

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sel Surya

Energi surya adalah salah satu sumber berkelanjutan yang paling relevan dan tersebar di dunia dengan kemajuan teknologi. Akibatnya, hal ini harus menjadi bagian dari solusi untuk masalah energi dan iklim saat ini. Namun, teknologi sel surya harus tetap memenuhi karakteristiknya dengan kebutuhan pasar. Dengan cara ini, pasar saat ini menuntut perangkat yang hemat biaya dan ringan dengan efisiensi konversi daya yang luar biasa untuk memberikan perluasan besar penggunaannya, serta integrasinya dalam perangkat seluler dan perangkat lain yang dapat digunakan (Mohammad Hafidz , 2015).

Sel surya adalah berfungsi untuk mengkonversi energi dengan perangkat yang dirancang menjadi energi listrik dari cahaya matahari menjadi melalui proses fotovoltaiik. Berdasarkan irisan sel surya dengan ketebalan minimum 0,3 mm yang terdiri dari bahan semi konduktor negatif dan positif, jika suatu cahaya jatuh padanya, sehingga menimbulkan suatu arus searah karena pada kedua kutubnya timbul perbedaan tegangan. Cahaya matahari dapat menembus langsung mencapai junction karena silicon jenis P merupakan lapisan permukaan yang dibuat sangat tipis. Sumber terminal keluaran positif adalah bagian P ini diberi lapisan nikel yang berbentuk cincin. Terminal keluaran negatif terdapat di bawah bagian P yaitu bagian jenis N yang dilapisi dengan nikel juga (Ekici dkk.,2022).

2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Pembangkit listrik tenaga surya adalah suatu teknologi pembangkit listrik yang mengubah energi foton dari cahaya matahari menjadi energi listrik. Paduan silikon digunakan untuk membuat sel-sel ini. Energi matahari langsung diubah menjadi listrik oleh sel fotovoltaik. Mereka bekerja sesuai dengan prinsip fotovoltaik. Foton diserap oleh unsur-unsur tertentu ketika terkena cahaya, yang melepaskan elektron bebas. Efek fotolistrik adalah istilah yang digunakan untuk menggambarkan fenomena ini. Efek fotovoltaik adalah proses menghasilkan listrik arus searah menggunakan prinsip efek fotolistrik (Semaoui dkk.,2020).

Berdasarkan prinsip efek fotovoltaik, sel surya atau sel fotovoltaik dibuat sinar matahari diubah oleh mereka menjadi listrik arus searah (DC). Namun jumlah listrik yang dihasilkan oleh satu sel surya tidak mencukupi. Oleh karena itu, modul surya atau panel surya terdiri dari beberapa sel surya yang dipasang pada kerangka pendukung dan terhubung secara elektrik satu sama lain (Soedjarwanto dkk.,2022).

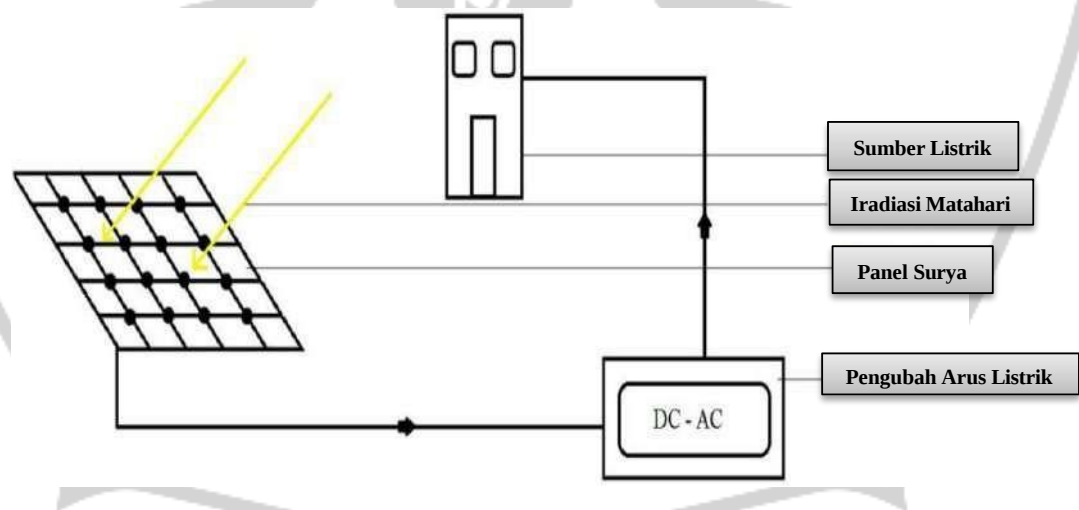
Secara umum, panel surya tersedia dalam berbagai ukuran dan keluaran daya, mulai dari beberapa ratus watt hingga beberapa kilowatt. Sementara panel atau modul memberikan daya pada tegangan tertentu, arus yang dihasilkannya ditentukan oleh intensitas cahaya yang datang. Namun, dalam kebanyakan kasus, sistem tenaga surya juga dilengkapi dengan inverter untuk menyediakan daya (Mohammad dkk2023).

Energi matahari membentuk sekitar 8,8 % dari listrik yang dihasilkan. Hal ini karena pembangkit listrik tenaga surya tidak dapat digunakan di daerah yang memiliki sinar matahari yang tidak konsisten atau karena luas permukaan yang besar yang dibutuhkan untuk menangkap energi matahari. Namun, di negara dan wilayah yang kaya akan tenaga surya, listrik yang dihasilkan dari panel surya lebih murah daripada listrik yang diproduksi secara komersial. Dalam beberapa tahun terakhir, penggunaan energi surya telah mengalami peningkatan eksponensial di Indonesia. Kemajuan dalam efisiensi panel surya diharapkan membuat energi surya lebih mudah tersedia untuk digunakan di rumah dan gedung perkantoran (Mohammad Hafidz, 2015).

Sistem penerangan yang hemat energi menggunakan lampu LED. Memanfaatkan sistem seperti *light-emitting diode* (LED) sebagai pengganti lampu neon atau pijar yang dapat mengurangi konsumsi listrik. Dalam merancang sistem fotovoltaik surya yang efektif maka terdapat beberapa rangkaian yang dapat digunakan yakni sistem *on-grid*, sistem *off-grid* dan sistem hybrid.

