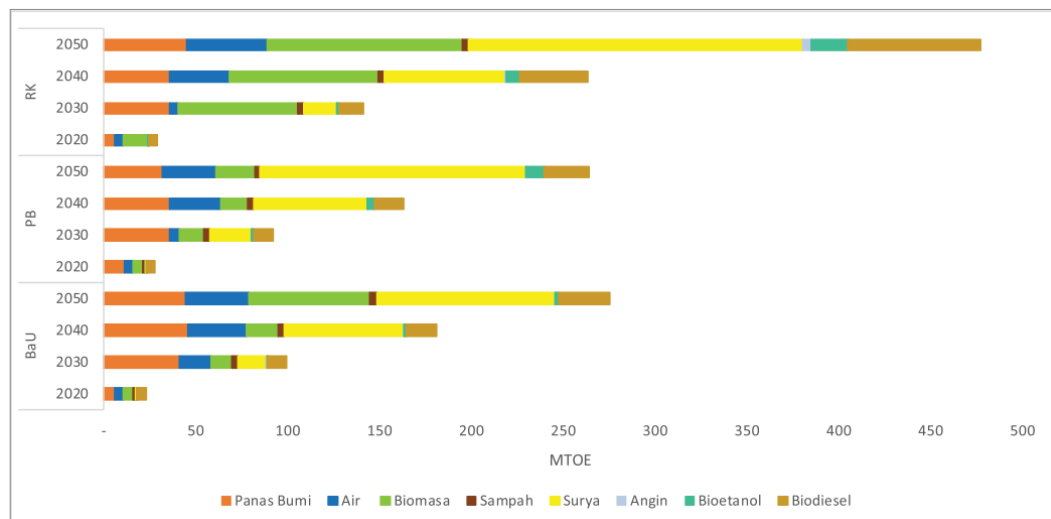


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Energi Baru dan Terbarukan

Energi Baru Terbarukan (EBT) adalah sumber energi alternatif yang berasal dari proses alamiah yang dapat diperbarui secara terus-menerus. EBT tidak hanya ramah lingkungan, tetapi juga mendukung pembangunan energi yang berkelanjutan dalam jangka panjang. Sebagaimana ditampilkan pada Gambar 2.1 penyediaan EBT sebagaimana yang telah dianalisis oleh Dewan Energi Nasional Indonesia dengan tiga skenario perkiraan energi pada tahun 2050 akan mencapai 275,2 MTOE (BaU), 264 MTOE (PB) dan 477 MTOE (RK).



Gambar 2. 1 Penyediaan EBT Berdasarkan Skenario Bau, PB dan RK

(Tim Sekretaris Jenderal Dewan Energi Nasional, 2019)

Berkurangnya produksi energi fosil, khususnya minyak bumi, serta komitmen global dalam pengurangan emisi gas rumah kaca mendorong Pemerintah Indonesia untuk terus meningkatkan peran EBT guna menjaga ketahanan dan kemandirian energi nasional. Sesuai dengan Peraturan Pemerintah No. 79 Tahun 2014 tentang

Kebijakan Energi Nasional, Indonesia menargetkan bauran energi terbarukan sebesar 23% pada tahun 2025 dan meningkat menjadi 31% pada tahun 2050 (Peraturan Pemerintah Republik Indonesia, 2014). Indonesia mempunyai potensi energi baru terbarukan yang cukup besar untuk mencapai target bauran energi primer tersebut, seperti terlihat pada Tabel 2.1.

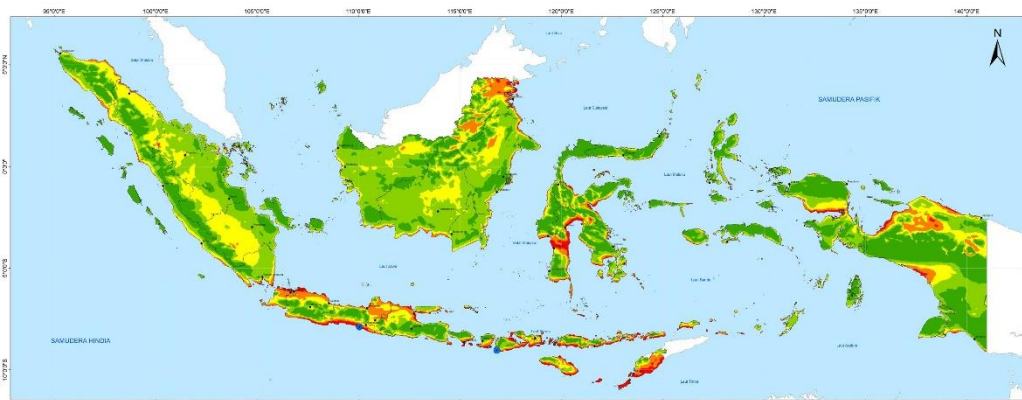
Tabel 2. 1 Potensi Energi Terbarukan
(Tim Sekretaris Jenderal Dewan Energi Nasional, 2019)

Jenis Energi	Potensi
Tenaga air	94,3 GW
Panas bumi	28,5 GW
Bioenergi	32,6 GW
Surya	207,8 GWp
Angin	60,6 GW
Energi laut	17,9 GW

2.1.1 Energi Surya

Energi surya merupakan salah satu bentuk energi terbarukan yang memanfaatkan iradiasi sinar matahari untuk menghasilkan energi listrik. Bekerja melalui mekanisme konversi energi efek fotovoltaiik yang mengubah energi cahaya menjadi energi listrik secara langsung dengan sel surya yang mengarahkan sinar matahari sebagai sumber energi pembangkit listrik. Indonesia memiliki potensi intensitas iradiasi matahari rata-rata sebesar 4,8 kWh/m²/hari atau setara dengan 112.000 GWp/hari dengan variasi rata-rata 9% tiap bulannya (Radwitya & Chandra, 2020).

Sebagaimana ditunjukkan dalam infografis peta potensi surya di Indonesia, dengan tingkat insolasi yang merepresentasikan distribusi iradiasi matahari di berbagai wilayah. Peta tersebut menggunakan skema warna untuk menunjukkan intensitas iradiasi, warna hijau tua mencerminkan tingkat insolasi sebesar 4,21 kWh/m²/hari, hijau muda dalam rentang 4,21–4,40 kWh/m²/hari, kuning untuk 4,41–4,60 kWh/m²/hari, oranye dalam kisaran 4,61–4,80 kWh/m²/hari, dan merah untuk wilayah dengan intensitas tertinggi, yaitu 4,81–5,00 kWh/m²/hari.



Gambar 2. 2 Infografis Peta Potensi Surya di Indonesia

(P3TKEBTKE, 2017)

Berdasarkan Gambar 2.2 potensi pemanfaatan energi surya di wilayah pesisir selatan Jawa Barat tergolong sangat tinggi, dengan tingkat insolasi yang dapat mencapai 5,00 kWh/m²/hari. Potensi energi surya yang tersebar merata di hampir seluruh wilayah Indonesia, didukung oleh tren penurunan harga komponen sistem PLTS serta adanya program-program pemerintah seperti instalasi PLTS atap pada rumah mewah dan program Lampu Tenaga Surya Hemat Energi (LTSHE), menjadi faktor pendorong dalam pengembangan pemanfaatan energi surya secara lebih luas (Tim Sekretaris Jenderal Dewan Energi Nasional, 2019).

2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Surya

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan sistem pembangkit listrik yang memanfaatkan sinar matahari sebagai sumber energi. Konversi energi ini dilakukan melalui *photovoltaic* atau panel surya, yaitu perangkat yang bekerja berdasarkan prinsip efek fotovoltaiik, di mana energi foton dari cahaya matahari diserap oleh material semikonduktor dan kemudian dikonversi menjadi energi listrik. Menurut (Gusmedi et al., 2025) energi listrik yang dihasilkan oleh material semikonduktor pada panel surya berbanding lurus dengan tingkat intensitas cahaya matahari yang diterimanya. Panel surya ini menghasilkan arus listrik searah (DC) yang kemudian akan disesuaikan dengan kebutuhan sistem melalui komponen pendukung lainnya, seperti inverter yang berfungsi mengubah arus DC menjadi arus AC agar dapat digunakan oleh beban yang dilayani maupun disalurkan ke jaringan listrik. Sistem PLTS dapat dikembangkan dalam berbagai skala, mulai dari sistem *off-grid*, *on-grid*, hingga sistem *hybrid* yang menggabungkan PLTS dengan sumber energi lain.

