A

Max. operating power (at max. irrad and 50°C): 3.03 kW

Array nom. Power (STC): 3.30 kWp

Global system summary

Number of modules: 6

Module area: 15 m²

Nominal PV Power: 3.3 kWp

Maximum PV Power: 3.2 kWp

Number of controllers: 1

Batteries: 8 (1 in series x 8 in parallel)

Battery pack voltage: 48 V

Pre-sizing Help

☒ No sizing

Planned power: 2.5 kWp

or available area: 0 m²

Battery voltage 48 V

Suggested capacity 1382 Ah

Suggested PV power 3.86 kWp

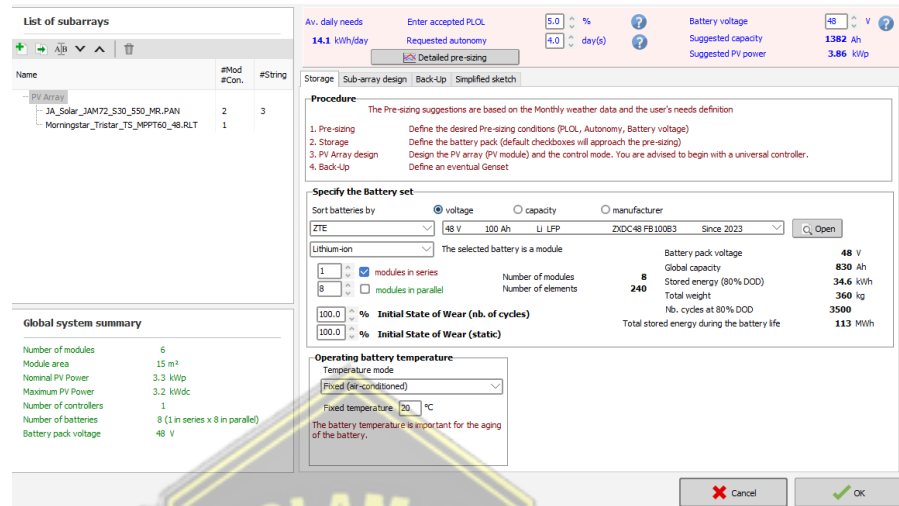
Cancel **OK**

Gambar 4.13 Sub-array Design Pada Menu System

Dalam perencanaan pembangunan PLTS berkapasitas 3.300 Wp, dibutuhkan 6 unit modul surya dengan spesifikasi 550 Wp per modul dan *operating mode* menggunakan MPPT controller dengan tegangan *input* 48 V yang disesuaikan dengan tegangan pada baterai. Estimasi luas area yang diperlukan untuk pemasangan panel surya ini adalah sekitar 15 m². Pada

kondisi STC (*Standard Test Condition*), sistem ini mampu menghasilkan daya nominal sebesar 3,3 kWp.

4.6.5 Penyimpanan energi



Gambar 4.14 Baterai / Storage

Baterai berperan penting dalam menentukan kapasitas penyimpanan energi yang diperlukan dalam sistem. Sebagai komponen utama dalam sistem PLTS *off-grid*, baterai berfungsi untuk menyimpan kelebihan energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya selama siang hari. Dengan adanya baterai, pasokan listrik tetap tersedia untuk digunakan pada malam hari atau saat kondisi sinar matahari terbatas.

4.6.6 Inverter



Gambar 4. 15 Inverter PRIME 3.000 W

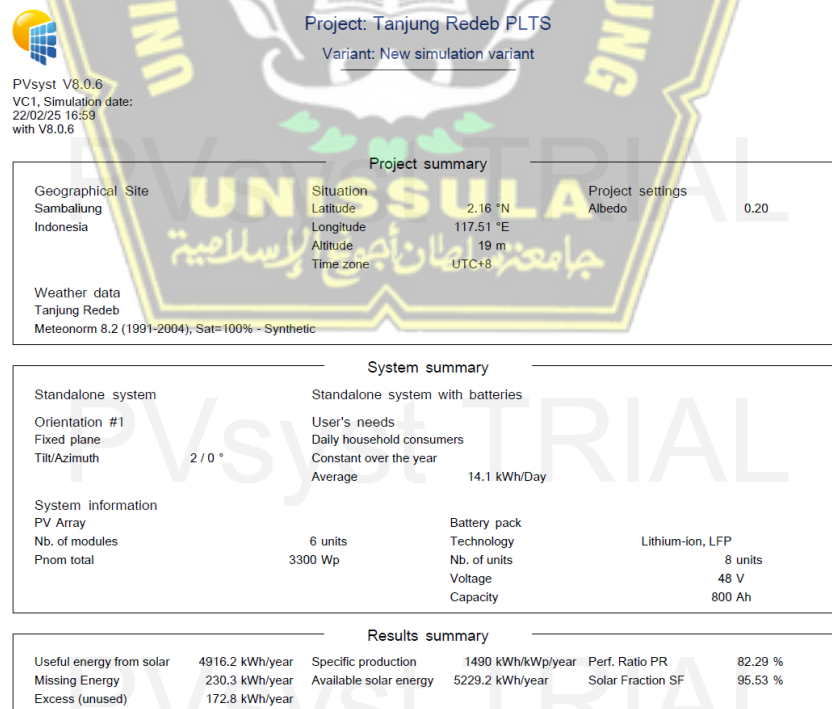
Dalam perancangan PLTS *off-grid* ini, sistem menggunakan *inverter* berkapasitas 3 kW sebanyak satu unit. Pemilihan *inverter* ini dilakukan

berdasarkan kebutuhan daya yang telah dianalisis dan disesuaikan dengan Tabel 4.1, yang memuat estimasi beban pemakaian energi listrik.

Pada simulasi menggunakan *software PVsyst* dalam mode *Stand-Alone*, tidak tersedia menu khusus untuk pemilihan *inverter*. Oleh karena itu, kapasitas *inverter* ditentukan secara manual dengan mempertimbangkan total daya yang dibutuhkan serta faktor keamanan dalam operasional sistem. Dengan kapasitas 3 kW, *inverter* ini diharapkan mampu mengonversi daya listrik yang tersimpan dalam baterai untuk memenuhi kebutuhan beban secara optimal pada sistem PLTS *off-grid* yang dirancang.

