

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam salah satu kebutuhan energi yang sangat dasar adalah energi listrik. Energi listrik memegang peranan penting dalam memenuhi kebutuhan hidup. Penggunaan jumlah peralatan elektronika yang mengkonsumsi energi listrik semakin hari semakin bertambah mulai dari sektor rumah tangga, instansi pemerintah hingga sektor industri. Sehingga menyebabkan kebutuhan energi listrik semakin besar. Ketersediaan bahan bakar fosil terus berkurang dan menimbulkan polusi yang berbahaya bagi lingkungan termasuk di wilayah Indonesia. Kebutuhan energi di Indonesia yang terus meningkat dan mendesak serta pentingnya menjaga kelestarian lingkungan, maka pemanfaatan energi terbarukan seperti energi matahari, panas bumi, biomassa dan angin menjadi solusi yang tepat untuk memenuhi kebutuhan energi (Zambak dkk., 2023).

Dalam menghadapi transisi energi global yang menekankan prinsip keberlanjutan, ketahanan energi menjadi faktor utama bagi pertumbuhan nasional, khususnya pada wilayah Indonesia yang masih mengalami keterbatasan akses energi. Pemerintah Indonesia menargetkan peningkatan kontribusi energi terbarukan sebesar 23% pada tahun 2025 bagian dari strategi nasional untuk mengurangi dominasi energi fosil (Kementerian ESDM, 2021). Arah kebijakan ini diperkuat melalui Rencana Umum Energi Nasional (RUEN), yang menargetkan porsi energi terbarukan mencapai 31% pada tahun 2050 (Budiarto & Surjisatya, 2021).

Ketergantungan nasional terhadap energi fosil masih menjadi tantangan utama, ditambah masih adanya wilayah yang belum menikmati suplai listrik optimal, sehingga pemanfaatan energi terbarukan menjadi semakin mendesak. Salah satu solusi untuk mengurangi tingkat penggunaan energi fosil yaitu menggunakan energi terbarukan seperti Pembangkit Listrik Tenaga Surya. PLTS merupakan salah satu energi terbarukan yang sangat efisien dan efektif dalam upaya pemenuhan kebutuhan energi listrik yang terus meningkat (Sari dan Murdianto, 2023).

Pemasangan sebuah PLTS dilakukan agar PLTS yang terpasang memiliki daya yang cukup untuk menyuplai beban. Pada beberapa kasus hal ini seringkali tidak diperhatikan sehingga menyebabkan PLTS yang terpasang tidak sanggup menyuplai beban secara maksimal ataupun PLTS yang ada jauh lebih besar dibanding beban yang digunakan menyebabkan kerugian karena harga PLTS juga relatif mahal. Salah satu yang dapat mempermudah adalah menggunakan *software* PVsyst untuk menentukan kapasitas panel surya untuk memenuhi kebutuhan beban. (Sari dan Murdianto, 2023).

Sektor kesehatan merupakan salah satu sektor publik yang memerlukan pasokan energi listrik yang stabil dan berkelanjutan untuk mendukung operasional pelayanan kesehatan, terutama pada fasilitas kesehatan seperti puskesmas. Ketersediaan listrik yang andal sangat penting mengingat banyak peralatan medis

yang membutuhkan suplai listrik kontinu untuk menunjang pelayanan kepada masyarakat.

Puskesmas Bunaken merupakan contoh fasilitas kesehatan yang telah berupaya memanfaatkan energi baru terbarukan melalui instalasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) sumber energi utama dengan sistem cadangan dari jaringan PLN. Namun, kondisi di lapangan menunjukkan bahwa sistem PLTS yang terpasang saat ini belum mampu menyuplai seluruh beban listrik yang tersedia. Sistem sering mengalami gangguan (*trip*) sehingga suplai energi berpindah kembali ke PLN secara dominan. Hal ini mengindikasikan perlunya analisis lebih lanjut mengenai kapasitas PLTS yang terpasang, pola konsumsi energi, serta kebutuhan pengembangan sistem untuk mencapai kemandirian energi yang optimal pada fasilitas tersebut.

Maka dari itu, Penelitian ini akan membahas mengenai **STUDI OPTIMASI PERENCANAAN SISTEM PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA ATAP PADA PUSKESMAS BUNAKEN** dengan harapan hasil penelitian ini dapat menghasilkan konfigurasi sistem pembangkit yang efisien secara teknis maupun ekonomis serta mendukung upaya peningkatan pemanfaatan energi terbarukan pada fasilitas pelayanan kesehatan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan dari latar belakang masalah yang dipaparkan, maka rumusan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Bagaimana penentuan spesifikasi komponen Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) pada Puskesmas Bunaken?
2. Bagaimana melakukan simulasi optimasi perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) pada Puskesmas Bunaken?
3. Bagaimana perhitungan analisis ekonomi dari Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) pada Puskesmas Bunaken?
4. Bagaimana perbandingan hasil perencanaan PLTS menggunakan software PVSyst dan HOMER Pro pada Puskesmas Bunaken?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah berikut:

1. Dapat menentukan spesifikasi komponen Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) pada Puskesmas Bunaken.
2. Melakukan analisis dan optimasi sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) untuk menghasilkan konfigurasi yang sesuai dan efisien.
3. Untuk mengetahui perhitungan analisis ekonomi dari perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) pada Puskesmas Bunaken.
4. Untuk mengetahui perbandingan hasil perencanaan PLTS menggunakan software PVSyst dan Homer pro pada Puskesmas Bunaken

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat berikut:

1. Merambah wawasan dan referensi ilmiah mengenai perencanaan dan optimasi sistem pembangkit listrik tenaga surya menggunakan PVSyst dan HOMER Pro.
2. Mengetahui kapasitas pembangkit listrik tenaga surya pada Puskesmas Bunaken.
3. Memberikan rekomendasi teknis bagi Puskesmas Bunaken dalam mengoptimalkan sistem PLTS yang telah terpasang.
4. Membantu pengurangan biaya operasional listrik melalui pengoptimalan energi surya.
5. Memberikan gambaran kelayakan teknis dan ekonomi penggunaan sistem PLTS menggunakan *software* PVSyst dan HOMER Pro.

1.5 Ruang Lingkup

Ruang lingkup penelitian ini dibatasi pada aspek-aspek berikut:

1. Penelitian ini dilakukan di Puskesmas Bunaken, Kota Manado, Sulawesi Utara, yang telah memiliki sistem PLTS eksisting sumber energi utama dengan dukungan jaringan PLN.
2. Penelitian ini difokuskan pada analisis optimasi sistem pembangkit Listrik yang terdiri dari kombinasi energi surya, (PLTS), PLN dan baterai sistem penyimpanan energi.
3. Lingkup teknis meliputi identifikasi kebutuhan beban listrik, proyeksi pertumbuhan beban, potensi energi surya, dan spesifikasi teknis komponen pembangkit (PV, genset, baterai, *inverter*), serta sambungan jaringan PLN.
4. Analisis dilakukan menggunakan perangkat lunak HOMER Pro dan PVSyst untuk mengevaluasi kombinasi sistem yang paling optimal secara teknis dan ekonomis.
5. Aspek ekonomis penelitian terbatas pada estimasi biaya investasi awal, biaya operasi dan pemeliharaan (O&M), serta biaya energi (cost of energy). Kajian tidak mencakup pembahasan mengenai aspek pendanaan, regulasi, atau kebijakan pemerintah secara mendalam.
6. Penelitian ini bersifat simulatif, tidak melibatkan implementasi fisik di lapangan. Analisis dilakukan berdasarkan data sekunder, data teknis eksisting, serta asumsi yang relevan dengan kondisi aktual di Puskesmas Bunaken.

1.6 Batasan Penelitian

Agar penelitian ini lebih terarah dan fokus, maka batasan-batasan dalam penelitian ini adalah berikut:

1. Sistem pembangkit yang dianalisis terbatas pada kombinasi energi surya (PLTS) dan koneksi jaringan PLN.
2. Analisis beban listrik pada sistem PLTS didasarkan data beban listrik di Puskesmas Bunaken.
3. Potensi energi surya dianalisis berdasarkan data radiasi matahari rata rata tahunan yang diperoleh dari sumber sekunder seperti NASA atau PVGIS.
4. Pembahasan dari aspek teknis meliputi jumlah komponen utama yang dibutuhkan untuk membangun PLTS.

