

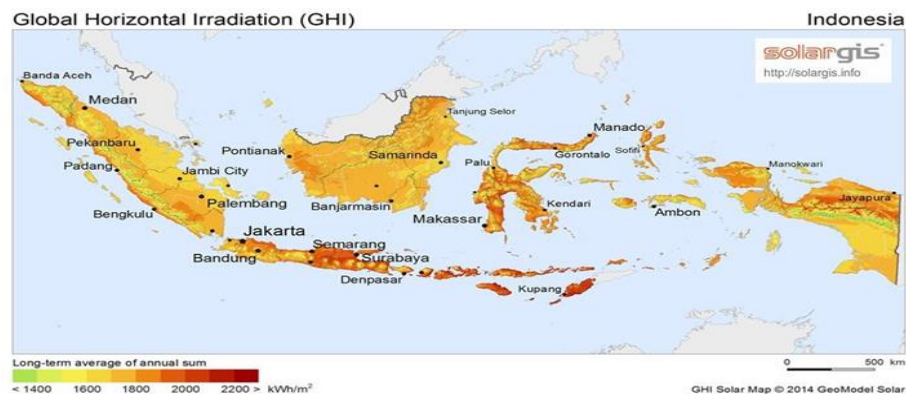
BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Potensi Energi Surya di Indonesia

Sebagai negara yang berada di wilayah khatulistiwa, Indonesia hampir sepanjang tahun mendapatkan sinar matahari yang cukup, sehingga memiliki potensi energi surya yang dapat dimanfaatkan dan dikembangkan baik untuk pembangkit listrik. Sesuai dengan data dalam Rencana Umum Energi Nasional (RUEN), Indonesia memiliki total potensi energi surya sebesar 207.898 MW yang tersebar di 34 Provinsi di Indonesia seperti yang terlihat pada Gambar 2.1

Energi surya merupakan sumber energi yang tak terbatas, karena energi matahari merupakan energi terbesar di Bumi. Bagi negara-negara tropis seperti Indonesia, sinar matahari sangatlah mudah untuk ditemui. Rata-rata insolasi harian Indonesia berkisar antara 4,5 – 5 kWh/m² /hari. Jawoto, 2019 (n.d.)



Gambar 2.1 Peta Potensi Energi Surya di Indonesia (Global Solar Atlas, 2020)

Dalam peta tersebut Gambar 2.1 menandakan level insolasi yang dijelaskan melalui warna, warna hijau tua berkisar 4,21 kWh/m² /hari, warna hijau muda berkisar 4,21-4.40 kWh/m² /hari, warna kuning berkisar 4.41-4.60 kWh/m² /hari, warna oranye berkisar 4.61-4.80 kWh/m² /hari dan warna merah berkisar 4.81-5.00 kWh/m² /hari. Potensi yang sangat baik ini tentunya menjadi peluang bagi energi baru terbarukan khususnya PLTS untuk berkembang pesat di Indonesia.

Energi surya adalah energi yang ramah lingkungan, sehingga tidak heran jika energi terbarukan saat ini dianggap sebagai energi masa depan yang dapat diterima oleh masyarakat dan mulai dikembangkan di Indonesia. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) memiliki konsep yang sederhana, yaitu mengkonversi cahaya matahari menjadi energi listrik. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa biaya untuk menghasilkan listrik dari tenaga surya di masa depan akan semakin terjangkau. Namun, penggunaan energi surya di Indonesia masih rendah, di mana hingga tahun 2020, kontribusi energi surya baru mencapai 0,07%.

Produksi energi listrik dengan sistem PLTS diproyeksikan akan menjadi yang terbesar di Indonesia hingga mencapai 421,3 TWh (*TeraWatt Hour*) dari sekian jenis sumber energi baru terbarukan atau sekitar 68%. Tingginya produksi listrik tersebut disinyalir karena implementasi PLTS atap/*rooftop* yang memiliki 25% porsi dari jumlah rumah mewah serta adanya perkembangan industri baterai di beberapa daerah sebagai penunjang sistem penyimpanan energi listrik PLTS (*Off-Grid*). (Nur Putra et al., 2021)

2.2 Green Campus

Green campus didefinisikan sebagai kampus yang berwawasan lingkungan yang mengintegrasikan ilmu pengetahuan lingkungan ke dalam kebijakan,

manajemen dan kegiatan tridharma perguruan tinggi. *Green campus* mempunyai kapasitas intelektual dan sumber daya dalam mengintegrasikan ilmu pengetahuan dan tata nilai lingkungan ke dalam misi serta program-programnya. *Green campus* harus menjadi contoh implementasi pengintegrasian ilmu lingkungan dalam semua aspek manajemen dan *Best Practices* dalam pembangunan berkelanjutan. (Febri et al., 2019)

Konsep green campus berarti bahwa universitas telah menjalankan berbagai kegiatan yang berfokus pada pelestarian lingkungan, seperti pengelolaan limbah, efisiensi penggunaan energi, promosi penggunaan sepeda, serta penciptaan lingkungan yang mendukung kenyamanan dalam belajar dan bekerja.

Menerapkan program green campus di Indonesia bukanlah hal yang mudah, diperlukan kolaborasi antara manajemen kampus dan mahasiswa untuk mewujudkannya. Berdasarkan penelitian di Institut Teknologi Nasional dan Universitas Katolik Parahyangan di Bandung, ditemukan bahwa salah satu kendala dalam mengoptimalkan implementasi konsep green campus adalah kebijakan manajemen yang kurang maksimal dalam mendukung konsep tersebut. Kebijakan yang kurang optimal dari manajemen kampus ini mungkin menjadi alasan rendahnya pemahaman sivitas akademika mengenai konsep Green Campus di kedua institusi tersebut. Mengingat pentingnya peran manajemen kampus dalam merealisasikan program ini, pemahaman mereka terhadap konsep Green Campus perlu mendapat perhatian lebih.

Beberapa standar ditetapkan untuk menentukan apakah suatu institusi telah menerapkan konsep green campus atau tidak. Dua lembaga di Indonesia telah

menetapkan standar campus hijau, yaitu Universitas Indonesia dan Kementerian Riset, Teknologi dan Pendidikan Tinggi.