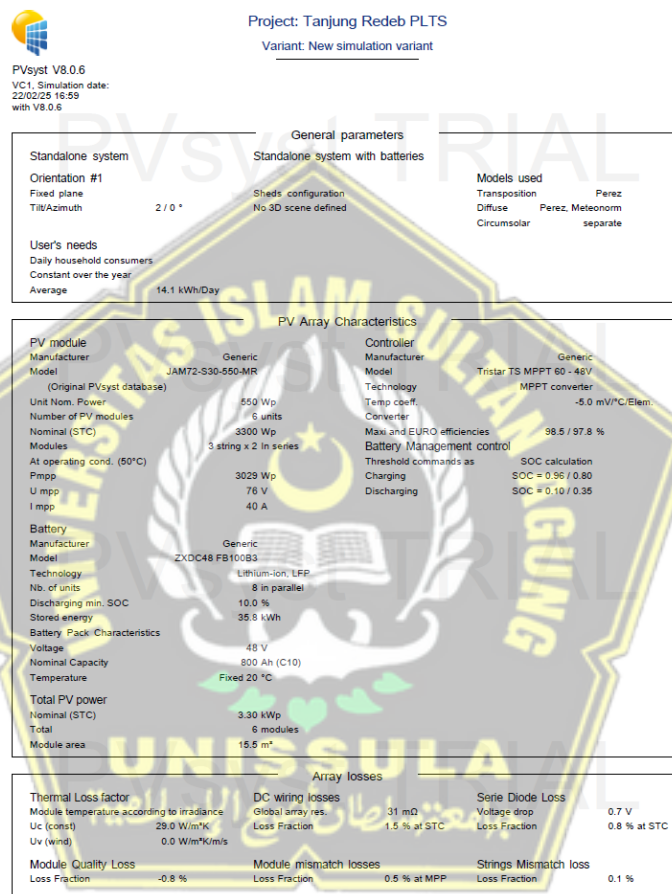
4.6 Hasil Simulasi *PVsyst*

Laporan berikut menyajikan hasil simulasi sistem PLTS *Stand-Alone / off-grid* yang dilakukan menggunakan *software PVsyst* dengan memasukkan parameter-parameter yang relevan. Lokasi studi kasus adalah Gudang AGO PLN UP3 Berau yang beralamat di Jl. S. A. Maulana No. 1, Kelurahan Karang Ambun, Kecamatan Tanjung Redeb, Kabupaten Berau, Provinsi Kalimantan Timur, dengan koordinat Latitude 2.1546° S dan Longitude 117.5017° E. Hasil simulasi yang diperoleh dari analisis ini akan disajikan dalam pembahasan berikut.



Gambar 4.16 Laporan Simulasi *PVsyst* (1)

Pada gambar 4.17, merupakan hasil laporan simulasi *PVsyst* pada rancangan ini dengan rata – rata energi 14,1 kWh/hari. Sistem PLTS *off-grid* yang dirancang ini memiliki kapasitas produksi energi listrik sebesar 5.229,2 kWh per tahun, sementara total konsumsi energi oleh pengguna mencapai 4.916,2 kWh per tahun. Panel surya dipasang dengan kemiringan (*tilt*) 2° dan orientasi *azimuth* 0° untuk mengoptimalkan penyerapan radiasi matahari. Lokasi simulasi berada pada koordinat koordinat $2^\circ 09' 16.2'' \text{N}$ $117^\circ 30' 05.7'' \text{E}$.

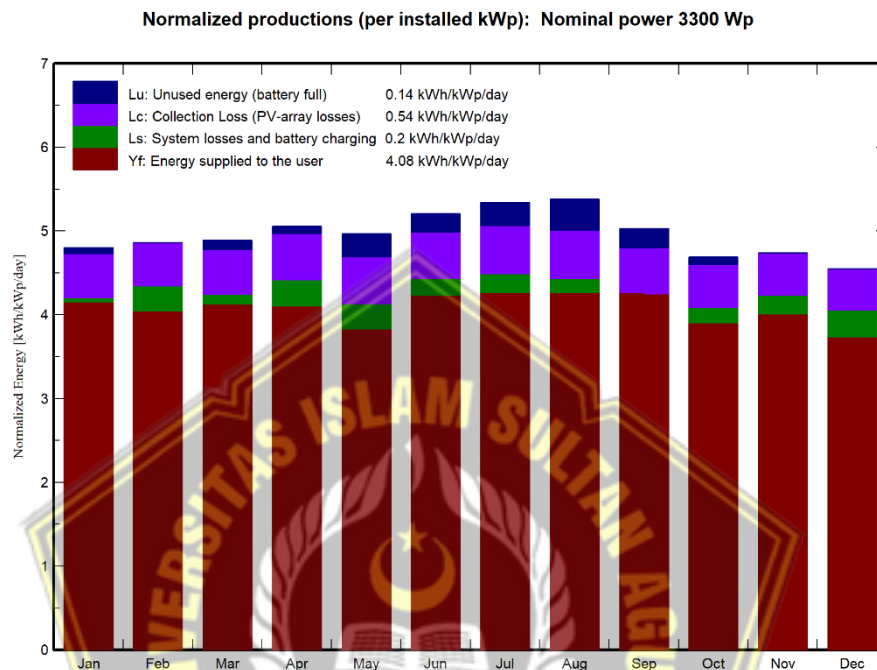


Gambar 4.17 Laporan Simulasi *PVsyst* (2)

Konsumsi energi rata - rata di Gudang AGO PLN UP3 Berau yang menjadi objek simulasi perencanaan ini adalah 14,1 kWh per hari.

Untuk memenuhi kebutuhan tersebut, digunakan panel surya dengan konfigurasi 6 unit panel, terdiri dari 2 unit yang dipasang secara seri dan 3 unit yang dipasang secara paralel. Konfigurasi ini menghasilkan daya sebesar 3,3 kWp. Area yang diperlukan untuk pemasangan modul surya diperkirakan seluas 15,5 m². Selain itu, sistem ini juga memerlukan satu unit *Solar Charge Controller* (SCC) untuk mengatur aliran daya dari panel surya ke baterai dan beban.

Pada bagian penyimpanan energi, sistem ini menggunakan delapan unit baterai yang dirangkai secara paralel, dengan tegangan 48 V dan kapasitas total 800 Ah. *State of Charge* (SOC) baterai yang tersedia dalam rancangan ini adalah sebesar 35,8 kWh, yang berfungsi sebagai cadangan energi untuk memastikan ketersediaan listrik saat malam atau sinar matahari tidak tersedia.