5. Pembahasan dari aspek keekonomian berupa perhitungan biaya energi dan analisis kelayakan investasi pembangunan PLTS menggunakan analisa dari *software* PVSyst dan HOMER Pro.
6. Perangkat lunak yang digunakan untuk simulasi dan analisis adalah PVSyst dan HOMER Pro.
7. Penelitian ini bersifat simulatif dan studi literatur, sehingga tidak mencakup instalasi atau pengujian langsung di lapangan.

1.7 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan tugas akhir ini dibagi ke dalam dua bab agar pembahasan dapat tersampaikan secara terstruktur. Adapun pembagian setiap bab dijelaskan berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Pada bab ini berisi latar belakang masalah, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, ruang lingkup, batasan penelitian, serta sistematika penulisan. Bab ini juga mencakup landasan awal terhadap topik pembangkit tenaga listrik.

BAB II METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini berisi tentang waktu dan lokasi penelitian, pengumpulan data, metode analisis dengan bantuan perangkat lunak PVSyst dan HOMER Pro, langkah langkah penelitian, perancangan sistem PLTS, diagram alur penelitian, analisis ekonomi kelayakan investasi dan simulasi PVSyst dan HOMER Pro

BAB III HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi tentang hasil yang diperoleh berdasarkan analisis yang dilakukan dan pembahasan.

BAB IV KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisi tentang kesimpulan berdasarkan rumusan masalah yang ditentukan dan saran-saran untuk penelitian selanjutnya.

1.8 Tinjauan Pustaka

1.8.1 Potensi Energi Matahari

Energi matahari adalah energi yang sangat baik untuk dikembangkan di Indonesia ini. Hal tersebut dikarenakan Indonesia merupakan salah satu negara yang berada di garis khatulistiwa. Energi matahari yang dapat digunakan untuk semua daratan Indonesia dengan luas 2 juta km² yaitu sebesar 4,8 kWh/m² dalam setiap satu hari, setara dengan 112.000 GWp yang didistribusikan Keunggulan- keunggulan energi surya apabila dibandingkan dengan energi fosil karena energi surya mudah didapatkan sebab berasal dari matahari itu sendiri, ramah lingkungan sesuai dengan kondisi geografis yang bermacam-macam, pemasangan, pengoperasian, serta perawatannya tidak sulit serta energi listrik yang didapatkan dari energi surya bisa disimpan dalam baterai (Hasrul, 2021). Tabel 1 menunjukkan radiasi harian rata-rata pada beberapa lokasi di Indonesia.

Tabel 1 Radiasi harian rata-rata pada beberapa lokasi di Indonesia

Provinsi	Lokasi Pengukuran	Radiasi (kWh/m² /hari)
Riau	Dumai	4,71
Sumatera Selatan	Palembang	4,67
Bengkulu	Bengkulu	4,79
Kalimantan Barat	Pontianak	5,12
Kalimantan Selatan	Banjarmasin	5,07
Kalimantan Tengah	Palangkaraya	4,87
Gorontalo	Gorontalo	5,14
Sulawesi Selatan	Makasar	5,88
Bali	Denpasar	5,34

Sumber: (Afif dan Martin, 2022)

Sebagian besar wilayah Indonesia memiliki rata-rata jangka panjang intensitas cahaya matahari yang potensial untuk menghasilkan listrik setara lebih dari 1.600 kWh per meter persegi. Hal ini menunjukkan bahwa potensi pengembangan energi surya di Indonesia memang sedemikian besar, terutama di daerah Nusa Tenggara dan Jawa Timur. Khusus untuk daerah Nusa Tenggara, pembangunan PLTS dapat menjadi alternatif prioritas untuk mengatasi kekurangan pasokan listrik di daerah tersebut. Melihat begitu besarnya potensi pemanfaatan tenaga surya PLTS di Indonesia.

Daerah yang meliputi Sumatra hingga Kalimantan. Sumatra dapat dikatakan tidak rasional mengingat masih ada sumber energi setempat yang dapat dimanfaatkan seperti mini/mikrohidro dan panas bumi yang belum dimanfaatkan secara optimal. Saat ini, fasilitas listrik dari PLTS Kalimantan telah terpasang di sejumlah daerah terpencil di Nunukan, diantaranya Sebuk, Sembakung, Lumbis, Ogong, Krayan, Nunukan dan Bulungan.

Daerah di wilayah Jawa dan Bali penduduk yang tinggal di kota mencapai 50% lebih dari total populasi (BPS, 2005). Kelompok masyarakat urban ini memiliki karakteristik yang lebih baik dibandingkan dengan masyarakat pedesaan dalam

konteks pemanfaatan PLTS seperti daya beli, tingkat pendidikan, serta pemahaman tentang lingkungan dan penyelamatannya. PLTS Fotovoltaik dengan kapasitas terbesar di Jawa Timur dirancang oleh Perusahaan dengan dibantu oleh sebuah institusi kerjasama internasional Jerman, *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit* (GIZ) GmbH.

Wilayah Kota Makassar berdasarkan data yang ada pada HOMER pro International untuk pembangkitan energi di kota Makassar dan berdasarkan dari jenis modul tipe monokristal. Helios tipe mono-Si-6T-245W yang memiliki tingkat efisiensi yang tinggi untuk sistem pembangkitan 100 kW *Grid connected*. Hal ini didukung data intensitas cahaya rata-rata dalam setahun yakni 5,88 kWh/m²/d.

Saat ini, dari 82.190 desa di Indonesia ada 2519 desa belum teraliri listrik. Sebanyak 2.111 di Papua dan 262 di Papua Barat. Salah satu upaya percepatan melistriki desa belum berlistrik ini tentu dengan mengutamakan energi terbarukan seperti PLTS.

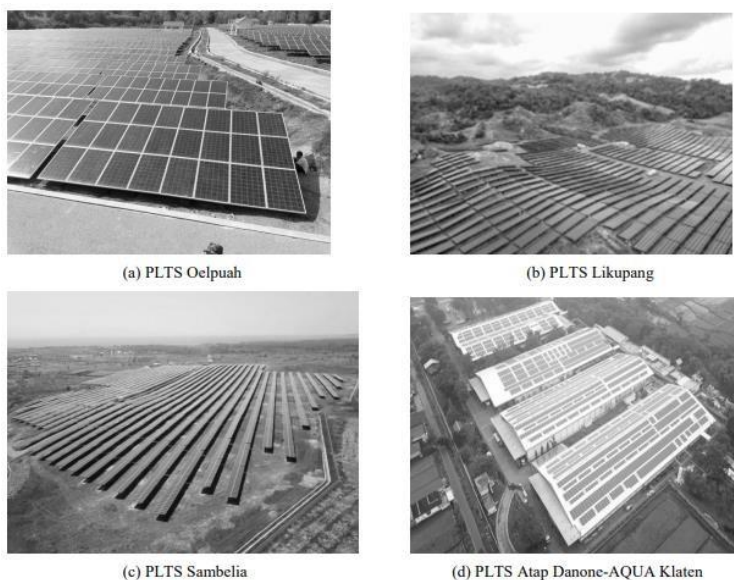
PLTS harus dibangun di wilayah dengan sinar matahari yang konstan sehingga Indonesia menjadi salah satu negara yang tepat untuk pengembangannya. Sampai saat ini, hampir seluruh sumber energi di Indonesia masih sangat bergantung pada batubara. Tanpa sadar, masih banyak dari kita yang ikut berkontribusi pada keberadaan gas rumah kaca. Dengan menggunakan tenaga surya, tujuan Indonesia untuk bebas batubara dan menjadi karbon netral bisa tercapai pada 2060 atau bahkan lebih dini. Dengan begitu pula, harapannya ada peluang besar bagi industri lokal untuk mengembangkan bisnis ke pabrikasi sel surya.

1.8.2 Pembangkit Listrik Tenaga Surya

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) pada dasarnya adalah pecatu daya (alat yang menyediakan daya), dan dapat dirancang untuk mencatu kebutuhan listrik yang kecil sampai dengan besar, baik secara mandiri, maupun dengan *hybrid* (dikombinasikan dengan sumber energi lain) baik dengan metode desentralisasi (satu rumah satu pembangkit) maupun dengan metode sentralisasi (listrik didistribusikan dengan jaringan kabel). Pada siang hari modul surya/panel *solar cell* menerima cahaya matahari yang kemudian diubah menjadi listrik melalui proses *photovoltaic*. Energi listrik yang dihasilkan oleh modul surya dapat langsung disalurkan ke beban atau disimpan dalam baterai sebelum digunakan ke beban. Dan arus searah DC (*direct current*) yang dihasilkan dari modul surya yang telah tersimpan dalam baterai sebelum digunakan ke beban terlebih dahulu (Usman, 2020).

