

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Penelitian yang Relevan

Dalam proses penyusunan penelitian thesis, dibutuhkan referensi sebagai acuan bagi penulis dalam proses pembuatan penelitian skripsi, tinjauan pustaka yang terkait adalah sebagai berikut:

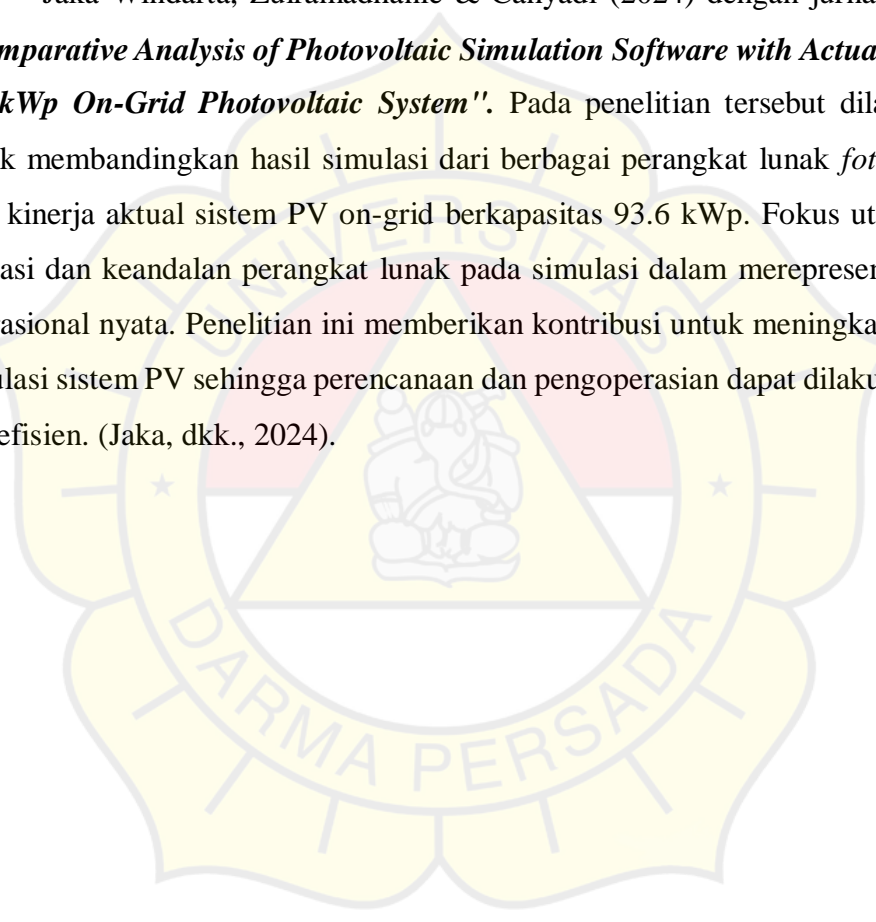
Yogik Indra Lukmanto, Muhammad Jubran Rizqullah, Mohamad Wahyu Hidayat dan Siti Diah Ayu Febriani (2022) dengan jurnal yang berjudul “**Analisis Losses Daya Sel Surya dalam Fabrikasi Modul Surya Monocrystalline 330 WP PT Santinilestari Energi Indoensia**”. Penelitian ini melakukan tinjauan terhadap berbagai faktor yang memengaruhi kerugian daya dalam proses pembuatan modul monocrystalline. Evaluasi dilakukan pada setiap tahapan fabrikasi, mulai dari pemilihan bahan, desain modul, hingga proses pemasangan komponen, untuk mengidentifikasi sumber utama penyebab penurunan efisiensi daya pada sel surya. Penelitian ini juga membahas pentingnya mengurangi kerugian daya selama pembuatan PV guna meningkatkan hasil efisiensi energi serta memberikan rekomendasi untuk mengoptimalkan proses pembuatan. (Yogik, dkk., 2022)

Jeremi Dwiiki Fajar Laksono, Erwan Eko Prasetyo & Gaguk Marausna (2022) dengan jurnal berjudul “**Analisis Efektivitas Kinerja Panel Surya Sebagai Sumber Energi Listrik dengan Photovoltaic 200 Wp**”. Penelitian ini melakukan pemantauan terhadap berbagai studi yang membahas seberapa efektif panel fotovoltaik berdaya 200 Wp sebagai sumber energi listrik. Penelitian ini juga melibatkan pengevaluasian mengenai performa, efisiensi, dan kemungkinan penerapan praktis panel surya dalam mengubah energi matahari menjadi listrik. Penelitian mencakup berbagai aspek seperti jumlah energi yang dihasilkan dalam kondisi lingkungan yang berbeda, biaya serta manfaat dalam pengaturan dan sistem keberlanjutan PV modul sebagai sumber energi. (Jeremi, dkk., 2022)

Yahya Zefri, Imane Sebari, Hicham Hajji, Ghassana Aniba & Mohammadreza Aghaei (2023) dengan jurnal yang berjudul “**A layer-2 solution for inspecting large-scale photovoltaic arrays through aerial LWIR multiview photogrammetry and deep learning: a hybrid data-centric and modelcentric approach**”. Pada penelitian tersebut dilakukan tinjauan solusi dua lapis (layer-2) untuk inspeksi *array fotovoltaik* skala besar menggunakan fotogrametri multiview udara dengan pencitraan inframerah gelombang

panjang dan *deep learning*. Penggabungan paradigma berorientasi data dan berorientasi model untuk meningkatkan efisiensi dan akurasi dalam mendeteksi anomali PV modul. Lapisan pertama melibatkan akuisisi *fotogrametri multiview* dengan drone dilengkapi kamera LWIR menghasilkan ortomosaik thermal dengan identifikasi area berpotensi cacat. Lapisan kedua menerapkan algoritma pembelajaran mendalam menganalisis data tersebut, mengidentifikasi anomali seperti *hot-spots* atau kerusakan modul PV bertujuan mengatasi keterbatasan metode inspeksi konvensional dengan solusi efisien dan akurat dalam memantau kesehatan dan kinerja instalasi PV skala besar. (Yahya, dkk., 2023)

Jaka Windarta, Zulramadhanie & Cahyadi (2024) dengan jurnal yang berjudul ***“Comparative Analysis of Photovoltaic Simulation Software with Actual Conditions of 93.6kWp On-Grid Photovoltaic System”***. Pada penelitian tersebut dilakukan tinjauan untuk membandingkan hasil simulasi dari berbagai perangkat lunak *fotovoltaik* dengan data kinerja aktual sistem PV on-grid berkapasitas 93.6 kWp. Fokus utamanya menilai akurasi dan keandalan perangkat lunak pada simulasi dalam merepresentasikan kondisi operasional nyata. Penelitian ini memberikan kontribusi untuk meningkatkan keakuratan simulasi sistem PV sehingga perencanaan dan pengoperasian dapat dilakukan lebih andal dan efisien. (Jaka, dkk., 2024).



2.2. Landasan Teori

2.2.1. Energi Baru Terbarukan

Energi baru terbarukan merupakan jenis energi yang berasal dari sumber alam yang dapat terus diperbarui. Contohnya, energi matahari berasal dari sinar matahari, energi angin berasal dari gerakan angin, dan energi hidro berasal dari aliran air. Energi terbarukan ini sangat penting karena dapat membantu mengatasi berbagai masalah lingkungan, lebih baik dibandingkan bahan bakar fosil, mengurangi emisi gas rumah kaca, serta meningkatkan keamanan pasokan energi. Pergeseran ke energi terbarukan sangat krusial untuk mengurangi perubahan iklim, meningkatkan penggunaan energi secara efisien, mendorong pembangunan yang berkelanjutan, dan memenuhi kebutuhan energi masa depan. (Aadya Sahrma, 2024)



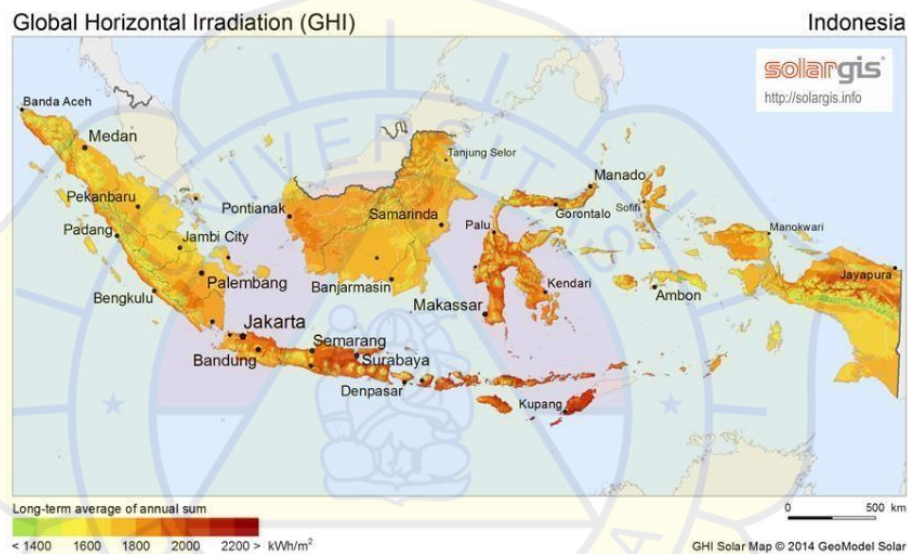
Gambar 2.1 Pembangkit Energi Baru Terbarukan (Tupan, 2022)

Energi Baru Terbarukan adalah Energi Terjangkau dan Bersih berfokus pada memastikan akses ke energi yang andal, berkelanjutan, dan modern untuk semua orang. Ini berarti membuat energi baru terbarukan tersedia dan terjangkau untuk semua orang. Dengan adanya penggunaan energi terbarukan, negara-negara dapat menurunkan emisi gas karbon dan membantu melindungi lingkungan. Indonesia telah berkomitmen untuk mengurangi emisi gas rumah kaca di bawah Perjanjian Paris 2015, yang bertujuan untuk melaksanakan proses pembangunan energi terbarukan yang signifikan dalam bauran energi nasional yang akan dilaksanakan pada tahun 2025 dan 2050. Meskipun Indonesia memiliki banyak sumber daya alam, Indonesia terus berupaya untuk menyeimbangkan pertumbuhan ekonomi dan perlindungan lingkungan. (Tupan, 2022)

Terdapat beragam kebijakan yang digunakan untuk mendukung pengembangan energi terbarukan. Transisi menuju energi terbarukan dapat merangsang pertumbuhan ekonomi dan meningkatkan akses energi di banyak sektor. Proyek energi terbarukan di

negara berkembang masih diperdebatkan karena energi terbarukan menghadirkan banyak tantangan seperti biaya awal yang tinggi dan kebutuhan akan sistem cadangan yang andal dapat menghambat adopsi secara luas, terutama di daerah dengan sumber daya bahan bakar fosil yang melimpah. Hal ini dapat mempersulit proses penyediaan akses listrik ke daerah terpencil. Maka dari itu, energi terbarukan adalah komponen penting dari pembangunan berkelanjutan yang menawarkan banyak manfaat sekaligus menghadirkan tantangan unik yang membutuhkan upaya terkoordinasi dari pemerintah, sektor swasta, dan masyarakat. (Tupan, 2022)

2.2.2. Potensi Tenaga Surya di Indonesia

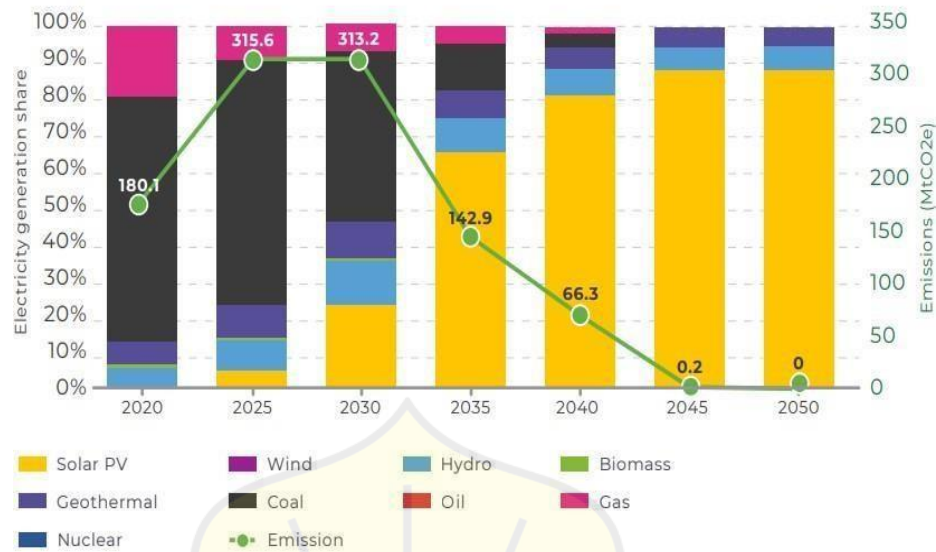


Gambar 2.2 Solar GIS Indonesia (Cikarang Listrindo, 2024)