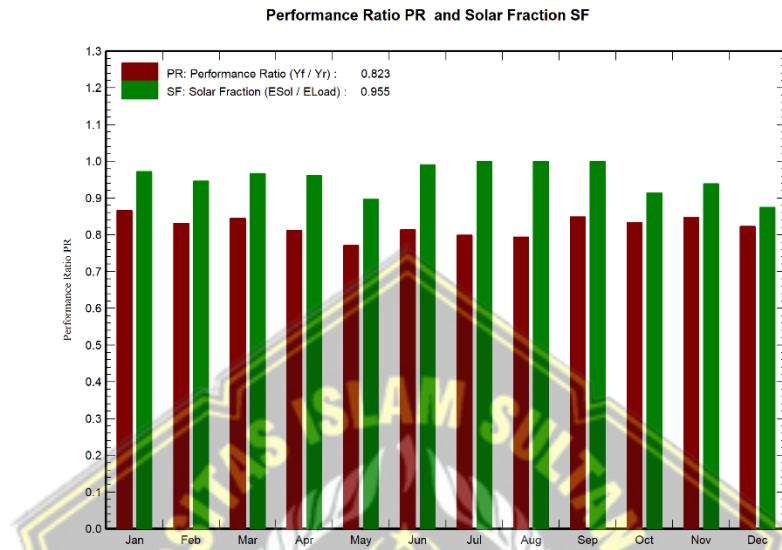
Gambar 4.18 Grafik *Normalized Productions*

Pada Gambar 4.19, menampilkan grafik *Normalized Productions* yang menggambarkan kerugian energi yang terjadi selama simulasi, khususnya kerugian pada PV-array serta kerugian sistem yang terjadi pada *inverter* dan baterai dalam sistem PLTS *off-grid*. Berdasarkan hasil simulasi yang diperoleh, terdapat energi yang tidak terpakai sebesar 0,14 kWh/kWp/hari, yang terjadi ketika baterai mencapai kapasitas penyimpanan maksimal. Hal ini menunjukkan adanya kelebihan energi yang tidak dapat disalurkan atau dimanfaatkan lebih lanjut, karena baterai sudah penuh dan tidak dapat menampung energi tambahan yang dihasilkan oleh panel surya, sehingga energi tersebut hilang dan tidak dapat dimanfaatkan untuk kebutuhan sistem atau beban.

Selain itu, sistem mengalami kerugian energi pada panel surya sebesar 0,54 kWh/kWp/hari, yang dapat disebabkan oleh berbagai faktor seperti efisiensi modul, sudut pencahayaan, dan kondisi lingkungan. Sementara itu, kerugian selama proses

pengisian baterai tercatat sebesar 0,2 kWh/kWp/hari, yang menunjukkan adanya energi yang hilang dalam konversi dan penyimpanan.

Adapun energi yang berhasil disuplai ke beban pengguna dalam sistem ini adalah sebesar 4,08 kWh/kWp/hari, yang menjadi sumber utama dalam memenuhi kebutuhan listrik konsumen.



Gambar 4.19 Grafik *Performance Ratio* (PR) and *Solar Fraction* (SF)

Performance Ratio (PR) merupakan parameter yang menunjukkan efisiensi sistem dalam mengubah energi matahari menjadi energi listrik yang dapat digunakan oleh beban. Dari hasil simulasi, diperoleh PR rata – rata tahunan sebesar 0.823 atau 82.3%, yang mengindikasikan bahwa sistem memiliki efisiensi yang baik dan masih bisa diperbaiki dengan penggunaan *inverter* yang lebih tinggi, optimasi beban penggunaan, dan menambah jumlah baterai. Nilai PR mengalami fluktuasi sepanjang tahun, dengan kecenderungan lebih tinggi pada bulan Februari, Agustus, dan September, sementara nilai terendah terjadi pada bulan Mei dan Juni. Penurunan PR pada bulan-bulan tertentu dapat disebabkan oleh beberapa faktor, antara lain:

1. Variasi intensitas radiasi matahari, di mana penurunan produksi energi akibat cuaca mendung atau curah hujan tinggi dapat menyebabkan penurunan efisiensi sistem.
2. Peningkatan suhu modul surya, yang dapat menurunkan tegangan keluaran panel fotovoltaik dan mengurangi daya yang dihasilkan.

3. Kehilangan daya dalam sistem, seperti konversi energi dari panel surya ke baterai atau inverter, serta efisiensi penyimpanan energi yang mungkin bervariasi tergantung pada kondisi operasional baterai.

Solar Fraction (SF) merupakan rasio antara energi yang dihasilkan oleh sistem PLTS terhadap total kebutuhan energi beban. Dari hasil simulasi, diperoleh SF rata - rata tahunan sebesar 0.955 atau 95.5%, yang berarti hampir seluruh kebutuhan energi pengguna dapat dipenuhi oleh sistem PLTS tanpa ketergantungan signifikan terhadap sumber energi eksternal sesuai dengan estimasi pemakaian beban pada Tabel 4.1. Nilai SF tertinggi terjadi pada bulan Agustus dan September, yang menunjukkan bahwa sistem mampu memenuhi hampir 100% kebutuhan energi beban pada bulan tersebut. Sementara itu, penurunan SF pada bulan Mei dan Desember mengindikasikan adanya sedikit kekurangan suplai energi, yang mungkin mengharuskan penggunaan sumber energi tambahan seperti PLN atau adanya keterbatasan dalam kapasitas penyimpanan baterai.

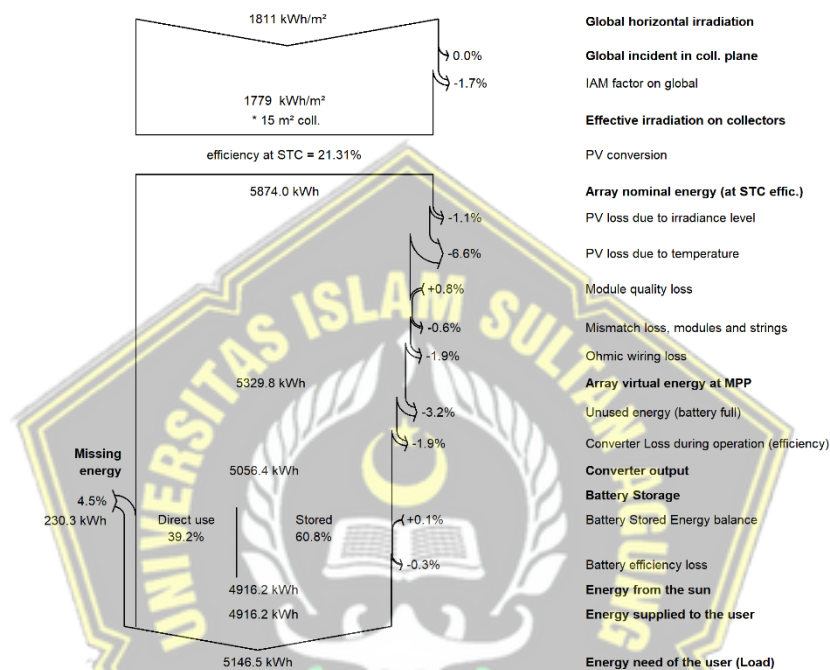
New simulation variant
Balances and main results