Panel surya bekerja berdasarkan prinsip *photovoltaic*, yaitu dengan cara mengubah energi foton dari radiasi cahaya matahari yang diterimanya menjadi energi listrik. Silikon terdiri atas 2 lapisan didalamnya, yaitu lapisan n (-) dan lapisan p (+). Lapisan n adalah lapisan yang berada di atas permukaan panel surya dan berhubungan langsung dengan cahaya matahari, sedangkan lapisan p berada dibawah lapisan n yang dipisahkan oleh sebuah gerbang (*junction*). Gerbang ini akan terbuka saat ada cahaya matahari menyinari permukaan panel surya. Terbukanya

gerbang antar lapisan mengakibatkan elektron yang dihasilkan mengalir. Intensitas cahaya matahari sangatlah mempengaruhi terbukanya gerbang antar lapisan, semakin lebar gerbang antar lapisan terbuka karena intensitas cahaya matahari yang besar, maka semakin besar pula arus yang mengalir. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) memanfaatkan energi matahari untuk menjadi energi listrik melalui *photovoltaic module* yang termasuk dalam energi hijau sehingga menjadi suatu pembangkit yang terbarukan, lebih efisien efektif, handal dan dapat mensuplai kebutuhan energi listrik. PLTS merupakan salah satu sarana untuk memenuhi kebutuhan masyarakat akan listrik yang sangat ramah lingkungan. Mengingat Indonesia merupakan daerah tropis, maka sangatlah baik apabila PLTS dikembangkan dengan sungguh-sungguh (Gifson dkk., 2022).



Gambar 1 PLTS Terpasang
(Afif dan Martin, 2022)

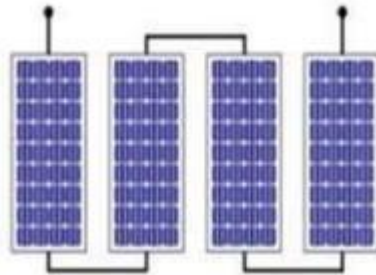
1.8.2.1 Rangkaian Seri Panel Surya

Penyusunan rangkaian seri pada panel surya akan meningkatkan tegangan tetapi arus konstan. Tegangan total yang dihasilkan adalah penjumlahan dari tegangan yang dihasilkan oleh modul ($V_{oc1} + V_{oc2}$), hal ini sesuai dengan hukum Kirchoff. Hubungan seri solar sel diperoleh dengan menghubungkan terminal positif (+) sel surya pertama dengan terminal negative (–) yang baru: positif (+) sel surya pertama dengan negative (–) yang baru.

$$V_{total} = V_1 + V_2 + V_3 \quad (1)$$

Dimana

- V_{total} : Tegangan keseluruhan
- V_1 : Tegangan panel 1
- V_2 : Tegangan panel 2
- V_3 : Tegangan panel 3



Gambar 2 Rangkaian Seri Panel Surya
(Sunardiyo dkk., 2022)

1.8.2.2 Rangkaian Paralel Panel Surya

Penyusunan rangkaian paralel pada sistem solar panel digunakan untuk meningkatkan nilai arus dengan tetap mempertahankan nilai tegangannya. Besar nilai arus pada rangkaian yaitu berikut:

$$I_{total} = I_1 + I_2 + I_3 \quad (2)$$

Dimana :

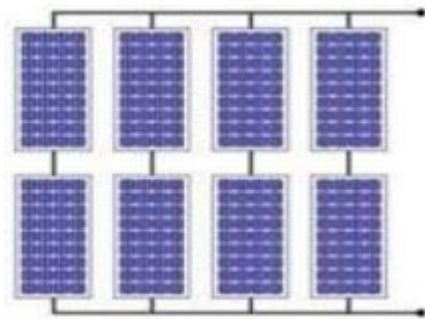
I_{total} : Arus keseluruhan

I_1 : Arus panel 1

I_2 : Arus panel 2

I_3 : Arus panel 3

Dengan tegangan nominal yang konstan.



Gambar 3 Rangkaian Paralel Panel Surya
(Sunardiyo dkk., 2022)

1.8.2.3 Rangkaian Seri Paralel Panel Surya

Rangkaian seri paralel merupakan gabungan dari rangkaian seri dan paralel atau juga di sebut rangkaian gabungan. Rangkaian gabungan di gunakan untuk menaikan nilai arus maupun tegangan. Untuk mengetahui besarnya daya yang dapat di bangkitkan pada sistem PLTS dapat di hitung dengan persamaan (Hayu & Siregar, 2018).

$$P_{out} = I_r \cdot A \cdot E_i \cdot E_p \quad (3)$$

Dimana

P_{out} : Daya keluaran
 I_r : Radiasi matahari ($W.m^2$)
 A : Luas daerah pemasanga panel surya
 E_i : Efisiensi inverter
 E_p : Efisiensi Panel

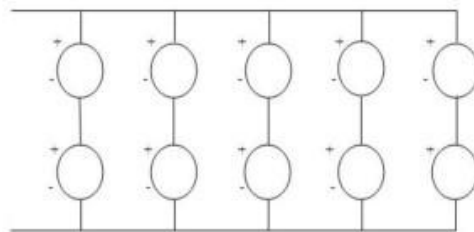
Selanjutnya untuk mengetahui jumlah panel surya yang akan di pasang di gunakan rumus :

$$Jumlah\ Panel\ Surya = \frac{P\ watt\ Peak}{P_{mpp}} \quad (4)$$

Dimana :

$P\ watt\ peak$: Daya keluaran sistem (Watt)

P_{mpp} : Daya maksimal keluaran panel surya (Watt Peak)

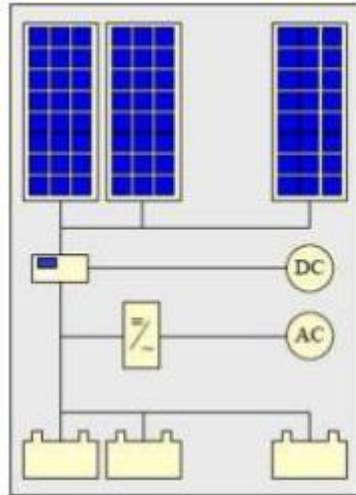


Gambar 4 Rangkaian Seri Paralel
(Sunardiyo dkk., 2021)

1.8.3 Jenis-jenis PLTS

1.8.3.1 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *Off-Grid*

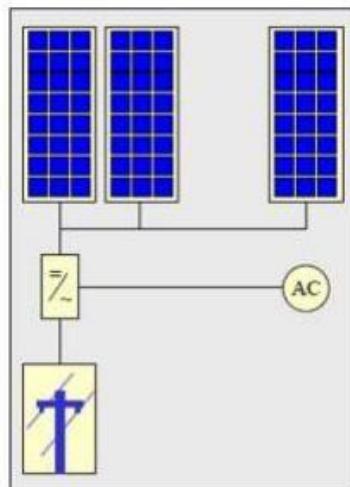
Sistem pembangkit listrik tenaga surya *off Grid* merupakan sistem PLTS yang *output* daya listriknya secara mandiri menyuplai listrik ke jaringan distribusi pelanggan atau tidak terhubung dengan jaringan listrik PLN. Sistem PLTS *off Grid* mengandalkan energi matahari satu-satunya sumber listrik sehingga aman dari polusi atau tidak mencemari udara. Sistem PLTS *Off-Grid* merupakan solusi terbaik dalam penyediaan energi listrik di daerah terpencil dengan memanfaatkan energi matahari yang dikonversi menjadi energi listrik untuk melayani kebutuhan listrik penduduk dengan sistem pengoperasian dan perawatan yang sangat mudah (Naim, 2020).