PLTS memiliki sejumlah keunggulan, energi surya bersifat melimpah dan gratis, juga tidak menghasilkan emisi maupun gas buang. Sistem PLTS yang bersifat modular, sehingga mudah untuk diinstalasi dan ditambah kapasitasnya. Selain itu, perawatannya relatif mudah dan dapat bekerja secara otomatis, menjadikannya cocok diterapkan di area terbatas. PLTS juga tergolong aman, memiliki tingkat keandalan yang terus meningkat, serta memungkinkan partisipasi langsung dari masyarakat dalam pengoperasian sistem (Pramono et al., 2020).

Perhitungan potensi energi Pembangkit Listrik Tenaga Surya atap dilakukan dengan menghitung luasan atap yang tersedia serta nilai iradiasi (GHI) dan efisiensi modul PV yang berikisar sekitar hingga 15%-20% (Siregar & Satria, 2025).

$$E_{PLTS} = GHI \times S \times \eta_{PV} \quad (2.1)$$

Dimana:

E_{PLTS} = Energi listrik yang dihasilkan PLTS (kWh).

GHI = Irradiasi matahari rata-rata (kWh/m²/hari).

S = Luas lahan (m²).

η_{PV} = Efisiensi modul PV (%).

Daya yang dapat dibangkitkan PLTS diperoleh dari luas total panel surya yang dipasang, kemudian disesuaikan dengan standar intensitas cahaya matahari dan efisiensi panel. Dari hasil perhitungan ini, jumlah panel surya yang dibutuhkan ditentukan dengan membandingkan daya yang dihasilkan dengan daya maksimum keluaran panel surya (Roza & Mujirudin, 2019).

$$P_{Wp} = S \times STC \times \eta_{PV} \quad (2.2)$$

$$N_{pv} = \frac{P_{Wp}}{P_{MPP}} \quad (2.3)$$

Dimana:

P_{Wp} = Daya yang Dibangkitkan PLTS (Wp)

STC = Kondisi uji standar (1000 W/m²)

η_{PV} = Efisiensi panel surya (%)

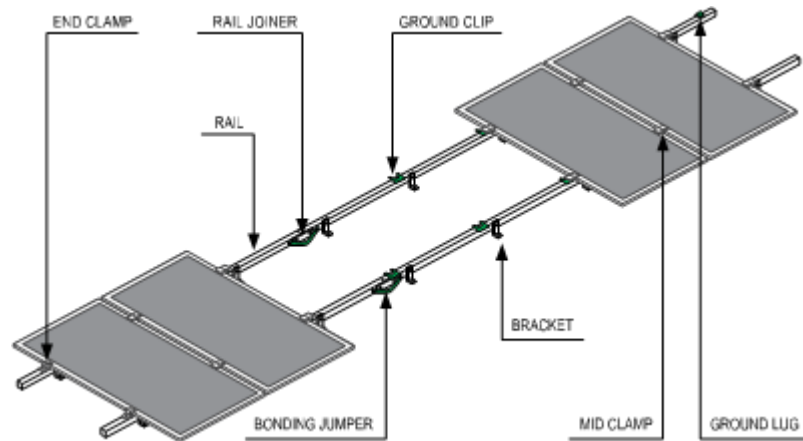
N_{PV} = Jumlah panel surya (unit)

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

2.2.2 Mounting Panel Surya

Mounting system pada instalasi PLTS merupakan struktur penyangga mekanis yang berfungsi untuk menempatkan dan menstabilkan posisi panel surya sesuai dengan ketersediaan area. Dalam sistem ini terdapat komponen bracket yang berperan vital sebagai pengikat modul pada media instalasi. Struktur tersebut tidak

hanya dituntut mampu menahan beban statis modul dan beban cuaca, tetapi juga harus memiliki resistensi terhadap korosi untuk mencegah degradasi material yang dapat membahayakan sistem.



Gambar 2. 3 Susunan konfigurasi standar PV Mounting (Simanjorang, 2022)

Gambar 2.3 merepresentasikan konfigurasi teknis dari struktur *mounting system* panel surya beserta komponen pendukung instalasinya. Secara struktural beban modul ditopang oleh batang rel yang terhubung dengan media atap menggunakan Bracket. Untuk mengakomodasi dimensi array yang lebih luas, koneksi antar-batang rel difasilitasi oleh komponen *rail joiner*. Mekanisme fiksasi modul pada rel dilakukan menggunakan *end clamp* untuk sisi terluar dan *mid clamp* pada sambungan di antara dua modul.

Metode pemasangan *mounting* secara umum diklasifikasikan menjadi tiga kategori, yaitu instalasi di atas permukaan tanah (*ground mounting*), instalasi disambungkan pada suatu tiang (*pole mounting*) dan instalasi pada atap bangunan (*roof mounting*).

1. *Ground Mounting*

Sistem *ground mounting* merupakan konfigurasi rangka penyangga modul surya yang diinstalasi langsung pada permukaan tanah. Penerapan metode ini

memerlukan ketersediaan lahan terbuka yang luas serta bebas dari vegetasi atau objek penghalang guna meminimalisir efek bayangan. Selain dinilai ekonomis dari sisi instalasi, sistem ini menawarkan keunggulan dalam aspek aksesibilitas, sehingga mempermudah proses pemeliharaan dan pembersihan modul secara berkala. Namun karena instalasi panel surya tipe *ground-mounted* terpapar secara langsung oleh kondisi lingkungan, khususnya kondisi angin, maka perencanaan desain struktural yang presisi menjadi aspek krusial untuk menjamin stabilitas sistem (Zulfakar, 2025).

2. *Pole Mounting*

Sistem *pole mounting* merupakan struktur penyangga panel surya yang ditumpu oleh satu atau beberapa tiang vertikal. Desain ini dirancang untuk memaksimalkan aksesibilitas material, menggunakan komponen seperti konduit vertikal dan kabel baja serta dapat diinstalasi hanya dengan menggunakan perkakas tangan standar (Franz et al., 2022). Hal ini menjadikan sistem tersebut sangat adaptif dan mudah direplikasi. Selain kemudahan konstruksi, keunggulan utama dari konfigurasi ini terletak pada efisiensi penggunaan lahan, di mana area permukaan tanah yang dibutuhkan jauh lebih minim dibandingkan sistem *ground mounting* konvensional.

3. *Roof Mounting*

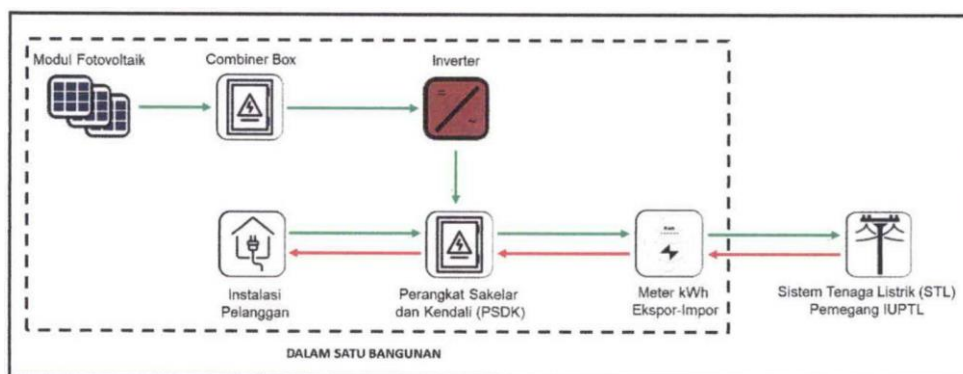
Sistem *roof mounting* merupakan instalasi panel surya yang memanfaatkan struktur atap bangunan sebagai media penyangga utama guna mengoptimalkan penggunaan lahan. Dalam perancangannya diperlukan evaluasi komprehensif terhadap parameter teknis yang meliputi karakteristik material atap, jarak antar-modul, sudut kemiringan, serta spesifikasi rel penyangga yang merupakan tahapan

krusial (Iskandar et al., 2024). Evaluasi tersebut bertujuan untuk memastikan pembebanan total yang dihasilkan oleh sistem PLTS aman untuk struktur bangunan eksisting untuk menahan beban instalasi.