UI GreenMetric World University mengevaluasi secara tahunan sebuah universitas berdasarkan kinerja kelestarian lingkungannya. Standar ini disusun oleh Universitas Indonesia dan meliputi enam kategori utama, yaitu:

1. **Penataan dan Infrastruktur:** Kategori ini mencakup infrastruktur fisik dan lokasi kampus, seperti efisiensi energi gedung, ruang hijau, dan opsi transportasi.
2. **Energi dan Perubahan Iklim:** Kategori ini mengukur upaya universitas untuk mempromosikan energi terbarukan dan mengurangi emisi karbon mereka.
3. **Air:** Kategori ini mengukur seberapa baik universitas menghemat air dengan daur ulang dan pemanenan air hujan.
4. **Sampah:** Kategori ini mengacu pada upaya universitas untuk mengurangi, mendaur ulang, dan membuat kompos sampah.
5. **Transportasi:** Kategori ini mengukur upaya universitas untuk mendorong cara transportasi yang lebih ramah lingkungan, seperti bersepeda dan menggunakan transportasi umum.
6. **Pendidikan dan penelitian:** Kategori ini mengukur upaya universitas untuk memasukkan keberlanjutan ke dalam kurikulum dan kegiatan penelitian mereka.

Untuk dianggap sebagai kampus hijau, universitas harus memiliki skor tinggi di setiap kategori dan mampu menunjukkan kemajuan dalam program keberlanjutan.

Kementerian Riset, Teknologi dan Pendidikan Tinggi. juga menetapkan beberapa kriteria universitas untuk dianggap sebagai green campus, yang meliputi:

1. **Pengelolaan energi dan air:** Kriteria ini mengukur upaya universitas untuk menghemat energi dan air, termasuk penerapan teknologi konservasi air dan penggunaan energi terbarukan.
2. **Pengelolaan limbah:** Kriteria ini mengukur upaya universitas untuk mengurangi, mendaur ulang, dan membuat kompos sampah, termasuk menerapkan program pemilahan sampah dan mendorong daur ulang.
3. **Transportasi hijau:** kriteria ini menilai upaya universitas untuk mendorong cara transportasi yang lebih hijau, seperti bersepeda dan menggunakan transportasi umum.
4. **Bangunan dan infrastruktur hijau:** Kriteria ini mengevaluasi upaya universitas untuk merancang dan membangun bangunan dan infrastruktur dengan cara yang ramah lingkungan, seperti menggunakan bahan yang berkelanjutan dan menerapkan standar bangunan hijau.

2.3 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Pembangkit Listrik Tenaga Surya adalah sistem pembangkit yang memanfaatkan energi dari radiasi matahari melalui konversi sel fotovoltaik. PLTS berfungsi untuk mengubah energi elektromagnetik dari sinar matahari menjadi energi listrik, yang dilakukan oleh panel surya yang terdiri dari sejumlah sel surya. Energi listrik yang dihasilkan berbentuk arus searah (DC). Semakin tinggi intensitas radiasi matahari yang diterima sel fotovoltaik, semakin besar pula daya listrik yang dihasilkan. Dengan posisi Indonesia yang berada di wilayah tropis dan dekat garis

khatulistiwa, teknologi PLTS memiliki potensi besar untuk diaplikasikan sebagai sumber tenaga listrik. (Roza & Mujirudin, 2019)

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) menggunakan sel surya pada panel untuk mengonversi energi radiasi dari sinar matahari atau foton menjadi energi listrik. Panel surya tersusun dari lapisan silikon murni dan bahan semikonduktor sebagai komponen utamanya. PLTS tergolong sebagai pembangkit ramah lingkungan karena tidak menghasilkan polusi atau limbah berbahaya. Efisiensi daya keluaran sel surya dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti radiasi matahari, suhu sel surya, orientasi panel surya, serta adanya bayangan atau shading. (Windarta et al., 2021)

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan suatu sistem pembangkitan yang mengkonversi energi kalor dari radiasi matahari / surya menjadi energi listrik. PLTS terdiri dari beberapa komponen utama yaitu panel surya, inverter, dan unit kontrol. Secara desain dan sistem integrasi, PLTS dikonfigurasi menjadi dua jenis, yaitu PLTS jenis Off-Grid dan PLTS jenis On-Grid. Pada PLTS jenis Off-Grid, energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya akan disimpan pada baterai yang terhubung dengan solar charger control dan inverter. Sedangkan pada PLTS jenis On-Grid, panel surya akan dihubungkan langsung dengan inverter dan jaringan PLN. Blok diagram PLTS dapat dilihat pada Gambar 2.2



Gambar 2.2 Blok Diagram PLTS (Sun Energy, 2020)

Berdasarkan cara penggunaan dan konfigurasi, PLTS umumnya terbagi menjadi dua kategori: sistem PLTS yang terhubung dengan jaringan (sistem PV on-grid) dan sistem PLTS yang tidak terhubung dengan jaringan (sistem PV off-grid) atau yang dikenal sebagai PLTS mandiri (stand-alone). PLTS mandiri ini tidak hanya dapat beroperasi secara independen, tetapi juga dapat didukung oleh sumber energi lain seperti tenaga angin, generator set, serta tenaga air dan mikro hidro, yang dikenal sebagai sistem PLTS hybrid. (Kumara et al., 2018)

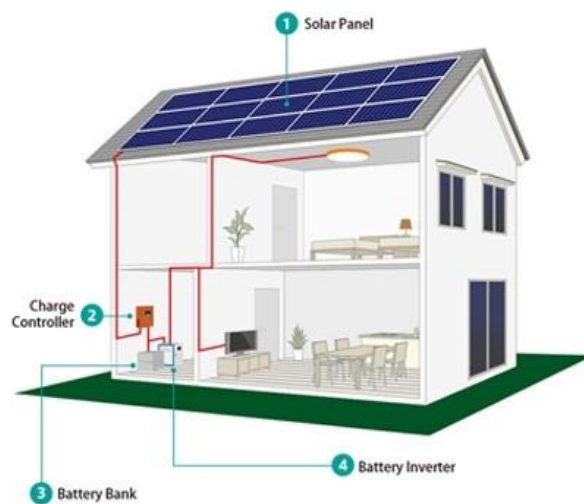
2.4 Konfigurasi PLTS

Konfigurasi sistem PLTS umumnya terbagi menjadi tiga bagian, yaitu sistem *Off Grid*, *On Grid* dan *Hybrid* yang disesuaikan dengan kebutuhan.

