

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Energi Sinar Matahari.

Energi primer yang terbesar didalam gugusan tatasurya terdapat di matahari, dimana energinya sudah dipancarkan sejak jutaan tahun lalu hingga ke jutaan tahun mendatang. Pemanfaatan panasnya sudah lama dirasakan oleh manusia, dalam zaman industri energi sinar matahari telah banyak dipelajari untuk dimanfaatkan pada teknologi-teknologi yang semakin maju untuk membangkitkan listrik arus searah (DC).

Energi sinar matahari berasal dari energi fusi dari atom-atom pembentuk matahari, pada saat terjadi reaksi fusi atau ledakan matahari akan dihasilkan energi cahaya foton yang dipancarkan kesegala arah dalam tata surya dan sebagian kecil akan menuju bumi. Di dalam *Solar Energy Engineering Processes and Systems* (Kalogirou, 2009), di bumi kita mendapatkan energi sinar matahari tampak yang dipancarkan dalam bentuk gelombang dengan panjang gelombang $0,38 \times 10^{-6}$ sampai $0,7 \times 10^{-6}$ meter.

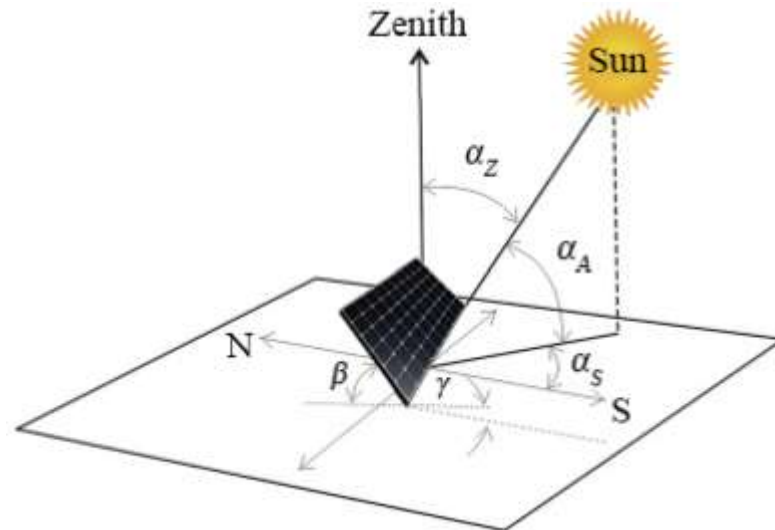
$$P_{in} = E \times A \quad (2.1)$$

P_{in} = Daya yang diterima (W)

E = Iradiasi matahari (W/m^2)

A = Luas permukaan modul PV (m^2)

Posisi sudut matahari akan selalu berubah sesuai pergerakan matahari sepanjang waktu membentuk bidang elips disekitar garis khatulistiwa tempat diatas permukaan bumi dan sinar matahari tidak dapat diterima pada saat malam (Duffett-Smith & Zwart, n.d.). Energi sinar matahari yang diterima dipermukaan bumi akan dipengaruhi oleh kondisi cuaca terang atau berawan, waktu, lokasi tempat terdapat bayangan benda lain pada modul PV dan sudut datang dari sinar matahari.



Gambar 2. 1 Posisi geometri modul *PV*

Keterangan gambar :

Zenith =	tegak lurus dengan bumi	N =	kutub utara
S =	kutub selatan	α_z =	sudut antara zenith dengan sinar datang matahari
α_A =	sudut antara permukaan bumi dengan sinar datang matahari	α_s =	sudut antara kutub Selatan dengan posisi matahari
β =	sudut modul <i>PV</i> terhadap permukaan bumi	γ =	sudut modul <i>PV</i> terhadap kutub bumi

Kondisi cuaca di Kota Makassar jika terjadi hujan dan berawan juga berpengaruh pada performa modul *PV*, dengan suhu udara 22°C - 35,5°C, kelembaban udara 76,85 % dan kecepatan angin 4,08 knots mempengaruhi pendinginan permukaan modul *PV* dan kemampuan kerja dari modul *PV* pada PLTS *Rooftop* yang dimanfaatkan (Badan Pusat Statistik Kota Makassar, 2024).