Dalam implementasi sistem PLTS untuk instalasi pada bangunan biasa diterapkan dalam dua bentuk utama, menurut (Musfita, G.A., H, Husada., Suyanto, 2020) PLTS digunakan tergantung pada kebutuhan dan ketersediaan jaringan listrik di lokasi penerapannya.

2.2.2 Sistem PLTS *On-Grid*

Sistem PLTS *On-Grid* tetap terhubung dengan jaringan PLN. Sistem ini didesain agar dapat terintegrasi dengan jaringan listrik yang sudah ada, dengan kapasitas daya yang umumnya lebih kecil dibandingkan dengan total beban sistem. Oleh karena itu, seluruh daya yang dihasilkan langsung disalurkan ke sistem kelistrikan, tanpa penyimpanan energi, sehingga PLTS *On-grid* tidak menggunakan baterai dan hanya beroperasi pada siang hari saat tersedia sinar matahari (Syahputra & Soesanti, 2021).



Gambar 2. 4 Diagram Sistem PLTS On-grid

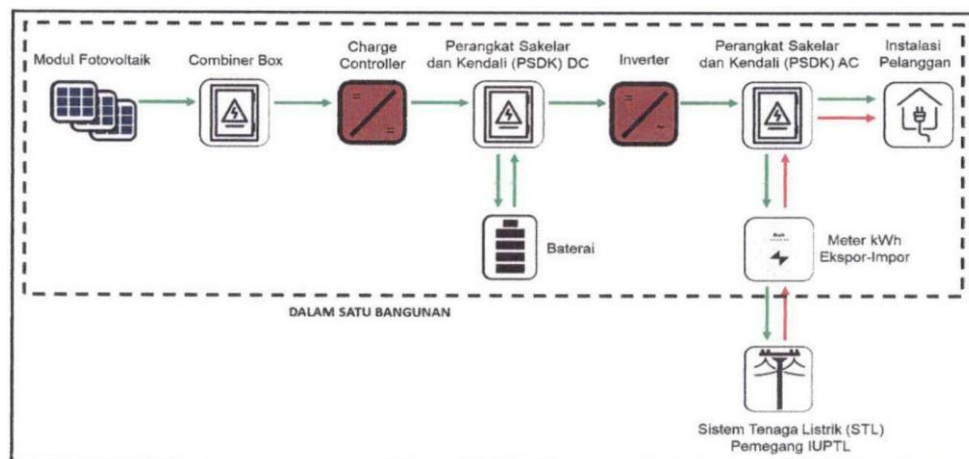
(Kementerian ESDM, 2021)

Komponen utama dari sistem PLTS *On-Grid* adalah inverter yang terintegrasi dalam Perangkat Sakelar dan Kendali (PSDK) seperti pada Gambar 2.3. Inverter

berfungsi untuk mengonversi listrik arus searah yang dihasilkan oleh modul PV menjadi listrik arus bolak-balik (AC) dengan tegangan dan kualitas daya yang sesuai dengan standar jaringan PLN. Sistem ini juga dilengkapi dengan proteksi otomatis, di mana suplai daya dari PLTS akan berhenti jika jaringan listrik utama tidak beroperasi, guna menjaga keselamatan dan stabilitas sistem.

2.2.3 Sistem PLTS *Off-Grid*

Sistem PLTS *Off-grid* merupakan sistem pembangkit listrik yang beroperasi secara mandiri tanpa terhubung ke jaringan PLN. Sistem ini mengandalkan penyimpanan energi berupa baterai yang menyimpan energi listrik dari modul PV yang dihasilkan siang hari. Sistem ini umumnya diterapkan di daerah terpencil atau PLTS sistem terpusat milik negara.



Gambar 2. 5 Diagram Sistem PLTS Off-Grid

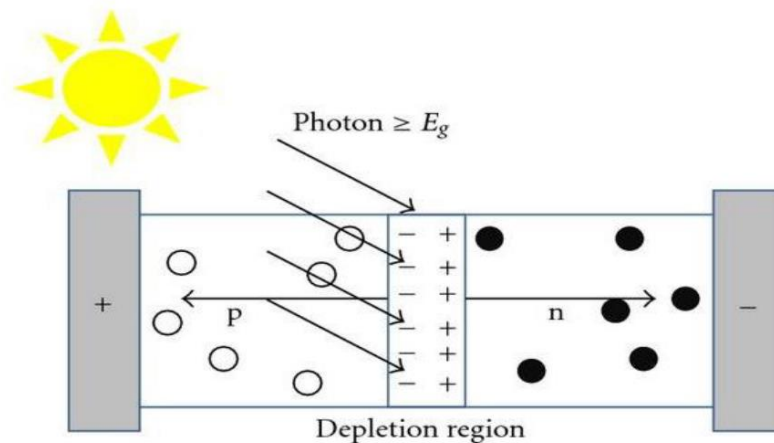
(Kementerian ESDM, 2021)

Dalam implementasinya, sistem PLTS *Off-grid* terdiri dari beberapa komponen tambahan, seperti pada Gambar 2.4 yaitu: *solar charge controller* (SCC) untuk mengatur aliran daya dari modul ke baterai dan baterai sebagai media penyimpanan energi (Windarta et al., 2022). Sistem ini dirancang untuk menyediakan pasokan

listrik secara berkelanjutan, bahkan ketika sinar matahari tidak tersedia, berkat dukungan penyimpanan energi pada baterai.

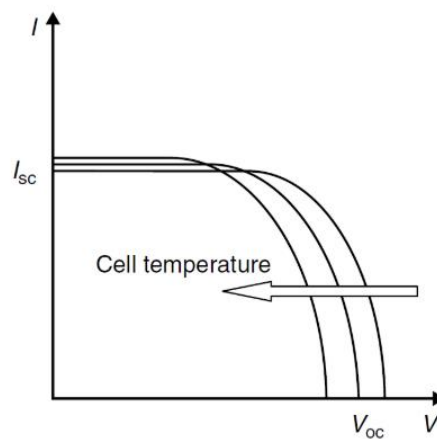
2.3 Panel Surya

Panel surya (fotovoltaik) merupakan komponen utama pada PLTS yang berfungsi mengubah energi surya menjadi energi listrik. Proses ini terjadi melalui prinsip kerja material semikonduktor. Ketika radiasi matahari mengenai permukaan sel fotovoltaik, foton dari cahaya matahari akan menumbuk lapisan tipe-N. Proses ini menyebabkan elektron-elektron lepas dari ikatan atomnya, menciptakan pasangan elektron–hole. Elektron yang bebas kemudian bergerak menuju lapisan tipe-N, sementara hole bergerak ke lapisan tipe-P, membentuk aliran muatan. Gerakan elektron ini menghasilkan arus listrik yang dikenal sebagai arus foton (I_{ph}). Karena sel PV berfungsi sebagai sumber arus, arus total yang terbentuk dalam sistem juga dipengaruhi oleh arus dioda (I_D) yang mengalir akibat karakteristik semikonduktor di persimpangan P-N. Menurut (Y. Zhang et al., 2020) perbedaan jumlah lubang dan kerapatan elektron bebas pada masing-masing permukaan tipe-P dan tipe-N menyebabkan terbentuknya medan listrik pada area pertemuan keduanya (*P-N junction*). Medan listrik ini terbentuk dengan arah dari sisi tipe-P menuju sisi positif dan dari tipe-N menuju sisi negatif, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2. 6 Skema *Photovoltaic* (Burhandono et al., 2022)

Pergerakan Bumi terhadap Matahari menyebabkan terjadinya perubahan sudut datang iradiasi matahari sepanjang tahun. Oleh karena itu, kemiringan dan orientasi panel surya perlu diatur sedemikian rupa untuk mengoptimalkan penyerapan radiasi matahari. Penyesuaian kemiringan panel PV secara tepat dapat meningkatkan nilai rata-rata iradiasi tahunan yang diterima (W/m^2), sehingga berdampak langsung pada peningkatan energi listrik yang dihasilkan. Semakin optimal sudut kemiringan dan arah orientasi panel, semakin besar pula potensi konversi energi surya menjadi energi listrik oleh sistem PV. Iradiasi matahari memengaruhi besarnya arus listrik yang dihasilkan oleh PLTS, sedangkan temperatur modul berpengaruh terhadap tegangan keluaran seperti yang terlihat pada Gambar 2.5. Peningkatan suhu sel fotovoltaik dapat menyebabkan penurunan efisiensi konversi listrik, dengan laju penurunan sekitar 0,4% hingga 0,5% per $^{\circ}\text{C}$ di atas suhu standar operasi (C. Zhang et al., 2020). Selain itu, *shading* memengaruhi intensitas iradiasi matahari yang diterima oleh modul surya dalam proses pembangkitan, sehingga turut memengaruhi kinerja keseluruhan sistem PLTS.