2.4.1 Sistem PLTS *Off Grid* (Stand Alone)

Sistem PLTS *Off grid* merupakan sistem pembangkit energi listrik yang hanya mengandalkan energi matahari sebagai satu-satunya sumber energi utama dengan menggunakan rangkaian panel surya untuk menghasilkan energi listrik sesuai dengan kebutuhan yang diperlukan. Sistem PLTS *Off grid* pada umumnya

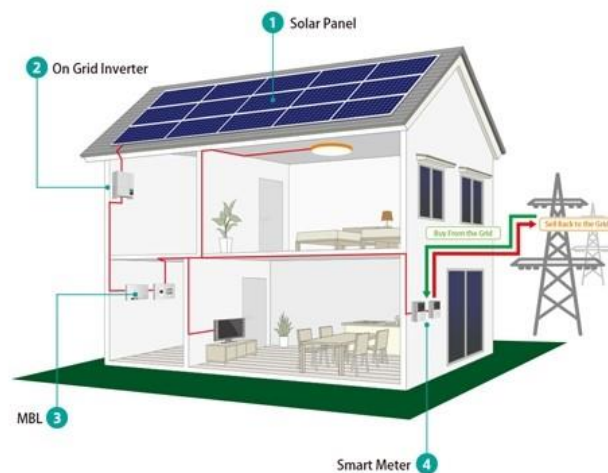
mempunyai keluaran tegangan 220 Vac (sama dengan sistem tegangan pada PLN), karena itu peralatan inverter sangat diperlukan untuk dapat mengubah arus DC menjadi AC untuk di kirim pada beban, selain daripada inverter alat alat penunjang lainnya seperti SCC dan Baterai menjadi komponen yg sangat penting. (Sampeallo et al., 201(R8). Berikut merupakan diagram sistem PLTS *Off grid* seperti pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Sistem PLTS *Off Grid* (Est Indonesia, 2022)

2.4.2 Sistem PLTS *On Grid*

Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) terinterkoneksi, atau dikenal sebagai Grid Connected PV Sistem, adalah sistem pembangkit listrik yang memanfaatkan radiasi matahari untuk menghasilkan energi listrik. Sesuai namanya, sistem ini terhubung dengan jaringan listrik PLN dan mengoptimalkan penggunaan energi matahari melalui modul surya atau modul fotovoltaik untuk menghasilkan listrik secara maksimal. Berikut merupakan diagram sistem PLTS *On Grid* seperti pada Gambar 2.4 (Ramadhana et al., 2022).



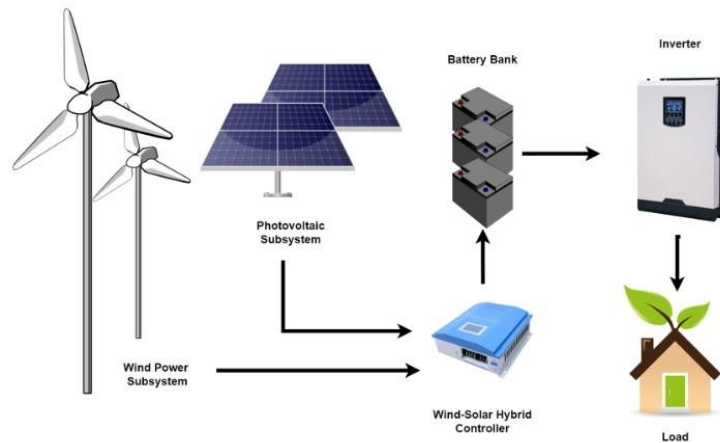
Gambar 2.4 Sistem PLTS *On Grid* (Est Indonesia, 2022)

Sistem ini juga dianggap ramah lingkungan dan bebas emisi. Sistem PLTS *On Grid* juga merupakan sebuah solusi *Green Energy* bagi masyarakat perkotaan baik perkantoran maupun perumahan yang bertujuan untuk dapat memperkecil tagihan rekening listrik dari PLN. Kelebihan utama dari PLTS *On Grid* ini adalah kemampuannya untuk memanfaatkan jaringan Listrik utama sebagai sumber penyimpanan energi dan juga sebagai sumber listrik cadangan jika produksi energi surya tidak mencukupi, misalnya pada malam hari atau saat cuaca buruk.

2.4.3 Sistem PLTS *Hybrid*

Konfigurasi hibrida adalah penerapan lebih dari satu jenis pembangkit listrik dengan sumber energi yang berbeda. Contohnya, penggunaan panel surya sebagai pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) yang dikombinasikan dengan pembangkit listrik tenaga angin (PLTB), di mana generatornya digerakkan oleh bahan bakar minyak, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.5. Tujuan dari sistem hibrid ini adalah untuk menggabungkan beberapa sumber energi agar dapat saling melengkapi kekurangan dari masing-masing sumber, baik dari segi teknis maupun ekonomis, sehingga tercipta sistem pembangkit yang handal. Berikut merupakan

diagram sistem PLTS *Hybrid* seperti pada Gambar 2.5



Gambar 2.5 Sistem PLTS *Hybrid* (Shafi *et al.*, 2023)

Keuntungan utama dari sistem PLTS *Hybrid* adalah kemampuannya untuk mengoptimalkan penggunaan energi baru terbarukan dengan tetap memastikan pasokan Listrik stabil dan dapat diandalkan, sistem ini juga dapat membantu mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan mengurangi emisi gas rumah kaca.

2.5 Komponen PLTS *Off Grid*

Komponen utama PLTS *Off Grid* yaitu modul surya dengan kemampuannya mengkonversi energi matahari menjadi energi listrik. Selain itu pula sel fotovoltaik dibantu perangkat lain untuk menunjang keandalan suatu system seperti, Inverter, *Solar Charge Controller*, dan *Battery*.