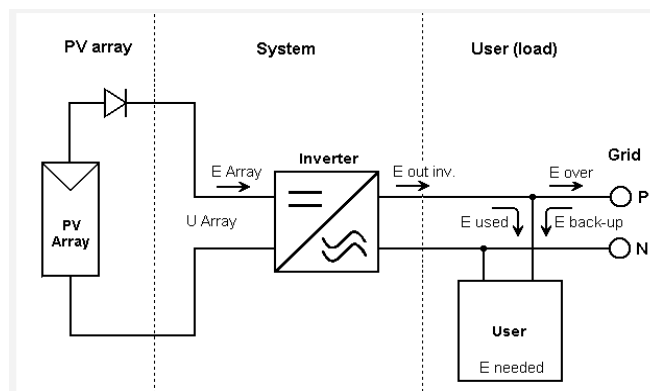
Gambar 5 Representasi Skematik Sistem *Off-Grid*
(Halim, 2022)

1.8.3.2 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *On-Grid*

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *On-Grid* adalah sistem *On-Grid* dimana sistem tersebut menghubungkan *output* PLTS dengan sumber listrik dari PLN. Sistem *On-Grid* dapat beroperasi tanpa baterai karena *output* listriknya disalurkan ke jaringan distribusi yang telah disuplai pembangkit lainnya misalnya PLN sehingga dapat mengurangi beban pembangkit lain yang terhubung pada jaringan yang sama (Aji., 2022).



Gambar 6 Representasi Skematik Sistem *On-grid*
(Halim, 2022)



Gambar 7 Diagram Blok PLTS On-grid
(Halim, 2022)

Sehingga perbedaan antara PLTS *On-Grid* dan *Off-Grid* yaitu berikut:

A. PLTS *On-Grid*

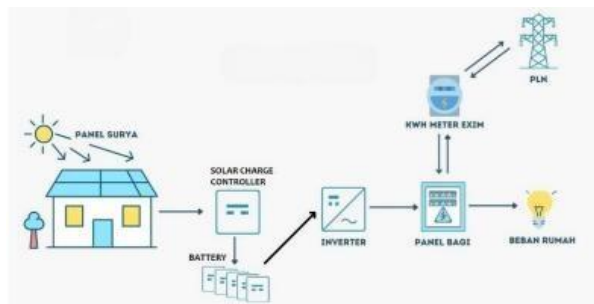
- Panel Surya Mendapat Pencahayaan Sehingga Menghasilkan Energi Listrik.
- Energi Listrik DC Dari panel Surya Diubah menjadi Listrik Gelombang Sinus seperti Listrik PLN Melalui *Inverter*.
- Hasil Listrik Gelombang Sinus yang di hasilkan Oleh *Inverter* langsung ikut masuk ke jaringan PLN Sehingga bisa mengurangi tagihan atau bahkan bisa ekspor hasil listrik ke PLN.
- PLN Juga menyediakan KWH Exim Agar kelebihan produksi listrik dari panel Surya bisa di ekspor dan dibeli oleh PLN.
- Jika Listrik PLN Mati maka PLTS juga ikut mati karena tidak menggunakan baterai.
- Sistem *On-Grid* ini termasuk sistem PLTS yang sederhana serta merupakan sistem yang efektif dalam segi biaya. Komponen utama dalam PLTS *On-Grid* adalah panel surya serta *inverter*. Sistem *On-Grid* dapat secara langsung mengimbangi tagihan listrik. Namun sistem ini memiliki kekurangan yakni jika terdapat mati listrik dari PLN maka hunian juga akan mengalami mati listrik, mengingat dalam pembangkitannya PLTS *On-Grid* bergantung dari listrik PLN untuk dapat menghasilkan listrik.

B. PLTS *Off-Grid*

- Panel Surya Mendapatkan Pencahayaan sehingga menghasilkan listrik DC.
- Listrik dari panel surya dikontrol dan dikendalikan oleh SCC (*Solar Charge Controller*) untuk diatur voltase dan amperanya agar bisa mengisi baterai.
- Listrik yang diolah oleh SCC masuk ke baterai.
- Baterai memberikan arus listrik ke alat *Inverter* untuk merubah listrik DC menjadi AC dan digunakan untuk peralatan rumah tangga.

1.8.3.3 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Hybrid

Sistem *hybrid* yang akan dirancang menggunakan prinsip kerja satu arah, yaitu dalam satu waktu tertentu beban hanya dipasok oleh salah satu pembangkit, ketika PLTS bekerja mensuplai listrik ke beban maka sambungan ke PLN dilepaskan dari beban (contoh keadaan pada pagi hari sampai sore hari). Begitu pun sebaliknya apabila listrik PLN sedang memberikan suplai listrik ke beban, maka PLTS dilepaskan dari beban (contoh keadaan pada malam hari). Ketika pembangkit yang sedang mensuplai listrik ke beban tiba-tiba mengalami trip, maka pembangkit yang lain akan segera menggantikannya secara otomatis melalui *switch* pengatur (Hajir, 2021).



Gambar 8 Sistem PLTS *Hybrid*
(Hajir, 2021)

1.8.4 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Kinerja Panel Surya

Adapun faktor-faktor yang mempengaruhi kinerja panel surya, berikut.

1.8.4.1 Radiasi Matahari

Radiasi memiliki pengaruh terhadap variasi arus dan tegangan. Terdapat korelasi antara variasi radiasi dan variasi arus. Tegangan pada rangkaian terbuka cenderung tidak mengalami perubahan drastis sehubungan dengan radiasi. Namun, terdapat peningkatan sedikit saat radiasi meningkat. Semakin tinggi radiasi, arus dan tegangan yang dihasilkan juga semakin besar. Salah satu faktor yang memengaruhi jumlah radiasi yang mencapai modul adalah adanya bayangan, seperti bayangan pohon, awan, bangunan, dan lain-lain (Hakim, 2020).

Intensitas penyinaran matahari merujuk pada jumlah energi yang diterima dari sinar matahari dalam bentuk radiasi pada lokasi dan waktu tertentu. Semakin tinggi intensitas penyinaran matahari, kinerja panel surya akan semakin baik. Intensitas penyinaran matahari yang tinggi menghasilkan radiasi matahari yang tinggi, meningkatkan potensi energi yang dapat dihasilkan oleh panel surya (Hakim, 2020).

1.8.4.2 Sudut Kemiringan

Sudut kemiringan memiliki dampak signifikan pada tingkat radiasi matahari yang diterima oleh permukaan modul surya. Untuk sudut kemiringan yang tetap, daya maksimum selama satu tahun dapat dicapai ketika sudut kemiringan modul surya

sama dengan lintang lokasi. Sistem pengaturan berfungsi untuk memberikan kontrol dan pengamanan dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), sehingga sistem pembangkit tersebut dapat beroperasi secara efisien dan optimal. Peralatan pengaturan pada sistem PLTS dapat dibuat secara manual, yaitu dengan selalu menempatkan modul surya menghadap ke arah matahari. Alternatifnya, pengaturan dapat dilakukan secara otomatis, terutama pada sistem yang banyak digunakan di daerah terpencil dengan bantuan rangkaian elektronik.

Namun, dari segi praktisitas dan kemudahan perawatan, direkomendasikan agar posisi pemasangan modul surya tetap dengan sudut kemiringan tertentu. Penentuan arah dan sudut kemiringan modul surya sebaiknya disesuaikan dengan letak geografis lokasi pemasangan. Hal ini penting untuk memastikan bahwa modul surya menghadap ke arah garis khatulistiwa, sehingga pemasangan modul surya ke arah khatulistiwa dimaksudkan agar modul surya mendapatkan penyinaran optimal. Modul surya yang dipasang di daerah khatulistiwa (lintang = 0°) dan diletakkan secara mendatar (tilt angle = 0°) akan menghasilkan energi maksimum (Hanif, dkk., 2012).

1.8.4.3 Orientasi Modul Surya

Orientasi modul surya merujuk pada arah atau sudut di mana panel surya diatur atau dipasang untuk menangkap sinar matahari dengan efisiensi maksimum. Pemilihan orientasi yang tepat dapat meningkatkan kinerja dan produksi energi dari modul surya. Untuk mendapatkan energi maksimum, disarankan menempatkan modul surya menghadap ke arah utara atau selatan. Meskipun menghadap ke arah timur atau barat juga memungkinkan untuk mendapatkan energi matahari, namun jumlah listrik yang dihasilkan kemungkinan akan lebih rendah. Selain itu, sudut peletakan modul surya sebaiknya tidak kurang dari 10 derajat atau melebihi 45° . Orientasi dari rangkaian modul surya ke arah matahari menjadi faktor krusial agar modul surya dapat menghasilkan energi secara maksimal. contoh, untuk lokasi yang terletak di belahan bumi utara (di atas garis khatulistiwa), sebaiknya modul surya diorientasikan ke selatan. Begitu pula, untuk lokasi yang terletak di belahan bumi selatan (di bawah garis khatulistiwa), modul surya diorientasikan ke utara (Hakim, 2020).