Indonesia memiliki rasio elektrifikasi nasional yang cukup bagus yaitu 92,80%. Peningkatan rasio elektrifikasi nasional dapat dikembangkan menggunakan Energi Baru Terbarukan menumbuhkan penyediaan kelistrikan di pelosok desa. Berdasarkan Solar GIS (*Gheographic Information System*) Indonesia kebanyakan berwarna kuning dalam *long term average* menunjukkan nilai sekitar 1.680 kWh/m² untuk *yearly total*. Terdapat beberapa faktor mempengaruhi kerja PLTS yaitu Iradiasi, sudut kemiringan, banyangan dan juga suhu. Indonesia terletak di wilayah khatulistiwa dengan intensitas penyinaran matahari relatif merata. (Tupan, 2022)

Indonesia memiliki rencana optimis dalam pemanfaatan Energi Baru Terbarukan (EBT). Gambar 2.4, Indonesia memiliki target pembangkit listrik didominasi energi surya dimulai tahun 2035 sampai 2050. Dengan tergantikannya energi batu bara dan energi tak terbarukan lain, diharapkan dapat menurunkan emisi CO₂ secara drastis dari 315.6 MtCO₂e pada tahun 2025 menjadi 0 MtCO₂e pada tahun 2050.

Decarbonization pathway: Electricity generation share and power sector emissions



Source: IESR, Agora Energiewende & LUT University, 2021

Gambar 2.3 Pembagian Generasi Listrik dan Pengaruhnya terhadap Emisi

Potensi dan pemanfaatan tenaga surya diharap mampu menggerakkan Indonesia dalam rangka mengurangi emisi CO₂ dan memenuhi kebutuhan energi yang semakin bertambah. Implementasi pemanfaatan EBT terpancaw sangat sedikit, terbukti dari data pemanfaatan tenaga surya di Indonesia hanya sekitar 314,8 MW atau 9,5% dari total potensi energi surya di Indonesia. Pemanfaatan energi surya jauh dari jumlah potensinya menjadi tantangan bagi kita untuk evaluasi pemanfaatan PLTS.

2.2.3. Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya



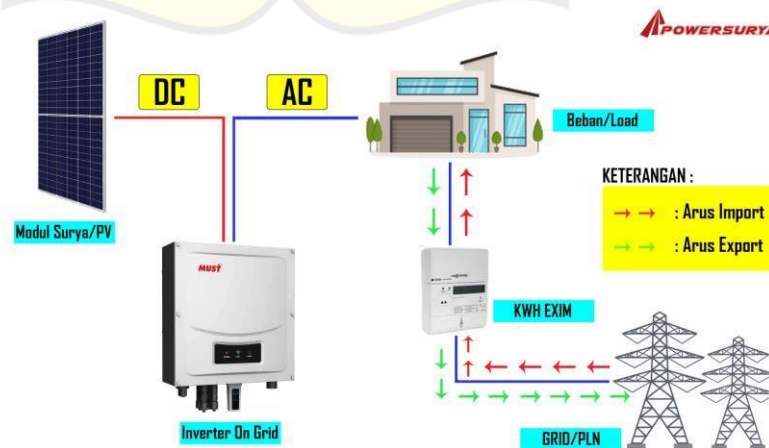
Gambar 2.4 PLTS Rooftop di Kawasan Industri (Cikarang Listrindo, 2024)

Pembangkit listrik tenaga surya adalah sistem energi terbarukan yang mengubah cahaya matahari menjadi listrik, terutama melalui teknologi fotovoltaik (PV) atau panas matahari. Pembangkit ini dapat bervariasi secara signifikan dalam ukuran, dari instalasi skala kecil sampai skala besar dapat digunakan menghasilkan listrik. Pembangkit listrik tenaga surya lebih sederhana dan lebih cepat proses pembangunannya jika dibandingkan dengan pembangkit yang menggunakan bahan bakar fosil.

Pembangkit listrik tenaga surya di kawasan industri dapat menghadirkan peluang signifikan untuk meningkatkan efisiensi energi terbarukan dan keberlanjutan. Teknologi energi matahari, seperti sistem fotovoltaik dan tenaga surya terkonsentrasi, dapat secara efektif memenuhi tuntutan energi thermal dan listrik dari berbagai sektor industri. Menerapkan energi surya dapat menyebabkan pengurangan biaya operasional substansif karena Pembangunan PLTS membutuhkan biaya relatif murah dan dapat ditempatkan di rooftop tidak membutuhkan lahan tambahan untuk pengaplikasiannya. Penggunaan PLTS di industri dapat memperbaiki dampak lingkungan seperti adanya pengurangan jejak karbon dengan pemanfaatan energi matahari secara signifikan menurunkan emisi karbon, berkontribusi terhadap mitigasi perubahan iklim, dan ikut serta mendukung gerakan peduli lingkungan.

Berdasarkan lokasi pemasangannya, PLTS dibagi menjadi dua yaitu pola tersebar dan pola terpusat. PLTS pola tersebar adalah PLTS dibangun dekat dengan beban pemakai sedangkan PLTS pola terpusat dibangun seperti PLTS pada umumnya yaitu dekat dengan sumber energi. Selain itu, berdasarkan konfigurasinya PLTS dibagi menjadi tiga yaitu PLTS *off-grid*, PLTS *on-grid*, dan PLTS sistem *hybrid* dengan penjelasan sebagai berikut : (Gaura, dkk., 2020)

a. Sistem On-Grid

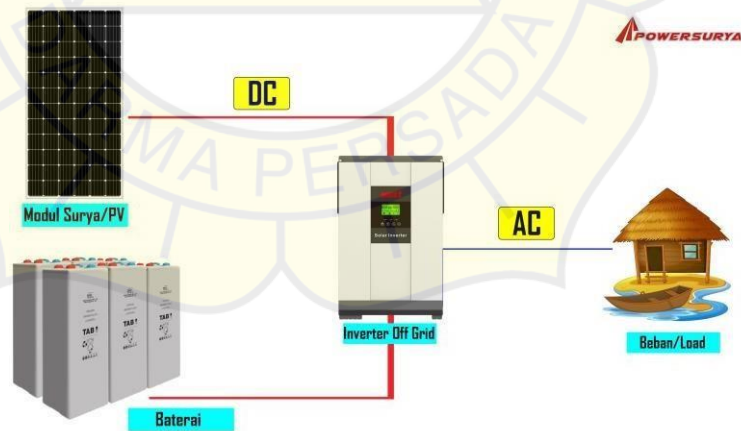


Gambar 2.5 Sistem PLTS On-grid (Harmiansyah, dkk., 2023)

Sistem On-Grid adalah PLTS yang terkoneksi ke jaringan distribusi listrik (terhubung jaringan Listrik PT Cikarang Listrindo). Dengan adanya hubungan ini maka ketika kelebihan energi listrik yang dihasilkan dapat disalurkan ke jaringan, sebaliknya apabila pasokan listrik dari PLTS tidak mampu memenuhi beban, listrik dapat diambil dari jaringan. Baterai PLTS *On-grid* pada dasarnya digunakan sebagai cadangan apabila jaringan mengalami kegagalan untuk periode tertentu dan dapat digunakan untuk mengekspor kelebihan daya listrik ke jaringan listrik. Terdapat jenis yang tidak menggunakan baterai karena jaringan dinilai sudah cukup *reliable* yaitu *Grid-connected PV without a battery back up*. (Ayu, dkk., 2020)

PLTS *on-grid* dapat dioperasikan pada pola *distributed* dan *centralized*. Pemanfaatan PLTS *on-grid distributed* biasanya terhubung dengan beban yang spesifik seperti rumah. PLTS *On-grid distributed* biasanya digunakan untuk jaringan tegangan rendah. Sedangkan PLTS *On-grid centralized* lebih cocok untuk jaringan tegangan menengah atau tegangan tinggi. PLTS *On-grid centralized* memiliki kelebihan yaitu memungkinkan rugi-rugi daya pada sisi pembangkitan yang lebih kecil namun tetap ada rugi-rugi penyaluran dan dari segi *monitoring* lebih mudah karena dalam satu area. (Ayu, dkk., 2020)

b. Sistem Off-Grid



Gambar 2.6 Sistem PLTS Off Grid (Harmiansyah, dkk., 2023)

Sistem Off-Grid adalah PLTS yang tidak terkoneksi ke jaringan distribusi listrik dan beroperasi secara independen menjadi jaringan listrik utama yang digunakan untuk penggunaan beban kecil ataupun di daerah terpencil dimana akses jaringan terbatas atau tidak ada. Sistem off-grid biasanya menggunakan baterai untuk menyimpan kelebihan energi yang dihasilkan pada siang hari untuk digunakan

pada malam hari atau selama periode sinar matahari rendah. Sistem memberikan kemandirian energi, memungkinkan pengguna menghasilkan listrik sendiri tanpa bergantung pada sumber eksternal. Ini sangat bermanfaat di daerah pedesaan atau terpencil. (Harmiansyah, dkk., 2023)

Berdasarkan aplikasi sistem dibagi menjadi dua yaitu PLTS *Off-Grid Domestic* dan *PLTS Off-Grid Non-Domestic*. Jenis *domestic* adalah sistem PLTS yang menyediakan listrik pada beban yang belum terhubung jaringan listrik utama. PLTS *off grid domestic* digunakan untuk menyediakan listrik beban penerangan, atau beban listrik rumah tangga lainnya. PLTS *off-grid non domestic* adalah PLTS yang menyediakan listrik pada beban lebih luas penggunaannya misalnya telekomunikasi, pelabuhan, dan bandara. (Harmiansyah, dkk., 2023)

c. Sistem Hybrid

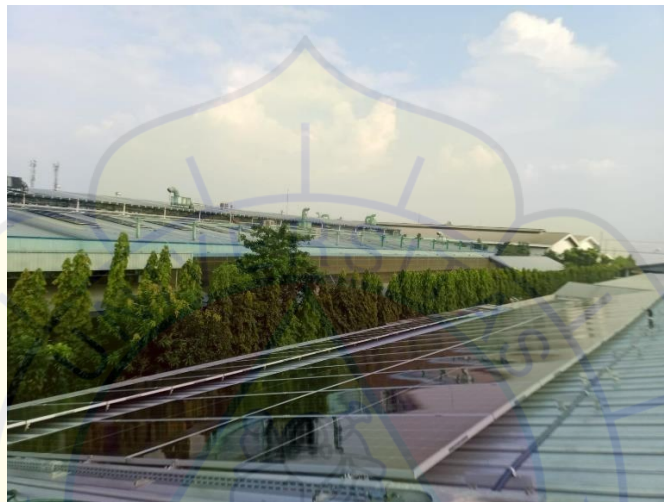
PLTS berjenis *hybrid* memiliki jaringan yang merupakan gabungan dari *on-grid* maupun *off-grid*, di mana terdapat sumber pembangkit lain yang menyuplai beban sama. Sistem PLTS ini terhubung kedua bagian kelistrikan, yaitu sisi AC dan DC. Pada sisi DC, *array* terhubung dengan *inverter hybrid* berisi *charge controller* pada inverter untuk mengatur energi matahari yang diserap modul surya melalui MPPT. Energi keluaran dari *charge controller* melalui bus bar DC disalurkan ke sistem baterai untuk disimpan energinya. Saat digunakan, energi DC akan dikeluarkan dari baterai ke inverter, akan diubah menjadi arus AC dan disalurkan ke beban AC. (Harmiansyah, dkk., 2023)

PLTS *hybrid* memiliki 3 jenis pola operasi, yaitu saat siang hari, saat kondisi berawan, dan saat malam hari. Pada siang hari, energi keluaran modul akan langsung disalurkan ke beban melalui inverter, sisanya akan disimpan di baterai, dan kelebihan energi akan dikirimkan ke jaringan listrik. Pada kondisi berawan, energi keluaran modul surya akan disalurkan ke beban dan disimpan di baterai secara paralel. Sedangkan, pada malam hari energi yang telah disimpan di baterai pada siang hari akan disuplai ke beban melalui inverter, di mana akan diubah dari arus DC menjadi AC. Apabila persediaan energi baterai sudah habis, memakai jaringan listrik untuk menyuplai beban. (Harmiansyah, dkk., 2023)

Berdasarkan lokasi pemasangan modul, PLTS terbagi menjadi PLTS atap, PLTS *ground mounting*, dan PLTS terapung.

a. PLTS Atap

Berdasarkan Peraturan Kementerian ESDM No. 16 tahun 2019 mendefinisikan PLTS atap sebagai proses pembangkitan tenaga listrik menggunakan modul fotovoltaik yang diletakkan di atas atap, dinding, atau bagian lain dari bangunan milik pelanggan. Umumnya, PLTS atap dipasang untuk mengurangi tagihan listrik dan memanfaatkan sumber energi ramah lingkungan.