	GlobHor kWh/m ²	GlobEff kWh/m ²	E_Avail kWh	EUnused kWh	E_Miss kWh	E_User kWh	E_Load kWh	SolFrac ratio
January	146.7	145.9	428.9	6.83	11.94	425.2	437.1	0.973
February	135.2	133.8	394.2	0.00	21.06	373.7	394.8	0.947
March	151.3	148.9	437.4	10.83	14.59	422.5	437.1	0.967
April	152.3	149.0	437.3	8.19	16.53	406.5	423.0	0.961
May	155.8	151.3	441.9	27.63	45.00	392.1	437.1	0.897
June	158.4	153.6	452.7	21.25	3.63	419.4	423.0	0.991
July	167.7	162.7	479.5	28.41	0.00	437.1	437.1	1.000
August	168.1	164.2	483.4	37.89	0.00	437.1	437.1	1.000
September	151.1	148.3	436.0	23.10	0.00	423.0	423.0	1.000
October	144.6	142.9	419.3	8.65	37.33	399.8	437.1	0.915
November	140.7	139.6	411.3	0.00	25.65	397.3	423.0	0.939
December	139.0	138.5	407.1	0.00	54.49	382.6	437.1	0.875
Year	1810.8	1778.7	5229.2	172.78	230.25	4916.2	5146.5	0.955

Gambar 4.20 Produksi Energi Tahunan (*Balances and Main Results*)

Berdasarkan Gambar 4.21, diketahui bahwa Rata-rata kapasitas energi yang dapat diproduksi dengan efisiensi optimal oleh sistem PLTS (E_{Avail}) adalah 5.229,2 kWh/tahun, Sementara itu, rata - rata energi yang digunakan oleh pengguna (E_{User}) mencapai 4.916,2 kWh/tahun, dengan total kebutuhan energi pengguna atau beban listrik tahunan (E_{Load}) sebesar 5.146,5 kWh/tahun. Selain itu, terdapat energi yang tidak terpakai (E_{Unused}) sebesar 172,78 kWh/tahun, yang menunjukkan kelebihan daya yang tidak terserap oleh sistem akibat keterbatasan

kapasitas penyimpanan baterai, Adapun energi yang belum terpenuhi (E_{Miss}) tercatat sebesar 230,25 kWh/tahun, yang mengindikasikan adanya defisit energi yang kemungkinan perlu dipenuhi dari sumber daya tambahan atau optimalisasi kapasitas penyimpanan energi. Dengan hasil ini, sistem PLTS memiliki SF sebesar 95,5%, yang menunjukkan bahwa sebagian besar kebutuhan energi pengguna dapat dipenuhi oleh sistem tenaga surya, dengan ketergantungan minimal terhadap sumber energi eksternal.



Gambar 4.21 Loss Diagram

Pada Gambar 4.22, representasi grafis dari kerugian yang dihasilkan melalui proses proyeksi sistem PLTS *off-grid* menunjukkan bahwa total *Global Horizontal Irradiation* yang diterima oleh sistem adalah 1.811 kWh/m²/tahun. Namun, akibat adanya berbagai faktor seperti jumlah radiasi efektif yang diterima oleh panel surya mengalami penurunan, sehingga *effective irradiation on collectors* tercatat sebesar 1.799 kWh/m²/tahun.

Dari jumlah radiasi ini, sistem PLTS menghasilkan energi *nominal array* sebesar 5.874,1 kWh/tahun. Namun, dalam proses konversi dan distribusi daya, terdapat berbagai faktor yang menyebabkan kehilangan energi seperti level iradiasi, suhu modul surya serta kerugian dalam sistem inverter dan baterai yang dapat disuplai dari panel surya ke beban hanya mencapai 4.916,2 kWh/tahun. Sementara

itu, energi yang hilang dengan sistem PLTS *off-grid* 3,3 kWp ini sebesar 230,3 kWh/tahun.

4.7 Perhitungan Ekonomi PLTS *Off-Grid*

Analisis ekonomi ini merupakan estimasi biaya investasi yang diperlukan untuk pembangunan sistem PLTS *off-grid* di Gudang AGO PLN UP3 Berau, Kabupaten Berau. Perhitungan ini mencakup biaya berbagai komponen yang diperlukan dalam perancangan sistem guna memastikan kelayakan teknis dan finansial dari implementasi PLTS tersebut.

Tabel 4.3 Harga Komponen dan Pemasangan PLTS 3.300 Wp

No	Nama Barang	Satuan	Jumlah	Harga	Total Biaya
1	JA Solar Panel Mono Crystalline 550 WP	Unit	6	Rp 1.948.700	Rp 11.692.200
2	Morningstar TriStar TS-MPPT-60M Solar Controller	Unit	1	Rp 19.351.040	Rp 19.351.040
3	Battery Lifepo4 48V 100Ah ZTE ZXDC48 FB100B3 (Second)	Unit	8	Rp 7.612.500	Rp 60.900.000
4	Inverter Prime 3000W 48V Hybrid Without Controller	Unit	1	Rp 5.169.500	Rp 5.169.500
5	Bracket Panel Surya 2,5 M x 2,2 M	Set	12	Rp 307.500	Rp 3.690.000
6	Panel Box 70 cm x 50 cm x 20 cm	Set	2	Rp 498.000	Rp 996.000
7	MCB DC 63 A	Unit	2	Rp 159.500	Rp 319.000
8	MCB AC 8 Ampere	Unit	1	Rp 66.000	Rp 66.000
9	Kabel NYY 6 mm ²	Meter	100	Rp 38.100	Rp 3.810.000
10	Kabel NYY 16 mm ²	Meter	100	Rp 35.200	Rp 3.520.000
11	Kabel NYY 1,5 mm ²	Meter	100	Rp 14.100	Rp 1.410.000
12	Surge Protection Device (SPD) 150 VDC 2P	Unit	1	Rp 210.000	Rp 210.000
13	Middle Clamp Bracket	Set	8	Rp 23.750	Rp 190.000
14	Siku L	Set	4	Rp 33.750	Rp 135.000
15	Penjepit Baterai	Set	16	Rp 8.314	Rp 133.020
17	Instalasi	Ls	1	Rp 1.500.000	Rp 1.500.000
18	Transport	LS	1	Rp 400.000	Rp 400.000
TOTAL BIAYA					Rp 113.491.760

4.8.1 Harga energi PLTS

Dalam penelitian ini, sistem PLTS diproyeksikan memiliki masa operasional selama dua puluh (20) tahun, sesuai dengan umur ekonomis komponen yang digunakan. Tingkat diskonto yang diterapkan sebesar 5,75%, yang mengacu pada tingkat suku bunga yang ditetapkan oleh Bank Indonesia (BI) pada bulan Februari 2025. Perhitungan biaya energi listrik yang

dihasilkan oleh PLTS per kWh dilakukan dengan mempertimbangkan faktor – faktor ekonomi tersebut.