1.8.4.4 Temperatur

Kinerja sel surya dipengaruhi oleh suhu; semakin tinggi suhu sel, produksinya akan semakin rendah. Sel surya dapat mencapai suhu tinggi saat radiasi matahari mencapai titik puncaknya pada musim panas, khususnya sekitar tengah hari, di mana suhu dapat mencapai 70°C . Panas tersebut hilang melalui bagian belakang modul melalui konveksi alami. Oleh karena itu, sangat penting untuk menghindari pemasangan sel surya yang membatasi aliran udara di bawah modul. aturan sederhana, kenaikan suhu sebesar 10°C dapat menurunkan output daya yang efektif dari sistem modul surya sekitar 4% - 5% saat suhu tinggi terjadi pada sel-sel surya yang sedang beroperasi. Ketika suhu panel sel surya meningkat, tegangan yang

melintasi setiap sel akan menurun, dan dengan penurunan tegangan, daya juga akan menurun (Hakim, 2020).

1.8.4.5 Bayangan/Shading

Pemasangan modul surya juga mempertimbangkan bayangan yang menutupi permukaan modul surya. Lokasi terbaik adalah lokasi dengan kondisi yang terhindar dari objek penghalang pada modul surya yang dapat tertutupi oleh bayangan pepohonan, dedaunan yang jatuh, awan, bangunan tinggi maupun panel surya yang terpasang di dekatnya. Ketika modul tertutup oleh bayangan, maka sambungan P-N di dalam sel surya berhenti memproduksi energi dan menjadi beban pasif sehingga mengakibatkan penurunan kinerja. Sel ini berperilaku seperti sebuah 16 diode yang memblokir arus yang diproduksi oleh sel-sel lainnya yang terhubung seri. Selain itu juga dapat menyebabkan panas berlebih dan kerusakan pada modul (Hakim, 2020).

1.8.5 Komponen-Komponen PLTS

1.8.5.1 Panel Surya

Modul surya merupakan komponen PLTS yang tersusun dari beberapa sel surya yang dirangkai sedemikian rupa, baik dirangkai seri maupun paralel dengan maksud dapat menghasilkan daya listrik tertentu dan disusun pada satu bingkai (*frame*) dan diberikan lapisan pelindung. Pada siang hari modul surya/panel *solar cell* menerima cahaya matahari yang kemudian diubah menjadi listrik melalui proses *photovoltaic*. Energi listrik yang dihasilkan oleh modul surya dapat langsung disalurkan ke beban atau disimpan dalam baterai sebelum digunakan ke beban. Arus searah DC (*direct current*) yang dihasilkan dari modul surya disimpan dalam baterai sebelum digunakan ke beban terlebih dahulu (Usman, 2020).

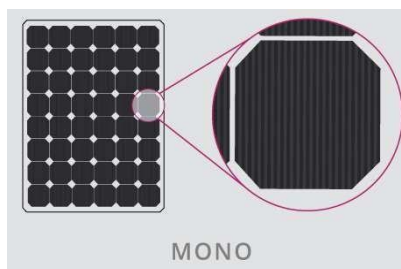
Modul surya berfungsi merubah cahaya matahari menjadi listrik arus searah (DC). Listrik tenaga matahari dibangkitkan oleh komponen yang disebut *solar cell*, komponen ini mengkonversi energi matahari menjadi energi listrik. *Solar cell* merupakan komponen vital yang terbuat dari bahan semi konduktor. Tenaga listrik dihasilkan oleh satu solar cell sangat kecil, maka beberapa solar cell harus digabung sehingga terbentuklah satuan komponen yang disebut modul. Pada aplikasinya karena tenaga listrik yang dihasilkan oleh modul ini masih kecil, maka dalam pemanfaatannya beberapa modul digabungkan sehingga terbentuklah apa yang sel surya atau *photovoltaic* adalah perangkat yang mengkonversi radiasi sinar matahari menjadi energi listrik. Efek *photovoltaic* ini ditemukan oleh Becquerel pada tahun 1839, dimana Becquerel mendeteksi adanya tegangan foto ketika sinar matahari mengenai elektroda pada larutan elektrolit. Pada tahun 1954 peneliti menemukan untuk pertama kali sel surya silikon berbasis p-n junction dengan efisiensi 6%. Sekarang ini, sel surya silikon mendominasi pasar sel surya dengan pangsa pasar sekitar 82% dan efisiensi lab dan komersil berturut-turut yaitu 24,7% dan 15%. Kepingan sel *photovoltaic* terdiri atas kristal silikon yang memiliki dua lapisan *silisium doped*, yaitu lapisan sel surya yang menghadap ke cahaya matahari memiliki *doped* negatif dengan lapisan fosfor, sementara lapisan di bawahnya terdiri dari *doped*

positif dengan lapisan borium. Antara kedua lapisan dibatasi oleh penghubung p-n. Jika pada permukaan sel photovoltaic terkena cahaya matahari maka pada sel bagian atas akan terbentuk muatan-muatan negatif yang bersatu pada lapisan fosfor. Sedangkan pada bagian bawah lapisan sel *photovoltaic* akan membentuk muatan positif pada lapisan borium. Kedua permukaan tersebut akan saling mengerucut, jika sel *photovoltaic* terkena sinar matahari. Sehingga pada kedua sisi sel *photovoltaic* akan menghasilkan beda potensial berupa tegangan listrik. Jika kedua sisnya dihubungkan dengan beban berupa lampu menyebabkan lampu akan menyala (Usman, 2020).

Panel surya dikelompokkan berdasarkan material sel surya yang menyusunnya. Terdapat perbedaan jenis-jenis panel surya yang dapat dimanfaatkan oleh masyarakat. Secara umum ada 3 jenis panel surya yang banyak digunakan di masyarakat yaitu:

1. Sel Surya Silikon Monokristal

Sel surya ini dibentuk dari bahan dasar monokristal. Merupakan panel yang paling efisien yang dihasilkan dengan teknologi terkini & menghasilkan daya listrik persatuan luas yang paling tinggi. Sel surya jenis ini dikenal juga sel-sel kristal tunggal. Sel monocrystalline yang berwarna hitam pekat terbuat dari bentuk silikon yang sangat murni sehingga menjadikannya sel surya paling efisien hingga 15% - 20% dibandingkan sel surya jenis lain. Selain itu, sel *monocrystalline* juga menjadi sel yang paling awet dari semua sel surya berbasis silikon. Namun, dengan mahalnnya harga silikon murni dan teknologi yang digunakan, harga jenis sel surya ini juga menjadi yang paling mahal di pasaran (Wibowo dkk., 2023).

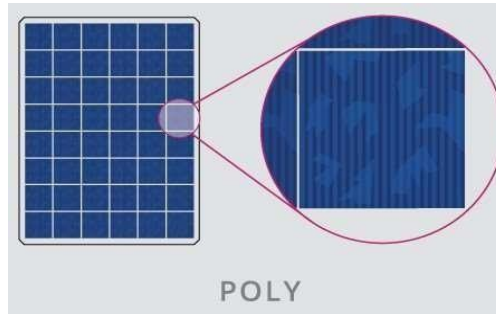


Gambar 9 Sel Monocrystalline
(Sunardiyo dkk., 2022)

2. Sel Surya Silikon Polykristal

Pembuatan sel surya silikon sumber arus konstan, tidaklah sesederhana pembuatan silikon untuk bahan semikonduktor. Secara kuantitatif sel surya polykristal menduduki tempat kedua. Efisiensinya terletak antara 10-13% lebih rendah dari sel monokristal. *Polycrystalline* menjadi alternatif yang lebih murah dibandingkan jenis *monocrystalline*. Hal ini dikarenakan proses pembuatannya yang lebih mudah yaitu dengan meleburkan atau mencairkan batang kristal *silicon* yang kemudian dituangkan dalam cetakan berbentuk persegi. Dengan kemurnian yang tidak sempurna jenis *monocrystalline*, sel surya yang dihasilkan dari jenis ini

tidak identic satu sama lain dan efisiensinya lebih rendah, sekitar 13%- 16%. Akan tetapi, jenis sel surya *polycrystalline* paling banyak dipakai saat ini mengingat harganya yang lebih murah (Wibowo dkk., 2023).