Gambar 2.7 PLTS Atap di Kawasan Industri

b. PLTS *Ground-Mounted*

PLTS *Ground-Mounted* dipasang diatas permukaan tanah (*ground mounted*) menggunakan sistem pertanahan berupa penggunaan peralatan berbahan batang tembaga. Selain itu, PLTS *ground-mounted* memiliki sistem proteksi penangkal petir untuk melindungi peralatan *array* atau inverter untuk mengangkal petir.



Gambar 2.8 PLTS *Ground-Mounted* di Kawasan Industri

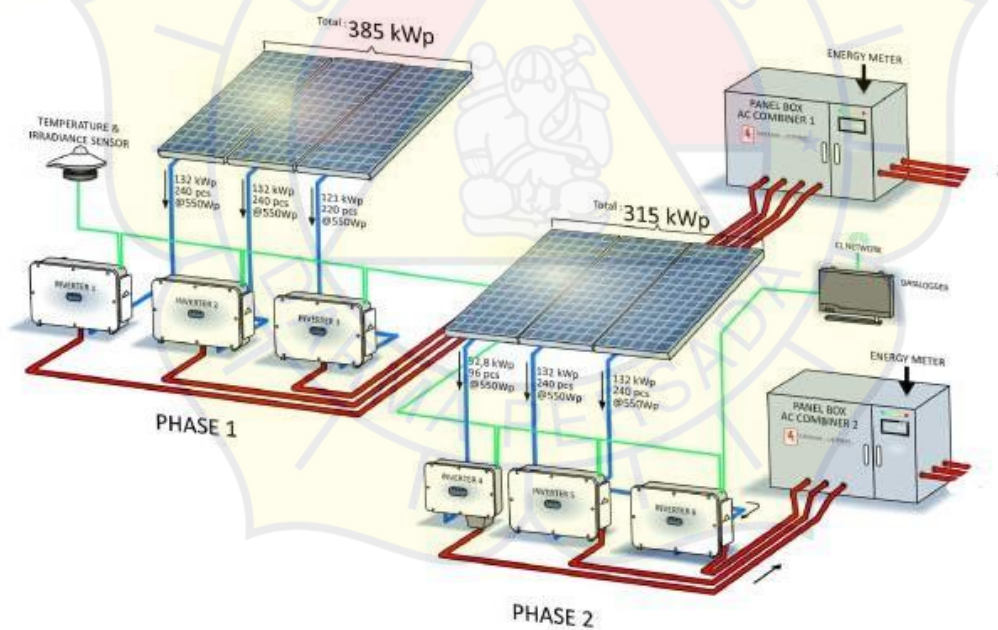
c. PLTS Terapung

Jenis PLTS ini dipasang di atas permukaan air (waduk atau danau) dengan potensi pengembangan hingga 26,65 GW di 271 lokasi tahun 2021. Terdapat struktur tambahan berupa pengampung, penjangkarang dan penambatan.



Gambar 2.9 PLTS Terapung (PLN, 2023)

2.2.4. Prinsip Kerja PLTS



Gambar 2.10 Prinsip Kerja PLTS

PLTS mengubah sinar matahari menjadi listrik melalui serangkaian proses yang melibatkan sel fotovoltaik (PV) dan komponen lainnya. PLTS beroperasi melakukan tangkapan energi surya sel fotovoltaik yang digunakan untuk menangkap sinar matahari, bentuk radiasi elektromagnetik diubah menjadi energi listrik yang dikenal sebagai efek

PV. Terjadi interaksi sinar matahari mengenai PV menangkap elektron menciptakan arus listrik untuk dimanfaatkan sebagai pembangkit listrik.

Konversi energi dilakukan menggunakan inverter untuk mengubah arus searah (DC) yang dihasilkan sel PV diubah menjadi arus bolak-balik (AC). Konfigurasi array PV dapat secara signifikan mempengaruhi efisiensi konversi energi. Konfigurasi yang berbeda dapat menyebabkan variasi dalam kehilangan bayangan yang berdampak pada kinerja PLTS. Selanjutnya energi yang dihasilkan didistribusikan untuk memenuhi kebutuhan beban. Kinerja sistem dapat dipengaruhi profil beban yang mengacu pada pola konsumsi energi dari waktu ke waktu. Sehingga pembangkit listrik tenaga surya bekerja menangkap sinar matahari melalui sel PV yang diubah menjadi listrik, dan mengelola listrik untuk digunakan.

2.2.5. Panel Surya



Gambar 2.11 Panel Surya

Panel surya adalah komponen utama dalam sistem fotovoltaik yang berfungsi untuk mengubah energi cahaya menjadi energi listrik. Komponen utama sistem PV yaitu sel surya atau Sel fotovoltaik. Cahaya adalah gelombang elektromagnetik yang memiliki panjang gelombang dan energi tertentu. Apabila sel PV menerima cahaya dengan energi lebih tinggi dari energi gap semikonduktor, akan terjadi eksitasi elektron yang apabila dialirkan pada rangkaian eksternal (beban) menjadi arus listrik.

Prinsip kerja dari panel surya adalah mengacu pada efek fotovoltaik yaitu ketika sinar matahari mengenai panel surya maka elektron dari bagian *N-type* akan berpindah ke bagian *P-type*. Fenomena ini akan menghasilkan arus internal yang akan diteruskan

oleh penghantar yang terhubung dengan beban. Selama sinar matahari masih menyinari sel surya, maka aliran arus dari sel surya ke beban terus berjalan. Perbedaan dari sel surya tipe-p dan tipe-n terletak pada jumlah elektronnya. Sel surya tipe-p umumnya akan mendoping wafer silikon dengan boron yang memiliki satu elektron lebih sedikit dari silikon, sehingga membuat sel bermuatan positif. Sedangkan sel surya tipe-n didoping fosfor yang memiliki satu elektron lebih banyak dari silikon yang menyebabkannya bermuatan negatif. Sel-sel surya akan disambungkan dan dilaminasi untuk membentuk unit lebih besar yaitu modul, sebelum dihubungkan ke panel.

Tabel 2.1 Perbandingan Jenis Modul Surya (Shah, dkk., 2020)

Parameter	Silikon Monokristalin	Silikon Polikristalin	Thin Film
Efisiensi	18 – 22%	14 – 18%	10 – 12%
Pembuatan	Satu kristal Silikon	Menyatukan beberapa kristal Silikon	Beberapa lapisan PV
Kondisi Penggunaan	Suhu standar	Suhu sedang menuju tinggi	Suhu tinggi
Kebutuhan Wilayah/kW	Paling kecil	Lebih kecil	Besar
Hasil Energi setiap Satuan Luas	Tinggi akibat kandungan Silikon	Tinggi akibat kandungan Silikon	Rendah akibat kandungan Silikon
Kinerja pada Pencahayaan Rendah	Rendah	Rendah	Sedang
Rentang Antara V_{OC} dan V_{mp}	15 – 20% (semakin kecil semakin baik)	15 – 20%	15 – 20%
Koefisien Suhu	Tinggi	Tinggi	Rendah (rendah lebih baik)
<i>Fill factor</i>	70 – 80% (tinggi lebih baik)	70 – 80%	60 – 68%

Terdapat beberapa jenis sel surya yang digunakan pada sistem PLTS yaitu :

1. *Monocrystalline silicon*

Monocrystalline silicon merupakan jenis sel surya dengan silikon tunggal atau mono. *Monocrystalline silicon* merupakan panel surya yang memiliki berbagai keunggulan, salah satunya ialah bahan yang terbuat dari silikon yang diiris tipis menggunakan bantuan mesin potong. Hasil irisan tipis membuat karakteristik *monocrystalline silicon* lebih menonjol jika dibandingkan panel surya lainnya. Penampang *monocrystalline silicon* dapat menyerap cahaya matahari optimal dibanding jenis sel surya lainnya. *Monocrystalline silicon* sangat rentan terhadap bayangan. Apabila panel surya terkena bayangan salah satu selnya atau sebagian area, dapat mengurangi efisiensi keseluruhan panel surya.

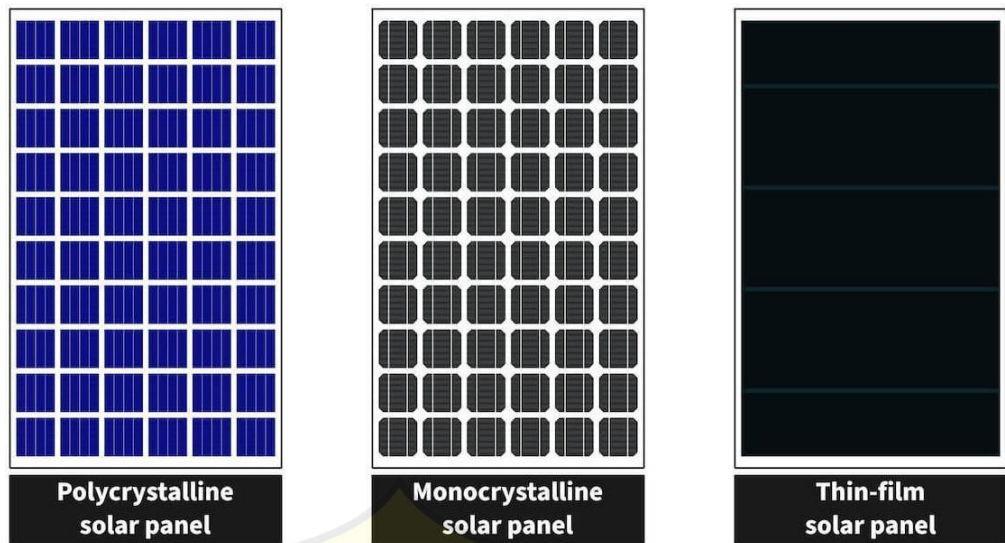
2. *Polycrystalline Silicon*

Polycrystalline silicon terbuat dari silikon multi-kristal. *Polycrystalline silicon* merupakan jenis panel surya yang umum digunakan di berbagai bangunan, serta sebagai panel surya yang sering digunakan di Indonesia. Teknologi panel surya terbuat dari batang silikon yang bisa dicairkan. *Polycrystalline silicon* memiliki kelebihan berupa kerapatan dan kerapuhan susunan.

Selain itu, *polycrystalline silicon* memiliki toleransi tinggi terhadap cahaya yang kurang sempurna, seperti misalnya terhadap cahaya dengan sudut datang yang tidak optimal. Meskipun demikian, jenis *polycrystalline silicon* ini memiliki efisiensi yang lebih rendah jika dibandingkan dengan *monocrystalline silicon*. Panel surya *polycrystalline* memiliki toleransi suhu yang kurang baik dan kurang cocok untuk dikembangkan di wilayah atau area yang memiliki curah hujan tinggi dikarenakan efisiensi dari panel *polycrystalline silicon* akan menurun atau bahkan tidak berfungsi ketika curah hujan sedang tinggi.