1. Biaya Pokok Listrik PLTS (*LCOE - Levelized Cost of Energy*)

$$\begin{aligned}
 \text{Biaya Pokok} &= \frac{\text{Total Biaya}}{\text{Lama Tahun}} \\
 &= \frac{\text{Rp 113.491.760}}{20 \text{ Tahun}} \\
 &= \text{Rp 5.674.588} \\
 \text{Biaya Bunga Kredit} &= \text{Biaya Pokok} \times \text{Suku Bunga Kredit} \\
 &= \text{Rp 5.674.588} \times 5,75\% \\
 &= \text{Rp 326.289} \\
 \text{LCOE} &= \frac{(\text{Biaya Pokok} + \text{Biaya Bunga Kredit})}{\text{Produksi Energi PLTS}} \\
 &= \frac{(\text{Rp 5.674.588} + \text{Rp 326.289})}{5.229,2 \text{ kWh}} \\
 &= \text{Rp 1.147,6}
 \end{aligned}$$

2. Biaya Operasional dan Pemeliharaan (O&M) PLTS per kWh

Biaya operasional pergantian dan pemeliharaan komponen PLTS.

$$\begin{aligned}
 \text{Biaya O\&M} &= 1\% \times \text{Total Biaya Komponen} \\
 &= 1\% \times \text{Rp 113.491.760} \\
 &= \text{Rp 1.134.918}
 \end{aligned}$$

Estimasi biaya penggantian baterai dalam 20 tahun operasional PLTS mencakup 8 unit baterai setiap 10 tahun sebanyak dua kali.

$$\begin{aligned}
 \text{Biaya Pergantian} &= \frac{\text{Biaya Baterai} \times \text{Pergantian Baterai}}{\text{Lama Tahun}} \\
 \text{Baterai} &= \frac{\text{Rp 60.900.000} \times 2}{20 \text{ Tahun}} \\
 &= \text{Rp 6.090.000/tahun}
 \end{aligned}$$

Dari dua perhitungan di atas, maka didapatkan Biaya Operasional dan Pemeliharaan (O&M) PLTS per kWh dengan persamaan sebagai berikut:

$$\text{Biaya O\&M/kWh} = \frac{\text{Biaya Pergantian Baterai} + \text{Biaya O\&M}}{\text{Produksi Energi PLTS}}$$

$$= \frac{(\text{Rp } 6.090.000 + \text{Rp } 1.134,918)/\text{tahun}}{5.229,2 \text{ kWh}}$$

$$= \text{Rp } 1.381,65/\text{kWh}$$

3. Harga/kWh

$$\begin{aligned} \text{Harga/kWh} &= \text{LCOE} + \text{Biaya O\&M/kWh} \\ &= \text{Rp } 1.147,6 + \text{Rp } 1.381,65 \\ &= \text{Rp } 2.529,22/\text{kWh} \end{aligned}$$

4.8.2 Analisa kelayakan investasi PLTS

Dalam perencanaan PLTS *off-grid* ini, analisis kelayakan dilakukan dengan menghitung periode pengembalian investasi guna menilai efisiensi finansial sistem.

$$\begin{aligned} \text{Profit} &= \text{Produksi Energi PLTS} \times \text{Harga kWh} \\ &= 5.229,2 \text{ kWh} \times \text{Rp } 2.529,22/\text{kWh} \\ &= \text{Rp } 13.225.794 \\ \text{Balik Modal} &= \frac{\text{Modal Awal}}{\text{Profit}} \\ (\text{Payback Periode}) &= \frac{\text{Rp } 113.491.760}{\text{Rp } 13.225.794} \\ &= 8,58 \text{ Tahun} \approx 8 \text{ Tahun } 7 \text{ Bulan} \end{aligned}$$

Berdasarkan profil beban energi pada Tabel 4.2, Gudang AGO PLN UP3 Berau memiliki kebutuhan beban listrik tahunan sebesar 14.527 kWh. Untuk memenuhi sebagian dari kebutuhan tersebut, sistem PLTS *off-grid* berkapasitas 3,3 kWp dirancang sebagai sumber energi alternatif. Dari hasil simulasi, sistem PLTS ini mampu membebani energi listrik sebesar 5.146,5 kWh per tahun, yang dapat mengurangi ketergantungan pada pasokan listrik utama.

$$\begin{aligned} \text{Persentase Penggunaan} &= \frac{\text{Produksi PLTS}}{\text{Pemakaian Beban kWh}} \\ &= \frac{5.229,2 \text{ kWh}}{14.527 \text{ kWh}} \times 100\% \\ &= 36\% \end{aligned}$$

Jadi dengan PLTS 3,3 kWp hanya bisa bebackup kebutuhan beban sebesar 36% dari total keseluruhan kebutuhan beban.

Dalam perencanaan investasi sistem PLTS *off-grid*, analisis arus kas digunakan untuk mengevaluasi kelayakan finansial proyek. Berdasarkan Tabel 4.4, arus kas sistem PLTS dianalisis selama 20 tahun operasional, dimulai dari tahun 2025 hingga 2044.