Gambar 10 Sel Polycrystalline
(Sunardiyo dkk., 2022)

3. Sel surya TFPV (*Thin Film Photovoltaic*).

Jenis sel surya ini dikenal juga dengan nama TFPV (*Thin Film Photovoltaic*). Sel surya *thin film* sangat tipis sehingga sangat ringan dan fleksibel. Sel surya jenis ini digolongkan menjadi tiga berdasarkan materialnya, yaitu Amorphous Silicon 1138. (a-Si) Solar Cells dengan efisiensi 6%-8%, Cadmium Telluride (CdTe) Solar Cells dengan efisiensi 9%-11%, dan Copper Indium Gallium Selenide (CIGS) Solar Cells dengan efisiensi paling tinggi sekitar 10%- 12% (Wibowo dkk., 2023).



Gambar 11 Solar Thin Film
(Sunardiyo dkk., 2022)

1.8.5.2 Solar Charge Controller (SCC)

Sollar charger controller rangkaian elektronika yang berfungsi untuk mengontrol arus DC yang akan disuntikan ke baterai dan mengambil dari baterai menuju beban. selain fungsi di atas memiliki fungsi lain yaitu pembatas arus agar tidak terjadi kelebihan pengisian baterai dan kelebihan tegangan yang akan disuntikkan dari panel surya. *Solar charge controller* adalah alat yang digunakan untuk mengontrol proses pengisian muatan listrik dari panel surya ke aki dan *inverter*. Terdapat setidaknya dua jenis solar controller yaitu yang menggunakan teknologi PWM (*pulse width modulation*) dan MPPT (*maximum power point tracking*). Solar controller PWM akan melakukan pengisian muatan listrik ke aki dengan arus yang besar ketika aki kosong, dan kemudian arus pengisian diturunkan secara bertahap ketika aki semakin penuh.

Teknologi ini memungkinkan aki akan terisi dalam kondisi yang benar-benar penuh tanpa menimbulkan 'stress' pada aki. Ketika aki penuh *solar controller* ini akan menjaga aki tetap penuh dengan tegangan float tertentu (Naim, 2020).



Gambar 12 *Solar Charger Controller (SCC)*
Sumber : (Digiware)

1.8.5.3 Inverter

Inverter adalah perangkat elektronika daya yang memiliki fungsi pengubah atau pengonversi tegangan dari tegangan DC ke Tegangan AC. Pada PLTS, *inverter* satu *phase* (L-N) biasanya digunakan untuk sistem dengan beban yang kecil sedangkan untuk inverter tiga *phase* (R-S-T) digunakan untuk sistem dengan beban yang besar maupun sistem yang terhubung dengan jaringan PLN (*grid-connected*). Agar gelombang yang dihasilkan berbentuk sinusoidal, teknik yang digunakan adalah *pulse width modulation* (PWM). Teknik PWM ini memungkinkan suatu pengaturan untuk menghasilkan frekuensi yang baik sesuai dengan nilai rms dari bentuk gelombang keluaran. Berdasarkan bentuk gelombang *inverter* dibagi menjadi empat yaitu *square sine wave inverter*, *modified sine wave inverter*, *pure sine wave inverter* dan *Grid tie inverter* (Silaban, dkk., 2021).



Gambar 13 Inverter
(Silaban, dkk., 2021)

1.8.6 Perhitungan PLTS

Sebelum dilakukan simulasi pada *Software* PVSyst dan HOMER pro, akan dilakukan perhitungan secara manual terkait jumlah komponen berdasarkan dengan jumlah beban harian. Adapun perhitungannya adalah:

1.8.6.1 Menghitung Luas Array

Dalam perencanaan pembangkit listrik tenaga surya, penting untuk mengetahui rencana luasan yang akan dibangunnya pembangkit listrik. Sebelum menentukan komponen lainnya, hal utama adalah menentukan luas area yang digunakan untuk mendapatkan penyusunan *array* yang tepat dan tidak memakan tempat yang berlebihan.

Efisiensi modul surya ditentukan berdasarkan spesifikasi pabrikan atau tipe modul surya yang ditentukan/diinginkan (yang telah ada dipasaran saat ini adalah modul surya dengan efisiensi 14-22%). Untuk mengetahui luas *array* dari modul surya dapat digunakan persamaan berikut (Hajar Noor, 2021):

$$Luas\ array = \frac{ET}{Gav \times \eta_{PV} \times FKT \times \eta_{out}} \quad (5)$$

Keterangan:

<i>Luas array</i>	: Luas permukaan <i>array</i> panel surya (m ²)
<i>ET</i>	: Total pemakaian energi (kWH/hari)
<i>Gav</i>	: Intensitas Radiasi Matahari (kWh/m ² /hari)
η_{PV}	: Efisiensi panel surya (%)
η_{out}	: Efisiensi keluaran sistem (%)
<i>FKT</i>	: Faktor koreksi temperatu (%)

pertimbangan luas area efektif yang dihasilkan dengan cara ini dapat dibandingkan dengan spesifikasi dimensi (ukuran) modul surya pabrikan, berdasarkan modul surya yang dipilih.

1.8.6.2 Menghitung Daya Keluaran dan Jumlah Panel Surya

Kapasitas daya dari panel dapat ditentukan berdasarkan beberapa faktor yang sudah ada, seperti rata-rata total kebutuhan energi, nilai intensitas radiasi matahari untuk setiap wilayah berbeda-beda, dimana dapat diperoleh melalui dua cara yaitu pengukuran langsung dan melalui data sekunder. Data sekunder diperoleh dari badan atau otoritas yang memiliki kewenangan untuk menerbitkan data iradiasi. Misalnya, NASA, Solargis maupun dari data Meteonorm (ICED, 2020).

Setelah memperoleh nilai luas *array* modul surya, nilai PSI di indonesia (1000W/m²), dan nilai efisiensi panel surya yang akan digunakan. Untuk mengetahui besar kapasitas daya maksimum pembangkit yang dapat dibangkitkan, digunakan persamaan berikut (Hajar Noor, 2021).

$$P\ wattpeak = Luas\ array \times PSI \times \eta_{PV} \quad (6)$$

Keterangan:

<i>P wattpeak</i>	: Daya yang akan dibangkitkan PLTS (Wp)
PSI	: Peak solar insulation (1000 W/m ²)

Kapasitas daya maksimal panel surya ditentukan berdasarkan spesifikasi pabrikan untuk tipe modul surya yang diinginkan/ditentukan. Untuk mengetahui

jumlah panel surya yang dibutuhkan agar dapat memasok daya maksimal yang dapat dibangkitkan dengan menggunakan persamaan berikut (Hajar Noor, 2021):

$$\text{Jumlah Panel} = \frac{P_{\text{wattpeak}}}{P_{\text{max}}} \quad (7)$$

Keterangan:

P_{max} : Kapasitas daya maksimal panel surya (W_p)

1.8.6.3 Menghitung Kebutuhan Solar Charge Controller (SCC)

Untuk menghitung kebutuhan solar charge controller, maka harus diketahui terlebih dahulu karakteristik dan spesifikasi dari panel surya yang ingin digunakan. Berikut rumus untuk menghitung kapasitas solar charge controller (Hajar Noor, 2021):

$$\text{Kapasitas SCC} = \frac{P_{\text{mpp}} \times \text{safety factor}}{V_{\text{mpp}}} \quad (8)$$

Keterangan:

P_{mpp} : Daya keluaran maksimum panel surya

V_{mpp} : Tegangan keluaran maksimum panel surya

Safety factor : Faktor keamanan (1,25 atau 125%)

1.8.6.4 Menghitung Kapasitas Inverter

Untuk menghitung kapasitas *inverter* yang akan digunakan, total kebutuhan maksimum dikali dengan 125% atau 1,25. *Inverter* bekerja pada kondisi normal, rata-rata maupun dalam kondisi daya puncak, maka dari itu perlunya *safety factor* pengaman jika terjadi beban puncak dan daya cadangan untuk memenuhi kebutuhan starting listrik.

