

BAB II

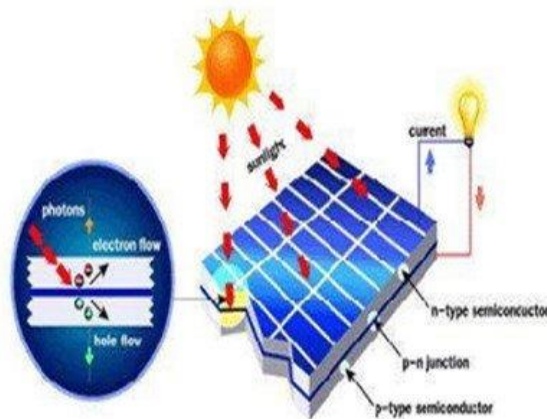
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Prinsip Dasar PLTS

Fenomena munculnya potensi listrik dari dua material yang peka terhadap cahaya setelah terkena paparan foton pertama kali diperkenalkan oleh fisikawan Prancis, Alexandre Edmond Becquerel 1839 (Ghosh & Yadav, 2021). Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan salah satu solusi energi yang berkelanjutan dengan memanfaatkan sumber daya alam yang melimpah seperti sinar matahari. Energi surya adalah salah satu sumber berkelanjutan yang paling relevan dan tersebar di dunia dengan kemajuan teknologi. Akibatnya, itu harus menjadi bagian dari solusi untuk masalah energi dan iklim saat ini.

Sel surya pada dasarnya adalah sebuah foto dioda yang besar dan dirancang dengan mengacu pada gejala fotovoltaic sehingga dapat menghasilkan daya sebesar mungkin. Energi surya telah banyak dimanfaatkan, salah satunya sebagai sumber pembangkit listrik yang mengonversi cahaya matahari menjadi energi listrik. Teknologi yang umum digunakan untuk proses konversi tersebut adalah fotovoltaic (PV). Fotovoltaic merupakan perangkat utama yang berfungsi mengubah cahaya matahari menjadi energi listrik (Khaligh & Onar, 2017). Seperti gambar berikut.

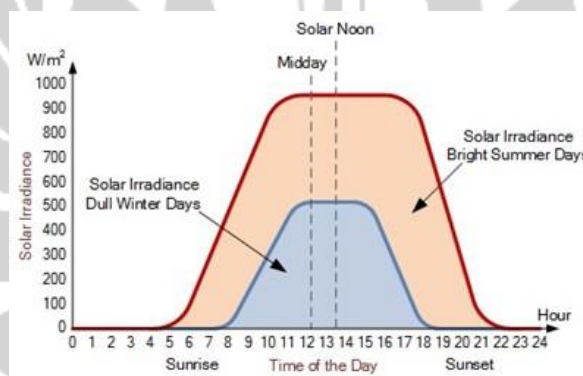
Gambar II.1 Prinsip kerja panel surya



Sumber: (Khaligh & Onar, 2017)

Besaran iradiasi matahari yang diterima modul fotovoltaik terbukti mengalami fluktuasi akibat perubahan waktu, kondisi atmosfer, dan posisi matahari, sehingga mempengaruhi keluaran tegangan, arus, serta daya panel surya. Peningkatan iradiasi secara langsung menaikkan daya keluaran modul PV pada kondisi suhu konstan (Aydin et al, 2024). Penelitian Fauzan & Yusri (2023) yang menegaskan bahwa variasi radiasi matahari dan temperature memiliki hubungan signifikan terhadap daya keluaran panel surya berdasarkan analisis statistic. Kenaikan intensitas radiasi hingga 1000 W/m^2 menghasilkan daya maksimum panel surya, energy matahari per satuan luas (per unit area) yang tiba di permukaan di sudut tertentu disebut sebagai irradiance atau radiasi yang diukur dalam W/m^2 atau kW/m^2 merupakan faktor utama yang menentukan besarnya energy listrik yang dapat dihasilkan modul fotovoltaik.