Tabel 4.4 Arus Kas

No.	Tahun	Biaya Investasi	Arus Kas Masuk	Profit Kumulatif
1	2025	Rp 113.491.760	Rp 13.225.794	(-Rp 100.265.966)
2	2026		Rp 13.225.794	(-Rp 87.040.172)
3	2027		Rp 13.225.794	(-Rp 73.814.377)
4	2028		Rp 13.225.794	(-Rp 60.588.583)
5	2029		Rp 13.225.794	(-Rp 47.362.788)
6	2030		Rp 13.225.794	(-Rp 34.136.994)
7	2031		Rp 13.225.794	(-Rp 20.911.199)
8	2032		Rp 13.225.794	(-Rp 7.685.405)
9	2033		Rp 13.225.794	Rp 5.540.390
10	2034		Rp 13.225.794	Rp 18.766.184
11	2035		Rp 13.225.794	Rp 31.991.978
12	2036		Rp 13.225.794	Rp 45.217.773
13	2037		Rp 13.225.794	Rp 58.443.567
14	2038		Rp 13.225.794	Rp 71.669.362
15	2039		Rp 13.225.794	Rp 84.895.156
16	2040		Rp 13.225.794	Rp 98.120.951
17	2041		Rp 13.225.794	Rp 111.346.745
18	2042		Rp 13.225.794	Rp 124.572.539
19	2043		Rp 13.225.794	Rp 137.798.334
20	2044		Rp 13.225.794	Rp 151.024.128

PI digunakan untuk menilai apakah proyek ini layak secara ekonomi dalam jangka panjang. Berdasarkan data investasi yang telah diperoleh, proyek PLTS ini memerlukan biaya awal sebesar Rp 113.491.760, dengan arus kas masuk tahunan sebesar Rp 13.225.794. Dari hasil analisis arus kas selama dua puluh tahun operasional, diperoleh total profit kumulatif pada

tahun 2044 sebesar Rp 151.024.128. Maka, *Probability Index* (PI) dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \text{Probability Index (PI)} &= \frac{\text{Profit Kumulatif}}{\text{Investasi Awal}} \\
 &= \frac{\text{Rp 151.024.128}}{\text{Rp 113.491.760}} \\
 &= 1,33
 \end{aligned}$$

Berdasarkan hasil perhitungan *Probability Index* (PI), diperoleh nilai 1,33, yang menunjukkan bahwa investasi pada sistem PLTS *off-grid* ini layak secara ekonomi. Nilai PI lebih dari (>) 1 menandakan bahwa total keuntungan yang diperoleh selama masa operasional proyek melebihi biaya investasi awal.

Langkah selanjutnya adalah menghitung *Return on Investment* (RoI) untuk mengetahui tingkat pengembalian investasi sistem PLTS *off-grid* ini. *Return on Investment* (RoI) merupakan parameter yang digunakan untuk menilai persentase keuntungan yang dihasilkan dari suatu investasi awal.

$$\begin{aligned}
 \text{Return on Investment (RoI)} &= \text{PI} \times 100\% \\
 &= 1,33 \times 100\% \\
 &= 133\%
 \end{aligned}$$

Hasil simulasi menggunakan *software PVsyst*, serta analisis kelayakan investasi, menunjukkan bahwa sistem PLTS 3,3 kWp yang dirancang memiliki biaya investasi awal sebesar Rp 113.491.760. Dari perhitungan yang dilakukan, diperoleh harga energi listrik sebesar Rp 2.529,22/kWh, dengan periode pengembalian modal (*Payback Period*) selama 8,58 tahun.

Dalam penelitian ini, sistem PLTS menghasilkan total profit selama dua puluh tahun sebesar Rp 151.024.128, dengan *Probability Index* (PI) sebesar 1,33. Selain itu, hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem PLTS 3,3 kWp hanya mampu menyuplai 36% dari total kebutuhan energi Gudang AGO PLN UP3 Berau, sehingga masih diperlukan tambahan sumber energi untuk memenuhi keseluruhan kebutuhan beban listrik.

4.8 PLTS *Off-Grid* Segi Lingkungan

Pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *off-grid* di tidak hanya bertujuan untuk memenuhi kebutuhan energi, tetapi juga harus dievaluasi

dari segi kelayakan lingkungan guna memastikan dampak yang ditimbulkan tetap dalam batas yang berkelanjutan. Berikut adalah beberapa dampak lingkungan dari simulasi PLTS *off-grid* ini :

4.9.1 Dampak positif

1. Pengurangan Emisi Karbon

PLTS *off-grid* menggantikan penggunaan listrik berbasis bahan bakar fosil, seperti listrik dari jaringan PLN atau generator diesel. Berdasarkan faktor emisi listrik PLN sebesar 0,85 kg CO₂/kWh, sistem PLTS *off-grid* dengan kapasitas 3.3 kWp yang menghasilkan 5.229,2 kWh per tahun mampu mengurangi emisi karbon sebesar:

$$\begin{aligned}\text{Emisi Karbon} &= \text{Produksi Energi PLTS} \times \text{Faktor Emisi} \\ &= 5.229,2 \times 0,85 \text{ kg CO}_2/\text{kWh} \\ &= 4.444,82 \text{ kg CO}_2 \approx 4,44 \text{ Ton CO}_2\end{aligned}$$

Dari hasil perhitungan tersebut, implementasi PLTS *off-grid* berkontribusi signifikan dalam mengurangi emisi karbon yang dihasilkan dari penggunaan energi berbahan bakar fosil, hal ini sejalan dalam mendukung program dekarbonisasi dan transisi energi yang lebih bersih di Indonesia sesuai dengan target pemerintah menuju *Net Zero Emission* (NZE) pada tahun 2060.

2. Pemanfaatan Energi Terbarukan yang Berkelanjutan

PLTS memanfaatkan sumber energi matahari yang tidak terbatas, berbeda dengan bahan bakar fosil yang memiliki keterbatasan cadangan dan berdampak pada perubahan iklim. Dengan memanfaatkan energi surya, sistem ini mendukung transisi menuju energi hijau dan berkelanjutan.

3. Mengurangi Pencemaran Udara dan Polusi Suara

Tidak seperti pembangkit listrik berbasis batu bara atau generator diesel, PLTS tidak menghasilkan emisi gas beracun dari hasil pembakaran batu bara atau solar yang berkontribusi terhadap pencemaran udara dan masalah kesehatan pernapasan. Selain itu, PLTS tidak menghasilkan kebisingan, berbeda dengan genset diesel yang sering digunakan di daerah terpencil.

4. Pemanfaatan Ruang dan Minimnya Dampak terhadap Ekosistem

Untuk skala lebih kecil, PLTS Atap *off-grid* tidak memerlukan lahan tambahan, sehingga tidak menyebabkan alih fungsi lahan atau mengganggu ekosistem alami. Pemasangan panel surya di atap bangunan seperti rumah, sekolah, atau fasilitas umum dapat mengoptimalkan ruang yang tidak terpakai tanpa mengubah struktur lingkungan sekitar. Selain itu, PLTS Atap juga tidak menyebabkan gangguan terhadap vegetasi dan habitat alami, sehingga lebih ramah lingkungan dibandingkan sistem PLTS berbasis lahan.