2.2.1 PLTS On- grid

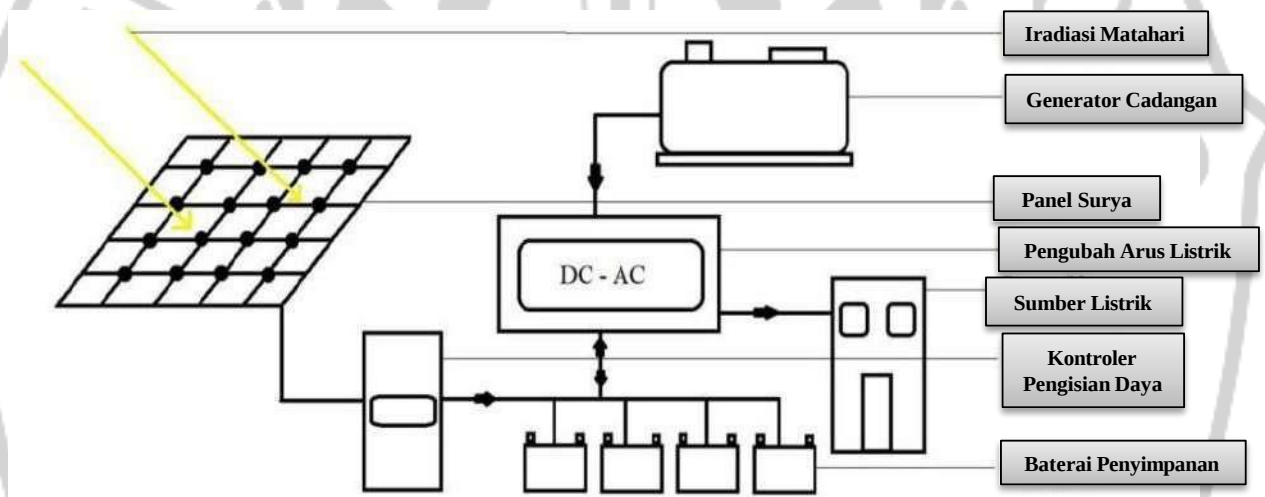
Sistem *on-grid* merupakan sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) yang berfungsi untuk mendapatkan energi listrik yang diubah dari energi dari panas matahari dan dimanfaatkan secara langsung tanpa menggunakan penyimpanan atau battery. Umumnya ditemukan di rumah, pabrik, dan gedung perkantoran. Karena dapat mengurangi tagihan listrik bulanan secara signifikan, ini merupakan salah satu strategi paling efisien untuk efisiensi biaya energi. Pemasangan PLTS jenis ini di atap gedung memungkinkan gedung memperoleh panas matahari sebanyak mungkin. PLTS tipe ini dipasang pada bagian atap rumah atau atap gedung, supaya dapat menerima panas matahari secara optimal. Sebelum disinkronkan dengan arus listrik ke jaringan listrik (PLN) diubah arus searah (DC) dari panas matahari menjadi arus bolak-balik (AC) oleh inverter (Ramadhana dkk., 2022), Sistem ini hanya mensuplai beban saat matahari bersinar sebagaimana terlihat pada Gambar 2.1. Tidak ada baterai dan daya yang dihasilkan tidak disimpan (Aboagye dkk., 2021).



Gambar 2.1 Sistem On-grid

2.2.2 PLTS Off-Grid

Sistem off-grid adalah sistem pembangkit listrik tenaga surya yang menggunakan energi matahari sebagai satu-satunya sumber energi. Jadi, jenis ini tidak disinkronkan dengan listrik PLN, berbeda dengan jenis on-grid. Biasanya sebagai cadangan, didukung oleh baterai sebagai penyimpanan energi atau genset (Ramadhana dkk., 2022). Sistem yang juga disebut dengan Stand Alone PV (Photovoltaic) biasanya digunakan di lokasi dimana jaringan listrik tidak tersedia atau tidak ada pembangkit listrik yang lain, karena sifatnya yang mandiri dan mengandalkan baterai seperti terlihat pada Gambar 2.2 Sistem ini memiliki susunan panel surya, baterai penyimpanan, dan sirkuit inverter (Aboagye dkk., 2021).



Gambar 2.2 Sistem Off-grid

2.2.3 PLTS Hybrid

PLTS Hybrid adalah didukung oleh teknologi Hybrid sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Surya seperti terlihat pada Gambar 2.3 Listrik dari PLN dapat digabungkan dengan listrik yang dihasilkan oleh panel surya. Dengan tujuan untuk mendapatkan dukungan energi listrik yang optimal sekaligusantisipasi saat terjadi kekurangan daya atau pemadaman yang dapat memudahkan pelanggan. Baterai cadangan sebagai tempat penyimpanan dari listrik yang dihasilkan dari sistem PLTS, seperti yang diterapkan pada PLTS *Off-Grid*. Bedanya jika di tipe *Off-Grid*, Genset untuk mengatasi kekurangan cadangan listrik dari baterai. Sedangkan untuk tipe ini, listrik dari PLN secara otomatis sebagai cadangan (Azizah & Purbawanto, 2021).



Gambar 2.3 Sistem *Hybrid* (sumber: www.builder.id)

2.2.4 Konfigurasi Sistem Lampu Penerangan

Karena menggunakan energi matahari, merupakan sumber energi tak terbatas dan gratis di planet ini, pencahayaan berbasis sel surya merupakan metode yang murah dan hemat energi untuk menyediakan daya penerangan. Dengan memanfaatkan panel surya, yang dirancang untuk menyerap cahaya matahari dan mengubahnya menjadi energi listrik menggunakan proses yang disebut fotovoltaiik yang kemudian disimpan dalam baterai. Lampu ini otomatis menyala di malam hari dan mati di pagi hari, sehingga biaya perawatannya minimal dan pengoperasiannya efisien. Lampu ini memiliki masa pakai yang panjang, perawatannya mudah, dan dibuat untuk menyediakan penerangan umum menggunakan sumber energi terbarukan (Hendarto, 2018).

Lampu LED yang menggunakan sel surya hemat energi dan membutuhkan daya yang lebih sedikit. Lampu LED high power seperti ini sangat terang, hemat energi dan tahan lama. Saat menggunakan sumber DC, lampu LED ini memiliki masa pakai operasi 50.000 jam. Dengan memanfaatkan teknologi ini, lampu ini sebelumnya tidak bergantung pada sumber energi dari luar dan dapat menghemat energi dan lingkungan. Pemasangannya cukup sederhana, terjangkau, bermanfaat, dan tentu saja, mampu mencegah pemadaman listrik total (black out) jika terjadi halangan yang tidak terduga. Dengan metode pemasangan yang cepat dan sederhana (Hendarto, 2018).

Penerangan Surya/ Solar Cell berbasis menggunakan lampu LED yang perlu pertimbangan hal - hal sebagai berikut (Fathurrahman dkk., 2023) :

1. Daya tahan lampu LED dan modul solar cell
2. Energi matahari yang digunakan dari alam yang merupakan energi tak terbatas
3. Tidak mencemari lingkungan
4. Mudah dalam pemasangan instalasi
5. Perawatannya sangat murah

Prinsip kerja secara umum penerangan berbasis Solar Cell dapat dijabarkan sebagai berikut:



Gambar 2.4 Prinsip Kerja Penerangan berbasis Solar Cell

Secara umum prinsip kerja penerangan berbasis solar cell seperti yang terlihat pada Gambar 2. 4, yakni Panel surya menggunakan cahaya matahari untuk menciptakan arus listrik pada siang hari. Sebagai pengontrol arus SCC (Solar Charge Controller) mengarahkan listrik ke baterai, membantu mencegah over charger. Dengan menggunakan energi listrik yang tersimpan dalam baterai sepanjang hari, lampu akan menyala pada malam hari. SCC harus dilewati dari listrik baterai supaya dapat terus mengalir dengan stabil. Pencahayaan yang dimaksud adalah lampu lengkap yang mencakup sumber cahaya, komponen optik (kaca, reflektor, atau diffuser), komponen listrik (sambungan ke catu daya atau sumber), struktur pendukung yang sesuai, tiang penyangga tegak lurus, dan pondasi tiang lampu (Hendarto, 2018).