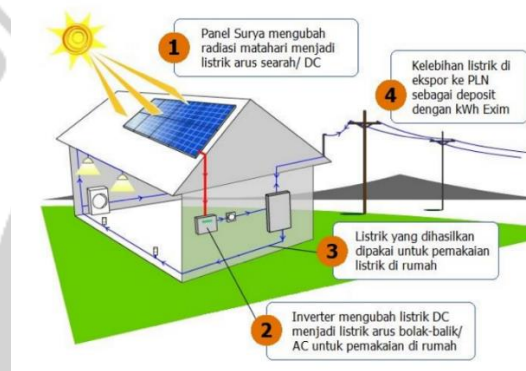
Gambar II.2 Kurva iradiasi matahari
Sumber: Radius Electric



2.2 Sistem PLTS

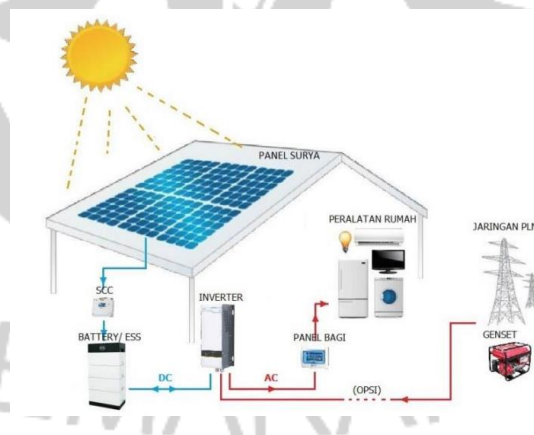
Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) menggunakan teknologi fotovoltaik (PV) untuk mengubah energy matahari menjadi listrik. Energi matahari langsung diubah menjadi listrik oleh sel fotovoltaik. Mereka bekerja sesuai dengan prinsip fotovoltaik. Foton diserap oleh unsur-unsur tertentu ketika terkena cahaya, yang melepaskan elektron bebas. Efek fotolistrik adalah istilah yang digunakan untuk menggambarkan fenomena ini. Efek fotovoltaik adalah proses menghasilkan listrik arus searah menggunakan prinsip efek fotolistrik (Rizkasari et al., 2020). Sistem fotovoltaik mengubah radiasi sinar matahari menjadi listrik. Semakin tinggi intensitas radiasi (iradiasi) matahari yang mengenai sel fotovoltaik, semakin tinggi daya listrik yang dihasilkannya (Latupono et al., 2023).

Dalam konteks ini, Pembangkit Listrik Tenaga Surya dapat dibagi menjadi dua sistem yaitu sistem PLTS *grid-connected* dan PLTS *Off – Grid* (Stand Alone). PLTS *grid-connected* adalah sistem pembangkitan listrik matahari dimana PLTS beroperasi paralel dengan *grid* (jaringan listrik PLN). Manfaat dari PLTS *grid-connected* memiliki manfaat berupa produksi listrik yang tidak menghasilkan emisi sehingga lebih ramah lingkungan. Selain itu, sistem ini juga memberikan keuntungan bagi pengguna karena dapat menurunkan biaya tagihan listrik, baik untuk rumah tangga maupun perkantoran (Latupono et al., 2023).



Gambar II. 3 PLTS grid-connected (Rizkasari et al., 2020)

PLTS *Off – Grid* (Stand Alone) merupakan sistem pembangkit listrik tenaga surya yang beroperasi secara mandiri untuk memenuhi kebutuhan beban listrik tanpa terhubung ke jaringan listrik utama. Sistem ini umumnya digunakan di daerah terpencil atau pulau-pulau yang belum terjangkau pasokan listrik. (Rizkasari et al., 2020).



Gambar II. 4 Sistem off-Grid (Rizkasari et al., 2020)

PLTS off-grid umumnya diimplementasikan pada wilayah terpencil yang belum memperoleh akses listrik dari negara, namun sistem ini juga memiliki potensi untuk diterapkan pada kawasan perumahan.

2.3 Jenis Sel Surya

Alternatif pemanfaatan sebuah energi terbarukan untuk penerangan di bangunan ataupun gedung-gedung adalah Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dengan menggunakan modul surya fotovoltaik yang dipasang di atap bangunan (PLTS Atap). PLTS Atap yang mudah dan murah adalah PLTS *on-grid* yang komponen utamanya panel surya dan inverter tanpa menggunakan baterai, sehingga biaya pengadaannya murah, perawatan dan pengoperasiannya lebih mudah (Latupono et al., 2023).