Gambar 2. 7 Pengaruh Suhu Sel PV Terhadap Karakteristik Panel Surya

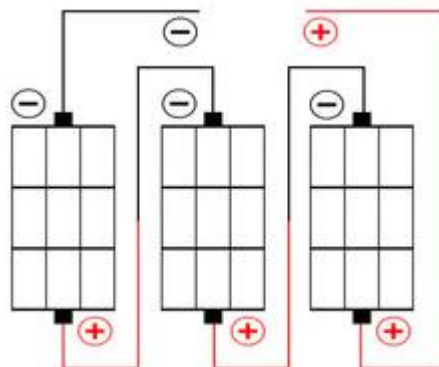
(C. Zhang et al., 2020)

2.3.1 Rangkaian Panel Surya

Perancangan sistem PLTS berorientasi pada pemenuhan spesifikasi suplai daya dan tegangan nominal yang dibutuhkan oleh beban. Guna mencapai parameter keluaran yang ditargetkan tersebut, topologi interkoneksi panel surya dapat dikonfigurasi secara seri, paralel, maupun kombinasi keduanya.

1. Rangkaian Seri

Konfigurasi rangkaian seri terhubung antara terminal positif (+) satu modul panel surya dengan terminal negatif (-) pada modul panel surya berikutnya.



Gambar 2. 8 Rangkaian Seri Panel Surya

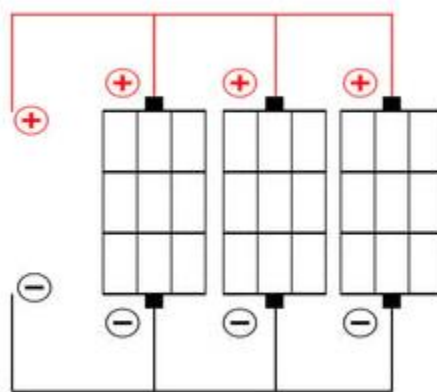
Karakteristik utama dari rangkaian seri adalah terjadinya akumulasi nilai tegangan total sistem, sedangkan besaran arus listrik yang mengalir tetap konstan atau sama dengan arus pada satu modul tunggal.

$$V_{total} = V1 + V2 + V3 + \dots + Vn \quad (2.4)$$

$$I_{total} = I1 = I2 = I3 = \dots = In \quad (2.5)$$

2. Rangkaian Paralel

Rangkaian paralel dibentuk melalui penggabungan seluruh terminal positif (+) modul pada satu titik koneksi umum, dan seluruh terminal negatif (-) pada titik koneksi lainnya.



Gambar 2. 9 Rangkaian Paralel Panel Surya

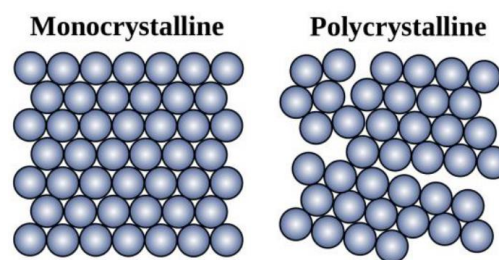
Rangkaian paralel menghasilkan nilai tegangan sistem yang cenderung konstan atau sama dengan tegangan satu modul, sementara total arus listrik yang dihasilkan akan meningkat sebagai hasil akumulasi arus dari setiap panel surya yang terhubung.

$$V_{total} = V1 = V2 = V3 = \dots = Vn \quad (2.6)$$

$$I_{total} = I1 + I2 + I3 + \dots + In \quad (2.7)$$

2.3.2 Jenis Panel Surya

Di Indonesia, jenis panel surya yang banyak beredar di pasaran umumnya menggunakan bahan baku silikon, yaitu *monocrystalline* dan *polycrystalline*. Material modul PV pada dasarnya terdiri dari tiga jenis utama, yaitu *silicon-based* (*monocrystalline* dan *polycrystalline*), *thin-film polycrystalline*, dan *thin-film single crystalline* (Khaligh & Onar, 2017). Sel surya monokristalin dibuat dari satu kristal silikon tunggal yang memiliki struktur kristal seragam, sedangkan sel surya polikristalin terdiri dari beberapa kristal silikon dalam satu wafer. seperti yang terlihat pada Gambar 2.10.



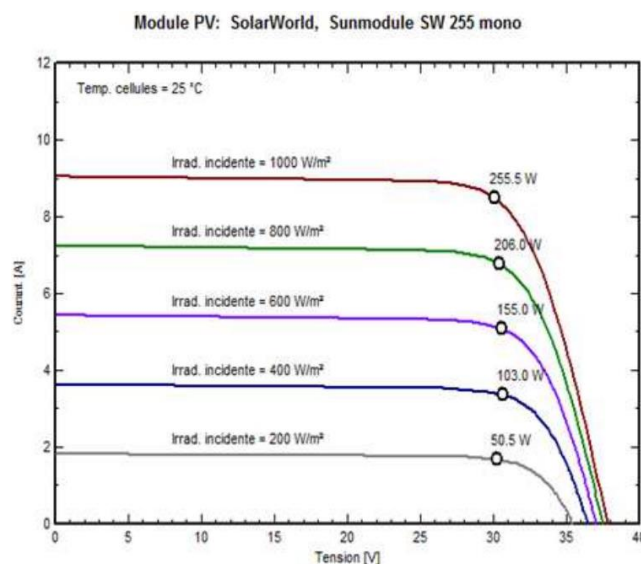
Gambar 2. 10 Struktur Kristal Monokristalin dan Polikristalin

(Callister Jr, W. D., and Rethwisch, 2012)

1. Monokristalin

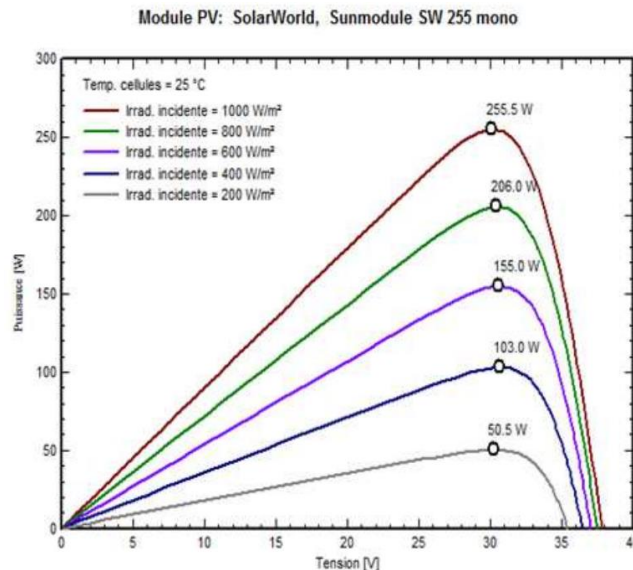
Monokristalin merupakan panel surya yang terbuat dari silikon murni yang dikristalkan menjadi satu kristal. Panel jenis ini tersusun dari kristal silikon tunggal yang memungkinkan pergerakan elektron lebih leluasa, sehingga menghasilkan aliran arus yang lebih tinggi. Monokristalin memiliki efisiensi energi yang tinggi dan umur pemakaian yang panjang, karena struktur kristalnya yang lebih murni, kerapatan cacat yang rendah, dan hambatan listrik yang lebih kecil. Menurut (Fitria Hidayanti, 2020), panel surya *monocrystalline* memiliki efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan *polycrystalline*, yaitu masing-masing sebesar 9,22% dan 7,94%.