3. *Thin Film Solar Cell*

Thin film solar cell merupakan jenis panel surya yang terbuat dari silikon dan bahan semikonduktor lainnya, seperti *cadmium telluride* (CdTe) dan *copper indium gallium selenide* (CIGS). *Thin film* terbuat dari silikon nonkristal. Jenis panel surya ini dapat bekerja sangat baik pada cahaya *fluorescent* atau cahaya lampu pijar yang banyak dijadikan sebagai alat penerangan. Jenis panel surya ini banyak digunakan untuk kebutuhan komersial. Namun, memiliki efisiensi cukup rendah. Panel surya ini mendapatkan penangkapan cahaya matahari sebesar 8,5% untuk penampang yang luas sama dengan *monocrystalline*.



Gambar 2.12 Panel *Monocrystalline*, *Polycrystalline*, dan *Thin Film* (Green, 2025)

2.2.6. Faktor Pengaruh *Performance Ratio*

Karena panel surya beroperasi dalam jangka waktu cukup panjang, manufaktur menjamin keluaran daya panel diatas 80% selama 25 tahun. Penurunan daya tersebut berkurang perlahan dikarenakan adanya degradasi atau kondisi lingkungan menyebabkan panel tersebut tidak dapat berkeja dengan seharusnya atau tidak menghasilkan daya maksimal. Apabila kegagalan tidak segera diatasi, dapat mempengaruhi performa rasio PLTS yang akan menyebabkan penurunan daya keluaran panel surya dan dapat bersifat semi-permanen ataupun permanen dan terus berkembang. (TrinaSolar, 2024)

Performa rasio dapat terjadi karena faktor kimia, listrik, panas, atau mekanik. Keluaran daya panel surya pada umumnya mengalami penurunan performa rasio 0.5% selama satu tahun. Panel surya *Amorphous Silicon* (a-Si), *Cadmium Telluride* (CdTe), *Copper Indium Gallium Selenide* (CIGS) degradasinya lebih cepat, jika dibandingkan *Monocrystalline Silicon* (mono-Si) dan *Polycrystalline Silicon* (poly-Si). (ESDM, 2024)

Faktor pengaruh *Performance Ratio* yang tidak dapat dikontrol antara lain :

- a. Total insiden cahaya matahari

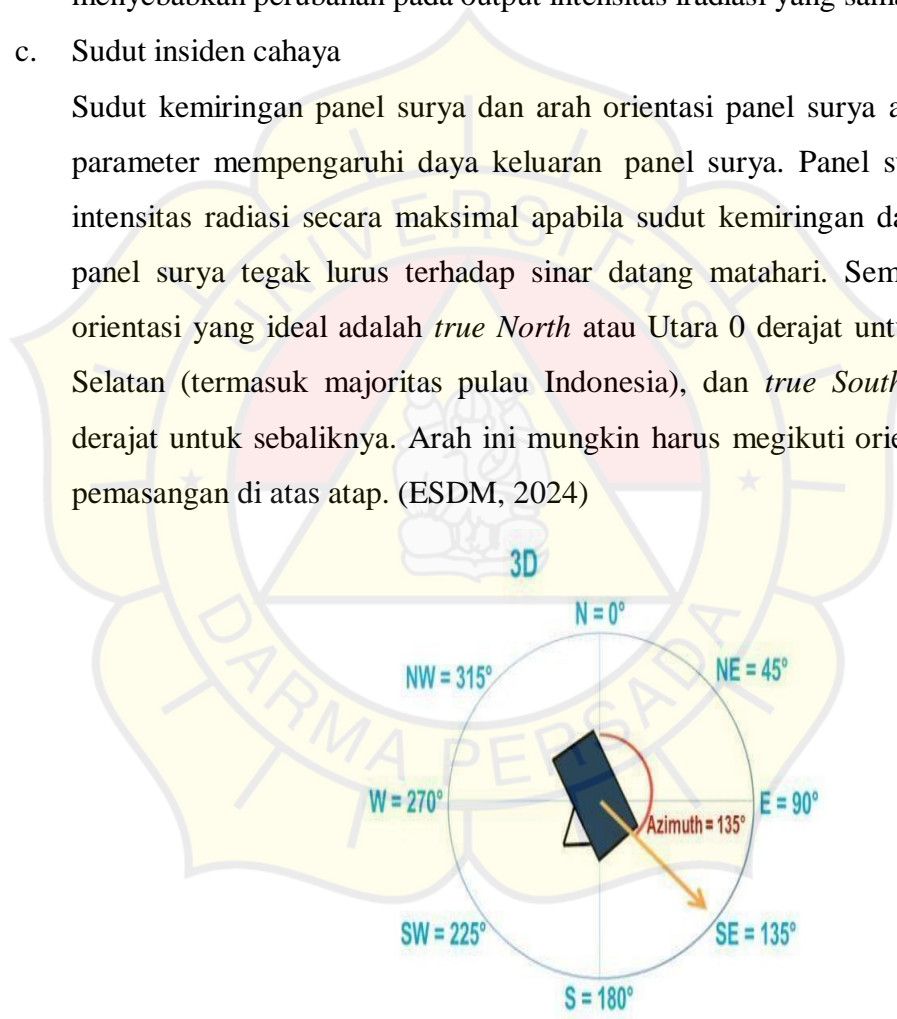
Faktor pertama yang tidak bisa dikontrol adalah jumlah total sinar matahari yang mengenai panel surya. Di lokasi yang sudah ditentukan, tidak mungkin mengontrol intensitas cahaya matahari yang datang setiap harinya. Jumlah total insiden cahaya matahari pada PLTS akan mempengaruhi total output energi PLTS, dan mempengaruhi *Performance Ratio* PLTS. Kebanyakan modul dirancang untuk bekerja optimal untuk terima cahaya matahari dan menjadi kurang efisien dalam kondisi cahaya rendah, seperti pada saat hari- hari bercuaca mendung dan hujan. (ESDM, 2024)

b. Intensitas spektral dari cahaya matahari

Intensitas spektral cahaya matahari yang terjadi pada panel surya tidak dapat dikontrol. *Standard Test Conditions (STC)* menetapkan spesifikasi "Massa Udara 1.5G" seperti yang tercantum dalam IEC 60904-3. Namun, spektrum cahaya yang sebenarnya berbeda dengan spektrum standar. Hal ini terjadi karena adanya interaksi antara cahaya matahari dengan atmosfer bumi. Karena respons spektral dari perangkat terhadap seluruh rentang panjang gelombang dalam spektrum elektromagnetik tidak sama, perubahan intensitas cahaya yang masuk menyebabkan perubahan pada output intensitas iradiasi yang sama. (ESDM, 2024)

c. Sudut insiden cahaya

Sudut kemiringan panel surya dan arah orientasi panel surya adalah salah satu parameter mempengaruhi daya keluaran panel surya. Panel surya menangkap intensitas radiasi secara maksimal apabila sudut kemiringan dan arah orientasi panel surya tegak lurus terhadap sinar datang matahari. Sementara itu sudut orientasi yang ideal adalah *true North* atau Utara 0 derajat untuk belahan bumi Selatan (termasuk mayoritas pulau Indonesia), dan *true South* atau Selatan 0 derajat untuk sebaliknya. Arah ini mungkin harus mengikuti orientasi atap untuk pemasangan di atas atap. (ESDM, 2024)



Gambar 2.13 Sudut Kemiringan dan Orientasi Panel Surya (ESDM, 2024)

d. Degradasi efisiensi inverter

Faktor selanjutnya yang mempengaruhi *Performance Ratio* adalah efisiensi konversi dari inverter. Inverter terbuat dari banyak komponen elektronik yang dapat menurun efisiensinya, yang berakibat kepada penurunan *Performance Ratio* dari PLTS. (ESDM, 2024)

e. Temperatur modul

Faktor utama yang memengaruhi nilai Performance Ratio adalah suhu modul yang bekerja pada instalasi PLTS dibandingkan dengan suhu standar yang digunakan dalam kondisi uji baku (STC). Sel surya memiliki ketergantungan pada suhu yang sudah dikenal, di mana efisiensinya menurun ketika suhu meningkat. Dampak ini diukur melalui koefisien suhu dari modul. (ESDM, 2024)

f. Rugi-rugi pengkabelan

Kerugian resistif pada PLTS adalah faktor lain yang menyebabkan Performance Ratio menjadi di bawah 100%. Biasanya kerugian akibat pengkabelan tidak meningkat seiring berjalannya waktu, namun jika kualitas konektor tidak memadai (misalnya koneksi antar kabel tidak tepat, seperti tidak menggunakan konektor yang sesuai), maka resistansi seri pada koneksi akan meningkat seiring waktu, sehingga memengaruhi *Performance Ratio*. (ESDM, 2024)

Faktor pengaruh *Performance Ratio* yang dapat dikontrol antara lain:

a. *Shading* (Bayangan)

Shading adalah masalah kritis di dalam sistem fotovoltaik karena efek tersebut kontra intuitif. Jika salah satu panel terhalang cahaya matahari, energi berkurang bukan sebesar faktor dari 6 atau 17%, melainkan sebesar 50%. Bahkan, *shading* parsial dapat merusak sel-sel tersebut karena dalam koneksi seri, besarnya energi dihasilkan ditentukan bagian terlemah dalam rangkaian. Panel surya mempunyai *bypass diode* tertanam didalam untuk mengurangi kerugian. (ESDM, 2024)

Bayangan tidak bisa dihindari, pada saat matahari terbit atau terbenam dimana bayangan menjadi lebih panjang karena produksi energi sistem mengalami penurunan di pagi hari dan sore hari, sedikit bayangan secara umum tetap diterima. Tetapi, lokasi panel terdapat objek yang dapat menyebabkan bayangan terhadap panel selama jam 10 hingga 2 siang harus dihindari. (ESDM, 2024)

Pada saat pemasangan modul surya, terdapat beberapa bagian dari sel surya yang terhalang benda-benda di sekitarnya seperti pohon, awan, atau bahkan terhalang sel surya di depannya. Bagian yang terhalang tidak akan mendapatkan sinar matahari dapat mempengaruhi output daya. Bayangan parsial satu sel secara signifikan mengurangi output daya dari seluruh modul. (ESDM, 2024)

Sel yang terkena *shading* menghasilkan arus lebih sedikit daripada yang tidak terkena *shading*. Sel surya terhubung seri yang berarti arus yang sama mengalir

pada seluruh bagian sel dapat menyebabkan *overheating* atau *hotspot* pada sel surya. Untuk menghindari permasalahan *hotspot* sel surya dikarenakan *shading*, disarankan menggunakan dioda *bypass* dihubungkan pada sub-string sel dalam modul. Dioda *bypass* bekerja sebagai saklar terbuka pada saat keadaan normal dan menjadi saklar tertutup menghubungkan substring saat ketidakcocokan pada bayangan. (ESDM, 2024)

b. Soiling

Soiling adalah pengumpulan debu di permukaan panel yang dapat menyebabkan *shading*. Lapisan debu mempunyai dampak merata pada semua panel. Meskipun sistem dapat beroperasi, ada lapisan debu, *power output* akan berkurang. Hujan yang dapat membersihkan panel terkadang cukup untuk mencegah kumpulan debu yang tebal, tetapi di daerah kering dan berdebu, pembersihan panel dengan air akan sangat diperlukan jika labisan debu menebal. (ESDM, 2024)

Seiring berjalannya waktu, terjadi penumpukan kotoran pada permukaan modul PV mengurangi cahaya jatuh pada bagian tertentu. Sama dengan *shading*, *soiling* ini mengakibatkan penurunan output daya yang dihasilkan oleh modul PV serta dapat merusak lapisan dan segel dari sel PV. *Soiling* pada sistem PV dapat mengakibatkan kerugian daya senilai 5-17%. Kotoran pada PV di dekat jalan raya atau daerah gurun lebih banyak dibandingkan dengan daerah yang sering terkena hujan. Sistem PLTS atap dapat mengalami kerugian *soiling* lebih sedikit dibandingkan dengan sistem yang dipasang di tanah. (ESDM, 2024)

c. Modul yang rusak atau cacat

Berbagai jenis kecacatan bisa terjadi pada panel surya dan berdampak negatif terhadap *Performance Ratio*. Beberapa kecacatan bisa terlihat jelas saat dilakukan inspeksi visual, seperti kaca yang pecah atau EVA yang berwarna kekuningan.