Pertimbangan memilih inverter supaya sesuai dengan daya yang dibutuhkan dilakukan menggunakan persamaan berikut (Hajar Noor, 2021):

$$\text{Kapasitas Inverter} = P_{\text{mpp}} \times \text{safety factor} \quad (9)$$

Keterangan:

P_{mpp} : Daya keluaran maksimum panel surya

Safety factor : Faktor keamanan (1,25 atau 125%)

1.8.7 Analisis Ekonomi pada Sistem PLTS

Kelayakan investasi PLTS ditentukan berdasarkan hasil perhitungan *Payback Periode* (PP), *Net Present Value* (NPV), *Internal Rate of Return* (IRR), *Profitability Index* (PI) dan *Return of Investment* (ROI).

1.8.7.1 Period Pengembalian Modal

Periode pengembalian modal adalah lamanya waktu yang dibutuhkan untuk mengembalikan nilai investasi melalui penerimaan yang dihasilkan oleh proyek (investasi). Rumus dari periode pengembalian modal berikut (Fachrezy. Muhammad Dendy. 2022).

$$PP = \text{year before recovery} + \frac{\text{investment cost}}{NPV \text{ kumulatif}} - IA \quad (10)$$

Keterangan:

Year before recovery : Jumlah tahun sebelum tahun pembelian final

Investment Cost : Biaya Investasi Awal

NPV Kumulatif : Jumlah kas bersih

Kriteria pengambilan keputusan apakah usulan investasi layak atau layak ditolak adalah :

- Investasi dikatakan layak, jika periode pengembalian modal memiliki periode waktu lebih pendek dari umur proyek.
- Investasi dikatakan tidak layak, jika periode pengembalian modal memiliki periode waktu lebih panjang dari umur proyek.

1.8.7.2 Net Present Value (NPV)

Nilai bersih sekarang atau *Net Present Value* (NPV) adalah nilai seluruh aliran kas bersih yang dinilai sekarang atas dasar faktor diskon (*discount factor*). Rumusnya adalah (Fachrezy. Muhammad Dendy. 2022)

$$NPV = \sum_{t=1} \frac{NCF_t}{(1+i)^t} - IA \quad (11)$$

Dikatakan Layak atau tidak jika :

1. Investasi dikatakan layak, jika NPV bernilai positif (> 0).
2. Investasi dikatakan tidak layak, jika NPV bernilai negatif (< 0).

1.8.7.3 Internal Rate of Return (IRR)

Internal Rate of Return adalah besarnya suku bunga yang menyamakan nilai sekarang dari investasi dengan hasil bersih yang diharapkan selama usaha berjalan. Untuk skenario dua nilai NPV yang telah diketahui sebelumnya, IRR dapat dirumuskan berikut (Fachrezy. Muhammad Dendy. 2022).

$$IRR = \frac{NPV1}{NPV2 - NPV1} - (i2 - i1) \quad (12)$$

Keterangan :

NPV1 harus di atas 0 ($NPV1 > 0$)

NPV2 harus di bawah 0 ($NPV2 < 0$)

1.8.7.4 Profitability Index (PI)

Rumus perhitungan PI adalah berikut (Fachrezy. Muhammad Dendy. 2022).

$$PI = \frac{\text{Present Value of future cash flow}}{\text{ijitiaal cost}} \quad (13)$$

Kriteria pengambilan keputusan apakah usulan investasi layak diterima atau layak ditolak adalah berikut :

- a. Investasi dikatakan layak, jika *Profitability Index* (PI) bernilai lebih besar dari satu (>1).
- b. Investasi dikatakan tidak layak, jika *Profitability Index* (PI) bernilai lebih kecil dari satu (< 1).

1.8.7.5 *Return on Investment* (ROI)

ROI (*Return on Investment*) adalah laba atas investasi atau tingkat pengembalian investasi yang nantinya akan dihasilkan dalam bentuk persentase. Suatu proyek dikatakan layak apabila nilai ROI positif. ROI didefinisikan dengan (Salman, Rudi. 2013).

$$ROI = \frac{\text{Net benefit at the end of lifetime}}{\text{Total Investment}} \times 100\% \quad (14)$$

1.8.8 *Software HOMER Pro*

HOMER merupakan sebuah *software* yang di buat dan dikembangkan di Amerika Serikat oleh perusahaan *The National Renewable Energi Laboratory* (NREL) dengan tujuan untuk mengoptimasi sistem pembangkit listrik, *output* yang tersedia dalam *software* HOMER yaitu berupa *lifecycle cost*, estimasi kapasitas sistem, dan emisi gas rumah kaca. HOMER dapat membuat kronologi yang detail tentang optimasi suatu model yang mudah digunakan sesuai dengan proyek yang akan dibuat. Dalam pengerjaan proyek kecil HOMER dapat memberikan 2 faktor untuk hasil simulasi yaitu dalam segi teknis dan segi ekonomi. Untuk proyek yang lebih besar HOMER dapat menghasilkan *output* berupa biaya dan kelayakan untuk perangkat keras yang lebih rinci (Haryanto, Bobby, 2018).

1.8.9 *Software PVSyst*

PVSyst adalah paket perangkat lunak PC untuk studi, ukuran dan analisis data dari sistem PV lengkap. Ini berkaitan dengan sistem PV *gridconnected*, berdiri sendiri (*Stand Alone*), memompa (*pumping*) dan DC-*grid* (untuk angkutan umum), dan termasuk data meteo dan PV sistem komponen database, serta *tool* lain. Perangkat lunak ini ditujukan untuk kebutuhan arsitek, insinyur, peneliti. Hal ini juga sangat membantu untuk pelatihan pendidikan). Langkah-langkah untuk melakukan simulasi PVSyst untuk mode *Stand Alone* adalah terlebih dahulu tentukan lokasi penelitian untuk mengetahui nilai iradiasi matahari, dengan mencari lokasi melalui titik koordinat (latitude dan longitude) di menu Database. Pada menu Database ini juga bisa untuk memasukkan data-data komponen yang belum ada di perangkat lunak ini. (Fachrezy. Muhammad Dendy.2022)

1.8.10 State of The Art

Pada bagian State of The Art ini ditampilkan beberapa penelitian terdahulu yang dijadikan bahan acuan penulis dalam melaksanakan penelitian. Tabel 2 memperlihatkan tabel State of The Art.

Tabel 2 State Of The Art

No	Penulis	Judul Penelitian	Metode yang Digunakan	Hasil yang Dicapai	Perbedaan dengan Penelitian yang Diajukan
1	Ali et al. (2023)	Optimal Sizing and Assessment of Standalone Photovoltaic Systems for Community Health Centers in Mali	Simulasi PVsyst, analisis teknis dan ekonomi (LCOE, Payback Period)	PLTS optimal mampu memenuhi kebutuhan energi pusat kesehatan dengan biaya lebih rendah	Tidak membandingkan skenario <i>hybrid</i> dan <i>On-Grid</i> serta tanpa proyeksi beban
2	Dwi Nanda et al. (2024)	Planning and Analysis of Integrated <i>On-Grid</i> Solar Power Plant using PVsyst <i>Software</i> at the Krejengan Health Center	Simulasi teknis PLTS <i>On-Grid</i> menggunakan PVsyst	PLTS mampu menurunkan konsumsi listrik PLN pada puskesmas	Hanya satu skenario dan tanpa optimasi ekonomi
3	Alfiandito et al. (2025)	Optimization of Rooftop Solar Power Plant Design at the BAPENDA Building	Simulasi PLTS atap menggunakan PVsyst	Meningkatkan efisiensi pemanfaatan energi surya gedung	Tidak menggunakan HOMER dan tanpa proyeksi beban
4	Nugroho & Priyono (2025)	Optimization of <i>On-Grid</i> Rooftop PV Energy Utilization with EV Charging Stations	Pemodelan dan optimasi sistem menggunakan HOMER	Konfigurasi sistem optimal secara ekonomi	Tidak membahas fasilitas kesehatan dan tanpa simulasi PVsyst
5	Nurdiana et al. (2025)	Studi Potensi Energi Terbarukan dengan Solar Rooftop <i>On-Grid</i> pada Gedung BSC	Analisis potensi PLTS atap menggunakan PVsyst	PLTS atap berpotensi memenuhi kebutuhan energi gedung	Hanya studi potensi tanpa optimasi dan proyeksi beban

BAB II

METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan mulai pada bulan Agustus 2025 hingga Desember 2025. Penelitian ini dilakukan di Puskesmas Bunaken, Kepulauan Bunaken, Kota Manado, Sulawesi Utara dan pengolahan data akan dilanjutkan yang bertempat di *Power and Energy Research Group*, Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin, Jalan Poros Malino KM.6, Bontomarannu, Gowa, Sulawesi Selatan.