Diperlukan informasi data kordinat geografi dimana letak PLTS *Rooftop* berada 9 meter diatas bangunan, juga tingginya lokasi dan tidak ada bayangan dari bangunan atau lainn disekitarnya. Hal ini akan memudahkan suatu saat jika akan dibandingkan suatu lokasi dengan lokasi lainnya untuk melihat potensi yang dapat dihasilkan dan juga untuk menghitung keuntungan yang mungkin dapat diperoleh dimasa yang akan datang.

Di dalam *User Manual For PV*SOL Ver.2.4*(Valentin, 2004), merupakan salah satu program komputer sudah dikembangkan untuk memudahkan dalam melakukan simulasi perhitungan, analisa dan pengambilan keputusan yang dibutuhkan dalam pemanfaatan PLTS.

Dalam penelitian ini menggunakan program *PVSyst* untuk mendesain pemanfaatan PLTS *Rooftop*, pemilihan material dan perhitungan ekonomi tekniknya dengan menggunakan program *Microsoft Exel* untuk menentukan keputusan untuk melakukan infestasi pemanfaatan PLTS *Rooftop*.

2.2 Modul *Photovoltaic*

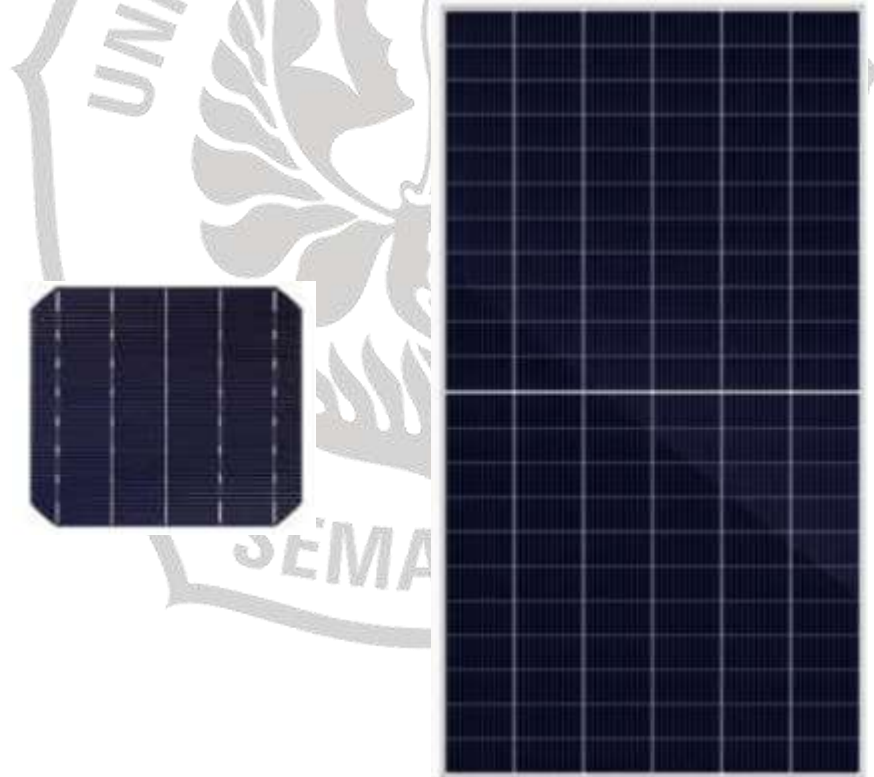
Unit peralatan yang mengubah energi foton sinar matahari menjadi beda potensial tegangan listrik arus searah (DC) disebut solar sel atau module *photovoltaic* (modul *PV*). Di dalam Panduan Pengoperasian Dan Pemeliharaan PLTS *Off-Grid* disebutkan pengertian Modul *PV* berdasarkan SNI 8395:2017 ialah beberapa sel surya yang digabungkan menjadi perangkat modul yang dapat mengubah energi matahari menjadi energi listrik arus searah(Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2017). Secara umum sambungan bahan semi konduktor *Photo Voltage* atau *PV* adalah lapisan semikonduktor tipe P dan tipe N yang di iris tipis kemudian ditempelkan penghantar listrik pada masing-masing permukaan. Proses pembuatan modul *PV* dapat dibuat dalam bentuk tipe kristal *monochrome* dan tipe kristal *polychrome*.