Namun, ada juga kecacatan lain yang tidak terlihat dengan mata telanjang, tetapi tetap memberikan pengaruh besar terhadap *Performance Ratio*. (ESDM, 2024)

Contoh jenis kecacatan tersebut meliputi dioda *bypass* yang mengalami hubungan pendek dan retakan kecil pada sel surya. Kecacatan jenis ini dideteksi dengan *Infrared Thermography* atau pencitraan *electroluminescence* saat inspeksi. Jika terdapat cacat kecil di sejumlah modul menyebabkan PLTS memiliki *Performance Ratio* rendah, modul cacat dapat diganti dengan modul bagus. (ESDM, 2024)

d. Inverter yang rusak atau cacat

Inverter yang rusak atau cacat adalah penyebab umum dari *Performance Ratio* yang rendah. Masa hidup inverter umumnya sekitar 10 tahun, berbeda dengan masa hidup modul sekitar 25 tahun. Oleh karena itu, pada masa hidup PLTS, harus dilakukan penggantian inverter karena apabila rusak atau cacat maka akan menghilangkan daya keluaran dari seluruh *string* modul yang terkoneksi dengan inverter tersebut. Hal ini mengakibatkan penurunan *Performance Ratio* PLTS sesaat. Situasi ini dapat dideteksi melalui pencitraan *thermal infrared*. Inverter yang berhenti bekerja harus diganti dengan yang baru. (ESDM, 2024)

2.2.7. Perawatan PLTS

Perawatan PLTS sangat diperlukan untuk menjaga peralatan agar tetap dalam keadaan bagus dan terjaga. Perawatan PLTS sangat diperlukan dan sangat sederhana karena harus dilakukan secara rutin dan berkala agar panel surya awet serta tahan lama. Kunci perawatan sistem pada panel surya supaya menjaga peralatan agar baik, berfungsi secara proporsional, efisien dan struktur yang efektif. Panel surya menjadi barang kuat karena meski digunakan selama bertahun-tahun tetap memiliki efektivitas yang berada di kisaran 92%, namun panel surya membutuhkan perhatian yang lebih agar dimanfaatkan lebih lama.

Dalam pemeliharaan PLTS, terdapat tiga pemeliharaan yang dilakukan yaitu preventive (preventif), predictive (prediktif), dan corrective (korektif).

a. *Preventive Maintenance* (Pemeliharaan Preventif)

Pemeliharaan dilakukan secara terjadwal dan rutin, tanpa indikasi kerusakan atau penurunan performa. Pemeliharaan digunakan untuk mencegah kerusakan atau kegagalan sistem sebelum terjadi dengan melakukan perawatan berkala, seperti pembersihan panel, pengecekan kabel, dan pemeriksaan koneksi inverter. Pada preventive maintenance yang bersifat proaktif dan dijadwalkan untuk mencegah kerusakan, menyebabkan perawatan yang tidak diperlukan.

b. *Predictive Maintenance* (Pemeliharaan Prediktif)

Pemeliharaan dilakukan berdasarkan pemantauan kondisi sistem melalui data yang ada dan analisis performa untuk memprediksi kapan terjadinya kerusakan. Mengidentifikasi tanda-tanda awal degradasi atau keausan komponen sehingga perawatan dapat dilakukan tepat waktu sebelum terjadi kegagalan dengan sensor untuk memonitor parameter seperti output daya, suhu, atau getaran. *Predictive*

maintenance mengandalkan data dan analisis kondisi untuk menentukan waktu perawatan, sehingga lebih efisien dan mengurangi downtime.

c. *Corrective Maintenance* (Pemeliharaan Korektif)

Pemeliharaan yang dilakukan setelah terjadi kerusakan atau kegagalan sistem dengan memperbaiki atau mengganti komponen rusak untuk mengembalikan kondisi sistem keadaan semula. *Corrective maintenance* bersifat reaktif, maka dilakukan setelah kerusakan terjadi, dan meskipun biaya awalnya mungkin lebih rendah, dapat menyebabkan downtime yang tidak direncanakan serta biaya perbaikan yang tinggi.

Perawatan dilakukan secara berkala dengan alasan antara lain adalah :

- a. Panel surya kotor karena ditempatkan di atas gedung pabrik yang merupakan area terbuka sehingga membuat solar panel kotor. Kotoran yang terdapat pada solar panel adalah tumpukan debu, kotoran burung dan kotoran bahan kimia yang berasal dari cerobong pabrik. Apabila kotoran ini dibiarkan terus menerus dan tidak dibersihkan dapat mempengaruhi performa rasio pada panel surya karena dapat menutup sinar matahari untuk mencapai lapisan silikon pada solar panel dapat mengakibatkan tidak ada listrik yang dihasilkan menimbulkan adanya *shading*.
- b. Sistem kelistrikan pada shelter PLTS perlu untuk diperiksa secara berkala karena terdapat solar panel dilakukan pemeriksaan listrik yang dihasilkan sesuai spesifikasi yang digunakan atau tidak. Jika tidak sesuai maka dapat dilakukan periksa ulang.
- c. Melakukan pengecekan braket pengikat pada panel surya yang sudah dipasang berada dalam berbagai macam kondisi mulai dari pemasangan di tanah datar, atap miring, atap datar, atau bahkan dapat dipasang menggunakan sistem tiang tunggal. Kondisi pemasangan mempunyai karakteristik bervariasi sehingga apabila terkena panas dan hujan baut panel menjadi longgar atau konstruksi bangunan menjadi berkarat serta rapuh yang perlu dilakukan pemeriksaan secara berkala untuk menghindari peralatan supaya tidak rusak.

Untuk menjaga keberlangsungan penyaluran energi listrik yang dihasilkan oleh PLTS maka perawatan pada sistem ini sangat penting. Perawatan panel surya dilakukan menggunakan air bersih dengan alat *dual brush*. Diharapkan tidak menggunakan air panas untuk perawatan panel surya karena lebih cepat menguap.

Jika menggunakan alat pembersih dengan sabun cair dilarutkan, dicampurkan terlebih dahulu karena jika menggumpal pada panel surya dapat mengakibatkan zat yang terkandung dalam sabun cair dapat terpapar dengan material panel surya secara langsung, sabun mengandung zat berbahaya dapat membekas dan sulit dibersihkan. Penggunaan *dual brush* berbahan material lembut karena apabila panel surya tergores menyebabkan usia panel surya menjadi lebih pendek sehingga dapat mempengaruhi efektivitas dalam menyerap paparan sinar matahari sebagai sumber energi utama. Memastikan air panel surya tidak mengering akibat paparan sinar matahari sangatlah penting. Ketika diabaikan air dapat membekas sehingga mempengaruhi serapan sinar matahari.



Gambar 2.14 Perawatan Panel Surya



Gambar 2.15 Alat *Dual Brush*

Kegiatan ini rutin dilakukan pada pagi hari karena apabila panel surya pada siang hari berada dalam kondisi panas dan tengah menyerap panas matahari dapat mengganggu proses penyerapan sinar matahari. Maka proses perawatan dilakukan pada pagi hari sehingga panel surya tidak terlalu panas dan listrik yang dihasilkan tidak besar. Jika terpaksa melakukan perawatan panel surya di siang hari dapat memastikan kondisi cuaca sedang dalam keadaan relatif sejuk. (Cikarang Listrindo, 2024)

Pada perawatan PLTS digunakan *body harness* sebagai pengaman pekerja ketika melakukan perawatan solar panel di atap. Terdapat sistem monitor yang sudah dipasang untuk menjaga inerja panel surya agar dapat digunakan untuk mengetahui kondisi PLTS tersebut. Penggunaan alat berfungsi mengetahui rekam jejak energi produksi panel surya dengan lebih presisi dan *real-time*. Sistem monitor dapat memberitahukan kelengkapan data mengenai manfaat panel surya untuk lingkungan sekitar.(Cikarang Listrindo, 2024)

2.2.8. Standar Pengukuran yang digunakan

Pada penelitian ini, akan digunakan IEC 61724 sebagai standar acuan. IEC 61724 merupakan standar untuk mengukur kinerja sistem fotovoltaik (PV). Pertimbangan penggunaan standar ini karena standar sangat umum digunakan pada evaluasi performa PLTS yang digunakan secara nasional maupun internasional. (IEC, 2021)

Standar terbagi menjadi tiga bagian, dengan rincian sebagai berikut :

- IEC 61724-1 “Pemantauan”: Ketentuan pengukuran.
Bagian 1 menguraikan peralatan, metode dan terminologi yang digunakan untuk memantau kinerja dan analisis sistem PV. Membahas tentang sensor, instalasi, peralatan pemantauan, data parameter pengukuran untuk pemeriksaan kualitas, parameter pengukuran, dan pengukuran kinerja. Tujuan dari bagian ini adalah sebagai dasar standar lain bergantung pada data yang dikumpulkan. (IEC, 2021)
- IEC 61724-2 “Metode Evaluasi Kapasitas”: Analisis performa berdasarkan data pemantauan satu hari.
Bagian 2 standar ini sebagai prosedur pengukuran dan analisis produksi daya dari sistem PLTS yang bertujuan untuk mengevaluasi kualitas kinerja sistem. Daya sistem PV aktual yang diukur. Prosedur ini digunakan untuk sistem PV yang terhubung ke jaringan, mencakup satu inverter dan perangkat keras terkait. Prosedur ini dapat diimplementasikan pada sistem PV apapun, termasuk sistem PV konsenterator, menggunakan radiasi (langsung dan global) relevan dengan kinerja sistem. (IEC, 2021)
- IEC 61724-3 “Metode Evaluasi Energi”: Analisis performa berdasarkan data pemantauan selama periode satu tahun atau lebih.
Pada Bagian 3, dijelaskan mengenai prosedur pengukuran dan analisis produksi energi dari sistem PV secara real-time. Pola kerja memiliki fokus pada durasi pengujian, metode penyaringan data, akuisisi data, dan pemilihan sensor. Standar pengujian ini diaplikasikan pada sistem PV yang terhubung ke jaringan

listrik yang memiliki minimal satu inverter dan perangkat lainnya. Tujuan utama standar ini untuk memfasilitasi dokumentasi garansi kerja, memverifikasi akurasi suatu model, melacak kinerja (seperti degradasi) dalam suatu sistem dalam jangka penggunaan tahunan, dan dokumen kualitas sistem. (IEC, 2021)

Pada IEC 61724-1 didefinisikan klasifikasi sistem pengawasan yaitu kelas A (akurasi tinggi), B (akurasi menengah), dan C (akurasi dasar) dibedakan berdasarkan implementasi dan data yang dibutuhkan. Kelas A atau B umumnya digunakan pada sistem PLTS berukuran besar seperti pada tingkat utilitas atau instalasi komersial besar. Sedangkan untuk kelas B atau C umumnya digunakan untuk sistem berukuran kecil seperti komersial kecil atau instalasi perumahan. (IEC, 2021)

Namun, implementasi setiap kelas dapat disesuaikan dengan kebutuhan tanpa mempertimbangkan ukuran sistem PLTS. Berdasarkan IEC 61724, keuntungan yang diperoleh dengan melakukan pemantauan kinerja diimplementasikan pada penelitian ini adalah identifikasi performa pada sistem PLTS dan perbandingan antara kinerja sistem PLTS dengan ekspektasi desain dan garansi. Selain itu, jika suatu sistem PLTS berada dalam performa optimal atau mengalami penurunan kinerja, sehingga perlu dilakukan pemeliharaan atau pengembangan komponen. Standar ini tidak mendefinisikan rentang tertentu dalam penilaian performa PLTS akibat perbedaan kondisi dari setiap pemasangan PLTS sehingga tidak terdapat rentang definit. Sebagai analisis, nilai parameter penelitian ini dibandingkan dengan penelitian eksisting lainnya. (IEC, 2021)

2.2.9. Komponen PLTS

Untuk memenuhi kebutuhan pasokan listrik guna menunjang proses produksi di kawasan industri dilakukan pemasangan PLTS sebagai bentuk upaya dukungan terhadap Energi Baru Terbarukan yang digerakkan oleh pemerintah. Data yang diperoleh untuk penelitian berada di wilayah Kawasan Industri, Kabupaten Bekasi, Jawa Barat. Titik koordinat adalah -6.303710771144277, (Lintang Selatan), 107.10336175902037 (Lintang Timur) yang diperoleh dari Google Maps. Data sumber informasi berasal dari rata-rata penyinaran matahari (*Irradiance*) selama satu tahun dari aplikasi *Fusion Solar*. (Cikarang Listrindo, 2024)

1. Letak Geografis

Untuk memenuhi kebutuhan pasokan listrik guna menunjang proses produksi di kawasan industri dilakukan pemasangan PLTS sebagai bentuk upaya dukungan terhadap Energi Baru Terbarukan yang digerakkan oleh pemerintah.