Faktor utama yang mempengaruhi perubahan efisiensi dari datasheet adalah temperature. Untuk menghitung kebutuhan energi modul surya, nilai radiasi terendah digunakan sebagai referensi untuk memastikan bahwa sistem dapat beroperasi bahkan pada intensitas radiasi yang rendah. Panel surya terdiri dari sejumlah sel surya yang terhubung secara seri, biasanya terdiri dari 36 atau 72 sel, untuk mendapatkan spesifikasi modul sesuai dengan persyaratan. Kinerja model ini kemudian diuji berdasarkan Kondisi Uji Standar (STC), yang mencakup intensitas radiasi matahari sebesar 1000 W/m^2 , massa udara 1,5, dan suhu modul 25°C (Aboagye et al., 2021).

Sel surya dapat dibentuk melalui 16 bahan semikonduktor tipe n (*electron*) dan tipe P (*Proton*) dapat dihubungkan dan membentuk lapisan *junction* PN. Sel surya bekerja dengan memanfaatkan efek fotovoltaik untuk mengubah cahaya matahari menjadi energi listrik. Prinsip kerja sel surya dijelaskan sebagai berikut: (Darno, Yahonnes M. Simanjutak, 2019)

- a. Ketika matahari menerangi permukaan sel surya, maka medan listrik akan terbentuk.
- b. Cahaya yang sampai ke sambungan antara tipe P dan tipe N menyebabkan elektron bebas.
- c. Elektron akan melewati medan listrik yang terbentuk jika memiliki cukup energi, sehingga elektron bebas bergerak melalui silikon dan masuk ke sirkuit eksternal.

Metode yang paling umum digunakan untuk membuat lapisan tipis silikon adalah dengan *Plasma-enhanced chemical vapor deposition* (PECVD), yang menggunakan silane dan gas hidrogen sebagai bahan utama. Dalam proses ini, lapisan silikon terbentuk tanpa struktur kristal yang teratur atau arah kristal tertentu, sehingga dikenal sebagai silikon amorphous atau silikon non kristal. Selain terbuat dari silikon, sel surya lapisan tipis juga dapat dibuat menggunakan semikonduktor lain yang memiliki efisiensi tinggi, seperti *Cadmium Telluride* (Cd Te) dan *Copper Indium*

Gallium Selenide (CIGS). 17 Panel surya atau yang sering juga disebut modul surya adalah komponen utama dari sistem energi fotovoltaik. Perkembangan pesat panel surya telah menyebabkan peningkatan efisiensi dan harga yang lebih (Kamal et al., 2022).

Berikut ini beberapa jenis panel surya : (Budiyanto & Setiawan, 2021)

1. Polikristal (*Poly-crystalline*)

Panel surya dengan struktur Kristal yang tersusun secara acak. Jenis polikristalin membutuhkan permukaan yang lebih besar dibandingkan jenis monokristalin untuk menghasilkan jumlah listrik yang sama, tetapi dapat menghasilkan listrik pada hari-hari mendung. Jenis ini biasanya terdiri dari 28 hingga 36 sel surya dengan panjang 8,5 cm, lebar 5 cm, dan tebal 0,3 mm per sel.

2. Monokristal (*Mono-crystalline*)

Panel yang paling efisien, karena menghasilkan daya listrik tertinggi per satuan area. Efisiensi mereka mencapai 15%. Kelemahan dari jenis panel ini tidak akan bekerja dengan baik di tempat yang minim cahaya (bayangan), dan efisiensinya akan berkurang secara signifikan pada hari-hari mendung.

3. Amorphous

Amorphous silicon (a-Si) telah digunakan sebagai bahan sel surya photovoltaik pada kalkulator. Meskipun kemampuannya lebih rendah dibandingkan sel surya jenis c-Si, hal ini tidak penting pada kalkulator, yang memerlukan energi yang kecil.

4. *Thin Film Photovoltaic*

Panel surya (dua lapisan) dengan struktur tipis mikrokristal-silicon dan amorphous dengan efisiensi modul hingga 8.5% sehingga area permukaan yang dibutuhkan per watt energi yang dihasilkan lebih besar dibandingkan dengan panel silicon monokristalin dan polikristalin. Inovasi terbaru adalah panel surya film tipis sambungan tiga (dengan tiga lapisan) yang dapat berfungsi dengan efisiensi sangat tinggi dalam cuaca yang sangat tinggi dalam cuaca yang sangat berawan dan dapat menghasilkan 45% lebih banyak energi listrik dibandingkan dengan jenis panel lain dengan daya nominal yang sama.