Gambar 2. 2 Susunan Lapisan Modul *PV*

2.2.1 Modul *PV* Mono-Crystalline

Modul surya *monocrystalline* diproduksi menggunakan metode Czochralski, sebuah proses kristalisasi silikon murni yang menghasilkan struktur kisi sempurna dengan tingkat kemurnian sangat tinggi. Karakteristik utama dari struktur ini adalah rendahnya hambatan internal dan energi batas butir (*grain boundary energy*), yang berkontribusi pada efisiensi konversi energi yang unggul, yakni berkisar antara 18% hingga 22%(Xu & Mou, 2020). Secara estetika, modul ini memiliki tampilan yang seragam dengan warna gelap yang konsisten, sehingga sering dianggap lebih estetik untuk instalasi di atap bangunan. Walaupun harga per watt modul ini cenderung lebih mahal dibandingkan tipe lainnya, performanya yang tinggi dalam berbagai kondisi cahaya dan efisiensinya dalam penggunaan lahan menjadikannya solusi ekonomis untuk proyek dengan keterbatasan ruang. Gambar 2.3 menunjukkan contoh modul berbahan *Mono-Crystalline*.



Gambar 2. 3 Modul *PV* Mono-Crystalline

2.2.2 Modul *PV* Poly-Crystalline

Modul *polycrystalline* dibuat melalui proses pengecoran ingot, di mana silikon dilelehkan dan dibentuk dalam wadah sebelum dipotong menjadi wafer, sebuah proses yang secara teknis lebih sederhana dan efisien dari segi waktu produksi dibandingkan tipe *monocrystalline*. Efisiensi konversi daya modul ini umumnya berada pada rentang 13% hingga 18%, yang berarti memerlukan luas area pemasangan yang sedikit lebih besar untuk menghasilkan kapasitas listrik yang sama dengan modul *monocrystalline* (Xu & Mou, 2020). Dari sisi ekonomi, proses manufaktur yang lebih ringkas membuat biaya produksi modul ini menjadi lebih rendah, sehingga harga jual di pasaran lebih ekonomis. Fleksibilitas harga tersebut menjadikan teknologi *polycrystalline* sebagai pilihan utama bagi pengguna yang memprioritaskan anggaran investasi awal dalam membangun sistem *fotovoltaik* skala besar atau sistem atap yang memiliki ruang tersedia cukup luas. Gambar 2.4 menunjukkan modul berbahan *Poly-Crystalline*.



Gambar 2. 4 Modul *PV* Poly-Crystalline

2.2.3 Estimasi Kapasitas Terpasang Modul PV

Dalam perencanaan sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), salah satu tahapan awal yang penting dilakukan adalah mengestimasi kapasitas terpasang (*installed capacity*) yang dapat dibangun pada area tersedia. Estimasi ini diperlukan untuk mengetahui potensi daya listrik yang dapat dihasilkan oleh sistem PV berdasarkan luas area pemasangan, khususnya pada aplikasi PLTS atap (*rooftop*) maupun PLTS *ground-mounted*. Besarnya kapasitas terpasang dipengaruhi oleh luas efektif area pemasangan, intensitas radiasi matahari yang diterima, serta efisiensi konversi energi dari modul *PV* yang digunakan.

Pada implementasinya, tidak seluruh luas area dapat dimanfaatkan sepenuhnya untuk pemasangan modul *PV*. Terdapat beberapa faktor pembatas seperti keberadaan struktur bangunan, area terbuka, ruang akses pemeliharaan, kemiringan permukaan, orientasi modul, serta potensi bayangan (*shading*) dari objek di sekitar lokasi pemasangan. Oleh karena itu, yang digunakan dalam perhitungan bukanlah luas total area, melainkan luas area efektif pemasangan modul *PV* yang benar-benar dapat dimanfaatkan.