2.5.1 Panel Surya

Panel surya merupakan elemen kunci dalam sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) yang berfungsi mengkonversi energi matahari menjadi energi listrik. Umumnya, setiap keping sel surya memiliki ketebalan 3 mm, yang terdiri dari kutub positif dan negatif yang terbuat dari bahan semikonduktor. Cara kerja sel

surya didasarkan pada efek fotovoltaiik, yaitu fenomena yang memungkinkan cahaya matahari diubah langsung menjadi energi listrik.

Panel surya terdiri dari bahan semikonduktor tipe n (elektron) dan tipe p (hole) yang saling terhubung dalam sebuah p-n junction. Prinsip kerja panel surya melibatkan pembentukan medan listrik ketika sinar matahari menyinari sel surya, yang menyebabkan cahaya diserap di zona sambungan tipe p. Proses ini menghasilkan elektron bebas yang bergerak melalui silikon dan memasuki sirkuit eksternal. Ketika elektron memasuki sirkuit eksternal, energi dilepaskan untuk menyalakan beban(Darno et al., 2017).

Kapasitas daya modul surya diukur dalam satuan Wattpeak (Wp). Daya dan arus listrik yang dihasilkan modul surya berubah – ubah tergantung pada besarnya intensitas radiasi surya yang diterima semakin tinggi intensitas cahaya matahari maka semakin besar energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya.

Berdasarkan jenis solar cell dapat dibedakan menjadi 3 jenis yaitu :

a. *Monocrystalline*

Modul surya jenis *Monocrystalline* ini terbuat dari silikon kristal tunggal. Dapat ditemukan secara alami, namun sangat jarang atau juga dapat tumbuh dibuat di laboratorium. Proses ini dinamakan dengan *recrystallising*, sehingga pembuatan dan harga dari modul jenis ini lumayan cukup mahal. Monokristal adalah jenis PV module yang memiliki efisiensi hasil tinggi pada setiap satuan luas PV Module. Panel surya jenis *Monocrystalline* umumnya memiliki efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan panel jenis lainnya, seperti polycristalin atau film tipis. Ini berarti mereka dapat mengubah lebih banyak sinar matahari menjadi energi listrik dalam ruang yang lebih kecil.

Monocrystalline sangat cocok untuk aplikasi di mana ruang terbatas tetapi membutuhkan output energi tinggi, seperti di atap rumah tinggal, gedung komersial, dan instalasi off-grid. . (Kristiawan et al., 2019). Panel jenis ini memiliki umur yang lebih panjang, bisa mencapai 25 tahun atau lebih. Desainnya yang elegan dan warna hitam pekat juga membuatnya lebih menarik secara visual, sehingga banyak dipilih untuk aplikasi di atap rumah. Umumnya bentuk *solar cell mono-crystallined* seperti pada Gambar 2.6



Gambar 2.6 Modul Surya *Monocrystalline* (Prayogi, 2018).

b. *Polycrystalline*

Polycrystalline adalah jenis PV module yang memiliki susunan kristal acak yang dikarenakan produksi PV ini menggunakan proses pengecoran. PV module polikristal mempunyai efisiensi yang lebih rendah dari jenis monokristal yaitu 12%-14%. Panel ini memiliki karakteristik yang baik dalam kondisi suhu tinggi, meskipun sedikit kurang efisien dibandingkan dengan panel monokristalin di bawah kondisi pencahayaan yang optimal. PV Module *Polycrystalline* memiliki harga yang lebih murah dari *Monocrystalline*. (Kristiawan et al., 2019). Bentuk *poly-crystalline* dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Modul Surya *Polycrystalline* (Prayogi, 2018)

Seperti disebutkan sebelumnya, efisiensi yang lebih rendah berarti lebih banyak panel dibutuhkan untuk menghasilkan jumlah energi yang sama dibandingkan dengan panel monokristalin. Panel ini memiliki umur pakai yang panjang, biasanya berkisar antara 25 tahun, dengan sedikit penurunan efisiensi seiring waktu.

c. *Thin Film*

Thin Film adalah sel surya yang dibuat dengan teknologi lapisan tipis (*thin film*). Teknologi pembuatan sel surya dengan lapisan tipis ini dimaksudkan untuk mengurangi biaya pembuatan solar sel dimana teknologi ini hanya menggunakan kurang dari 1% dari bahan baku silikon jika dibandingkan dengan bahan baku untuk tipe monocrystalline. Efisiensi tertinggi saat ini yang bisa dihasilkan oleh jenis solar sel lapisan tipis ini adalah sebesar 19,5% Keunggulan lainnya dengan menggunakan tipe lapisan tipis adalah semikonduktor sebagai lapisan solar sel bisa di deposisi pada substrat yang lentur sehingga menghasilkan device solar sel yang fleksibel. *Thin Film*

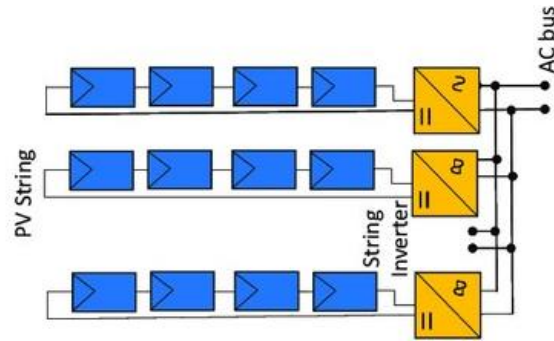
Photovoltaic dengan tiga lapisan memiliki nilai efisiensi sangat baik sehingga mampu memproduksi energi listrik 45% lebih tinggi dibanding jenis lain. (Ramadhan & Purwoto, 2022)