Berdasarkan jenis – jenis sumber cahaya, lampu penerangan dapat kita bedakan berdasarkan jenis – jenis sumber cahaya, terdiri atas 4 (tiga) jenis seperti pada Gambar 2.5 yaitu: Lampu LED, Lampu Merkuri, Lampu Sodium dan lampu tabular lamp/ lampu fluoresen.



a. Lampu merkuri b. Lampu sodium c. Lampu LED d. Tabular Lamp

Gambar 2.5 Lampu Merkuri, LED, Sodium dan Lampu Neon/ Fluoresen Adapun tipe lampu untuk penerangan di PLTU PT. Puncakjaya Power ada 2 yaitu tipe lampu TL (tabular lamp)/ fluoresen dan tipe lampu (HPS) high pressure sodium (Cohen dkk., 2021; Fathurrahman dkk., 2023):

1. Tipe Lampu TL [4,5]

Lampu merkuri dengan tekanan rendah (0,4 Pa) yang tersusun dari bahan fluoresen disebut lampu fluoresen (TL = tubelair lamp). Cahaya Ultraviolet, yang meliputi cahaya yang tidak kelihatan, dilepaskan dari dalam lampu. Oleh karena itu bahan fluoresen dilapisi dalam lampu tabung untuk mengubah cahaya ultraviolet menjadi cahaya tampak. Lampu fluoresen sering digunakan dalam desain pencahayaan ruangan untuk memberikan pencahayaan yang merata dan memenuhi tujuan praktis untuk berbagai aktivitas. cenderung menghasilkan cahaya putih bersih yang tidak mengubah warna objek, yang membuat lampu fluoresen sangat baik untuk menampilkan objek visual. Perbandingan konversi kedalam watt lampu TL ke LED didapat 23Watt lampu TL berbanding 10 Watt lampu LED dengan lumen atau penyinaran yang sama, model lampunya diperlihatkan seperti pada gambar 2.6.



Gambar 2.6 Daya Lampu LED dan daya Lampu CFL Dengan perbandingan 1: 2,3

2. Tipe lampu high pressure sodium (HPS)

High-Pressure Sodium (HPS) High Bay Fixture: Ini menunjukkan bahwa lampu ini menggunakan teknologi lampu natrium tekanan tinggi (High-Pressure Sodium). Lampu ini umumnya digunakan untuk memberikan cahaya yang intens, efisien energi, dan seringkali digunakan di tempat-tempat dengan langit-langit yang tinggi, seperti gudang atau bangunan industri.

High Power Factor Ballast: Power factor adalah ukuran efisiensi penggunaan daya listrik. High power factor (faktor daya tinggi) menunjukkan bahwa lampu ini dirancang untuk mengoptimalkan penggunaan energi, yang dapat menghasilkan efisiensi yang lebih tinggi dan mengurangi kerugian daya. Secara keseluruhan, lampu ini dirancang untuk memberikan cahaya yang intens dan efisien energi di lingkungan dengan langit-langit tinggi, seperti gudang industri atau tempat produksi. Faktor daya tinggi juga menandakan bahwa lampu ini dirancang untuk mengoptimalkan efisiensi penggunaan daya listrik.

Pengganti lampu HPS (High-Pressure Sodium) dengan lampu LED melibatkan beberapa pertimbangan, termasuk perbedaan dalam efisiensi energi antara kedua jenis lampu. Lampu LED umumnya lebih efisien daripada lampu HPS, yang berarti bahwa untuk mendapatkan tingkat cahaya yang setara, lampu LED biasanya membutuhkan daya yang lebih rendah. Sebagai referensi umum, penggantian HPS 400W dengan lampu LED mungkin memerlukan sekitar 150 hingga 250 watt, tergantung pada spesifikasi dan

efisiensi masing-masing lampu LED (Fathurahman, 2023).

Namun, untuk menghitung secara akurat kebutuhan daya lampu LED yang diperlukan untuk penggantian, disarankan untuk mempertimbangkan faktor-faktor berikut (Abdul Azis, 2021):

1. Lumen Output: Lampu LED biasanya memberikan lebih banyak lumen per watt daripada HPS. Lumen adalah ukuran cahaya yang dihasilkan.
2. Distribusi Cahaya: Lampu HPS mungkin memiliki pola cahaya yang berbeda dari lampu LED. Perlu memastikan bahwa distribusi cahaya yang diinginkan dapat dicapai dengan lampu LED yang dipilih.
3. Karakteristik Lingkungan: Perlu juga mempertimbangkan karakteristik lingkungan di mana lampu akan digunakan. Misalnya, jika ruangan memerlukan cahaya warna tertentu, perhatikan indeks warna lampu LED yang akan dipilih.
4. Spesifikasi Produk: Lihat spesifikasi teknis lampu LED yang akan dibeli untuk memastikan bahwa mereka memenuhi kebutuhan dan persyaratan tertentu.

Sebelum melakukan penggantian, disarankan untuk berkonsultasi dengan produsen atau penyedia lampu LED yang dapat memberikan saran berdasarkan kondisi dan kebutuhan spesifik. Dari perbandingan lumen berdasarkan Tabel 2. 1 yang terlihat perbandingan antara lampu HPS yang diubah menggunakan lampu LED yang digunakan pada PLTU PT. Puncakjaya Power.

Tabel 2.1 Perbandingan Lampu LED dan High Pressure Sodium / Metal Halide

	HPS	LED
Lumens/ Watt	54.2	105.7
Umur (Jam)	30.000	>50.000
Efisiensi energi	Rendah	Tinggi
Ramah lingkungan	Tidak	Ya
Potensi terbakar	Ya	Tidak

Lampu berdasarkan lumen per watt dimana HPS 54,2 lumen: LED 105,7 lumen, HPS di konversi Watt lampu LED = Watt lampu TL dibagi 1,95

Perhitungan sistem pencahayaan dapat dilakukan dengan berpedoman pada standar SNI-03-6575-2001 disesuaikan dengan kondisi nyata di lapangan.

2.2.5 Panel Surya

Pemanfaatan energi terbarukan yang sangat dibutuhkan untuk menerangi gedung atau bangunan adalah Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) digunakan panel surya fotovoltaik yang terpasang pada atap bangunan (PLTS Atap). PLTS Atap yang mudah dan murah merupakan PLTS on-grid yang komponen utamanya adalah inverter dan panel surya tidak menggunakan baterai, sehingga biaya perawatan dan pembuatan murah, pengoperasiannya lebih mudah (Badan Standarisasi Nasional, 2020).

Faktor utama yang mempengaruhi efisiensi dari data panel surya adalah temperatur. Untuk menghitung kondisi daya panel surya, nilai iradiasi terkecil digunakan sebagai referensi untuk memastikan bahwa sistem dapat beroperasi dengan baik meskipun posisi iradiasi rendah (Irfani dkk., 2021). Panel surya umumnya dibentuk dari serangkaian sel surya yang dihubungkan secara seri yang terdiri atas 72 atau 60 sel surya didapatkan spesifikasi modul yang diminta dan diuji menggunakan *Standart Test Condition* (STC). STC kriterianya radiasi matahari nilainya 1000 W/m², massa udara 1,5 dan modul bersuhu 25 °C (Badan Standarisasi Nasional, 2020).

Sel surya terbentuk dari semikonduktor tipe-P (kaya hole) dan semikonduktor tipe-n (kaya elektron) yang dihubungkan yang membentuk lapisan PN junction. Sinar matahari diubah sel surya dengan efek fotovoltaik, dimana elektron dari tipe-n terdorong menuju kutub negatif menjadi arus listrik. Prinsip kerja sel surya adalah sebagai berikut (Kadang dkk., 2022):

- a. Medan listrik dibentuk ketika permukaan dari sel surya disinari oleh matahari.
- b. Elektron bebas terjadi saat cahaya sampai diantara tipe N dan tipe P.
- c. Jika memiliki energi yang cukup Medan listrik yang terbentuk akan dilewati elektron, akibatnya elektron bebas bergerak melewati silikon ke sirkuit eksternal.