Watt-peak menunjukkan daya maksimum yang dihasilkan pada kondisi radiasi matahari 1000 W/m² dan suhu panel 25°C. Panel surya diproduksi dalam berbagai ukuran (daya

terpasang). Konstruksi panel surya terdiri dari susunan sel surya, tutup kaca, bingkai Alumunium khusus dan soket. Panel surya memiliki usia yang relatif panjang yaitu minimal 20 tahun, dan umumnya suplier panel surya memberi garansi *out put power* hingga 10-25 tahun. Saat intensitas cahaya berkurang (berawan, hujan, mendung) arus listrik yang dihasilkan juga akan berkurang. Degradasi panel surya yang diletakkan di luar ruangan rata rata median 1,33% per tahunnya tergantung jenis modul panel surya yang digunakan, kemudian akan terus mengalami penurunan yang signifikan setelah mencapai usia 15 tahun (Royana, 2020).

2.4 Inverter

Inverter adalah komponen yang penting dalam sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) yang berfungsi untuk mengonversi arus lngsung(DC) Surya PLTS yang berfungsi untuk mengonversi arus langsung (DC) dari panel surya menjadi arus bolak baik (AC) agar dapat digunakan oleh perallatan rumah tangga. Seirin meningkatnya penggunaan energi terbarukan, terutama tenaga surya. Perbaikan dan inovasi dalam desain inverter menjadi semakin penting efisiensi (Buratynskyi & nechaleva (2022)) (talib et al., 2023)

1. Radiasi matahari

Modul memanfaatkan cahaya matahari dalam menghasilkan energi, sehingga radiasi matahari dikenal dalam 3 istilah penting yakni: direct, difuse dan albedo. Direct adalah radiasi matahari yang langsung dating pada kondisi cuaca cerah dan mengenai permukaan unit dengan intensitas yang bervariasi. Sedangkan radiasi tersebar adalah radiasi matahari yang tersebar akibat pembelokan oleh partikel atmosfer, seperti uap air dan partikel debu. Di sisi lain, albedo adalah cahaya matahari yang dipantulkan kembali oleh permukaan bumi. Pengumpulan ketiga komponen ini dikenal sebagai radiasi total (Badan Standarisasi Nasional, 2020).

Kapasitas produksi sebuah pane surya dipengaruhi oleh jumlah radiasi matahari yang diterima permukaan panel. Intensitas radiasi matahari memengaruhi nilai arus keluaran panel akibat peningkatan pergerakan elektron. Ketika sinar matahari mengenai permukaan unit, tegangan akan medekati nilai VOC, sementara nilai arus akan berubah sesuai dengan kondisi radiasi matahari yang diterima (Jon Marjuni Kadang et al., 2022).

2. Temperatur

Perubahan suhu memiliki dampak besar pada tegangan keluaran panel surya. Ketika permukaan panel terpapar sinar matahari selama periode tertentu, suhu panel akan meningkat karena tidak semua energi cahaya dapat diubah menjadi energi listrik. Panas yang dihasilkan menyebabkan perubahan pada nilai tegangan dan arus keluaran. Oleh karena itu, suhu menjadi salah satu factor yang secara signifikan mempengaruhi perubahan tegangan keluaran panel fotovoltaik (Utami & Daud, 2021).

3. Orientasi dan kemiringan modul

Sepanjang tahun, posisi matahari terus berubah dari matahari terbit hingga matahari terbenam di berbagai tempat. Perubahan posisi ini menyebabkan variasi dalam intensitas radiasi yang diterima oleh panel surya. Oleh karena itu, panel surya harus dipasang ke arah yang benar dan dengan sudut kemiringan yang optimal untuk menghasilkan energi maksimal sepanjang tahun. Orientasi modul sangat tergantung dari garis lintang. Di belahan bumi utara, panel biasanya diarahkan ke selatan, dengan sudut kemiringan sekitar nilai lintang dikurangi 10° . Di daerah-daerah di belahan bumi utara dengan lintang di atas 23° utara, jalur matahari di langit selalu berada di sisi selatan. Di musim panas, posisi matahari lebih tinggi di langit, sedangkan musim dingin posisinya menjadi lebih rendah. Sebaliknya, di belahan bumi selatan dengan lintang di atas 23° Selatan, matahari selalu muncul di sisi utara. Di khatulistiwa dan di wilayah tropis, antara 23° utara dan 23° selatan, matahari kadang-kadang di selatan, dan kadang-kadang di utara, tergantung pada waktu tahun. Indonesia terletak di sekitar khatulistiwa, sehingga walaupun orientasi vertikal panel akan menerima energi yang optimal, dengan mempertimbangkan pemeliharaan, kemiringan panel surya dibuat sekitar 10° - 15° . biasanya pembangkit listrik tenaga surya dirancang untuk bulan ketika tingkat radiasi paling rendah, sehingga produksi dapat dicapai sepanjang tahun (Sugiono et al., 2022).