2.5.2 Inverter

Inverter adalah perangkat elektronik yang berfungsi untuk mengubah tegangan output DC dari panel surya atau baterai menjadi tegangan AC, biasanya 120 Volt atau 220 Volt dengan frekuensi 50 Hz atau 60 Hz. Komponen ini merupakan bagian penting dalam sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) agar dapat memproduksi daya yang dapat digunakan oleh berbagai beban. Inverter berperan dalam mengubah energi listrik DC, yang bersifat intermiten dari PLTS, menjadi AC untuk disuplai ke beban. Oleh karena itu, inverter dan sistem kontrol yang menghasilkan AC yang diinginkan sangat penting dalam sistem PLTS. (Halim, 2020). Terdapat beberapa jenis inverter yang umum digunakan pada system PLTS, antara lain :

a. *String* Inverter

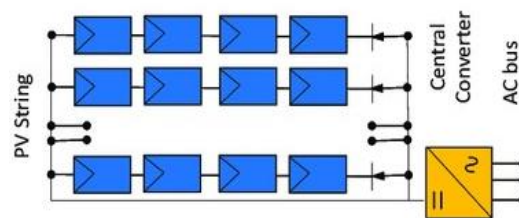
String Inverter digunakan untuk pemasangan jaringan tersambung skala kecil (10 kW atau kurang). Biasanya kapasitas *string* inverter ialah 1 kW - 12 kW, ketika PLTS berkapasitas diatas 5 kW maka *multi-string* inverter atau inverter terpusat dapat digunakan sebagai inverter alternatif. Setiap inverter memiliki fungsi sebagai MPPT dan tegangan DC inputnya bisa mencapai 1000 VDC. Gambar diagram *string* inverter dapat dilihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 String Inverter (Solar Plan, 2019)

b. Central Inverter

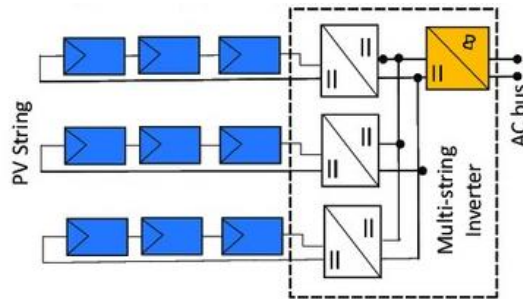
Central inverter atau inverter terpusat ini biasanya digunakan untuk daya PLTS yang besar, sebagai contoh inverter ini digunakan pada daya dari 30 kWp dan dari 100 kWp. Inverter terpusat ini sama halnya dengan inverter string dan multi string namun yang membedakan dengan inverter terpusat adalah array pada PLTS dapat dibagi menjadi beberapa *sub array*. Bentuk diagram *central* inverter dapat dilihat pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Central Inverter (Solar Plan, 2019)

c. Multi-String Inverter

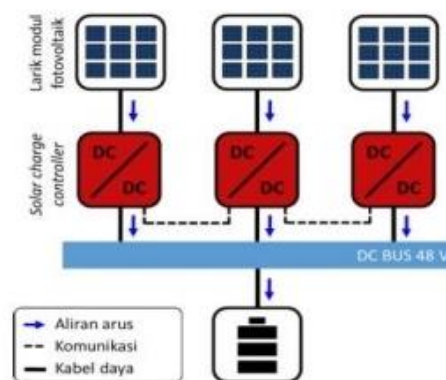
Multi – String Inverter merupakan gabungan antara string inverter dengan *central inverter*. Keunggulannya yaitu antar string memiliki input yang terpisah sehingga apabila terjadi kerusakan modul atau kegagalan sistem pada suatu string, maka tidak mempengaruhi string yang lain. Bentuk diagram *multi-string* inverter dapat dilihat pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10 *Multi-String Inverter* (Solar Plan, 2019)

2.5.3 *Solar Charger Controller*

Solar Charger Controller (SCC) adalah perangkat elektronik yang berfungsi untuk mengatur arus searah yang mengalir ke baterai dan yang diambil dari baterai untuk keperluan beban. Pengendali ini mencegah pengisian berlebih (*overcharging*) yang terjadi ketika baterai sudah terisi penuh, serta mengendalikan tegangan berlebih dari panel surya. Pengisian yang berlebihan dapat mempersingkat umur baterai. SCC umumnya terdiri dari satu input (dua terminal) yang terhubung dengan output dari panel sel surya, satu output (dua terminal) yang terhubung dengan baterai, dan satu output (dua terminal) yang terhubung dengan beban. Posisi SCC pada sistem PLTS diperlihatkan Gambar 2.11 di bawah.



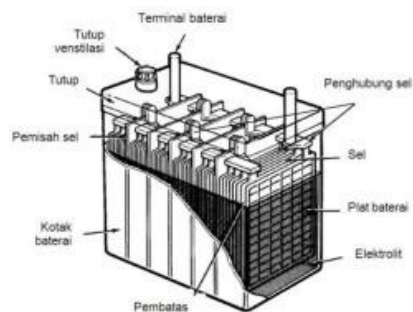
Gambar 2.11 Rangkaian SCC pada PLTS (Ramadhani, 2018)

Pada malam hari, panel surya tidak menghasilkan arus karena tidak ada

sumber energi dari matahari. Akibatnya, aliran arus terhenti, dan arus yang ada di dalam baterai bisa mengalir kembali ke panel surya, yang berpotensi merusak sistem panel surya. Oleh karena itu, SCC berperan untuk mencegah terjadinya arus balik ini. SCC juga mengatur aliran arus dari beban ketika beban terhubung ke SCC. Terminal beban pada SCC dapat digunakan untuk menghubungkan beban secara langsung ke SCC.

2.5.4 Baterai

Baterai adalah alat yang digunakan untuk menyimpan energy listrik dalam bentuk kimia kemudian diubah menjadi energy listrik untuk memperoleh arus listrik yang diperlukan. Umumnya bentuk baterai seperti pada Gambar 2.12 .