Cara yang biasa digunakan dalam pembuatan silikon film tipis adalah *Tube-enhanced chemical vapor deposition* (PECVD) dari hydrogen dan gas silane. Sistem

ini membuat lapisan menghasilkan silikon amorphous (non-kristal) yang dikenal



sebagai silikon yang tidak memiliki arah orientasi kristal atau struktur atomnya acak dan tidak teratur. Selain perlengkapan semikonduktor lain yang memiliki efisiensi sel surya yang tinggi seperti Cadmium Telluride(CdTe) dan Copper Indium Gallium Selenide (CIGS), sel fotovoltaik film tipis juga dibuat dari perlengkapan menggunakan silikon. Bagian utama dari sistem PLTS adalah modul surya atau sering juga disebut panel surya. Peningkatan efisiensi dan harga lebih kompetitif menyebabkan perkembangan panel surya yang semakin pesat. Berikut ini beberapa jenis panel surya modelnya seperti terlihat pada gambar 2.7 (Purwoto dkk., 2018):

1. Monokristal (Mono-crystalline)

Panel yang digunakan mempunyai efisiensi tinggi, menghasilkan daya listrik tertinggi per satuan luas sehingga membutuhkan tempat yang lebih kecil dibanding panel yang lain, memiliki efisiensi tertinggi lebih dari 22,5 %. Kekurangan lebih mahal harganya dibanding jenis panel yang lain

2. Polikristal (Poly-crystalline)

Jenis polikristalin membutuhkan area yang lebih besar daripada jenis monokristalin untuk menghasilkan jumlah listrik yang sama. Jenis ini biasanya berisi 28-36 sel surya dengan panjang 8,5 cm, jangkaun 5 cm, dan konsistensi 0,3 mm per sel. Satu sel berukuran panjang 8,5 cm, tebal 0,3 mm, dan lebar 5 cm

3. Amorphous

Bahan sel surya photovoltaik dalam kalkulator adalah amorphous silicon (a-Si). Pada kalkulator yang memerlukan energi yang kecil tidak terlalu berpengaruh dibandingkan sel surya jenis c-Si yang kemampuannya lebih besar.

4. Thin Film Photovoltaic

Merupakan panel surya (dua lapisan) dengan struktur lapisan tipis mikrokristal dari amorphous yang dibentuk dengan efisiensi mencapai 8,5 % sehingga untuk luas permukaan yang dibutuhkan lebih besar per watt daya yang dihasilkan dibandingkan dengan polikristal & monokristal. Thin Film Triple Junction PV (dengan tiga lapisan) dapat berfungsi dengan sangat efisien di udara yang sangat berawan dan dapat menghasilkan daya listrik hingga 45 %, lebih tinggi dari pada jenis panel lain ini merupakan penemuan terbaru.

Wattpeak menunjukkan daya maksimum yang dihasilkan dalam kondisi radiasi



matahari 1000 W/m² dan suhu panel 25 C. Panel surya diproduksi dalam ukuran bermacam-macam (daya terpasang). Konstruksi panel surya terdiri dari susunan sel surya, penutup kaca, bingkai aluminium khusus dan soket. Panel surya memiliki masa pakai yang cukup panjang, yakni minimal 20 tahun, dan umumnya para supplier panel surya memberikan garansi lebih dari 10-25 tahun. Ketika intensitas cahaya menurun (berawan, mendung, hujan) arus listrik yang dihasilkan juga akan turun. Degradasi panel surya yang diletakkan di luar ruangan rata-rata median 1,33% per tahunnya tergantung jenis modul panel surya yang digunakan, kemudian akan terus mengalami penurunan yang signifikan setelah mencapai usia 15 tahun (Aboangye, 2021).

Semakin banyak panel surya yang digunakan, konversi daya surya akan semakin tinggi. Secara umum, ukuran panel surya tertentu akan menghasilkan hasil yang spesifik. Misalnya, m cm x n cm menghasilkan x Watt listrik DC (Arus Searah) setiap jam. Berikut perbandingan tabel antar teknologi modul surya yang tersedia dipasaran (Neli Lestari dkk., 2021):

Tabel 2.2 Perbandingan Antar Teknologi Modul Surya yang Tersedia Di Pasaran

	Spesifikasi Teknis	Kelebihan	Kekurangan	Penggunaan
Monokristal	Jenis sel surya yang dimiliki terbuat dari silikon tunggal (mono).	- Efisien digunakan pada suhu tinggi - Efisiensi tertinggi (sampai 22,5 %), yang berarti cakupan kilowatt-jam lebih banyak per kaki persegi - Masa pakai lebih lama (25+ tahun) - Hemat tempat	- Jenis panel surya termahal - Daripada jenis panel lainnya	Sehari hari
Polikristal	Terbuat dari campuran jenis-jenis silikon	- Biaya yang rendah dan cenderung mudah dalam pembuatan	- Efisiensi lebih rendah dibandingkan panel monokristal	Sehari hari

	Spesifikasi Teknis	Kelebihan	Kekurangan	Penggunaan
		- Umur panjang (25+ tahun) - Efisiennya bertahan pada suhu tinggi	- Dapat menghasilkan daya listrik saat mendung	
Amorphous	Terbuat dari lapisan silikon non-kristal yang dilapisi pada substrat tipis seperti kaca, plastik, atau logam.	- Bekerja baik dalam pencahayaan fluorescent - Temperatur tinggi hanya berdampak kecil pada produktivitasnya - Ringan - Biaya rendah - Tersedia panel fleksibel dan berperekat	- Efisiensi rendah, yang berarti tidak cocok untuk rumah rata-rata - Umur lebih pendek dibandingkan panel mono dan poli	Sehari hari dan perangkat komersial (kalkulator)
Thin Film	Merupakan panel surya (dua lapisan) dengan struktur lapisan tipis silicon - mikrokristal dan amorphous	- Bersifat fleksibel karena dibuat dengan bahan film tipis, sehingga dapat dibentuk dan disesuaikan dengan berbagai bentuk dan ukuran permukaan. - Efisien dalam kondisi cahaya rendah, seperti ketika cuaca mendung atau pada waktu senja dan fajar.	- Kurang efisien dalam keadaan cahaya terang sehingga tidak cocok dengan daerah dengan intensitas cahaya tinggi - Umur pakai kurang dari 25 tahun	Sehari hari dan perangkat komersial (kalkulator)



Gambar 2.7 Perbandingan Modul Surya
(www.cleanenergyreviews.info, diakses 5 Agustus 2022)

Keunggulan fotovoltaik modul jenis kristal:

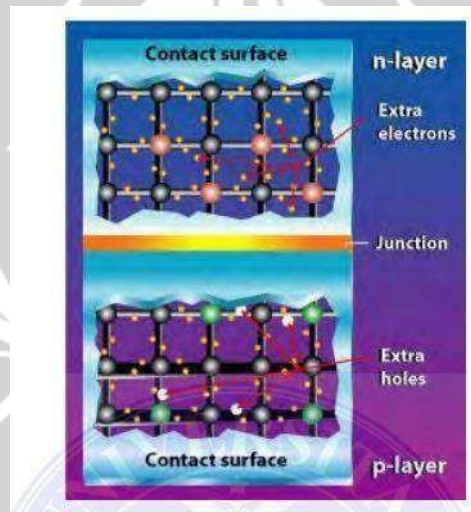
- Konversi energi dengan efisiensi tinggi;
- Lebih besar densitas daya per area;
- Bahan lebih sedikit untuk rak dan penopang;
- Biaya angkut lebih rendah karena jumlah modul lebih sedikit.
- Lebih banyak pilihan jumlah modul;
- Inverter sangat bagus fleksibilitasnya.