2.5 PLTS Rooftop Pada Kawasan Industri

Pembangkit Listrik Tenaga Surya PLTS rooftop merupakan solusi yang inovatif dalam pemanfaatan energi terbarukan, khususnya solar. PLTS jenis ini menguntungkan secara ekologis dan ekonomis, menawarkan potensi besar dalam pengurangan emisi karbon serta ketergantungan pada energi fosil.

PLTS rooftop merujuk pada sistem fotovoltaik (PV) yang dipasang di atap bangunan, menyediakan sumber energi terbarukan yang dapat digunakan secara local. Instalasinya tidak memerlukan lahan tambahan, sehingga memaksimalkan pemanfaatan ruang yang ada. Di

Indonesia, sistem ini telah terbukti dapat memenuhi kebutuhan energi pada skala rumah tangga dan industri (Ansori *et al.*, 2023). Berikut beberapa keunggulan utama dari PLTS rooftop di kawasan industri yang meliputi:

1. Ekonomi dan biaya, keunggulan utama penggunaan PLTS rooftop adalah potensi penghematan biaya energi. Penelitian menunjukkan bahwa integrasi sistem PV pada bangunan industri dapat mengurangi biaya listrik bulanan secara signifikan. Dalam studi yang dilakukan di beberapa negara, seperti ekuador, pelaksanaan sistem PV untuk pengguna komersial menunjukkan penghematan sekitar 25% dibandingkan dengan biaya listrik dari utility (Tapia *et al.*, 2022). Riset di Indonesia mengonfirmasi bahwa penggunaan PLTS rooftop dapat memberikan ROI (return on investment) yang menarik (Kassem *et al.*, 2023).
2. Keberlanjutan Lingkungan, PLTS rooftop berkontribusi pada pengurangan emisi karbon dioksida dengan menggantikan kebutuhan energi dari sumber fosil. Indonesia memiliki kekayaan sumber daya matahari yang melimpah, menjadikannya lokasi ideal untuk penerapan teknologi ini. Penelitian menunjukkan bahwa penerapan PV di atap bangunan industri dapat mengurangi emisi karbon secara signifikan sambil memenuhi permintaan energi (Wang *et al.*, 2022). Dengan demikian, PLTS rooftop tidak hanya mendukung keberlanjutan energi tetapi juga membantu pencapaian target perubahan iklim global (Bouich *et al.*, 2023).
3. Efisiensi Energi, penerapan PLTS rooftop juga berkaitan dengan efisiensi energi yang lebih baik dalam pengelolaan konsumsi listrik. Penelitian di berbagai lokasi di Indonesia menunjukkan bahwa sistem PV yang terintegrasi di bangunan dapat meningkatkan efisiensi penggunaan energi dan mengurangi pemborosan (Syamsuddin, 2023). Selain itu, penginstalan sistem PV yang optimal memungkinkan pemilik bangunan untuk mengelola penggunaan energi lebih baik, terlebih jika ada insentif pemerintah yang mendukung adopsi teknologi ini (Kumar *et al.*, 2023).
4. Kemandirian energi, dengan memasang sistem PLTS rooftop, kawasan industri dapat mencapai tingkat kemandirian energi yang lebih tinggi. Hal ini menjadi sangat penting mengingat potensi ketidakstabilan pasokan energi dari sumber konvensional. Para peneliti menunjukkan bahwa penggunaan sistem berbasis PV

pada bangunan dapat membantu industri mengurangi ketergantungan pada komoditas yang fluktuatif (Abiyasa et al., 2024). Ini memberikan keuntungan kompetitif dalam pengelolaan biaya operasional dan efisiensi produksi di lokasi industri (Shi et al., 2021).