Gambar 2.12 Baterai (Farizy *et al.*, 2016)

Fungsi bank baterai antara lain:

- Sebagai suplai bagi beban dengan tegangan dan arus yang stabil melalui inverter baterai, juga dalam hal terjadi putusnya pasokan daya (*intermittent*) dari modul fotovoltaik;
- Bertindak sebagai cadangan untuk mengatasi perbedaan antara daya yang tersedia dari modul fotovoltaik dan permintaan dari beban;
- Menyediakan cadangan energi untuk digunakan di hari-hari dengan cuaca berawan atau pada kondisi darurat. Penentuan kapasitas baterai harus

memperhitungkan hari-hari ketika sistem berjalan penuh tanpa pasokan daya dari modul fotovoltaik untuk memenuhi kebutuhan listrik (hari otonom);

Baterai adalah salah satu elemen penting dalam sistem panel surya yang dilengkapi dengan penyimpanan energi listrik cadangan. Fungsi baterai adalah untuk menyimpan energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya dalam bentuk arus searah. Energi yang tersimpan ini berfungsi sebagai cadangan, yang biasanya digunakan ketika panel surya tidak memproduksi energi, seperti pada malam hari atau saat cuaca mendung. Selain itu, tegangan yang dikeluarkan ke sistem juga lebih stabil. Kapasitas energi yang dapat disimpan dalam baterai diukur dalam satuan ampere hour (Ah), yang menunjukkan arus maksimum yang dapat dikeluarkan oleh baterai dalam satu jam. Namun, saat proses pengosongan (discharger), baterai tidak boleh dikosongkan hingga batas maksimum, agar umur pakainya dapat lebih lama. Batas pengosongan ini sering disebut dengan istilah Depth Of Discharge (DOD).

Beragam jenis dan baterai saat ini diproduksi, masing-masing dirancang dengan spesifikasi dan karakteristik kinerja yang berbeda sesuai dengan aplikasi tertentu. Dalam sistem panel surya, baterai tipe lead-acid dan Li-ion lebih umum digunakan karena variasi kapasitas (Ah) yang lebih banyak tersedia, harganya lebih terjangkau, dan karakteristik kinerjanya yang sesuai. Di beberapa kondisi ekstrem, seperti suhu rendah, baterai jenis nickel-cadmium digunakan meskipun biayanya lebih tinggi. Beberapa teknologi baterai yang umum dikenal mencakup lead acid, alkaline, NiFe, Ni-Cad, dan Li-ion. Setiap jenis baterai memiliki kelebihan dan kekurangan baik dari segi teknis maupun biaya (Aita Diantari et al., n.d.)

2.6 *Mounting System*

Modul surya harus terpasang pada suatu struktur/kerangka ,untuk

menjaganya tetap terarah pada arah yang tepat, agar lebih tersusun rapi dan terlindungi. Struktur pemasangan modul surya bisa pada struktur yang tetap (fixed) atau dengan sistem pelacak sinar matahari, atau biasanya disebut tracking systems (Pratama, 2018). Berikut adalah beberapa jenis sistem mounting yang umum digunakan

2.6.1 *Ground Mounting*

Merupakan sebuah rangka yang dipasang tepat ke tanah. Sistem ini memerlukan lahan yang luas dan tidak ada pepohonan disekitarnya. Pemasangan sistem ini ekonomis. Salah satu kelebihan menggunakan *Ground Mounting* adalah bahwa panel mudah diakses untuk pemeliharaan dan pembersihan.

2.6.2 *Pole Mounting*

Merupakan rangka untuk memasang modul PV dengan disambungkan pada suatu tiang atau lebih. Kelebihan dari system ini adalah pada lebih sedikitnya ruang permukaan tanah yang dibutuhkan. Tiang akan menempatkan panel beberapa meter di udara.

2.6.3 *Roof Mounting*

Merupakan tipe paling umum dari mounting sistem PV skala perumahan, biasanya digunakan pada perumahan dan bangunan. Prosedur instalasinya dinilai lebih rumit dan berbahaya. Instalasi roof-mounting lebih memakan waktu daripada memasang panel pada tiang *pole-mounting* atau *ground-mounting*.

2.7 Perhitungan PLTS

2.7.1. Menghitung Area Array

Area array (PV Area) diperhitungkan menggunakan rumus sebagai berikut
Besarnya daya yang harus dibangkitkan diperhitungkan dengan membagi kebutuhan

beban listrik dengan *PSH* (*Peak Sun Hour*) dan dikalikan dengan rugi rugi daya (*Losses*) sebesar 15% seperti efisiensi inverter, modul surya, dan kabel.

$$PV_{area} = \frac{E_L}{GHI \times TCF \times \eta_{pv} \times \eta_{inv}} \quad (2.1)$$

Keterangan :

- E_L : Energi yang dibangkitkan (kWh/hari)
- PV_{area} : Luas Array (m²)
- GHI : Intensitas Matahari harian [kW/m² /hari]
- TCF : *Temperature coefficient factor* [%]
- η_{pv} : Efisiensi Modul Surya
- η_{inv} : Efisiensi Inverter

2.7.2. Daya yang Dibangkitkan

Besar daya yang dibangkitkan array merupakan hasil kali besaran array dengan iradiasi STC dan efisisensi modul surya.

$$P_{wattpeak} = PV_{area} \times PSI \times \eta_{pv} \quad (2.2)$$

Keterangan :

- $P_{wattpeak}$: Daya Maksimal Array (Wp)
- PV_{area} : Luas Array (m²)
- η_{pv} : Efisiensi Modul Surya (0,98)
- PSI : Iradiasi STC (1000 W/m²)

2.7.3. Menghitung Jumlah Panel Surya

Banyaknya modul surya diperhitungkan dengan menggunakan rumus sebagai berikut :

$$N = \frac{P_{PV}}{P_{MPP}} \quad (2.3)$$

Keterangan :

N : Jumlah Panel Surya

P_{PV} : Daya Maksimal Array (m^2)

P_{MPP} : Kapasitas Panel Surya (Wp)

2.7.4. Kapasitas Inverter

Pemilihan inverter harus diperhitungkan agar menghasilkan daya yang optimal. Kapasitas Inverter harus memiliki nilai DC-AC Rasio sebesar 1,2. Nilai ini merupakan nilai perbandingan antara kapasitas daya yang dibangkitkan array dengan kapasitas inverter. Kapasitas inverter ditentukan dengan persamaan :

$$DC - AC \text{ RATIO} = \frac{P_{PV}}{P_{IN}} \quad (2.4)$$

Maka

$$P_{IN} = \frac{P_{PV}}{DC-AC \text{ RATIO}} \quad (2.5)$$

Keterangan :

P_{PV} : Daya Maksimal Array (Wp)

P_{IN} : Kapasitas Daya Inverter (kW)