4.9.2 Dampak negatif

Meskipun PLTS *off-grid* memiliki berbagai dampak positif terhadap lingkungan, terdapat beberapa tantangan dan dampak negatif yang perlu diperhatikan dalam implementasinya. Beberapa aspek yang dapat menimbulkan dampak lingkungan antara lain :

1. Pengelolaan Limbah Elektronik

Salah satu tantangan utama dalam penggunaan PLTS adalah limbah elektronik (*e-waste*) yang berasal dari panel surya, *inverter*, dan baterai yang memiliki masa pakai terbatas.

- a. Panel surya memiliki umur pakai sekitar 25–30 tahun, setelah itu perlu dilakukan *recycling* atau pembuangan yang sesuai agar tidak menjadi limbah yang mencemari lingkungan.
- b. Baterai *Lithium-Ion* memiliki umur pakai terbatas sekitar 10-15 tahun, setelah itu perlu dilakukan daur ulang atau penggantian.
- c. *Inverter* dan komponen elektronik lainnya juga memiliki masa pakai terbatas sesuai dengan spesifikasi produk.

2. Ketergantungan pada Cuaca dan Variabilitas Produksi Energi

PLTS sangat bergantung pada intensitas radiasi matahari, sehingga dalam kondisi mendung atau hujan, produksi energi dapat menurun. Oleh karena itu, sistem penyimpanan energi dengan baterai menjadi sangat penting untuk menjaga ketersediaan daya listrik.

4.9.3 Mitigasi dampak lingkungan

Untuk mengoptimalkan manfaat positif dan mengurangi potensi dampak negatif dari Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *off-grid*, sejumlah strategi yang dapat diterapkan meliputi:

1. Pengelolaan limbah elektronik yang berkelanjutan,
2. Pemanfaatan ruang atap untuk instalasi panel surya (PV), dan
3. Desain yang ramah terhadap lingkungan.



BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

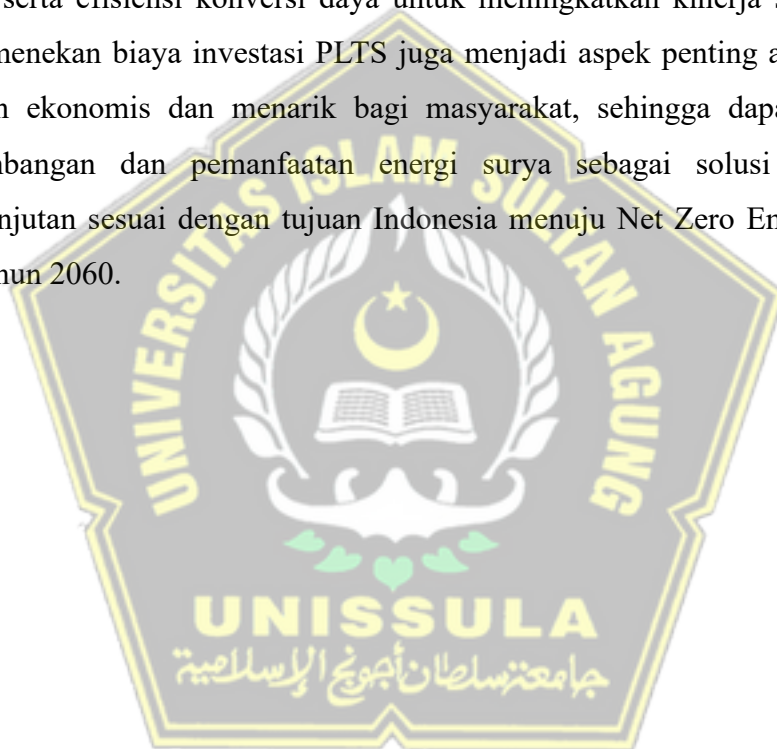
Melalui perhitungan numerik dan proyeksi menggunakan perangkat lunak (*software*) *PVsyst* dalam merancang PLTS *off-grid* untuk Gudang AGO PT PLN (Persero) UP3 Berau, berikut adalah beberapa kesimpulan yang dapat ditarik dari hasil proyeksi penelitian PLTS *off-grid* diatas sebagai berikut :

1. Perencanaan sistem PLTS *off-grid* di Gudang AGO PT PLN (Persero) UP3 Berau dilakukan menggunakan perangkat lunak *PVsyst*, dengan konfigurasi sistem menggunakan 6 unit modul surya berkapasitas 550 WP, disusun dalam 2 seri dan 3 paralel, sehingga total kapasitas sistem mencapai 3.300 Wp (3,3 kWp). Berdasarkan simulasi, sistem ini mampu menghasilkan energi sebesar 5.229,2 kWh per tahun dan dirancang untuk memasok sekitar 36% dari kebutuhan energi tahunan Gudang AGO PT PLN (Persero) UP3 Berau sebesar 14.527 kWh. Desain ini telah disesuaikan dengan data iklim lokal dan pola konsumsi beban agar optimal dan efisien.
2. Dari sisi teknis, sistem PLTS ini mampu mengurangi ketergantungan pada pasokan listrik dari PLN serta beroperasi andal dalam kondisi cuaca yang beragam. Secara ekonomi, total investasi awal sebesar Rp 113.491.760,- diperkirakan akan kembali dalam waktu 8,58 tahun (*Payback Period*). Nilai *Probability Index* (PI) sebesar 1,33 menunjukkan bahwa setiap Rp 1,00 yang diinvestasikan akan memberikan nilai kembali sebesar Rp 1,33, menjadikan proyek ini layak dari sisi finansial..
3. Penerapan sistem PLTS ini mampu mengurangi emisi karbon sebesar 4,44 ton CO₂ per tahun, yang berkontribusi terhadap upaya dekarbonisasi dan pengurangan dampak perubahan iklim. Dengan pemasangan panel di atas atap bangunan seluas 15,5 m², sistem ini tidak memerlukan alih fungsi lahan dan tidak mengganggu ekosistem sekitar,

menjadikannya solusi energi terbarukan yang ramah lingkungan dan berkelanjutan.

5.2 Saran

Penelitian selanjutnya dapat difokuskan pada penentuan kapasitas optimal PLTS yang mampu memenuhi kebutuhan energi harian secara penuh, sehingga sistem dapat beroperasi secara mandiri tanpa bergantung pada sumber energi tambahan. Selain itu, diperlukan kajian eksplorasi lebih mendalam mengenai penggunaan PLTS sebagai sumber energi baru terbarukan yang lebih efisien, dengan menekankan pada optimasi kapasitas panel surya, sistem penyimpanan energi, serta efisiensi konversi daya untuk meningkatkan kinerja sistem. Upaya untuk menekan biaya investasi PLTS juga menjadi aspek penting agar sistem ini semakin ekonomis dan menarik bagi masyarakat, sehingga dapat mendorong pengembangan dan pemanfaatan energi surya sebagai solusi energi yang berkelanjutan sesuai dengan tujuan Indonesia menuju Net Zero Emission (NZE) pada tahun 2060.