Data yang diperoleh untuk penelitian berada di wilayah Kawasan Industri, Kabupaten Bekasi, Jawa Barat. Titik koordinat berada pada titik -6.303710771144277 (Lintang Selatan), 107.10336175902037 (Lintang Timur) didapatkan dari Google Maps. Informasi berasal dari rata-rata penyinaran matahari (*Irradiance*) setahun dari aplikasi *Fusion Solar*. (Cikarang Listrindo, 2024)

Tabel 2.2 Data Geografis (Cikarang Listrindo, 2024)

Data Geografis	
Garis Lintang (<i>Latitude</i>)	$-6.303710771144277^{\circ}$
Garis Bujur (<i>Longitude</i>)	$107.10336175902037^{\circ}$
Ketinggian	12 masl
Zona Waktu (<i>Time Zone</i>)	GMT+7

Tabel 2.3 Data Atap Bangunan (Cikarang Listrindo, 2024)

Data Atap Bangunan	
Luas Atap	1.485 m ²
Kemiringan Atap	8°
Azimuth Atap	90°

PLTS yang sudah dipasang pada di Kawasan Industri dihubungkan secara seri untuk meningkatkan arusnya, efisiensi penggunaan ukuran kabel tidak terlalu besar sehingga dapat menghemat biaya instalasi dan supaya memenuhi nilai rating dari inverter, karena pada inverter terdapat minimal arus dan tegangan masukan. PLTS digunakan sebagai sumber energi bauran Energi Baru Terbarukan untuk memberikan dukungan gerakan *Green Energy* karena ramah lingkungan. Namun, untuk saat ini PLTS dalam masa pengembangan dan bersifat *sustainable*, sumber energi panas yang dihasilkan bergantung cuaca dan faktor lingkungan di sekitar PLTS. Sehingga diperlukan baterai cadangan memiliki kualitas bagus dan sedang berada dalam tahap pengkajian perusahaan, sehingga terhubung on-grid dengan pembangkit konvensional dengan metode *spinning reserve*. Penggunaan PLTS jenis *Monocrystalline* karena memiliki tingkat efisiensi lebih baik dibandingkan dengan jenis *Polycrystalline* karena dalam proses pembuatannya *Monocrystalline* melewati lebih banyak proses sehingga menghasilkan pv modul yang memiliki efisiensi lebih bagus, walaupun secara harga lebih mahal, namun apabila mempertimbangkan lahan untuk instalasi pemilihan *Monocrystalline* lebih sepadan karena membutuhkan lebih sedikit lahan dibandingkan jenis *Polycrystalline*. (Cikarang Listrindo, 2024)

Pada tahun 2024, di kawasan industri memiliki PLTS dengan kapasitas beragam yang terdiri dari PLTS atap yang digunakan untuk menunjang proses produksi dan mendukung perkembangan Energi Baru Terbarukan di kawasan Industri. Sistem PLTS didesain dan dibangun pada tahun 2024 sehingga sudah beroperasi selama satu tahun hingga sekarang. Penelitian berfokus pada PLTS atap *On-grid* di Kawasan Industri yang memiliki komponen utama berupa module *photovoltaic monocrystalline* dengan kapasitas 550 Wp, 1 unit inverter *grid-tie* 3 fasa yang didukung beberapa komponen lain berupa *module support*, *smartlogger*, kabel PVDC, dan aksesoris konektor digunakan untuk menghubungkan komponen satu dengan komponen lainnya. Sistem PLTS bersifat *On-Grid* yang terkoneksi dengan jaringan listrik, maka apabila terdapat produksi energi berlebih akan disalurkan ke jaringan listrik dengan frekuensi dan tegangan yang sama, sehingga tidak menggunakan baterai sebagai tempat cadangannya. PLTS Atap terpasang pada Pabrik A kawasan industri Jababeka terhubung dengan aplikasi *Fusion Solar* yang dapat digunakan untuk memantau informasi cuaca secara *online* dari aplikasi tersebut. (Cikarang Listrindo, 2024)

PLTS digunakan untuk pasokan listrik pabrik hingga 20% dari beban yang ada sesuai dengan kesepakatan antara pabrikan dengan pihak penyedia listrik, presentase yang digunakan sesuai dengan Peraturan Kementerian ESDM mengenai Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia Nomor 2 Tahun 2024 tentang Pembangkit Listrik Tenaga Surya Atap yang Terhubung Jaringan Tenaga Listrik Pemegang Usaha Penyediaan Tenaga Listrik untuk Kepentingan Umum. Berdasarkan peraturan yang ditetapkan, tidak ada batasan 100% daya tersambung dari pelanggan. Namun, dapat mengikuti kesepakatan yang sudah ditentukan. Ketentuan yang diubah pada Peraturan Menteri adalah tidak ada sistem ekspor-impor sehingga kelebihan yang terdapat pada sistem PLTS atap tidak dihitung dalam bentuk tagihan listrik pelanggan. (Cikarang Listrindo, 2024)



Gambar 2.16 Tampak Atas PLTS Atap *On-grid* di Kawasan Industri (Cikarang Listrindo, 2024)

Pemeliharaan pada sistem PLTS Atap *On-grid* di Kawasan Industri dilakukan secara rutin setiap enam bulan sekali untuk melakukan pembersihan *module* panel surya yang dilakukan oleh tim *cleaning* yang dibekali ilmu cara pembersihan secara teknis menggunakan alat bernama *Solar Panel Cleaning Dual Brush*. (Cikarang Listrindo, 2024)

1. Spesifikasi *Module* Panel Surya

PV Module yang digunakan pada penelitian ini merupakan *module photovoltaic monocrystalline* dengan merk Trina Solar tipe TSM-DE19-550 yang dapat mencapai kapasitas sebesar 550 Wp sebanyak 1276 Unit dengan *lifetime* selama 25 tahun dengan degradasi sebesar 0,5% per tahun. Panel surya ini tersusun dari 54 *string* dengan *module* surya dihubung seri. Tampilan *module* surya terletak di Gambar 2.17 dan pada tabel 2.4 berupa spesifikasi *module* panel surya pada PLTS Atap.

Tabel 2.4 Spesifikasi *Module* Panel Surya (TrinaSolar, 2024)

Spesifikasi TrinaSolar TSM-DE19-550	
Tipe Sel	<i>Monocrystalline</i>
Dimensi	2384 x 1096 x 35 mm
Berat	32.3 kg
Susunan Sel	PERC Mono 166 x 83 mm (1276 pcs)
Lapisan Depan	2.0 mm AR <i>coating tempered glass</i>
<i>Frame</i>	<i>Anodized Aluminum Alloy</i>
<i>Junction Box</i>	IP68
Kabel Keluaran	4 mm ² , 280mm(+) atau 280 mm (-)
Beban Mekanis	Sisi Depan 5400Pa / Sisi Belakang 2400Pa
Daya Nominal Maksimum (Pmax)	550 W
Tegangan Operasi Optimal (Vmp)	31.8 V
Arus Operasi Optimal (Imp)	17.29 A
Tegangan <i>Open Circuit</i> (Voc)	38.1 V
Arus Hubung Singkat (Isc)	18.39 A
Efisiensi Modul (STC)	21.00%



Gambar 2.17 *Module Surya di PLTS Atap On-Grid di Pabrik Manufaktur (TrinaSolar, 2024)*

2. Spesifikasi Inverter

Inverter adalah komponen penting dalam sistem tenaga surya, digunakan untuk mengubah listrik arus searah (DC) yang dihasilkan oleh panel surya menjadi listrik arus bolak-balik (AC). Konversi ini diperlukan karena sebagian besar peralatan listrik dan jaringan kelistrikan beroperasi pada daya AC. Sumber tegangan input DC inverter dapat berupa sel surya, baterai, atau sumber tegangan DC lain. Output dari inverter umumnya 120 V atau 220 V dengan frekuensi 50 Hz atau 60 Hz. Efisiensi inverter didefinisikan sebagai rasio energi keluaran (AC) dengan energi input (DC) yang sangat penting untuk menentukan banyak energi yang dihasilkan digunakan secara efektif. (Cikarang Listrindo, 2024)

Banyak inverter dilengkapi dengan kemampuan pemantauan, memungkinkan pengguna untuk melacak kinerja sistem tenaga surya mereka secara real-time. Inverter memfasilitasi koneksi sistem tenaga surya ke jaringan listrik, memungkinkan kelebihan energi diumpankan kembali ke jaringan, yang dapat memberikan manfaat finansial bagi pemilik sistem. Efisiensi inverter secara signifikan dapat mempengaruhi rasio kinerja keseluruhan sistem tenaga surya. Efisiensi lebih tinggi berarti lebih banyak energi yang dihasilkan dapat digunakan, yang sangat penting untuk memaksimalkan output energi. Inverter dapat mengalami kehilangan energi karena panas dan faktor lainnya membuat pemilihan inverter berkualitas tinggi penting untuk optimalisasi kinerja sistem. Jenis inverter umumnya ditentukan bentuk gelombang output yang dihasilkan.

Sebagian besar beban industri dan rumah tangga memerlukan arus AC. Inverter Smart String SUN2000-100KTL-M2 merubah arus DC menjadi AC dengan *MPPT conversion algorithm* untuk mengonversikan energi yang maksimal dan fleksibilitas kontrol. Selain itu, inverter juga bekerja dengan sinkronisasi voltase dan frekuensi kepada jaringan listrik atau sesuai kebutuhan beban. (Cikarang Listrindo, 2024)

Keunggulan lain dari inverter Huawei adalah proteksi kelistrikannya. Di dalam setiap inverter yang ditawarkan sudah termasuk *string disconnecting switch*, *anti-islanding protection* yang memastikan inverter tidak mensuplai daya ke jaringan jika inverter mengalami kehilangan tegangan referensi, *AC overcurrent protection*, *DC surge arrester type II*, *AC surge arrester type II*, *DC insulation resistance detection*, dan *residual current monitoring unit*. (Cikarang Listrindo, 2024)

Inverter Huawei juga memiliki ketahanan yang sangat baik dengan tingkat proteksi IP65 pada tipe SUN2000-60KTL-M0 yang memungkinkan untuk dipasang di lokasi *outdoor*. Untuk memaksimalkan performa dan mengurangi beban perawatan, inverter Huawei menggunakan sistem pendingin tanpa kipas, sehingga mengurangi titik rawan kerusakan terjadi pada kipas pendingin pada inverter merk lain. (Cikarang Listrindo, 2024)

Pada sistem PLTS atap ini menggunakan empat inverter dengan merk Huawei dengan tipe SUN2000-100KTL-M2. Inverter tersebut berguna sebagai penghubung *DC Combiner* dengan panel LVMDP. Pada gambar 2.18 terdapat tampilan Inverter SUN2000-100KTL-M2 dan tabel 2.5 terdapat Spesifikasi inverter 100 kWp. (Huawei, 2024)



Gambar 2.18 Inverter Huawei SUN2000-100KTL-M2 (Huawei, 2024)

Tabel 2.5 Spesifikasi Inverter Panel Surya (Huawei, 2024)

Spesifikasi Huawei SUN2000-100KTL-M2	
Efisiensi Maksimum	98,7%
Tegangan <i>Input</i> Maksimum	1.100 V
Arus Maksimum per MPPT	22 A
Arus Hubung Singkat Maksimum per MPPT	30 A
Tegangan Awal	200 V
Rentang Tegangan Operasi MPPT	200 – 1.000 V
Tegangan Masukan Terukur	600 V
Daya Aktif AC Terukur	60.000 W
Daya Semu AC Maksimum	66.000 VA
Daya Aktif AC Maksimum	66.000 W
Tegangan Keluaran Terukur	230 V / 400 V, 3W + N + PE
Frekuensi Jaringan AC	50 Hz / 60 Hz
Arus Keluaran Terukur	91,2 A
Arus Keluaran Maksimum	100 A
Rentang Faktor Daya	0,8 <i>leading</i> ... 0,8 <i>lagging</i>
Total Distorsi Harmonik Maksimum	< 3%
Dimensi (P x L x T)	1075 x 555 x 300 mm
Berat (dengan penyokong)	74 kg
Rentang Suhu Operasi	25 °C ~ 60 °C
Konsumsi Daya Malam Hari	< 2 W