Modul fotovoltaik jenis thin film keunggulannya adalah:

- Lebih sedikit bahan yang digunakan;
- Lebih murah biaya per watt;
- Dapat menyesuaikan kebutuhan estetika tampilannya;
- Pada saat pembuatan konsumsi kebutuhan energi lebih sedikit;
- Lebih toleransi terhadap bayangan yang menutupi sinar matahari.

2.2.6 Cara Kerja Sel Surya

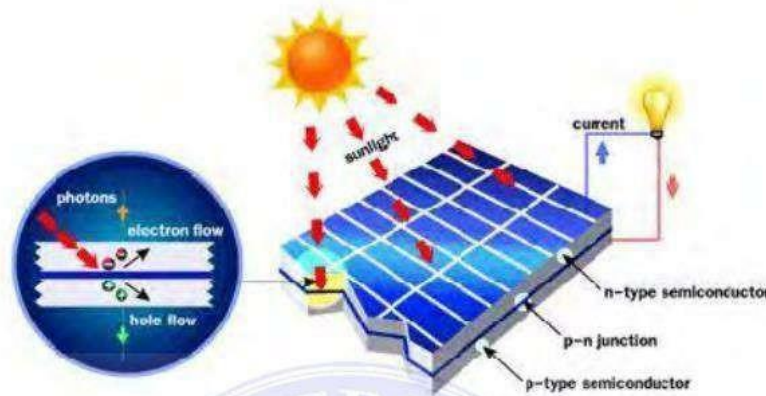
Prinsip junction p-n diterapkan dalam sel surya konvensional, yang melibatkan junction antara semikonduktor tipe-n dan tipe-p. Pada semikonduktor, struktur atomnya terdiri dari ikatan yang mengandung elektron. Semikonduktor tipe-n memiliki kelebihan elektron (muatan negatif), sedangkan semikonduktor tipe-p memiliki kelebihan hole (muatan positif). Proses penciptaan kelebihan elektron dan hole ini dilakukan melalui doping, yaitu penambahan atom doping. Sebagai contoh, silikon tipe-p dihasilkan dengan menambahkan atom boron, sedangkan silikon tipe-n diperoleh melalui doping menggunakan atom fosfor. Ilustrasi pada gambar 2.8, menggambarkan junction semikonduktor tipe-p dan tipe-n (Aryza dkk., 2017).



Gambar 2.8 Junction Antara Semikonduktor Tipe-p (kelebihan hole) dan Tipe-n (kelebihan elektron)

Pada sambungan p-n, medan listrik terbentuk untuk memungkinkan ekstraksi elektron dan hole oleh material kontak, sehingga dapat menghasilkan listrik. Ketika semikonduktor tipe-p dan tipe-n bersentuhan, elektron dari semikonduktor tipe-n akan bergerak menuju tipe-p. Hal ini menyebabkan semikonduktor tipe-n memiliki kutub positif, sedangkan semikonduktor tipe-p menjadi bermuatan negatif. Aliran elektron dan hole ini menciptakan medan listrik. Ketika cahaya matahari mengenai p-n junction, karena lebih kuat medan listrik tersebut membuat elektron bergerak menuju kutub negatif, yang kemudian digunakan untuk menghasilkan listrik, sementara hole atau

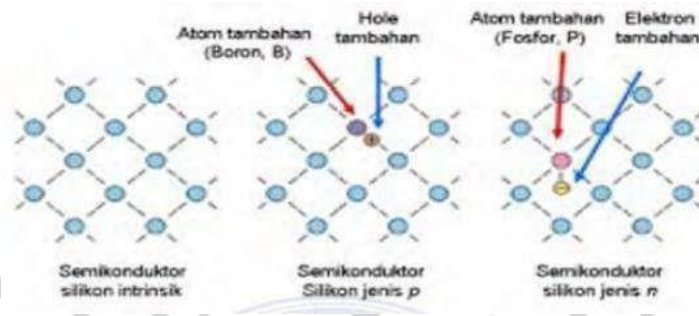
kekosongan yang ditinggalkan elektron secara efektif menciptakan kutub positif seiring elektron mengalir ke arah kutub negatif. seperti diilustrasikan pada gambar 2.9 dibawah ini:



Gambar 2.9 Prinsip kerja p-n junction.

Bahan yang menyusun sel surya adalah semikonduktor sehingga mungkin mengubah sinar matahari menjadi listrik. Sel surya terdiri dari 2 tipe semikonduktor; yaitu jenis-n dan jenis-p.

Semikonduktor jenis-n adalah semikonduktor yang memiliki kelebihan elektron, sehingga memiliki kelebihan muatan negatif (n = negatif). Sementara semikonduktor tipe-p memiliki kelebihan hole, sehingga disebut p (p = positif) karena muatan positif yang lebih. Jenis semikonduktor sistem ini dikendalikan dengan ditambahkan unsur lain ke semikonduktor, sebagaimana diilustrasikan pada gambar 2. 10 di bawah ini.



Gambar 2.10 Jenis Semikonduktor

Awal pembuatan kedua jenis semikonduktor ini bertujuan untuk meningkatkan posisi konduktivitas, posisi daya hantar listrik dan panas semikonduktor alami. Pada semikonduktor alami (disebut semikonduktor intrinsik) elektron dan hole memiliki jumlah yang sama. Konduktivitas listrik dan panas pada semikonduktor dapat ditingkatkan oleh kelebihan elektron atau hole (Fathurrahman dkk., 2023).

Contoh semikonduktor intrinsik adalah silikon (Si). Untuk menghasilkan semikonduktor tipe-P, biasanya ditambahkan unsur-unsur seperti aluminium (Al), boron (B), galium (Ga), atau indium (In) ke dalam silikon, yang meningkatkan jumlah hole. Sebaliknya, semikonduktor tipe-N dibuat dengan menambahkan nitrogen (N), fosfor (P), atau arsenik (As) ke dalam silikon, sehingga meningkatkan jumlah elektron. Berbeda dengan silikon tipe-P dan tipe-N, silikon intrinsik tidak mengandung unsur tambahan apa pun. Proses penambahan unsur-unsur ini dikenal sebagai doping, yang biasanya dilakukan dengan jumlah kurang dari 1% dari berat silikon yang di-doping (Cohen dkk., 2021).