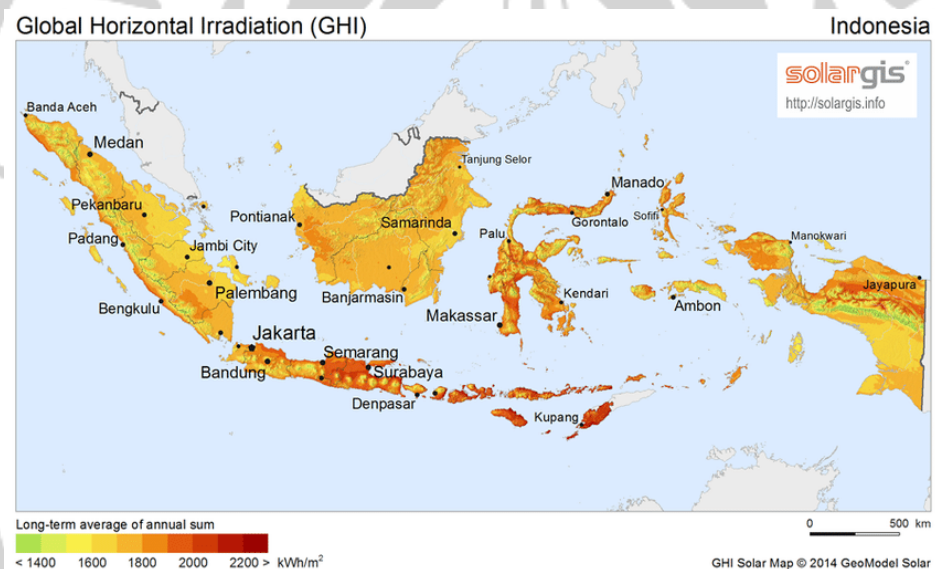
Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) di area industri seperti pertambangan batubara menghadapi beragam tantangan, terutama terkait dengan efisiensi dan umur panjang panel surya. Salah satu isu yang paling mendasar adalah akumulasi debu batubara, yang dapat secara signifikan mengurangi kinerja panel fotovoltaik. Penelitian menunjukkan bahwa debu ini dapat menghalangi sinar matahari yang masuk, yang berakibat pada penurunan efisiensi konversi energi (Alshareef, 2023). Beberapa faktor lingkungan di area industri yang berpotensi mempengaruhi performa PLTS termasuk polusi udara, kotoran partikel dan kontaminasi material oleh logam berat.

1. Dampak debu batubara terhadap kinerja panel surya, akumulasi debu dapat menghalangi proses konversi energi pada panel surya dengan membuat permukaan panel menjadi kurang efisien. Alshareef mengemukakan bahwa efek soiling atau pencemaran pada modul PV dapat menyebabkan penurunan efisiensi signifikan, mencapai hingga 11,86% dalam kasus penumpukan debu ekstrem (Alshareef, 2023). Selain itu, faktor-faktor lingkungan seperti polusi dari industri batubara dapat memperburuk kondisi ini. Misalnya, paparan kontaminan seperti logam berat yang berasal dari proses industri dapat medatangkan kerusakan yang lebih lanjut dan memperpendek umur material panel surya (Yang et al, 2024).
2. Kualitas udara dan efek lingkungan, kualitas udara di sekitar area pertambangan batubara sangat mempengaruhi kinerja PLTS. Polusi yang disebabkan oleh debu dan partikel lain dari kegiatan industri dapat mengandung bahan kimia berbahaya yang menyebabkan korosi atau degradasi material panel surya. Penelitian oleh Munzel et al. menunjukkan bahwa polusi udara berkontribusi terhadap berbagai risiko kesehatan, termasuk gangguan pernapasan di antara populasi yang peka (Munzel, et al., 2020)
3. Keamanan instalasi PLTS, keamanan instalasi PLTS juga terancam oleh debu dan kontaminan lain di lingkungan industri batubara. Kotoran dari debu berbahaya bias berakibat pada kerusakan komponen fotovoltaik. Bahan kontaminan dari aktivitas

pertambangan, termasuk bahan kimia berbahaya, dapat merusak material isolasi pada panel yang meningkatkan risiko korsleting listrik (Rucinski et al, 2021).

2.6 Potensi Energi Matahari

Energi matahari merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang paling menjanjikan di Indonesia. Sebagai negara yang terletak di garis khatulistiwa, Indonesia memiliki potensi sinar matahari yang melimpah sepanjang tahun. Matahari di Indonesia mampu bersinar secara efektif selama 2000 jam pertahun, sehingga energi matahari di Indonesia sangat potensial sebagai sumber energi terbarukan. Energi terbarukan seperti energi surya tidak hanya ramah lingkungan tetapi juga menjadi alternative yang berkelanjutan untuk mengurangi ketergantungan pada sumber energi fosil (Robandi et al, 2023) (Pambudi et al, 2023).