Secara matematis, estimasi daya puncak (*watt peak*) sistem *PV* dapat dihitung berdasarkan hubungan antara luas permukaan modul, intensitas radiasi matahari standar, dan efisiensi modul *PV* sebagai berikut:

$$PV_{watt\ peak} = PV_{area} \times PSI \times \eta_{PV} \quad (2.2)$$

$PV_{watt\ peak}$ = Daya tertinggi

PV_{area} = Luas permukaan modul *PV*

PSI = Psi

η_{PV} = Efisiensi modul *PV*

Persamaan tersebut memberikan gambaran awal mengenai potensi kapasitas terpasang yang dapat dicapai pada suatu area tertentu, sehingga dapat digunakan sebagai dasar dalam analisis kelayakan teknis dan perencanaan kapasitas sistem PLTS.

2.3 Modul Kontrol

Di dalam Panduan Pengoperasian Dan Pemeliharaan PLTS *Off-Grid*, modul kontrol berdasarkan SNI 8395:2017 adalah merupakan perangkat keras yang berfungsi sebagai peralatan pengaturan pengisian dan pengeluaran arus listrik pada baterai. Pada sebuah sistim PLTS pada umumnya diperlukan beberapa pengontrol yang disesuaikan dengan system yang direncanakan (Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2017).

Beberapa tipe peralatan kontrol SCC yang umum dipasaran yang dapat digunakan pada pemanfaatan modul *PV*, seperti berikut :

- a. Kontrol pengisian baterai.
- b. Inverter *DC/AC*.

2.4 Inverter

Unit peralatan listrik yang mengubah arus listrik searah menjadi arus listrik bolak-balik disebut *inverter*. Peralatan inverter adalah peralatan yang terdiri dari beberapa jenis rangkaian elektronika untuk membentuk satu kesatuan unit mengubah arah arus listrik *DC* menjadi arus listrik *AC*.

Di dalam Panduan Pengoperasian Dan Perawatan PLTS *Off-Grid* (ESDM, 2017) disebutkan pengertian Inverter berdasarkan SNI 8395:2017 adalah suatu peralatan listrik yang berfungsi untuk mengubah arus searah (*DC*) menjadi arus bolak-balik (*AC*). Dengan menggunakan inverter maka beban-beban listrik *AC* pada umumnya di sebuah rumah dapat di operasikan seperti saat menggunakan listrik dari PT. PLN.



Gambar 2. 5 Inverter

2.5 Kontrol Beban Listrik

Peralatan kontrol yang akan digunakan untuk keamanan pada sebuah rangkaian listrik akan disesuaikan dengan kebutuhan rangkaian arus listriknya, dimana akan ditentukan bagian-bagian yang akan berpengaruh untuk dikontrol dan juga sebagai pengatur rangkaian dalam sistim rangkaian beban tersebut sesuai dengan data yang akan di analisa. Kontrol ini memastikan PLTS *Rooftop* hanya bekerja atau terbebani saat sumber matahari tersedia pada siang hari dalam beberapa jam dan menggunakan energi listrik dari PLN saat pagi, sore dan malam hari.

Beberapa peralatan kontrol yang dapat digunakan dalam membantu pengaturan pemakaian beban disesuaikan dengan kebutuhan, diantaranya:

2.5.1 Saklar Pemindah Otomatis (*Automatic Transfer Switch*)

Automatic Transfer Switch (ATS) merupakan perangkat elektromekanis yang berfungsi untuk melakukan pengalihan beban secara otomatis antara dua sumber

catudaya, dalam hal ini PLTS *Rooftop* dan jaringan utilitas (PLN), guna menjamin kontinuitas pasokan energi. Perangkat ini bekerja dengan memonitor parameter kelistrikan, seperti tegangan dan status kapasitas baterai (*State of Charge*), untuk kemudian memicu perpindahan sumber daya secara instan ketika kondisi daya dari PLTS tidak mencukupi. Dalam operasionalnya, *ATS* dirancang untuk memprioritaskan PLTS sebagai sumber utama dan mengalihkan ke PLN sebagai sumber cadangan guna menjaga stabilitas beban.