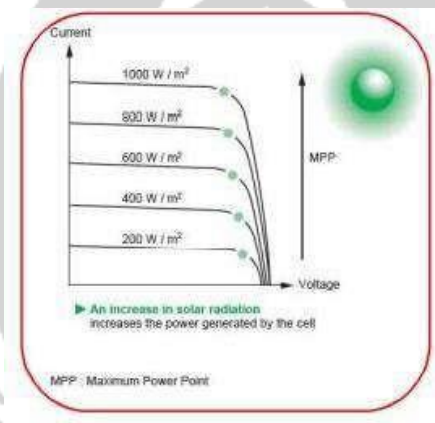
2.2.7 Parameter Kinerja Modul Cell

Beberapa parameter yang mempengaruhi keinerja modul dari sel surya adalah radiasi matahari, temperatur dan orientasi kemiringan modul seperti penjelasan dibawah ini:

1. Radiasi matahari

Panel surya menggunakan cahaya matahari untuk menghasilkan listrik. Radiasi matahari ada 3 istilah antara lain albedo, difuse, dan direct. Albedo adalah pantulan cahaya dari permukaan bumi; direct adalah sinar matahari yang bersinar langsung pada permukaan modul dengan intensitas yang bervariasi pada hari yang cerah; difuse

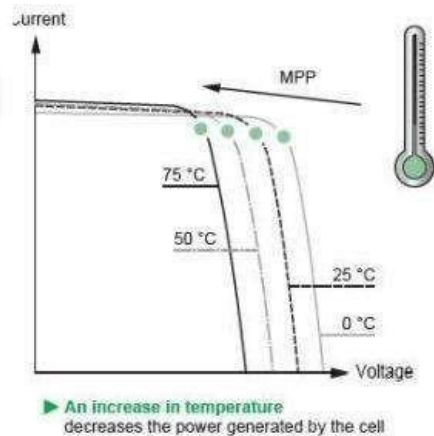
adalah sinar matahari yang tersebar karena molekul-molekul di atmosfer, seperti uap air dan partikel debu. Radiasi global adalah total dari tiga komponen matahari (langsung + difuse + albedo) (Perangin & Associates, 2023). Radiasi matahari yang mengenai permukaan panel sangat mempengaruhi daya keluaran panel surya. Radiasi matahari mempengaruhi arus keluaran panel akibat pergerakan electron meneingkat sedangkan ketika dipermukaan modul cahatya matahari sampai, maka tegangan berada di rentang nilai Voc, sedangkan arus berubah sesuai kondisi radiasi matahari seperti pada gambar 2.11 dibawah ini.



Gambar 2.11 Pengaruh Perubahan Radiasi Matahari terhadap Arus (Electrical Installation Guide, Schneider, 2018)

2. Temperatur

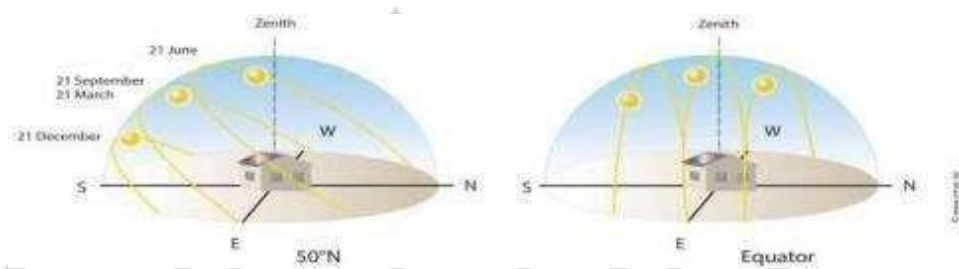
Tegangan keluaran panel surya sangat dipengaruhi oleh fluktuasi suhu temperatur. Karena tidak semua sinar matahari dapat diubah menjadi listrik, ketika permukaan panel surya terkena sinar matahari, suhu akan meningkat seiring waktu dan panel menjadi panas. Tingkat tegangan dan arus keluaran bervariasi sebagai akibat dari panas yang dihasilkan. Seperti yang terlihat pada Gambar 2.2, suhu memiliki dampak besar pada bagaimana tegangan keluaran panel PLTS berfluktuasi. Badan Standardisasi Nasional (2020) menyatakan bahwa untuk penyerapan modul terbaik, *Standard Test Condition* (STC) harus memenuhi persyaratan berikut: massa udara 1,5, radiasi matahari 1000 W/m^2 , dan suhu modul 25°C (Asrori, 2019). grafik terlihat seperti pada gambar 2. 12 dibawah ini:



Gambar 2.12 Temperatur dan Tegangan (Electrical Installation Guide, Schneider, 2018)

3. Orientasi dan kemiringan modul

Karena posisi matahari yang berfluktuasi, yang memengaruhi jumlah energi yang terpapar pada panel surya, matahari berubah posisi dari matahari terbit hingga terbenam sepanjang tahun. Untuk menghasilkan energi yang maksimal sepanjang tahun, panel harus diposisikan dengan orientasi dan kemiringan yang tepat. Garis lintang memainkan peran utama dalam orientasi modul. Belahan utara sering menghadap ke selatan di belahan bumi utara dan sebaliknya, dimiringkan oleh sudut lintang dikurangi 10° . Matahari selalu bergerak ke selatan di belahan bumi utara (kiri), mencapai titik tertingginya di musim panas dan titik terendahnya di musim dingin pada garis lintang di atas 23° LU. Matahari selalu menghadap ke utara pada garis lintang di atas 23° LS di belahan bumi selatan. Bergantung pada musim, matahari kadang-kadang terbit tepat di atas kepala pada siang hari di selatan dan kadang-kadang di utara di daerah khatulistiwa dan di antara daerah tropis, antara 23° LU dan 23° LS. Karena Indonesia dikelilingi oleh garis khatulistiwa, kemiringan modul surya diatur antara 10° dan 15° untuk memudahkan perawatan, meskipun lokasi modul tegak lurus akan menghasilkan energi maksimum. PLTS biasanya direncanakan pada bulan-bulan dengan tingkat radiasi terendah untuk memungkinkan produksi sepanjang tahun. seperti terlihat pada gambar 2. 13 (Rudawin dkk., 2020).



Gambar 2.13 Posisi Matahari Sepanjang Tahun terhadap Garis Ekuator (GIZ, 2017)

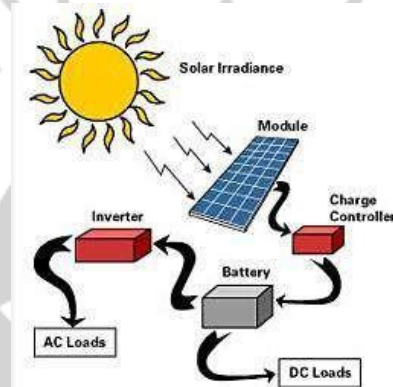
2.2.8 Distribusi Energi Listrik dari Solar ke Baterai

Sel surya merupakan salah satu jenis pembangkit listrik yang ramah lingkungan karena tidak menimbulkan polusi, selain itu tahan lama, dan tidak menimbulkan suara bising. Sudah dijelaskan bahwa sel surya sangat bergantung pada intensitas cahaya matahari yang masuk ke permukaan.

Energi yang dihasilkan oleh sel surya dapat bervariasi dan tidak stabil, bergantung pada kondisi pencahayaan saat itu. Jika sel surya dihubungkan langsung ke beban, hal ini berpotensi merusak beban. Solusinya adalah menggunakan sistem penyimpanan energi yang mampu menyimpan listrik dari sel surya, sehingga energi tersebut dapat disalurkan ke beban secara stabil. Dengan adanya sistem penyimpanan energi, beban tetap dapat menerima pasokan listrik yang stabil meskipun kondisi penyinaran matahari sedang berawan atau mendung (Febrian dkk., 2020).

2.2.9 Proses Penyerapan dan Penyuplaian Energi Matahari

Energi listrik yang tersimpan ke baterai dalam bentuk DC (Direct Current) maka motor DC dapat menggunakan energi listrik secara langsung. Jika motor AC (Alternating Current) dibutuhkan inverter supaya dapat digunakan. Seperti terlihat pada gambar 2. 14 dibawah ini.