3. Spesifikasi Datalogger Huawei SmartLogger 3000A



Gambar 2.19 Datalogger Huawei SmartLogger 3000A (Huawei, 2024)

Tabel 2.6 Spesifikasi Datalogger Huawei SmartLogger 3000A (Huawei, 2024)

Spesifikasi Datalogger Huawei SmartLogger 3000A	
Maksimum Perangkat Terhubung	80
Ethernet	Modbus-TCP, IEC 60870-5-104
LAN	LAN x 1,10 / 100 / 1000 Mbps
RS485	Modbus-RTU, IEC 60870-5-103 (standar), DL / T645
LED	LED Indikator x 3 – RUN, ALM, 4G
WEB	Embedded Web
USB	USB 2.0 x 1
APP	Komunikasi melalui WLAN untuk Commissioning
Kisaran Suhu Pengoperasian	40°C ~ 60°C (-40°F ~ 140°F)
Suhu Penyimpanan	40°C ~ 70°C (-40°F ~ 158°F)
Kelembaban Relatif (Non-kondensasi)	5% ~ 95%
Maksimal Ketinggian Operasi	4.000 m (13.123 kaki)
AC Power Supply	100 V ~ 240 V, 50 Hz / 60 Hz
DC Power Supply	12 V / 24 V
Konsumsi Daya	Typical 8 W, Max. 15 W
Dimensi (P x L x T)	225 x 160 x 44 mm
Berat	2 kg
Perlindungan	IP20
Opsi Instalasi	Pemasangan di Dinding, Pemasangan Rel DIN, Pemasangan di Meja

Terdapat satu datalogger merk Huawei tipe SmartLogger 3000A memiliki desain kontrol ekspor yang cerdas, mudah dipasang dan mempunyai keamanan modul proteksi petir. Datalogger digunakan untuk memonitoring kerja sistem PLTS. Didalam alat ini sudah terdapat perangkat lunak yang tertanam (*embedded software*) untuk mengatur kerja inverter, sensor cuaca, dan power meter yang terhubung dengan alat. Alat ini juga berguna untuk menghubungkan setiap data pada system ke pengguna menggunakan PC dan juga menghubungkan system ke server secara *online* sehingga system PLTS dapat di monitor secara *real-time*. (Cikarang Listrindo, 2024)

Datalogger adalah komponen yang berfungsi sebagai tempat untuk memonitor kerja sistem PLTS. Pada alat ini terdapat perangkat lunak yang ditanam (*embedded software*) digunakan mengatur kerja setiap inverter, sensor cuaca, dan power meter yang

terhubung dengan alat ini. Alat ini juga berguna untuk menghubungkan setiap data pada sistem ke pengguna menggunakan PC dan menghubungkan sistem dengan server secara *online* sehingga sistem PLTS dimonitor secara *real-time*. (Cikarang Listrindo, 2024)

Huawei SmartLogger 3000A yaitu perangkat datalogger yang dirancang khusus berguna untuk mengumpulkan, merekam, dan mengirimkan data operasional dari sistem pembangkit listrik tenaga surya. Datalogger mengumpulkan data berbagai komponen sistem fotovoltaik, seperti inverter, panel surya, dan peralatan sehingga memungkinkan pemantauan kinerja secara menyeluruh yang diperoleh disimpan dan dikirim berkala ke pusat monitoring seperti *Fusion Solar*, untuk dianalisis lebih lanjut. (Cikarang Listrindo, 2024)

Dengan adanya data yang dikumpulkan secara *real-time*, operator dapat segera mendeteksi apabila terjadi gangguan, penurunan performa dan kinerja sistem sehingga dapat melakukan intervensi yang diperlukan. Data historis yang tersimpan di datalogger memungkinkan evaluasi jangka panjang terhadap kinerja sistem dan membantu dalam mengidentifikasi tren degradasi atau masalah potensial lainnya. Informasi yang akurat dapat membantu dalam pengambilan keputusan untuk pemeliharaan prediktif, sehingga meningkatkan efisiensi operasional dan mengurangi *down-time*. (Cikarang Listrindo, 2024)

Peralatan ini digunakan untuk mendukung integrasi data sistem dengan platform monitoring *Fusion Solar* yang menyediakan visualisasi dan analitik untuk memudahkan pemantauan dan manajemen sistem PV secara menyeluruh. Huawei SmartLogger 3000A berperan sebagai jembatan antara peralatan lapangan dan sistem manajemen pusat, memberikan data yang diperlukan untuk memastikan sistem fotovoltaik bekerja dengan optimal dan andal. (Cikarang Listrindo, 2024)

4. Spesifikasi Sensor Temperatur dan Kelembaban

Sensor temperatur dan kelembaban yang dilengkapi wadah aluminium stabil dan kabel tahan cuaca kuat. Dengan adanya penggunaan komponen kualitas terbaik, sensor mencapai akurasi sangat tinggi dan ideal digunakan di lingkungan industri dan lapangan (pabrik PV atau ruang pemantauan teknik). Semua sensor dikirimkan protokol kalibrasi untuk amplifier pengukur. (Cikarang Listrindo, 2024)

Sensor ambient dan temperatur merupakan sensor dirancang untuk mengukur suhu lingkungan sekitar dengan akurasi dan keandalan tinggi. Sensor ini mendeteksi dan mengukur suhu disekitarnya yang mencakup kondisi dalam dan diluar ruangan. Dengan kemampuan respons yang cepat terhadap perubahan suhu, sensor ini dapat memberikan

data secara *real-time* berguna untuk sistem pemantauan dan kontrol. Sensor ambient



temperatur biasanya menggunakan elemen penginderaan seperti termistor, termokopel, atau sensor semikonduktor. Elemen merespon perubahan suhu dengan menghasilkan sinyal listrik dikonversi dan dianalisis untuk mendapat nilai suhu aktual. (Cikarang Listrindo, 2024)

Tabel 2.7 Spesifikasi Sensor Temperatur dan Kelembaban (Cikarang Listrindo, 2024)

Spesifikasi Sensor Temperatur dan Kelembaban		
Type	Ta-ext-V-4090	Ta-ext-I-4090
Sinyal Keluaran	0 - 10 V pada -40 - +90 °C	4 -20 mA pada -40 - +90 °C
Ketidakpastian (-40 - +80°C)	1K	1 K*
Beban	Minimal 100 k▲	Maksimal 400 ▲
Arus	Sekitar 2 mA	Maksimal 25 mA
Supply Tegangan	12 to 28 VDC	
Sensor Elemen	Pt1000 1/3 Kelas B sesuai EN 60751	
Sensor Rumah	Tabung baja INOX, diameter 6 mm, panjang 50 mm	
Sensor Kabel	3 m LiYC11Y, 4 x AWG 26, hitam, tahan cuaca dan sinar UV	
Case Material	<i>Powder Coated Aluminium</i>	
Tingkat Perlindungan	64 mm x 58 mm x 34 mm / IP 67	
Berat	370 g	
Kondisi Pengoperasian	-40 hingga +80 °C	
Koneksi Kabel	Panjang: 3 m, dilapisi PUR, terlindung (LiYC11Y, 4 x 0,14 mmZ)	



Gambar 2.20 Spesifikasi Sensor Temperatur dan Kelembaban (Cikarang Listrindo, 2024)

5. Spesifikasi Sensor Iradiasi Matahari (*Pyranometer*)

Sensor pengukuran radiasi matahari yang andal dengan ISO 9060 Spectrally Flat Kelas C. *Pyranometer* didesain secara kuat, ringan, menyediakan data yang andal dan berkualitas di berbagai lingkungan operasional, ideal untuk pemantauan efisiensi pada instalasi PV komersial kecil. (Cikarang Listrindo, 2024)

Pyranometer merupakan suatu sensor yang digunakan untuk mengukur besarnya intensitas cahaya matahari berdasarkan pada kerapatan fluks elektromagnetik, kemudian dapat diubah menjadi parameter listrik dengan adanya satuan W/m^2 . *Pyranometer* akan dipasang di suatu daerah permukaan untuk mengukur cahaya matahari secara *real-time*. *Pyranometer* bekerja dengan menggunakan sensor termopile yang mengubah energi radiasi matahari menjadi sinyal listrik. Sinyal ini diolah untuk menentukan nilai radiasi global mencakup sinar matahari langsung dan sinar yang tersebar di daerah atmosfer. Data radiasi matahari berguna untuk mempelajari interaksi antara atmosfer, permukaan bumi, dan energi matahari. (Cikarang Listrindo, 2024)



Gambar 2.21 Spesifikasi Sensor Iradiasi Matahari (*Pyranometer*) (Cikarang Listrindo, 2024)

Tabel 2.8 Spesifikasi Sensor Iradiasi Matahari (*Pyranometer*) A (Cikarang Listrindo, 2024)

Spesifikasi Sensor Iradiasi Matahari (<i>Pyranometer</i>)		
Tipe	CMP3	SMP3
Klasifikasi ISO 9060:2018	Kelas Datar Spektral C	
Sensitivitas	5 - 20 $\mu V/W/m^2$	-
Impedansi	20 - 200 Ω	-
Kisaran keluaran yang diharapkan (0 - 1500 W/m^2)	0 - 30 mV	-
Max Iradiasi operasional	2000 W/m^2	
Output analog • Versi V	-	0 - 1 V
Rentang keluaran analog*	-	-200 - 2000 W/m^2

Tabel 2.9 Spesifikasi Sensor Iradiasi Matahari (*Pyranometer*) B (Cikarang Listrindo, 2024)

Spesifikasi Huawei SUN2000-100KTL-M2		
Tipe	CMP3	SMP3
Output analog • Versi A	-	4 - 20mA
Rentang keluaran analog*	-	0 - 1600 W/m ²
Serial output	-	RS-485 Modbus® RTU
Rentang Serial output	-	-400 - 2000 W/m ²
Respon Waktu (63 %)	< 6 s	< 1,5 s
Respon Waktu (95 %)	< 18 s	< 12 s
Rentang spektral (20% poin)	285 to 3000 nm	
Rentang spektral (50% poin)	300 to 2800 nm	
Nol offset (tidak berventilasi)		
a. radiasi thermal (pada 200 W/m ²)	< 15 W/m ²	< 15 W/m ²
b. perubahan suhu (5 K/jam)	< 5 W/m ²	< 5 W/m ²
Ketidakstabilan (perubahan/tahun)	< 1%	
Non-linearitas (100 hingga 1000 W/m ²)	< 1.5%	
Respon terarah (- 80 ° dengan sinar 1000 W/m ²)	< 20 W/m ²	
Selektivitas spektral (350 hingga 1500 nm)	< 3%	
Respon kemiringan (0 ° - 90 ° pada 1000 W/m ²)	< 1%	
Respon suhu	< 5% (-10 °C - +40 °C)	< 2% (-20 °C - +50 °C) < 4% (-40 °C - +70 °C)
Bidang pandang	180 °	
Akurasi tingkat gelembung	< 0.2 °	
Konsumsi daya (pada 12 VDC)	-	I-version: 55mW A-version: 100mW
Supply Tegangan	-	5 - 30VDC
Perangkat Lunak		SmartExplorer Software
Tipe Detektor	<i>Thermopile</i>	
Kisaran suhu pengoperasian dan penyimpanan	-40 °C - +80 °C	
Kisaran kelembaban	0 - 100 %	
MTBF (<i>Mean Time Between Failures</i>)	> 10 tahun	
Rating IP	67	
Aplikasi yang direkomendasikan	Untuk pengukuran rutin di stasiun cuaca, pengujian lapangan, pertanian, hortikultura, dan hidrologi.	Untuk efisiensi dan pemantauan pemeliharaan instalasi listrik PV, pengukuran rutin di stasiun cuaca.

6. Penyangga Modul Surya

Penyinaran matahari pada suatu modul surya dipengaruhi beberapa faktor, salah satunya adalah letak astronomi lokasi pemasangan panel. Oleh karena itu, dibutuhkan sudut kemiringan yang paling tepat agar intensitas radiasi matahari yang diterima adalah yang tertinggi.