Dari sisi teknis, *ATS* yang handal harus memenuhi standar keselamatan internasional untuk memastikan perlindungan terhadap perangkat dan pengguna. Standar tersebut di antaranya adalah UL 1008 (*Standard for Transfer Switch Equipment*) untuk pengujian konstruksi, serta standar IEEE terkait distribusi daya rendah dalam sistem industrial dan komersial. Selain itu, integrasi *ATS* dalam sistem fotovoltaiik wajib menerapkan fitur anti-islanding untuk memutus koneksi dari jaringan utilitas saat terjadi gangguan pada grid, sehingga melindungi personel teknisi yang bekerja pada jaringan PLN. Dengan waktu perpindahan (*switching delay*) yang sangat cepat, umumnya dalam kisaran milidetik, *ATS* memastikan peralihan sumber energi berlangsung mulus tanpa menyebabkan gangguan yang signifikan pada beban listrik yang terhubung (Teodorescu et al., 2011a).



Gambar 2. 6 *Automatic Transfer Switch (ATS)*

2.5.2 Saklar Waktu

Saklar waktu atau *timer switch* merupakan perangkat kontrol otomatis yang dirancang untuk menyambung dan memutus aliran listrik berdasarkan jadwal waktu yang telah diprogram sebelumnya (Usman et al., 2023). Dalam sistem PLTS *Rooftop*, timer ini berfungsi mengaktifkan koneksi antara modul surya, inverter, dan beban rumah tinggal pada pagi hari (misalnya pukul 06:00) ketika intensitas cahaya matahari mencapai level optimal, kemudian memutuskan koneksi secara otomatis pada sore hari (misalnya pukul 18:00) untuk mengoptimalkan efisiensi energi dan mencegah pemborosan daya di hari dan memutus arus listriknya saat sore hari.



Gambar 2. 7 Saklar Waktu

Dalam sistem kontrol PLTS *Rooftop*, ATS dan timer memiliki fungsi yang berbeda namun saling melengkapi. ATS berfungsi sebagai perangkat pemindah sumber energi listrik secara otomatis antara PLTS *Rooftop* dan jaringan PLN berdasarkan kondisi ketersediaan suplai listrik, sehingga kontinuitas pelayanan beban dapat tetap terjaga (Teodorescu et al., 2011b). Sementara itu, timer berfungsi sebagai perangkat pengatur waktu operasi sistem yang bekerja berdasarkan jadwal tertentu,

misalnya mengaktifkan pemanfaatan energi PLTS pada periode siang hari dan mengalihkan suplai ke jaringan PLN pada sore atau malam hari (Asni Tafrikhatin et al., 2022). Dengan kombinasi tersebut, ATS berperan dalam menjaga keandalan perpindahan sumber listrik, sedangkan timer berperan dalam mengatur periode operasi sistem agar sesuai dengan waktu ketersediaan radiasi matahari. Perbedaan fungsi ini menjadi dasar penggunaan keduanya dalam penelitian, karena sistem PLTS *Rooftop* yang dirancang membutuhkan kontrol sumber energi sekaligus pengaturan waktu operasi beban.

2.5.3 Kontaktor

Kontaktor merupakan saklar elektromagnetik berdaya tinggi yang dirancang khusus untuk menyambung dan memutus arus listrik besar (hingga ratusan ampere) pada tegangan rendah hingga menengah, dengan operasi yang dikontrol oleh sinyal rendah daya dari perangkat eksternal seperti *timer switch* atau *relay*. Dalam sistem PLTS *Rooftop hybrid*, kontaktor berfungsi sebagai aktuator utama yang menerima perintah dari *timer switch* untuk memutus koneksi jaringan PLN dan mengalihkan beban sepenuhnya ke sistem surya selama jam siang (misalnya 09:00-17:00).



Gambar 2. 8 Kontaktor

Prinsip kerjanya melibatkan kumparan elektromagnetik (*coil*) yang diaktifkan oleh sinyal kontrol DC 12-24V dari timer, menghasilkan medan magnet kuat untuk menarik armature dan menutup kontak utama yang mampu menangani beban *AC* 1-fase atau 3-fase. Kontaktor dilengkapi kontak bantu (*NO/NC*) untuk *interlock* logika dan proteksi, serta fitur *arc suppression* untuk mencegah busur listrik saat pemutusan beban induktif seperti inverter atau motor. Dalam konteks PLTS, penggunaan kontaktor tidak hanya menjamin isolasi sempurna antara PLN dan PLTS (mencegah *backfeeding*), tetapi juga melindungi panel surya dari arus balik atau *overcurrent* melalui trip otomatis jika melebihi set point arus rating (Petruzella, 2020).