Gambar 2.14 Sistem Kerja Panel Surya

2.3 Perancangan dan Realisasi Perangkat Keras

Pada perangkat keras alat ini terdiri dari beberapa modul yaitu:

2.3.1 Modul Sel Surya



Gambar 2.15 Modul Cell Surya

Pada gambar 2.15 model dan bentuk dari modul surya, Modul surya merupakan sejumlah sel surya yang disusun secara seri dan paralel, umumnya berjumlah 28-36 sel untuk meningkatkan tegangan dan arus yang dihasilkan sehingga cukup untuk penggunaan sistem tenaga listrik. Untuk memperoleh energi listrik yang maksimal, permukaan modul surya harus selalu menghadap matahari. Elemen utama dari sistem

surya fotovoltaik adalah modul yang merupakan unit rakitan dari beberapa sel surya fotovoltaik. Untuk membuat modul fotovoltaik dalam pembuatannya, dapat menggunakan teknologi kristal dan thin film. Modul fotovoltaik kristal dapat dibuat dengan teknologi yang lebih sederhana dibandingkan dengan teknologi thin film, tetapi untuk membuat sel fotovoltaik, diperlukan teknologi yang tinggi (Fathurrahman dkk., 2023).

2.3.2 Battery (Accu)

Tujuan utama baterai adalah untuk menyimpan energi listrik yang dihasilkan oleh panel sel surya untuk digunakan dalam menyalakan sistem starter, sistem pengapian, lampu, dan perangkat listrik lainnya yang secara kolektif disebut sebagai beban listrik. Battery dibutuhkan agar listrik tetap tersedia pada saat mendung/ berawan karena listrik yang dihasilkan panel surya tidak cukup untuk beban dan energi listrik tetap juga tersedia walau di malam hari. PLTS Off-Grid dibutuhkan penyimpan energi yang memiliki kepadatan daya (power density) tinggi dan juga kepadatan energi (energy density) tinggi (Revolta, 2020), modul dari battery seperti terlihat pada Gambar 2. 16. dibawah ini.



Gambar 2.16 Modul Baterai

Sel listrik dalam baterai mengalami proses elektrokimia reversibel yang sangat efisien. Proses elektro kimia *reversibel* memungkinkan konversi kimia menjadi energi listrik atau proses pelepasan muatan terjadi dalam baterai, dan sebaliknya, dari energi listrik menjadi energi kimia. Regenerasi elektroda yang digunakan atau pengisian dayanya, melibatkan pengiriman arus listrik dalam polaritas sel yang berlawanan artinya saat pengisian daya ke baterai elektron mengalir dari katoda (kutub positif) ke anoda (kutub negatif) berlawanan saat penggunaan daya. Ada elektrolit asam sulfat, elektroda positif, dan elektroda negatif dalam bentuk pelat dalam baterai penyearah yang digunakan dalam pembangkit listrik tenaga surya (PLTS). Timah digunakan untuk membuat pelat. Untuk baterai mobil, volume internal dibagi menjadi banyak sel, biasanya enam sel, dengan beberapa elemen terendam dalam elektrolit di setiap sel. Baterai sangat berperan penting bagi kemampuan sel surya untuk menghasilkan energi listrik dari matahari (Cahyadi dkk., 2020).

2.3.3 Solar Charge Controller (SCC)

Solar charge controller tipe algoritma kontrol: mppt/pwm digunakan dalam pengontrol pengisian daya dari sel surya ke baterai. Pengontrol pengisian daya surya akan menyalakan relai untuk memulai proses pengisian daya baterai jika tegangannya rendah. Sebaliknya jika tegangan baterai penuh relai mengaktifkan pengontrol untuk mematikan pengisian daya surya baterai seperti terlihat pada gambar 2.17 dibawah ini (Workala dkk., 2023):



Gambar 2.17 Solar Charge Controller



2.3.4 Perhitungan Teknis

1. Menghitung luas panel surya:

Menghitung luas dari panel surya (*Photovoltaic Area*) diperlukan untuk mengetahui jumlah energi yang tersedia ketika perencanaan dan evaluasi pembangkit listrik. Adapun rumus yang digunakan sebagai berikut (Latupono dkk., 2023):

$$PV\ Area = \frac{EL}{G_{AV} \times \eta_{PV} \times TCF \times \eta_{out}} \dots\dots\dots (2.1)$$

Dimana:

- EL = Daya yang dihasilkan [kWh/hari]
- $PV\ Area$ = Luas permukaan panel surya [m^2]
- TCF = Temperature coefficient factor [%]
- G_{AV} = Intensitas harian matahari [kW/m^2 /hari]
- η_{PV} = Efisiensi panel surya [%]
- η_{out} = Efisiensi keluar [%] asumsi 0,9

2. Perhitungan daya produksi dari PLTS

Setiap kenaikan temperature 1 derajat dari temperature standarnya akan mengakibatkan daya berkurang sebesar 0,5 % , daya dari cahaya matahari mengenai permukaan bumi ditentukan sebesar $1000\ W/m^2$ (Latupono dkk., 2023).

$$PV\ Watt\ peak = PV\ Area \times PSI \times \eta_{PV} \dots\dots\dots (2.2)$$

Dimana:

- $PV\ Watt\ peak$ = Daya produksi PLTS
- $PV\ Area$ = Luas Permukaan panel surya (m^2)

PSI = Peak Solar Insolation, yaitu sebesar 1.000 W/m²

η_{PV} = Efisiensi panel surya (%)

3. Menghitung energi surya yang masuk (P_{in})

Energi surya yang masuk dapat dihitung dengan menghitung berapa intensitas cahaya matahari yang masuk yaitu (Budiyanto, 2021):

$$P_{in} = E.A \text{ panel} \dots\dots\dots (2.3)$$

Keterangan:

P_{in} = Daya yang datang di panel surya (Watt)

A panel = Luas panel (m²)

E = Intensitas/ iradiasi matahari (Watt/m²)

4. Energi yang keluar dari solar Cell (P_{out})

Keluaran energi dari panel surya (P_{out}) dihitung dimana arus dan voltage diukur di keluaran panel surya, sehingga keluaran energi dari panel surya, dicari menggunakan rumus (Fuaddin & Daud, 2021):

$$P_{out} = I.V \dots\dots\dots (2.4)$$

Keterangan:

P_{out} = Daya keluar panel surya (Watt)

I = Kuat Arus (Ampere)

V = Tegangan (Volt)

5. Menghitung Efisiensi

Besarnya energi matahari yang masuk (P_{in}) dan energi matahari yang keluar (P_{out}) dapat digunakan untuk menghitung efisiensi yang dihasilkan oleh panel surya pengisian baterai; ini adalah efisiensi keluaran panel surya pengisian baterai. Ini adalah perhitungan efisiensi (Kariongan, 2022):

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \% \dots\dots\dots (2.5)$$

Keterangan:

η = Efisiensi

P_{out} = Daya keluaran dari panel surya (Watt)



P_{in} = Daya yang masuk ke panel surya (Watt)

6. Perhitungan jumlah panel surya (Latupono dkk., 2023),

$$\text{Jumlah panel surya} = \frac{P_{watt}}{P_{mpp}} \dots\dots\dots (2.6)$$

Dimana :

$P_{watt \text{ peak}}$ = Daya yang akan dibangkitkan dari PLTS (Watt)

P_{mpp} = Daya maksimum keluaran panel surya (Watt)

7. Perhitungan fill factor (FF)

Untuk mengukur sejauh mana sel surya dapat mengisi daya yang tersedia dari cahaya matahari (Dahliya dkk., 2021).

$$FF = \frac{V_{mp} \times I_{mp}}{V_{oc} \times I_{sc}} \dots\dots\dots (2.7)$$

Dimana :