DAFTAR PUSTAKA

- [1] Agus Cahyono Adi, “Konsumsi Listrik Masyarakat Meningkat, Tahun 2023 Capai 1.285 kWh/Kapita,” Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. Accessed: Dec. 11, 2024. [Online]. Available: <https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/konsumsi-listrik-masyarakat-meningkat-tahun-2023-capai-1285-kwh-kapita>
- [2] K. Oktaviani *et al.*, “Manajemen Rantai Penyediaan dan Pemanfaatan Energi Nasional,” *Pusat Data dan Teknologi Informasi Energi dan Sumber Daya Mineral Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral*, pp. 110–114, Dec. 2016, Accessed: Dec. 12, 2024. [Online]. Available: <https://www.esdm.go.id/assets/media/content/content-manajemen-rantai-penyediaan-dan-pemanfaatan-energi-nasional-.pdf>
- [3] Agus Cahyono Adi, “Pemerintah Kejar Target Tingkatkan Bauran EBT,” Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. Accessed: Dec. 11, 2024. [Online]. Available: <https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/pemerintah-kejar-tingkatkan-bauran-ebt>
- [4] M. A. Ridho, B. Winardi, and A. Nugroho, “Analisis Potensi Dan Unjuk Kerja Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (Plts) Di Departemen Teknik Elektro Universitas Diponegoro Menggunakan Software Pvsyst 6.43,” *Transient: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, vol. 7, no. 4, pp. 883–890, 2019.
- [5] D. S. Ariadita, A. Nugroho, and B. Winardi, “Analisis Potensi dan Unjuk Kerja Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Blok D3 dan F Perumahan Grand Tembalang Regency Menggunakan Software PVsyst,” *Transient: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, vol. 8, no. 3, pp. 232–237, 2022.
- [6] M. Mardiansyah and I. Irfan, “Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya Kapasitas 100 Kw Pada Gedung Fakultas Teknik Uniska Mab Banjarmasin Dengan Sistem On-Grid,” *EEICT (Electric, Electronic, Instrumentation, Control, Telecommunication)*, vol. 6, no. 1, 2023.

- [7] T. Kristyadi and T. Afianto, "Optimasi Perencanaan PLTS Terpusat Di Wilayah Pulau Terluar," *Jurnal Infotekmesin*, vol. 12, no. 2, pp. 167–174, 2021.
- [8] E. Tarigan, "Simulasi optimasi kapasitas PLTS atap untuk rumah tangga di Surabaya," *Multitek Indonesia: Jurnal Ilmiah*, vol. 14, no. 1, pp. 13–22, 2020.
- [9] S. S. Sudewanto and M. A. Riyadi, "Evaluasi Pemanfaatan Pembangkit Listrik Tenaga Surya On Grid di Laboratorium B PLN UPDL Pandaan," *TELKA-Jurnal Telekomunikasi, Elektronika, Komputasi dan Kontrol*, vol. 8, no. 2, pp. 165–174, 2022.
- [10] A. Firmansyah, K. Karnoto, and J. Windarta, "Studi Perancangan Dan Analisa Daya Pembangkit Listrik Tenaga Surya Dengan Sistem On Grid Pada Pondok Pesantren Tanbihul Ghofiliin Kabupaten Banjarnegara," *Transient: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, vol. 10, no. 4, pp. 693–700, 2021.
- [11] R. B. D. P. Nugraha, "Desain Stand Alone Solar Photovoltaic System di Gedung Museum Provinsialat (Pastoran Gereja) Argopuro Semarang Dengan Daya 7700 VA," Universitas Semarang, Semarang, 2023.
- [12] S. Suprianto, "Analisa Perhitungan untuk Pemasangan Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya untuk Solar Home System," *RELE (Rekayasa Elektrikal dan Energi): Jurnal Teknik Elektro*, vol. 4, no. 1, pp. 60–67, 2021.
- [13] E. Megawati, S. Handoko, and A. A. Zahra, "Analisis Potensi Dan Unjuk Kerja Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya Sistem Hybrid Pada Atap Kandang Ayam Closed House Di Tualang Kabupaten Serdang Bedagai," *Transient: Jurnal Ilmiah Teknik Elektro*, vol. 10, no. 2, pp. 384–389, 2021.
- [14] Y. Hakimah, "Analisis Kebutuhan Energi Listrik dan prediksi Penambahan Pembangkit Listrik Di Sumatera Selatan," *Jurnal Desiminasi Teknologi*, vol. 7, no. 2, 2019.

- [15] Suratno and B. D. Cahyono, “Rancang Bangun Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Sebagai Catu Daya Pompa Air Submersible,” *Jurnal Teknik Elektro Uniba (JTE UNIBA)*, vol. 7, no. 2, pp. 309–319, 2023.
- [16] M. F. Fernanda, B. Nainggolan, and I. Silanegara, “Penentuan Komponen Sistem PLTS 100 Wp pada Floating Photovoltaic sebagai Sumber Energi Lampu Penerangan 20 W Pada Kolam Politeknik Negeri Jakarta,” in *Prosiding Seminar Nasional Teknik Mesin Politeknik Negeri Jakarta, Jakarta*, 2021.
- [17] M. Effendy, R. N. Syahputra, and K. Hidayat, “PERANCANGAN MAXIMUM POWER POINT TRACKING PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA BAYU MENGGUNAKAN FOUR SWITCH BUCK BOOST CONVERTER DENGAN METODE P&O-ORB,” *Transmisi*, vol. 21, no. 4, pp. 103–108, Oct. 2019, doi: 10.14710/transmisi.21.4.103-108.
- [18] G. A. Trianto, “Kendaraan Listrik Mampu Kurangi Emisi Karbon Hingga Separuh, PLN Terus Dorong dan Kembangkan Ekosistemnya,” Press Release No. 775.PR/STH.00.01/X/2022. Accessed: Feb. 25, 2025. [Online]. Available: <https://web.pln.co.id/media/2022/10/kendaraan-listrik-mampu-kurangi-emisi-karbon-hingga-separuh-pln-terus-dorong-dan-kembangkan-ekosistemnya>
- [19] SNI 0225-9 (2020), “Persyaratan Umum Instalasi Listrik (PUIL) 2020 – Bagian 9: Pengusahaan Instalasi listrik,” Jakarta, 2020. [Online]. Available: www.bsn.go.id