Sudut kemiringan dipengaruhi dua faktor, yaitu sudut kemiringan panel surya terhadap bidang horizontal dan sudut yang diukur mengacu pada arah utara atau selatan, disebut sudut *azimuth*. Tingkat kemiringan optimum umumnya dipasang sesuai garis lintang, jika lokasi modul disisi selatan khatulistiwa, modul surya menghadap arah utara dengan sudut *azimuth* 00. Jika modul berada di bagian utara, maka sudut *azimuth* menggunakan 1800 menghadap selatan. Penyangga modul surya dapat digunakan untuk mengatur orientasi arah utara atau selatan dan elevasi sudut kemiringan supaya sistem PLTS dapat memiliki kerja maksimum. Umumnya, penyangga terbuat dari besi dilapisi galvanis, suatu material seng dengan tingkat konsentrasi kemurnian hingga 99,7% agar besi terlindungi dari karat.

7. Panel AC Combiner

Panel ini sangat penting untuk mengisolasi komponen-komponen yang didalam kotaknya. Banyak komponen lain harus terlindungi dan tidak kontak langsung dengan air untuk keseimbangan sistem. Box Panel akan melindungi komponen elektrik bagian AC untuk melindungi MCB AC, MCCB AC dan untuk melindungi sistem monitoring. Kotak-kotak pelindung ini terbuat dari bahan non-korosif paling tidak dengan proteksi IP41. Box mempunyai umur yang panjang untuk keberlangsungan sistem.



Gambar 2.22 Panel AC Combiner (Cikarang Listrindo, 2024)

8. Kabel

Sistem kabel atau *wiring* pada PLTS sangat krusial untuk memastikan proses produksi listrik yang efisien dan aman. Komponen utama *wiring* antara lain adalah kabel DC yaitu kabel PV untuk menghubungkan panel surya dengan inverter dan *combiner box*, serta kabel seri dan paralel untuk menghubungkan antar panel surya.

Selain kabel DC, terdapat kabel *grounding* untuk menghubungkan komponen PLTS ke tanah untuk melindungi peralatan dari lonjakan listrik. Selanjutnya, terdapat kabel AC yang terdiri dari kabel AC utama untuk menghubungkan keluaran inverter ke panel distribusi atau langsung ke beban, dan kabel distribusi AC untuk menghubungkan panel distribusi ke beban atau jaringan listrik. Terdapat MC4 konektor yang digunakan menghubungkan panel surya dengan satu sama lain dengan kabel lain.

9. Sistem Proteksi Petir

Penangkal digunakan untuk melindungi peralatan modul surya dari sambaran petir. Sistem proteksi digabungkan dengan penangkal petir gedung atau dibuat terpisah bila penangkal petir pada gedung tidak mencangkup wilayah modul surya. Komponen utamanya adalah penangkal petir (*lightning rod*) dan *surge protection devices* (SPD). Penangkal petir berfungsi untuk menangkap sambaran petir dan mengarahkannya ke tanah melalui kabel penghantar. SPD berguna untuk melindungi peralatan listrik akibat petir dengan menyerap dan menahan lonjakan tegangan. Instalasi mengacu standar SNI 03-7015-2004 tentang Sistem Proteksi Petir pada Bangunan Gedung.

10. Sistem Pentanahan

Sistem pentanahan berfungsi guna melindungi komponen PLTS seperti *inverter*, *controller*, dan perangkat aktif lainnya dengan memastikan bahwa seluruh potensi listrik komponen PLTS sama dengan bumi. *Grounding* memiliki dua komponen utama, yaitu kabel dan batang tanah (*grounding rod*). Kabel tersebut menghubungkan komponen listrik PLTS ke tanah dan sebagai jalur arus gangguan ke bumi. Sedangkan batang tanah adalah batang dari tembaga atau baja berlapis yang ditanam di tanah dihubungkan dengan kabel untuk mengalirkan arus gangguan ke bumi.

Komponen PLTS pada suatu sistem PLTS dapat digabungkan dengan *grounding* terpasang pada gedung, namun jika dinilai tidak cukup maka dapat dibuat *grounding* khusus PLTS. Jika akan dibuat *grounding* khusus, maka perlu disatukan dengan yang sudah ada atau *equipotential grounding* untuk menghindari perbedaan potensial antar

batang konduktor tertanam dalam tanah. Dalam penggunaannya, komponen ini mengacu standar SNI 0225 mengenai Persyaratan Umum Instalasi Listrik (PUIL) menyatakan besar *grounding* harus lebih kecil dari 5 Ohm. Jika masih diatas 5 Ohm, perlu dilakukan penambahan *grounding rod* paralel dengan *grounding* utama.

11. Data Iradiasi Matahari dan Pergerakan Matahari

Data meteorologis iradiasi matahari berasal dari aplikasi *Fusion Solar* yang mengacu pada Intensitas matahari yang dihasilkan oleh panel surya melalui sensor iradiasi. Data yang dapat diketahui dari aplikasi *Fusion Solar* antara lain Iradiasi Global Horizontal, Iradiasi Horizontal Difus, cuaca, intensitas sinar matahari dan kecepatan angin. Data produksi energi dapat berupa energi harian, energi bulanan, energi tahunan dan energi total.

Dengan adanya penelitian ini, dapat diketahui bahan utama sebagai pendukung yaitu Iradiasi Global Horizontal, Iradiasi Horizontal Difus, radiasi ekstraterestrial, insiden global, indeks kejernihan, suhu lingkungan, kecepatan angin dan cuaca. Iradiasi Global Horizontal merupakan jumlah *Direct Normal Irradiance* (DNI), *Diffuse Horizontal Irradiation* (DHI), dan radiasi yang dipantulkan oleh tanah. *Direct Normal Irradiance* (DNI) adalah jumlah iradiasi yang diterima setiap satuan luas pada bagian tegak lurus (normal) terhadap cahaya matahari yang datang secara lurus dari arah matahari. Cara yang tepat untuk melakukan optimasi penerimaan DNI adalah dengan memastikan permukaan selalu tegak lurus dengan radiasi yang datang. Sedangkan DHI adalah iradiasi yang tetap berada antara batas matahari dan sistem energi.

12. Data pada Fusion Solar

Spesifikasi PLTS Atap *On-grid* di Kawasan Industri dijadikan sebagai acuan untuk proses pengambilan data sistem di aplikasi *Fusion Solar* untuk memperoleh data evaluasi perkembangan sistem PLTS berupa daya produksi PLTS seharusnya setiap bulan dalam kurun waktu setahun. Aplikasi ini digunakan karena memiliki berbagai fitur yang menunjang analisis sistem yang bersifat komprehensif serta berguna sebagai pertimbangan berbagai faktor seperti halnya orientasi, efisiensi, radiasi matahari, cuaca dan lain sebagainya. Pada aplikasi ini terdapat berbagai jenis komponen yang memiliki spesifikasi akurat sesuai data yang ada di lapangan. Aplikasi ini mengacu pada kapasitas *module* surya dan inverter yang sudah tertera di PLTS tersebut. (Huawei, 2024)

Data yang digunakan pada aplikasi ini antara lain, berupa :

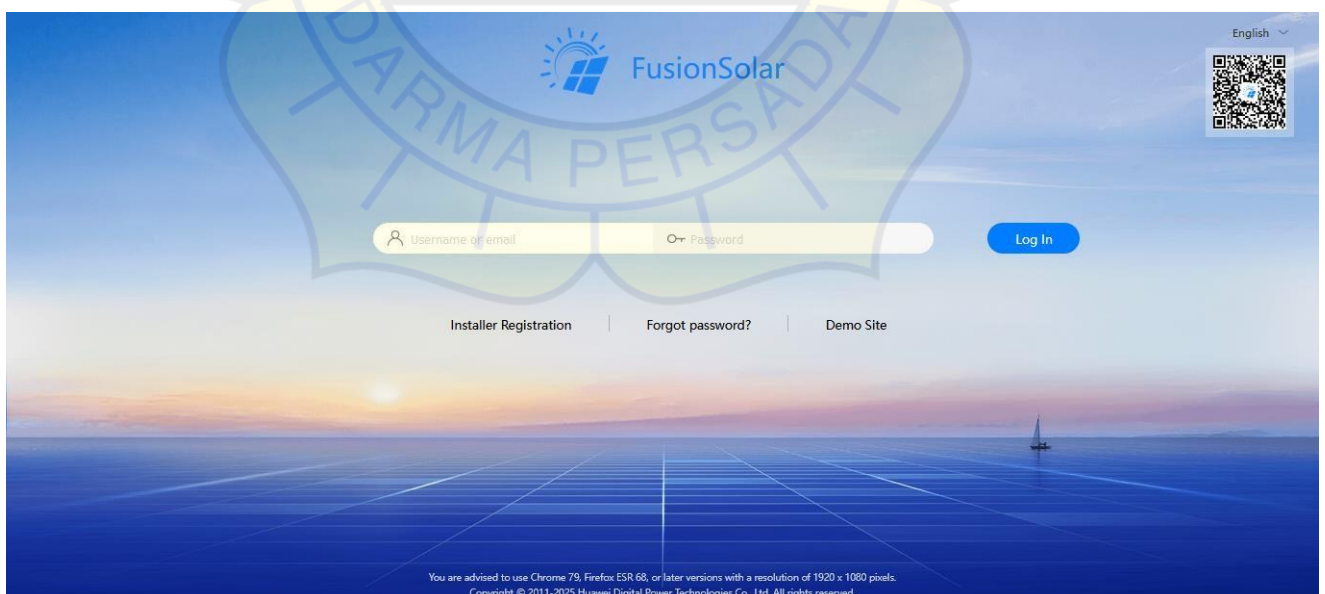
- Letak geografis lokasi PLTS
- Orientasi PLTS (kemiringan dan *azimuth*)
- Sistem PLTS (spesifikasi *module* panel surya dan inverter)

Data keluaran yang dapat ditinjau dari aplikasi, antara lain adalah :

- Data produksi sistem PLTS (hasil keluaran)
- Data meteorologis (iradiasi matahari, indeks kecerahan cuaca, suhu lingkungan dan kecepatan angin)

Data keluaran yang dihasilkan akan dijadikan sebagai acuan dan parameter yang digunakan dalam perhitungan evaluasi. Data produksi sistem PLTS sebagai acuan faktor kali sebagai proyeksi data pengukuran. Data produksi sistem PLTS untuk menentukan daya produksi *array* dengan pertimbangan efisiensi inverter sesuai data. (Huawei, 2024)

Hasil data iradiasi matahari akan dijadikan sebagai salah satu hal penting untuk parameter perhitungan. Pengolahan data menjadi tahapan terpenting dalam penelitian yang dilakukan, banyaknya data yang diperoleh dari berbagai sumber yang *valid* dapat mempengaruhi satu data dengan yang lainnya. Data geografis dan spesifikasi PLTS harus disesuaikan dengan data yang terdapat pada aplikasi *Fusion Solar* supaya data yang diproses sesuai dengan data di lapangan. Data yang didapatkan berupa proyeksi produksi PLTS selama satu tahun dan data Iradiasi Global Horizontal. (Huawei, 2024)



Gambar 2.23 *FusionSolar* Huawei (Huawei, 2024)

Huawei *Fusion Solar* adalah solusi energi surya pintar yang dikembangkan oleh Huawei. Teknologi ini mencakup berbagai produk dan sistem untuk pembangkit listrik tenaga surya (PLTS), baik untuk skala rumah tangga, komersial, maupun utilitas besar. *Fusion Solar* menggabungkan kecerdasan buatan (AI) dan internet of things (IoT) untuk meningkatkan efisiensi energi, keandalan sistem, dan kemudahan pengelolaan. (Huawei, 2024)

Pengintegrasikan teknologi AI dan Cloud, *Fusion Solar* digunakan untuk meningkatkan efisiensi pembangkit listrik tenaga surya, memastikan sistem efisien, aman, andal, serta mendukung operasi dan pemeliharaan yang cerdas. Untuk pengguna residensial, Huawei menyediakan solusi PV pintar dirancang untuk memaksimalkan produksi energi dan meningkatkan efisiensi energi secara keseluruhan. (Huawei, 2024)

Selain itu, Huawei menawarkan aplikasi *Fusion Solar* yang memungkinkan pengguna memantau dan mengelola sistem panel surya secara *real-time*, memberikan wawasan mengenai produksi energi, status jaringan dan aliran energi antara komponen dengan sistem. Secara keseluruhan, *Fusion Solar* bertujuan menyediakan solusi energi surya yang inovatif dan efisien bagi berbagai jenis pengguna, mulai dari pemilik rumah hingga pemilik pabrik utilitas. (Huawei, 2024)