V_{mp} = Tegangan maks (Volt)

I_{mp} = Arus maks (Ampere)

V_{oc} = Tegangan open circuit (Volt)

I_{sc} = Arus short circuit (Ampere)

8. Perhitungan Performance Ratio (Kual dkk., 2022).

$$PR = \frac{\text{Energi aktual output PLTS}}{GHI \times A \times \eta} \dots\dots\dots (2.8)$$

Keterangan :

η = Efisiensi (%)

A = Luas permukaan panel (m²)

GHI = Global Horizontal Iradiasi (KWh/m²)

Perhitungan Pengisian Pada Battery (Suprianto, 2021)

$$\text{Pengisian Baterai} = \frac{AH}{\text{Kapasitas Baterai}} \dots\dots\dots (2.9)$$

$$\text{Mencari AH} = \frac{ET}{VS}$$

Keterangan :

AH : Ampere Hour (Ah)

ET : Energi di sistem (Wh)

VS : Tegangan di baterai (v)

9. Perhitungan Efisiensi Baterai

- Kapasitas Penggunaan Baterai

$$C_{\text{baterai}} = \frac{\text{Cnominal baterai} \times DOD}{100 \%} \dots\dots\dots (2.10)$$

- Kapasitas yang dapat digunakan hingga masa pakai/ siklus.

$$C_{\text{baterai umur daur}} = C_{\text{baterai}} \times UD \dots\dots\dots (2.11)$$

Dimana:

UD : Usia Daur

C_{baterai umur daur} : Kapasitas baterai sampai akhir masa pakai (Ah)

C_{baterai} : Kapasitas total yang bisa digunakan dari baterai

- Total Kapasitas Baterai

$$C_{\text{baterai}} = \frac{Et \times A}{VS} \dots\dots\dots (2.12)$$

2.3.5 Analisis Keekonomian

1. Net Present Value (NPV)

Teknik untuk mencari nilai sekarang bersih berdasarkan faktor diskonto disebut NPV (Net Present Value). Selisih antara investasi awal dan seluruh nilai tunai bersih dihitung menggunakan metode ini. Rumus berikut digunakan untuk menghitung nilai Net Present Value (NPV) (Mohammad dkk., 2023).

$$NPV = PWB - PWC \dots\dots\dots (2.13)$$

Present Worth of Benefit (PWB) merupakan arus kas yang dalam perhitungannya hanya memperhitungkan cash flow benefit atau uang masuk saja.

$$PWB = \sum_{t=0}^n \frac{(CB_t (FBP)_t)}{t} \dots\dots\dots (2.14)$$

Present Worth of Cost (PWC) merupakan arus kas yang dalam perhitungannya hanya memperhitungkan arus keluar atau cash flow.

$$PWC = \sum_{t=0}^n \frac{(CC_t (FBP)_t)}{t} \dots\dots\dots (2.15)$$

Dimana:

CB = Coss flow benefit

CC = Cash flow cost

FBP = Faktor bunga present

t = Periode

Metode NPV untuk menganalisis kelayakan ekonomi suatu usaha memiliki dua kriteria, yaitu (Kariongan, 2022).

- $NPV > 0$, Investasi layak dilakukan/ feasible
 - $NPV < 0$, Investasi tidak memungkinkan / unfeasible
2. Pay Back Periode adalah menemukan periode pengembalian modal investasi dengan menghitung faktor diskonto menggunakan arus kas bersih kumulatif yang diasumsikan sama dengan investasi awal (Kariongan, 2022):

$$\text{Pay Back Periode} = \frac{\text{Nilai Investasi awal}}{\text{Arus kas bersih} + \text{Arus kas masuk}} \dots\dots\dots(2.16)$$

Ada beberapa syarat untuk menetapkan payback period yaitu:

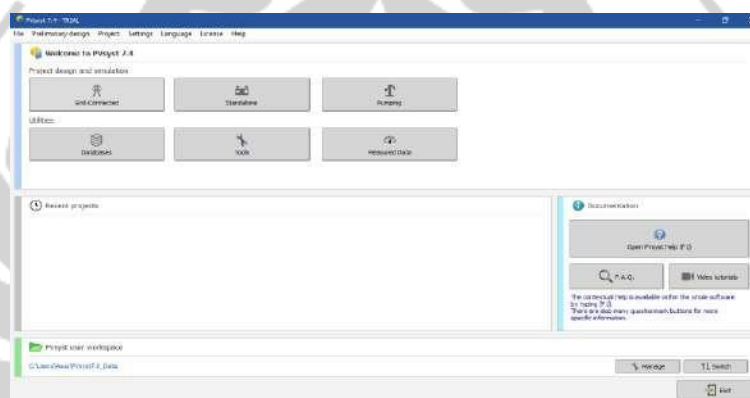
- Payback period dianggap layak/ feasible jika kurang dari durasi umur proyek.
- Payback period yang dianggap tidak layak/ unfeasible jika melebihi durasi umur proyek.

Banyak perangkat lunak yang tersedia saat ini untuk membantu menganalisis ekonomi pembangkit listrik berbasis EBT. Salah satu perangkat lunak tersebut adalah PVSyst. PVSyst adalah perangkat lunak yang dikembangkan oleh Universitas Genewa (Swiss) dan dirancang untuk industri energi surya. PVSyst membuat, mensimulasikan, dan menganalisis semua jenis sistem energi matahari. PVSyst terkenal dengan akurasi dan fleksibilitasnya karena dua alasan (Mohammad, 2023):

1. PVSyst memungkinkan pengguna untuk memasukkan data spesifik tentang tata surya mereka. Contoh: data pada modul PV surya dan inverter.
2. PVSyst dapat mensimulasikan kinerja sistem energi dalam berbagai kondisi. Contoh: Orientasi panel surya, lokasi dan iklim situs, beban listrik dan pola konsumsi, dll.

Selain itu, PVSyst menawarkan serangkaian opsi penyesuaian tingkat lanjut untuk desain sistem PV. Ini termasuk memodelkan teknologi panel yang berbeda, menggabungkan naungan dan faktor spesifik lokasi lainnya, dan mengoptimalkan kinerja sistem berdasarkan berbagai kriteria. Contoh: Produksi energi, biaya, atau emisi CO₂ (Banguero dkk., 2017).

Perangkat lunak ini dapat membantu dalam analisis keekonomian untuk diterapkan dalam PLTS Atap skala kecil. Output berupa payback period misalnya dapat memberikan gambaran kepada calon pengguna untuk merencanakan apabila membeli PLTS Atap melalui skema pinjaman.



Gambar 2.18 Tampilan Awal PVSyst

Pada gambar 2.18 menampilkan tampilan pada perangkat lunak PVSyst parameter input yang dibutuhkan antara lain: Data yang dibutuhkan untuk simulasi pada PVSyst terdiri dari biaya investasi awal (komponen PLTS), biaya pemeliharaan dan operasional, serta biaya penjualan energi PLTS dan penghematan. Sedangkan untuk parameter output perangkat lunak ini dapat menyajikan Net Present Value (NPV), Benefit Cost Ratio (BCR) serta Pay Back Period (PBP).

Penelitian ini difokuskan kepada analisis PBP dikarenakan akan digunakan sebagai dasar pemberian pertimbangan jangka waktu masa pinjaman atau informasi masa waktu pengembalian modal terkait pemasangan PLTS pada bangunan/fasilitas di PT. Puncakjaya Power.