Modul PV monokristalin memiliki karakteristik efisiensi yang tinggi dan output daya yang optimal pada kondisi pencahayaan penuh, serta stabilitas tegangan meskipun arus menurun akibat rendahnya iradiasi matahari. Karakteristik ini menjadikan modul monokristalin sangat cocok untuk aplikasi yang membutuhkan output daya maksimal dari area terbatas. Berdasarkan penelitian yang dilakukan (Elamim et al., 2017) menggunakan modul PV 255 Wp, ketika iradiasi matahari 1000 W/m^2 , modul menghasilkan daya maksimum sebesar 255,5 W, namun ketika iradiasi menurun menjadi 800, 600, 400, dan 200 W/m^2 , daya yang dihasilkan juga menurun secara proporsional, masing-masing menjadi 208,6 W, 155,0 W, 103,0 W, dan 50,5 W. Penurunan daya ini terutama disebabkan oleh penurunan arus, sedangkan tegangan cenderung tetap stabil seperti pada Gambar 2.11 dan Gambar 2.12.



Gambar 2. 11 Karakteristik I-V Monokristalin

(Elamim et al., 2017)



Gambar 2. 12 Karakteristik P-V Monokristalin

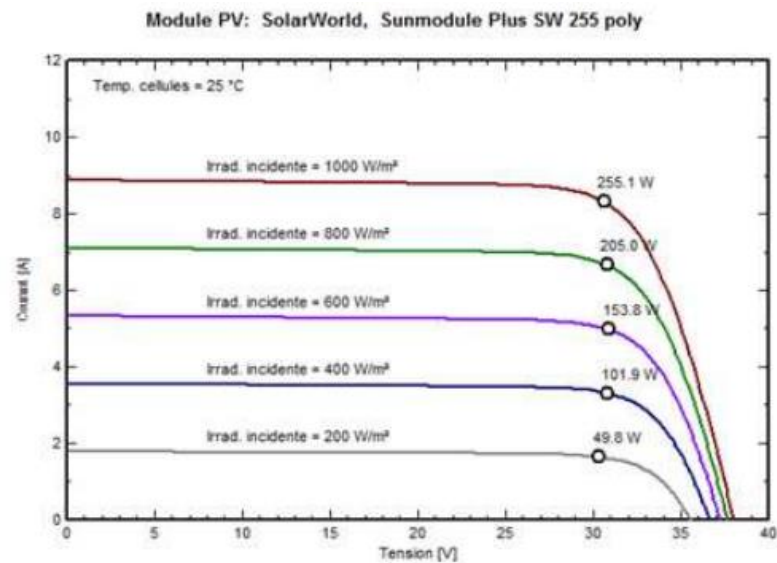
(Elamim et al., 2017)

2. Polikristalin

Panel surya polikristalin terdiri dari banyak kristal yang berbeda dari silikon yang dilelehkan dan didinginkan dan dibiarkan membentuk banyak kristal dalam satu wafer. Akibat struktur kristalnya yang tidak seragam dan memiliki lebih banyak batas antar kristal, panel surya polikristalin memiliki efisiensi yang cenderung lebih rendah dibandingkan monokristalin, memiliki efisiensi berkisar 12%-14%. Panel surya polikristalin tetap banyak digunakan karena proses produksinya lebih sederhana dan biaya pembuatannya lebih rendah, sehingga menjadi pilihan yang ekonomis.

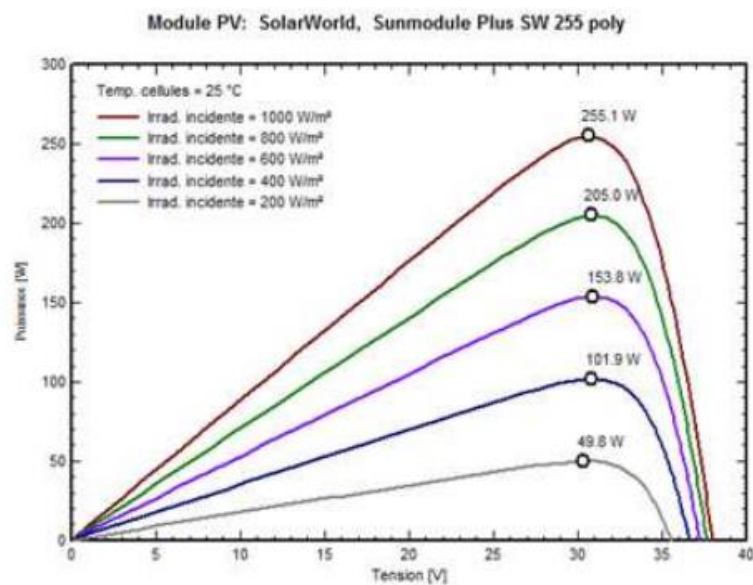
Modul PV polikristalin memiliki karakteristik tegangan keluaran pada modul ini umumnya lebih rendah, baik pada kondisi tegangan rangkaian terbuka (V_{oc}) maupun tegangan pada titik daya maksimum. Arus keluaran bergantung pada intensitas radiasi matahari, namun cenderung sedikit lebih rendah dibandingkan modul monokristalin dalam kondisi yang sama, seperti yang ditunjukkan pada

Gambar 2.13 dan Gambar 2.14. Meskipun begitu, modul polikristalin lebih tahan terhadap suhu tinggi dan memiliki biaya produksi yang lebih ekonomis, sehingga sering digunakan untuk aplikasi skala besar dengan area pemasangan yang luas.



Gambar 2. 13 Karakteristik I-V Polikristalin

(Elamim et al., 2017)



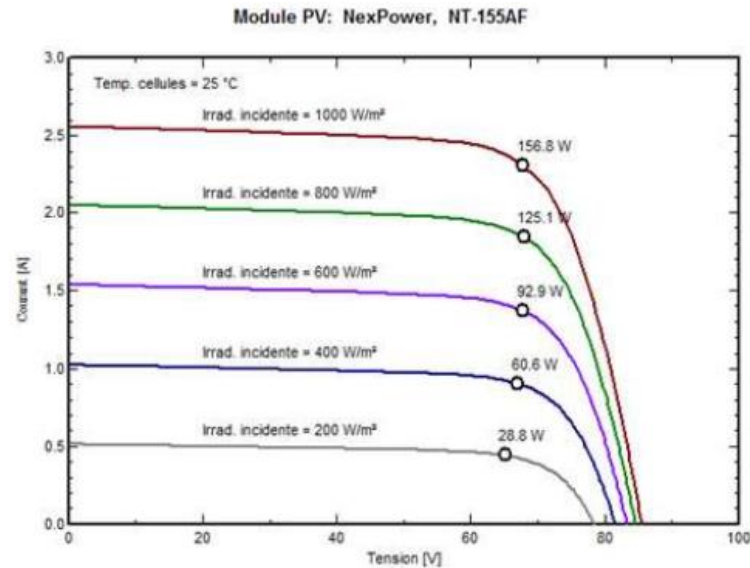
Gambar 2. 14 Karakteristik P-V Polikristalin

(Elamim et al., 2017)

3. *Thin Film Solar Cell*

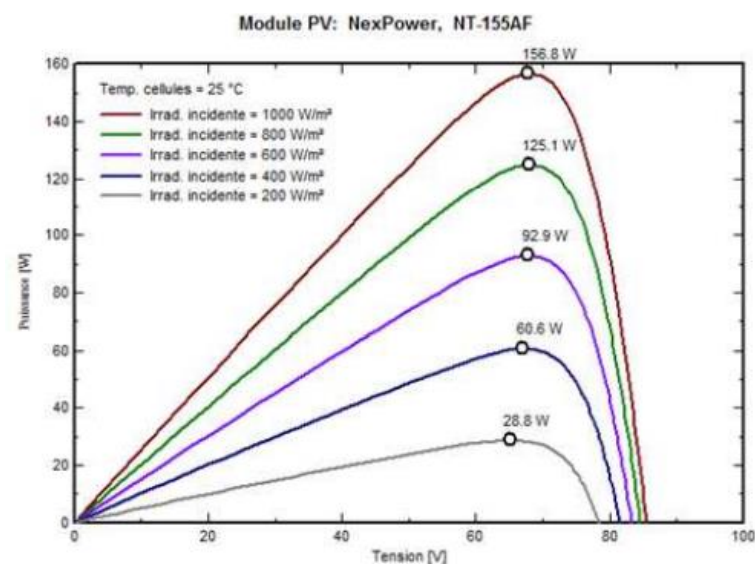
Panel surya jenis *thin film* merupakan bagian dari generasi kedua teknologi sel surya dan dikenal lebih ekonomis dibandingkan dengan sel surya berbasis wafer silikon generasi pertama. Ketebalan lapisan penyerap cahaya pada sel wafer silikon dapat mencapai 350 μm , sementara pada sel surya thin film ketebalannya jauh lebih tipis, biasanya sekitar 1 μm . Inovasi terbaru dalam teknologi thin film adalah pengembangan panel surya triple-junction, yang memiliki efisiensi lebih tinggi terutama pada kondisi pencahayaan rendah. Panel ini mampu menghasilkan daya hingga 45% lebih besar dibandingkan panel lainnya dengan kapasitas daya nominal yang sama, terutama saat cuaca mendung. Menurut (Gautama, 2021) berdasarkan material penyusunnya, sel surya thin film dapat diklasifikasikan menjadi tiga jenis utama, yaitu silikon amorf (a-Si), kadmium telurida (CdTe), dan tembaga indium galium selenium (CIGS).