2.2 Alat dan Bahan

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah satu unit laptop dengan *software* HOMER Pro dan PVSyst, Microsoft Excel, Global Solar Atlas, Google Earth atau GIS Tools.

2.3 Data yang diperlukan

Data yang diperlukan untuk kepentingan penelitian diantaranya:

1. Kondisi Geografi dan Demografi Puskesmas Bunaken.
2. Data teknis pembangkit eksisting.
3. Data Beban Listrik Puskesmas Bunaken.
4. Total daya beban alat listrik yang akan disuplai oleh pembangkit.
5. Data intensitas cahaya matahari.
6. Durasi pemakaian perangkat listrik.
7. Daya output dari pembangkit listrik tenaga surya.
8. Optimasi Pembangkit Listrik Hibrida.

2.4 Prosedur Penelitian

Adapun langkah-langkah dalam penelitian ini secara umum meliputi:

1. Studi literatur dengan mengkaji teori dan penelitian terdahulu terkait sistem PLTS, serta penggunaan *software* HOMER Pro dan PVSyst untuk analisis energi.
2. Pengumpulan data teknis PLTS, data beban listrik, data iklim dan data ekonomi dari sumber relevan seperti *Global Solar Atlas*, PLN dan pihak Puskesmas.
3. Simulasi teknis dan ekonomi menggunakan HOMER Pro dan PVSyst.
4. Menganalisis hasil simulasi untuk setiap kombinasi pembangkit dan pertumbuhan beban, kemudian membandingkan hasilnya untuk menentukan konfigurasi paling optimal secara teknis dan ekonomis.
5. Menarik kesimpulan dari hasil analisis dan memberikan rekomendasi sistem pembangkit terbaik untuk kondisi eksisting dan masa depan Puskesmas Bunaken.

2.5 Metode Pengambilan Data

Metode pengambilan data yang dilakukan dalam penelitian ini meliputi:

1. Observasi lapangan untuk mendapatkan data kondisi eksisting sistem PLTS dan konsumsi Listrik di Puskesmas Bunaken.
2. Studi dokumentasi dengan mengumpulkan data sekunder dari instansi terkait seperti PLN dan Puskesmas.
3. Studi Literatur dan basis data daring seperti Global Solar Atlas, HOMER Pro, PVSyst dan referensi teknis mengenai komponen komponen PLTS dan baterai.

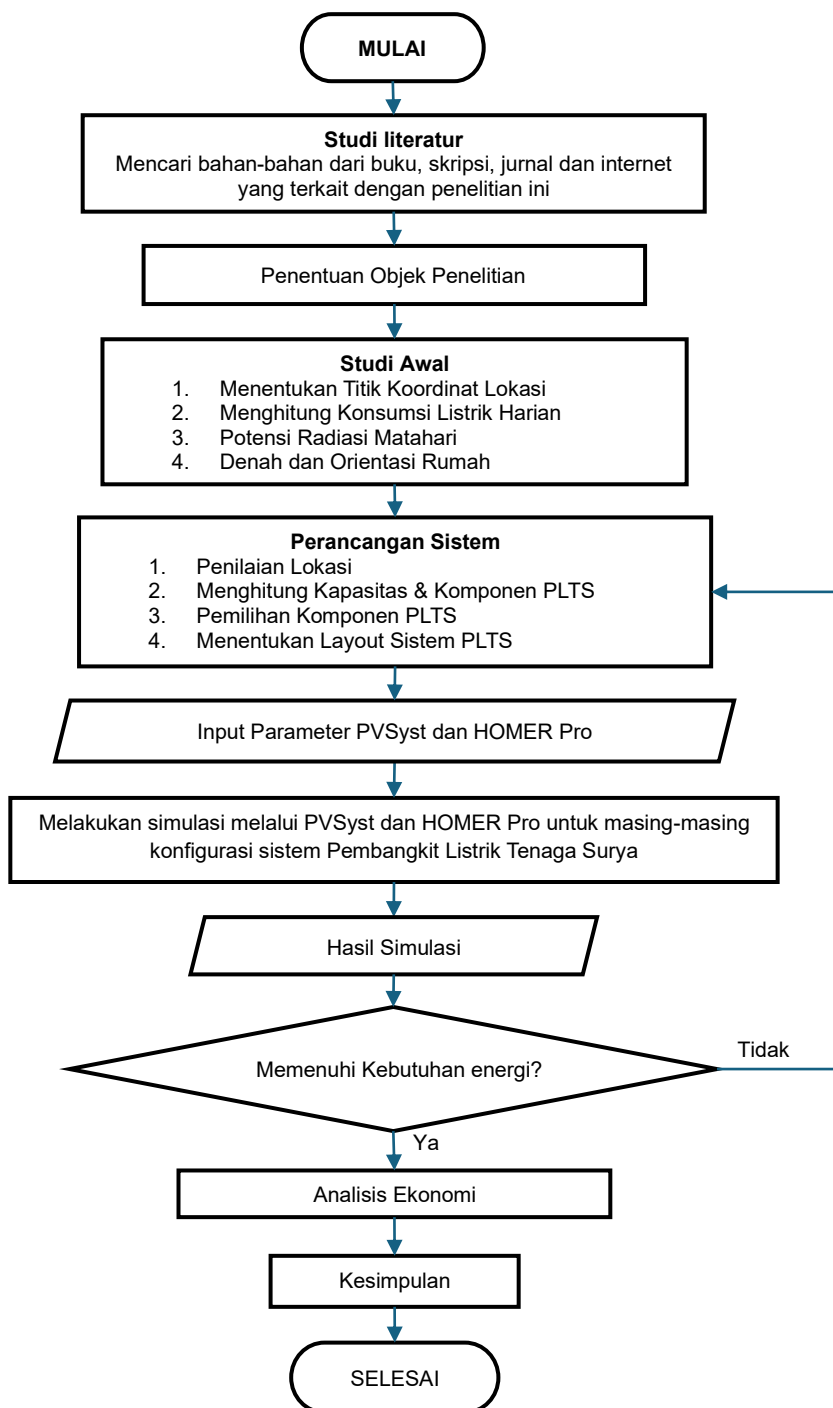
2.6 Metode Analisis Data

Metode analisis data dalam penelitian ini terbagi menjadi dua bagian, yaitu:

1. Analisis teknis meliputi menghitung total kebutuhan energi Listrik berdasarkan beban eksisting dan proyeksi pertumbuhan beban, menentukan kapasitas optimal PLTS, kapasitas baterai dan kebutuhan daya PLN.
2. Analisis ekonomis meliputi menghitung biaya investasi, biaya operasi dan biaya energi, menggunakan indikator ekonomi HOMER Pro dan PVSyst.

2.7 Diagram Alir Penelitian

Adapun alur pelaksanaan penelitian ini dapat dilihat pada diagram alir berikut, yang menggambarkan tahapan penelitian secara sistematis mulai dari pengumpulan data hingga penarikan kesimpulan yang ditampilkan pada Gambar 14.



Gambar 14 Diagram Alir Penelitian

Gambar 14 menggambarkan tahapan sistematis dalam melakukan studi optimasi perencanaan PLTS atap di Puskesmas Bunaken, dimulai dari studi literatur sebagai dasar teori, penentuan objek penelitian, serta pengumpulan data awal seperti koordinat lokasi, konsumsi energi listrik harian, potensi radiasi matahari, dan denah bangunan. Selanjutnya dilakukan perancangan sistem meliputi penilaian lokasi, perhitungan kapasitas dan pemilihan komponen, serta penentuan layout, kemudian seluruh parameter dimasukkan ke dalam software PVsyst dan HOMER Pro untuk dilakukan simulasi berbagai konfigurasi sistem. Hasil simulasi dianalisis untuk memastikan sistem mampu memenuhi kebutuhan energi, dan apabila belum terpenuhi maka dilakukan perbaikan desain dan simulasi ulang. Jika telah memenuhi kebutuhan, penelitian dilanjutkan dengan analisis ekonomi untuk menilai kelayakan finansial sebelum akhirnya ditarik kesimpulan mengenai konfigurasi sistem PLTS atap yang optimal secara teknis dan ekonomis.