2.7.5. Kapasitas Baterai

Untuk mengetahui kapasitas baterai yang diperlukan, dilakukan perhitungan dengan menggunakan rumus

$$C = \frac{E_d}{V_S \times DOD \times \eta} [Ah] \quad (2.6)$$

Keterangan :

C : Kapasitas Baterai [Ampere-hour]

E_d : Konsumsi Energi Harian [kWh]

V_S : Tegangan Baterai [Volt]

DOD : Kedalaman maksimum untuk pengosongan baterai [%]

H : Efisiensi baterai

2.7.6. Kapasitas Inverter Baterai

Inverter baterai harus mampu mengelola daya dari baterai ke beban dengan efisiensi tinggi. Inverter baterai harus memiliki kapasitas yang mampu menangani beban puncak yang dapat terjadi selama waktu operasi baterai. maka kapasitas inverter baterai diperhitungkan dengan persamaan.

$$C_{inverter} = P_{peak} \times SF \quad (2.7)$$

Keterangan :

$C_{inverter}$: Kapasitas Inverter Baterai (kW)

SF : *Safety Factor*

P_{peak} : Beban Puncak (kW)

2.7.7. Energi yang dihasilkan

Energi yang dihasilkan didapatkan dengan pengalihan daya yang dibangkitkan array dengan PSH (*Peak Sun Hour*) lokasi dan total efisiensi sistem.

$$E_{out} = P_{PV} \times PSH \times Losses \quad (2.8)$$

Keterangan :

E_{out} : Energi yang dihasilkan sistem (kWh)

P_{PV} : Daya Maksimal Array (Wp)

PSH : *Peak Sun Hour*

$Losses$: Efisiensi Sistem (%)

2.7.8. Performance Ratio

Perfomance Ratio adalah ukuran suatu kualitas sistem dilihat dari energi

tahunan yang dihasilkan. Apabila sistem tersebut nilai PR nya berkisar 70-90 %, maka sistem tersebut dapat dikatakan layak. Untuk mengetahui performance ratio maka dapat dihitung dengan persamaan dibawah

$$PR = \frac{E_{sistem}}{E_{ideal}} \quad (2.9)$$

$$E_{sistem} = P_{array} STC \times H_{tilt} \quad (2.10)$$

Keterangan :

PR : Performance ratio (%)

E_{ideal} : Energi yang diperoleh PV pada PSH (Wp)

H_{tilt} : Rata Rata radiasi harian

2.8 Faktor yang Mempengaruhi PLTS

2.8.1 Bayangan (*Shading*)

Bayangan (*shading*) adalah satu faktor yang mempengaruhi kinerja panel surya. Umumnya PLTS dibangun sangat berdekatan dengan bangunan terutama pada daerah perkotaan dan menyebabkan bayangan pada modul PLTS terutama yang dipasang di atap. Terkadang karena desain PLTS yang salah, bayangan sendiri juga dimungkinkan terjadi. Faktor lain yang dapat menyebabkan kerugian adalah pohon terutama pada PLTS atap. Jadi, pepohonan di sekitarnya harus dianalisis dengan baik ketika sistem PLTS dirancang.

Rangkaian panel surya harus memiliki jarak yang cukup satu sama lain untuk menghindari bayangan dari rangkaian panel surya yang berdekatan atau bangunan yang lebih tinggi disekitarnya. Penting untuk menghitung secara akurat jarak antar rangkaian panel surya, terutama jika rangkaian tidak dipasang pada ketinggian yang sama jarak yang berdekatan dapat menyebabkan bayangan,

sementara jarak antar rangkaian yang sangat jauh dapat menyebabkan penggunaan lahan secara berlebihan.

2.8.2 Arah Pemasangan PLTS

Setiap lokasi memiliki radiasi sinar matahari yang berbeda-beda, semakin besar intensitas sinar matahari yang diterima maka akan semakin tinggi kinerja panel surya dalam memproduksi listrik. Dalam pemasangan panel surya ini arah hadap menentukan jumlah keluaran yang cukup dari pembangkit listrik tenaga surya. Idealnya, panel surya harus diatur secara tegak lurus dengan sinar matahari untuk menerima radiasi secara langsung. Ada beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam menentukan arah hadap panel surya diantaranya :

a. Sudut Kemiringan

Sudut kemiringan atau sudut inklinasi ditentukan oleh garis lintang lokasi. Di tempat yang terletak di dekat khatulistiwa seperti Indonesia, datangnya sudut sinar matahari hampir tegak lurus. Oleh karena itu, sudut kemiringan 0° adalah sudut yang paling optimal untuk menangkap radiasi matahari secara langsung. Namun demikian, sudut 0° atau sudut yang relatif datar dapat menyebabkan genangan air atau penumpukan debu di permukaan panel. Oleh karena itu, dianjurkan untuk menempatkan panel surya dengan sudut kemiringan minimal 10° untuk mendapatkan mekanisme pembersihan diri, terutama disaat hari hujan. sudut optimal untuk mempertahankan kinerja tinggi ditentukan berdasarkan rata-rata ketinggian matahari di musim yang berbeda.

b. Sudut Azimuth

Sudut azimuth juga dikenal sebagai arah datangnya sinar matahari. Panel surya harus diatur arah hadapnya untuk menghadap khatulistiwa agar

mendapatkan hasil energi yang optimal. Sudut azimuth yang optimal akan memastikan bahwa panel surya menghadap langsung ke arah matahari terbit pada pagi hari dan ke arah matahari tenggelam pada sore hari. Karena azimuth berbeda-beda menurut garis lintang dan waktu, di belahan bumi utara dimana garis lintang diatas 0°, arah hadap optimal panel surya adalah 180° atau menghadap ke selatan. Di belahan bumi selatan atau dibawah garis khatulistiwa, panel surya harus menghadap ke utara atau 0°. Arah hadap boleh menyimpang hingga 45° ke timur atau barat tanpa secara signifikan mengurangi energi yang dihasilkan.