Pada penelitian yang dilakukan (Elamim et al., 2017), modul surya tipe *Thin Film* menunjukkan kinerja yang stabil pada berbagai tingkat intensitas penyinaran (irradiansi). Meskipun demikian, arus listrik yang dihasilkan cenderung lebih rendah dibandingkan modul monokristalin dengan ukuran dan kondisi yang sama. Modul ini memiliki karakteristik tegangan yang relatif tinggi, mencapai hingga 80 V, sehingga cocok digunakan untuk aplikasi yang memerlukan tegangan besar. Selain itu, efisiensinya tetap dapat dipertahankan pada kondisi pencahayaan rendah, menjadikannya unggul dalam situasi berawan atau pencahayaan tidak langsung. Ilustrasi lebih lanjut mengenai karakteristik ini dapat dilihat pada Gambar 2.15 dan Gambar 2.16.



Gambar 2. 15 Karakteristik I-V Thin Film Amorphous

(Elamim et al., 2017)



Gambar 2. 16 Karakteristik P-V Thin Film Amorphous

(Elamim et al., 2017)

2.4 Faktor yang Mempengaruhi Kinerja Panel Surya

Proses konversi iradiasi matahari menjadi energi listrik pada modul panel surya merupakan sistem yang sangat dipengaruhi oleh berbagai variabel lingkungan dan teknis. Parameter determinan yang mempengaruhi daya keluaran meliputi

intensitas iradiasi, kecepatan angin, kondisi atmosfer, orientasi geometris, serta temperatur sel itu sendiri. Secara spesifik temperatur operasional sel terbentuk dari interaksi kompleks antara temperatur ambien, sirkulasi angin, karakteristik material, dan metode pemasangan. Di antara seluruh variabel tersebut faktor suhu menempati posisi krusial yang memerlukan atensi khusus, mengingat fluktuasi temperatur memiliki dampak signifikan terhadap efisiensi produksi energi sistem secara *real-time* (Fakhira et al., 2023).

2.4.1 Iradiasi Matahari

Iradiasi matahari didefinisikan sebagai densitas energi radiasi surya pada satu satuan luas permukaan dalam periode waktu tertentu dalam satuan kWh/m²/hari. Dalam karakteristik operasional panel surya, intensitas iradiasi merupakan variabel dominan yang mempengaruhi kinerja. Peningkatan intensitas iradiasi akan berdampak pada kenaikan arus keluaran secara signifikan. Sementara itu parameter tegangan mengalami perubahan yang relatif kecil pada kondisi temperatur konstan. Ketidakteraturan iradiasi pada permukaan modul fotovoltaik akan menginduksi ketidakseimbangan parameter elektrik antar-sel (Burhandono et al., 2022). Kondisi ini mengakibatkan pada timbulnya distribusi termal yang tidak merata, berpotensi memicu efek pemanasan pada satu titik. Dampak dari anomali tersebut menyebabkan penurunan daya keluaran sistem, serta dapat menurunkan keandalan komponen dalam jangka panjang.

2.4.2 Temperatur

Temperatur sel surya (T_c) didefinisikan sebagai parameter suhu operasional yang terukur pada permukaan modul fotovoltaik. Dalam kondisi malam hari, nilai T_c cenderung berada dalam kesetimbangan termal atau ekuivalen dengan

temperatur lingkungan. Namun, pada saat terjadi paparan iradiasi matahari dengan intensitas tinggi, temperatur sel akan mengalami eskalasi panas yang signifikan, di mana nilainya dapat melampaui temperatur lingkungan dengan deviasi mencapai 30°C atau lebih (Hie Khwee, 2013). Untuk mendapatkan nilai temperatur sel surya dapat menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$T_c = T_a + I_T \left(\frac{T_{c,NOCT} - T_{a,NOCT}}{I_{T,NOCT}} \right) \left(1 - \frac{n_c}{\tau\alpha} \right) \quad (2.8)$$

Dimana:

T_c = Temperatur PV (°C)

T_a = Temperatur daerah sekitar (°C)

$T_{c,NOCT}$ = Temperatur nominal sel surya (°C)

$T_{a,NOCT}$ = Temperatur daerah sekitar di mana temperatur nominal sel surya (°C)

$I_{T,NOCT}$ = Radiasi matahari pada temperatur nominal sel surya didefinisikan
(1000 kw/m²)

n_c = Efisiensi panel surya (%)

$\tau\alpha$ = Tingkat penyerapan panel surya (90%)

2.4.3 Sudut Kemiringan

Penentuan sudut kemiringan optimal panel surya sangat bergantung pada variasi elevasi matahari tahunan serta garis lintang lokasi instalasi. Wilayah Indonesia memiliki potensi penerimaan iradiasi tegak lurus yang maksimal pada sudut kemiringan 0°. Namun instalasi secara datar memiliki kelemahan teknis berupa risiko genangan air dan akumulasi debu pada permukaan modul. Sudut kemiringan panel surya mempengaruhi nilai *Global on Collector Plane* yang relatif terhadap permukaan horizontal (Gusmedi et al., 2025).

2.4.4 Sudut *Azimuth*

Parameter sudut azimuth merupakan sudut orientasi arah datangnya sinar matahari pada bidang horizontal relatif terhadap arah mata angin utara. Mengingat posisi matahari yang bersifat dinamis sepanjang hari, penentuan orientasi panel surya menjadi krusial untuk memaksimalkan tangkapan energi. Sebagai contoh pada fenomena ekuinoks, matahari terbit tepat dari arah Timur (azimut 90°) dan terbenam di arah Barat (azimut 270°) (April et al., n.d.).

Untuk mendapatkan paparan iradiasi yang optimal, panel surya harus diorientasikan menuju garis khatulistiwa. Oleh karena itu, pada lokasi di belahan bumi utara, orientasi optimal panel adalah menghadap selatan (azimut 180°). Sebaliknya, untuk lokasi di belahan bumi selatan panel surya harus dihadapkan ke arah utara (azimut 0°).

2.5 Inverter

Inverter merupakan komponen utama dalam sistem PLTS yang berfungsi untuk mengubah listrik DC yang dihasilkan oleh modul sel surya menjadi energi listrik AC dengan karakteristik dan kualitas yang sesuai sebelum disalurkan ke beban. Menurut (Wahyu et al., 2020) untuk keperluan sistem PLTS *On-Grid* dengan meteran listrik PLN ekspor-impor, umumnya digunakan inverter dengan kapasitas minimum 3000 Watt.

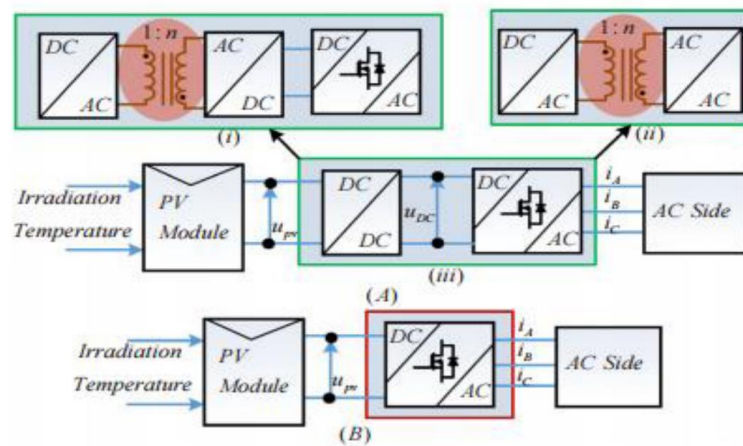
Sizing Factor Inverter (SFI) merupakan rasio perbandingan antara kapasitas daya inverter dengan kapasitas daya total dari modul panel surya. Rasio ini digunakan untuk memastikan bahwa inverter dan panel surya dapat beroperasi secara efisien dan aman, tanpa menyebabkan overloading pada inverter maupun kehilangan daya dari modul PV. SFI menggambarkan sejauh mana daya inverter

disesuaikan terhadap total daya puncak modul PV yang diuji berdasarkan *Standard Test Condition* (STC) seperti pada persamaan berikut (Leticia Toreti Scarabelot, G., & Arns Rampinelli, 2021).

$$SFI = \frac{P_{inverter}}{P_{wp}} \quad (2.9)$$

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan oleh (Rodrigo et al., 2016), nilai SFI menunjukkan perbedaan kinerja antara dua jenis teknologi PV. Panel surya berbahan dasar silikon (Si) memiliki nilai SFI 1,05, yang menunjukkan efisiensi relatif lebih tinggi. Sementara itu panel surya berbahan dasar *cadmium telluride* (CdTe) memiliki nilai SFI 0,95. Perbedaan ini menunjukkan bahwa meskipun teknologi film tipis CdTe memiliki keunggulan biaya produksi yang lebih rendah serta performa yang cukup baik pada kondisi pencahayaan rendah, namun secara keseluruhan efisiensi energi kumulatif yang dihasilkan masih sedikit lebih rendah dibandingkan dengan panel surya berbahan silikon.

Pada sistem PLTS yang terhubung ke jaringan listrik, umumnya diperlukan transformator yang berfungsi sebagai isolasi galvanik antara panel surya dan sistem jaringan, yang dapat beroperasi pada frekuensi rendah maupun tinggi (Burhandono et al., 2022). Namun penggunaannya seringkali menyebabkan peningkatan biaya investasi secara keseluruhan. Inverter tanpa transformator menawarkan solusi lebih efisien dari segi biaya.



Gambar 2. 17 (A) Inverter MSPC, (B) Inverter SSPC

(Dogga & Pathak, 2019)

Terdapat dua jenis inverter tanpa transformator yang umum digunakan dalam sistem PLTS, yaitu *Multi-Stage Power Conversion* (MSPC) dan *Single-Stage Power Conversion* (SSPC) (Dogga & Pathak, 2019). Kedua jenis inverter ini memiliki perbedaan dalam jumlah tahapan konversi daya dari sumber DC yang dihasilkan oleh panel surya menjadi arus AC yang digunakan oleh beban atau disalurkan ke jaringan listrik. Kedua konfigurasi ini ditampilkan pada Gambar 2.17 yang menunjukkan perbedaan struktur dan alur konversi daya dari masing-masing jenis inverter.

2.6 Aspek Ekonomi Implementasi PLTS

Iradiasi matahari merupakan sumber energi primer yang tersedia secara melimpah di alam dan bebas biaya. Namun proses konversi sumber daya matahari menjadi tenaga listrik melalui sistem fotovoltaik tetap menuntut investasi kapital yang substansial. Tingginya biaya awal pada implementasi PLTS utamanya didominasi oleh pengadaan komponen sistem yang meliputi panel surya, unit inverter, serta komponen pendukung lainnya.

2.6.1 *Life Cycle Cost (LCC)*

Analisis *Life Cycle Cost* (LCC) merupakan metode evaluasi komprehensif yang memperhitungkan totalitas biaya baik nilai saat ini maupun proyeksi biaya masa depan yang timbul sepanjang siklus hidup operasional sistem PLTS. Komponen perhitungan ini tidak hanya terbatas pada biaya investasi awal, melainkan juga mengakumulasi biaya operasional dan pemeliharaan (O&M), perbaikan komponen. Perbandingan nilai LCC antara sistem yang diusulkan dengan opsi alternatif menjadi indikator utama dalam menentukan efektivitas biaya proyek tersebut.

$$LCC = C + O\&M + R \quad (2.10)$$

Dimana:

C = Biaya modal awal

O&M = Biaya operasioanal dan pemeliharaan

R = Biaya penggantian komponen

Biaya yang dikeluarkan selama jangka waktu hidup proyek akan berbeda setiap tahun nya. Untuk menghitung biaya yang sesuai dengan laju bunga Bank Indonesia, dengan tingkat bunga bank yang digunakan diambil dari aturan yang telah ditetapkan oleh Bank Indonesia yaitu sebesar 6% dan nilai suku bunga terkecil adalah sebesar 3,5%.

$$O\&M = O\&M_p \left(\frac{(1+i)^2 - 1}{i(1+i)^2} \right) \quad (2.11)$$

Dimana:

O&M_p = Biaya O&M per tahun

n = Life time proyek

i = Tingkat suku bunga bank

2.6.2 *Cost of Energy (COE)*

Cost of Energy merupakan biaya yang energi listrik per 1 kWh. COE dapat diketahui dengan membagi biaya tahunan dengan produksi energi tahunan oleh PLTS. Nilai COE dapat diketahui dengan persamaan berikut.

$$COE = \frac{TAC}{E_{served}} \quad (2.12)$$

Dimana:

TAC = Biaya total tahunan PLTS (Rp)

E_{served} = Total beban listrik yang berhasil dilayani (kWh)

2.6.3 *Cash Flow Analysis (CFA)*

Cash Flow Analysis adalah laporan besarnya kas masuk dan kas keluar selama jangka waktu proyek dari aktivitas operasi, investasi dan pembiayaan. CFA mencakup:

a. *Cash Flow Benefit (CFB)*

Cash Flow Benefit adalah aliran uang masuk maupun penghematan yang diperoleh disetiap tahun selama sistem berjalan.

$$CFB = \sum_{t=1}^n \frac{\text{Penghematan bersih}}{(1+i)^n} \quad (2.13)$$

b. *Cash Flow Cost (CFC)*

Cast Flow Cost adalah aliran uang keluar disetiap tahun selama sistem bekerja.

$$CFC = \sum_{t=1}^n \frac{\text{Cost}}{(1+i)^n} \quad (2.14)$$

2.6.4 Net Present Value (NPV)

Net Present Value (NPV) merupakan seluruh aliran kas bersih dinilai sekarang atas dasar faktor diskonto. Dengan menghitung selisih antara seluruh kas bersih nilai sekarang dengan investasi modal awal.

$$NPV = CFB - CFC \quad (2.15)$$

2.6.5 Internal Rate of Return (IRR)

Internal Rate of Return (IRR) didefinisikan sebagai tingkat suku bunga diskonto yang menyeimbangkan nilai arus kas masuk dan keluar sehingga *Net Present Value* (NPV) proyek bernilai nol. Suatu proyek investasi dinyatakan layak apabila nilai IRR melampaui suku bunga bank. Sebaliknya, jika nilai IRR berada di bawah ambang batas suku bunga acuan tersebut, proyek dinilai tidak layak untuk direalisasikan karena berpotensi merugikan.

$$IRR = i_1 \left(\frac{NPV_1}{NPV_1 - NPV_2} \right) \times (i_2 - i_1) \quad (2.16)$$

Dimana:

NPV_1 = net present value tingkat bunga rendah

NPV_2 = net present value tingkat bunga tinggi

i_1 = tingkat bunga yang kecil (%)

i_2 = tingkat bunga yang besar (%)

2.6.6 Simple Payback Period (SPP)

Simple Payback Period (SPP) merupakan pendekatan analisis ekonomi dalam mengevaluasi kelayakan proyek, termasuk pada sistem PLTS *on-grid*. Secara spesifik, metode ini bertujuan untuk mengkalkulasi durasi waktu yang diperlukan guna memulihkan total biaya investasi awal. Perhitungan ini didasarkan pada

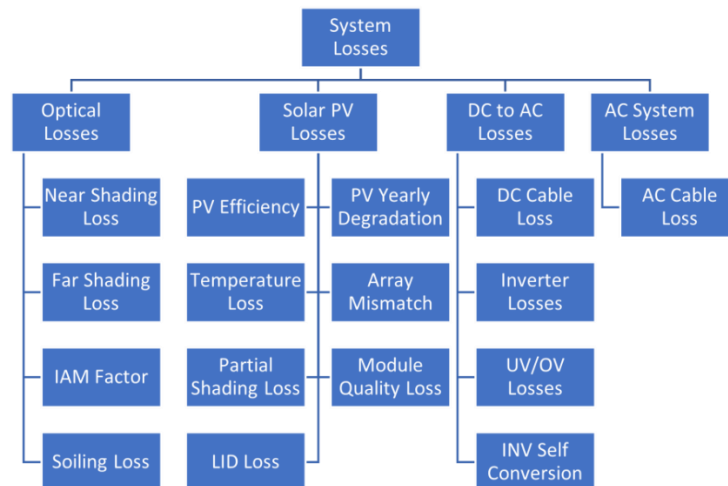
akumulasi nilai penghematan biaya energi tahunan yang dihasilkan oleh operasional sistem PLTS tersebut.