2.8.3 Temperatur

Sebuah panel surya dapat beroperasi secara maksimum jika temperatur panel tetap normal (pada 25°C), kenaikan temperatur lebih tinggi dari temperatur normal pada panel surya akan melemahkan tegangan. Setiap kenaikan temperatur panel surya 1°C dari 25 °C akan berkurang sekitar 0.4%.

$$TCF = \frac{P_{MPP \text{ saat } t \text{ naik } ^\circ C}}{P_{MPP}} \quad (2.11)$$

Keterangan :

TCF : Temperature Coefficient Factor

P_{MPP} : Kapasitas Modul Surya

$P_{MPP \text{ saat } t \text{ naik } ^\circ C}$: Kapasitas Modul Surya saat temperature naik

2.9 Aspek Emisi

Analisis potensi reduksi emisi CO₂ melalui pembangunan PLTS dilakukan dengan mengurangi jumlah energi listrik dari pembangkit berbahan bakar fosil dan mengganti dengan PLTS. Pemanfaatan PLTS merupakan salah satu alternatif dalam rangka mengganti/substitusi pembangkit tenaga fosil. CO₂ merupakan salah satu

emisi penghasil gas rumah kaca. Pembangkit Listrik Tenaga Uap batubara memiliki rata-rata faktor emisi sebesar 1,05 kg/kWh. Artinya untuk menghasilkan energi listrik 1 kWh melalui pembangkit berbahan bakar fosil dihasilkan emisi CO₂ sebesar 1,05 kg/kWh

$$eCO_2 = kWh \times eF \quad (2.12)$$

Keterangan :

eCO_2 : Emisi eCO_2

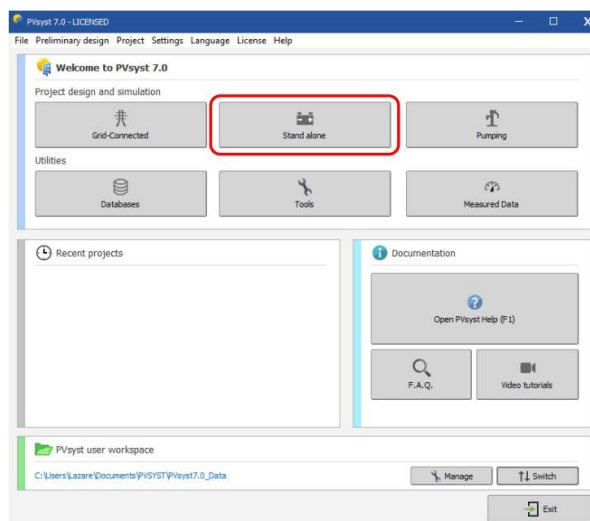
kWh : Produksi Energi Listrik pertahun

eF : Faktor Emisi

2.10 Pvsyst

PVsyst adalah *software* yang digunakan untuk proses pembelajaran, pengukuran, dan analisa data dari suatu sistem PLTS secara menyeluruh. PVsyst dikembangkan oleh Universitas Geneva, pada *software* ini dapat dilakukan pemodelan simulasi diantaranya *sistem Grid-connected*, *Stand-alone*, *sistem Pumping*, dan *DC-grid*. *Software* ini sering digunakan dalam industri energi surya untuk merencanakan, menganalisis dan memodelkan sistem pembangkit listrik tenaga surya. (Karuniawan, 2021). Tampilan *software* PVsyst dapat dilihat pada Gambar 2.13

PVsyst adalah perangkat lunak yang canggih dan komprehensif yang dapat digunakan untuk menganalisis berbagai aspek sistem PV, seperti komponen, layout, orientasi, radiasi matahari, kerugian termal, efisiensi konverter daya (inverter). PVsyst juga dapat mensimulasikan sistem dengan baterai atau generator cadangan (Rinaldo, 2023)



Gambar 2. 13 Tampilan Software PVsyst

Penggunaan PVsyst sebagai alat bantu untuk simulasi karena fiturnya sesuai dengan yang dibutuhkan pada penelitian ini. Selain itu PVsyst dilengkapi database dari sumber data meteorologi yang luas dan beragam, selain itu data komponen yang diperlukan pada sistem PLTS juga tersedia. Contoh sumber data yang dapat digunakan pada PVsyst yaitu MeteoNorm v 6.1, NASA-SSE, PVGIS, Satel-Light, TMY2/3 dan SolarAnywhere.

2.11 Penelitian Terkait

No	Judul Jurnal	Nama peneliti	Tempat dan Tahun Penelitian	Pembahasan
1.	PERANCANGAN LISTRIK TENAGA SURYA (PLTS) TERPUSAT <i>OFF-GRID System</i> PADA GEDUNG LAB TERPADU II	Yanolanda S H	Gedung Lab Terpadu II Fakultas Teknik Universitas Bengkulu	Merancang PLTS Off-Grid untuk gedung laboratorium sebagai pusat energi terbarukan di Universitas Bengkulu dengan

	FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS BENGKULU			data daya listrik dan data beban listrik di gedung laboratorium terpadu 2 lantai 1 sampai lantai 4 Fakultas Teknik Universitas Bengkulu.
2.	ANALISIS POTENSI DAYA LISTRIK PLTS ATAP DI GEDUNG DIREKTORAT POLITEKNIK NEGERI SEMARANG DENGAN PERANGKAT LUNAK PVSYST	Eriko Arvin Karuniawan	Gedung Direktorat Politeknik Negeri Semarang, 2023	Perencanaan pembangkit listrik tenaga surya di atap gedung Fakultas Teknologi Industri Unissula dengan menganalisa intensitas radiasi matahari dan suhu udara di kota semarang, dengan parameter konsumsi energi gedung, luas atap gedung, besar intensitas radiasi dan suhu udara di kota semarang.
3.	ANALISIS KELAYAKAN PEMBANGKIT ENERGI LISTRIK	Ahmad Syaeful Anwar	Gedung Fakultas Teknik Universitas	Pembuatan model pembangkit Listrik tenaga surya serta membandingkan

	<i>TENAGA SURYA ROOFTOP DI GEDUNG FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS SILIWANGI</i>		Siliwangi Kota Tasikmalaya, 2021	kelayakan sistem PLTS Off Grid dan on grid untuk mensuplai daya yang dibutuhkan oleh Gedung Fakultas Teknik Universitas Siliwangi.
--	---	--	--	--