$$SPP = \frac{\text{Biaya modal awal}}{\text{Penghematan Bersih}} \quad (2.17)$$

2.7 PVsyst

PVsyst merupakan salah satu perangkat lunak simulasi sistem fotovoltaik (PV) yang digunakan dalam proses pembelajaran, pengukuran (sizing), dan analisis data dari sistem PLTS. PVsyst dirancang untuk memodelkan performa sistem PV berdasarkan parameter teknis dan kondisi lingkungan yang realistis. Menurut penelitian (Ridho et al., 2019) salah satu keunggulan PVsyst adalah kemampuannya untuk melakukan simulasi berbasis data cuaca historis yang diperoleh dari berbagai database global seperti Meteonorm dan NASA-SSE.

PVsyst mendukung berbagai konfigurasi sistem, termasuk pengaturan sudut kemiringan panel surya dan arah azimuth panel surya yang berpengaruh terhadap penerimaan radiasi matahari. Konfigurasi lainnya pada PVsyst mencakup pemilihan berbagai jenis dan merek modul PV serta inverter, PVsyst memungkinkan pengguna untuk mempertimbangkan keterbatasan area pemasangan, seperti luas atap yang tersedia maupun kebutuhan daya listrik yang harus dipenuhi. Dalam simulasi sistem, menurut (Karuniawan, 2021) PVsyst memiliki keunggulan selain dapat mensimulasikan sistem PLTS *On-Grid* dan *off-grid*, juga dapat mensimulasikan pompa berbasis PLTS. PVsyst melakukan simulasi sistem PLTS dengan pendekatan komprehensif, dimulai dari pemrosesan data radiasi matahari hingga analisis performa sistem secara keseluruhan. Dalam prosesnya, PVsyst terlebih dahulu mengolah data meteorologi, seperti intensitas radiasi matahari, suhu lingkungan, dan kondisi atmosfer lainnya.



Gambar 2. 18 Analisis *Losses* PLTS Pada Simulasi PVsyst

(Baihaqi, 2023)

Salah satu aspek penting dalam studi kelayakan pemasangan PLTS adalah analisis nilai *Performance Ratio* (PR). PR merupakan indikator efisiensi kinerja sistem secara keseluruhan, yang dipengaruhi oleh berbagai faktor, terutama yang berkaitan dengan *losses* dalam sistem. Nilai PR yang rendah umumnya disebabkan oleh faktor-faktor seperti kehilangan daya pada modul, kerugian kabel, inefisiensi inverter, serta pengaruh suhu dan *shading*. Rasio performa ditunjukkan dalam nilai persentase yang menunjukkan total energi yang dihasilkan dan rugi-rugi yang terjadi ketika sistem berada pada kondisi STC (Windarta et al., 2022). Untuk memprediksi kelayakan sistem PLTS, dilakukan simulasi sebagai serangkaian perhitungan untuk memperkirakan energi listrik yang dapat dihasilkan oleh sistem. Simulasi ini mempertimbangkan sejumlah parameter teknis, seperti efisiensi panel surya, suhu modul, dan potensi bayangan dari lingkungan sekitar. Perangkat lunak PVsyst digunakan untuk melakukan analisis mendalam terhadap berbagai jenis kerugian energi di setiap tahap sistem seperti pada Gambar 2.18, mulai dari

ketidaksempurnaan modul, rugi-rugi kabel, efisiensi inverter, hingga distribusi energi listrik.

2.8 Penelitian Terkait

Penelitian mengenai studi perencanaan dan analisis potensi daya plts telah banyak dilakukan sebelumnya. Beberapa Penelitian yang terkait dengan penulis terdapat pada Tabel 2.2.

Tabel 2. 2 Penelitian Terkait

No	Judul Jurnal	Nama Peneliti	Tempat dan Tahun Penelitian	Pembahasan Jurnal
1	Perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya Hybrid di Gedung Ict Universitas Diponegoro Menggunakan Software Pvsyst 7.0	Ragil Adi Nugroho, Bambang Winardi, dan Sudjadi	Penelitian dilakukan di Gedung ICT Universitas Diponegoro, Indonesia tahun 2021	Penelitian ini membahas perancangan dan analisis potensi sistem tenaga surya di Gedung ICT, dengan optimalisasi pemanfaatan atap dan lahan kosong. Evaluasi dilakukan terhadap sistem tenaga surya hibrida menggunakan PVsyst, termasuk integrasi baterai dan sakelar transfer otomatis untuk mendukung keandalan dan efisiensi sistem.

2	Perencanaan PLTS Roof Top <i>On-Grid</i> Untuk Gedung Kantor PLTU Amurang Sebagai Upaya Mengurangi Auxiliary Power dan Memperbaiki Nilai Nett Plant Heat Rate Pembangkit	Ardian Burhandono, Jaka Windarta dan Nazaruddin Sinaga	Penelitian dilakukan di gedung perkantoran PLTU Amurang di Moinit Kab. Minahasal Selatan Prov. Sulawesi Utara, tahun 2022.	Penelitian ini membahas perencanaan PLTS atap <i>On-Grid</i> di gedung PLTU Amurang untuk mengurangi konsumsi daya dari pembangkit utama dan meningkatkan nilai NPHR. Rencana mencakup enam panel surya monokristalin 300 Wp dan satu inverter 2000 W, dengan estimasi biaya Rp 71.500.000.
3	Analisis Potensi Daya Listrik Plts Atap di Gedung Direktorat Politeknik Negeri Semarang Dengan Perangkat Lunak Pvsyst	Eriko Arvin Karuniawan, Friska Ayu Fitrianti Sugiono, Pangestuningtyas Diah Larasati, dan Adeguna Ridlo Pramurti	Penelitian dilakukan di Gedung Direktorat Politeknik Negeri Semarang pada tahun 2023	Penelitian ini membahas studi kasus perencanaan dan optimasi PLTS atap di Politeknik Negeri Semarang, menunjukkan potensi produksi energi sekitar 9.321 kWh per tahun dari kapasitas 6,08 kWp, dengan performance ratio sebesar 0,82 yang mencerminkan

				efisiensi konversi energi yang baik.
4	Rancang Bangun Pembangkit Listrik Tenaga Surya Pada Laboratorium Teknik UMSU Menggunakan Simulasi PVSyst	Muhammad Fitra Zambak, Kurniawan Lubis, dan Ade Faisal	Penelitian ini dilakukan di Gedung Laboratorium Fakultas Teknik UMSU pada tahun 2023	Penelitian ini membahas desain dan implementasi PLTS <i>On-Grid</i> 30 kWp di Laboratorium Teknik UMSU untuk memanfaatkan energi matahari sebagai sumber listrik terbarukan. Studi mencakup analisis intensitas cahaya, beban listrik, serta kondisi lingkungan. Simulasi dengan PV*SOL menunjukkan bahwa 56 panel surya dapat menghasilkan sekitar 200,08 kWh per hari untuk kebutuhan pencahayaan.
5	Potensi Pembangkit Listrik Alternatif Tenaga Surya di Atap Kampus Lombok	Yoga Dwi Hermawan dan Muji Juherwin	Penelitian ini dilakukan di Lombok Institute of Technology (LIT) di Ds. Lenek Daya Kec. Lenek	Penelitian ini membahas potensi energi matahari sebagai sumber terbarukan melalui perancangan PLTS atap di Institut Teknologi Lombok

	Institute Of Technology Kabupaten Lombok Timur		Lombok Timur	(LIT). Menggunakan perangkat lunak PVsyst, studi ini mengevaluasi penyerapan energi dan kebutuhan beban listrik untuk bangunan berkelanjutan. Hasil studi kasus menunjukkan bahwa 36 modul surya dapat mencukupi kebutuhan energi harian, menegaskan kelayakan solusi energi matahari yang ramah lingkungan.
--	--	--	-----------------	--