Sumber: Wikimedia commons (2021)

Gambar diatas menunjukkan peta intensitas radiasi matahari yang ada di Indonesia, peta tersebut menunjukkan bahwa Sebagian besar wilayah Indonesia mempunyai potensi energi surya yang tinggi dan merata, yang diukur dengan parameter global horizontal irradiation (GHI), yaitu total energi radiasi matahari yang diterima permukaan horizontal per meter persegi, per hari atau per tahun. Berdasarkan data yang tercantum di global solar atlas (world bank/ESMAP) yang juga menjadi rujukan kementerian esdm, nilai radiasi matahari Indonesia berada pada kisaran 4,0-4,6 kWh/ m² per hari atau setara dengan 1300-2000 kWh m² per tahun, yang artinya Indonesia menerima sekitar 4-5 jam matahari efektif perhari. Tingginya intensitas

radiasi tersebut dipengaruhi oleh letak Indonesia di sekitar garis khatulistiwa sehingga penyinaran matahari relative sepanjang tahun, menjadikan energi surya sangat potensial untuk dikembangkan sebagai energi terbarukan.

Timika (Kabupaten Mimika), papua tengah terletak dekat garis khatulistiwa, sehingga menerima sinar matahari yang cukup intens sepanjang tahun, seperti halnya wilayah tropis lainnya di Indonesia. Menurut analisis global lokasi oleh penyedia data solar internasional, Timika menunjukkan potensi produksi energi solar yang cukup baik 4.65-5.60 kWh/hari per kW panel surya sepanjang tahun ini berarti setiap 1 kWp panel fotovoltaik di Timika dapat menghasilkan energi listrik antara 4.65-5.60 kWh per hari, tergantung musim dan kondisi cuaca (profil solar, 2025).

2.7 Parameter Pemasangan Photovoltaik

Faktor pengoperasian maksimum solar cell sangat tergantung pada:

1. Temperatur ambient
2. Radiasi solar matahari
3. Kecepatan angin bertiup
4. Keadaan atmosfer bumi
5. Orientasi panel atau array PV (photovoltaic)
6. Posisi letak sel surya (array) terhadap matahari (titl angle), (selly zulkarnaen, 2022)

2.8 Perancangan dan realisasi perangkat keras

- a. Modul Sel Surya



Gambar II. 5 Modul Sel Surya (Latupono et al., 2023)

Modul surya adalah sekumpulan sel surya yang dihubungkan secara seri dan paralel, dan biasanya terdiri dari 28-36 sell untuk meningkatkan tegangan dan arus yang

dihasilkan sehingga cukup untuk digunakan dalam sistem pasokan daya beban. Untuk mendapatkan produksi energi listrik maksimum, permukaan unit surya harus selalu menghadap matahari. Komponen utama dari sistem tenaga surya photovoltaic adalah unit, yang merupakan unit perakitan dari beberapa sel *photovoltaic*. Untuk memproduksi unit *photovoltaic* secara industri, dapat digunakan teknologi kristal dan lapisan tipis. unit *photovoltaic* kristal dapat dibuat dengan teknologi yang relatif sederhana, sementara pembuat sel *photovoltaic* memerlukan teknologi canggih (Jon Marjuni Kadang et al., 2022).

b. *Battery/ Accu*

Battery berfungsi sebagai tempat penyimpanan energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya. Penggunaan *battery* diperlukan karena energi surya tidak selalu stabil dalam menghasilkan listrik. Ketika cuaca mendung atau gelap, listrik yang dihasilkan tidak cukup untuk mengoperasikan sistem, oleh karena itu baterai diperlukan untuk memastikan pasokan energi tetap tersedia, bahkan di malam hari. PLTS membutuhkan media penyimpan energi yang memiliki kepadatan energi (*energy density*) yang tinggi dan juga kepadatan daya (*power density*) yang cukup tinggi (Wibowo, 2020).



Gambar II. 6 Modul Baterai (Wibowo, 2020)

c. *Solar Charge Controller (SCC)*

Solar charge controller dengan algoritma kontrol: *mppt/pwm* dapat berfungsi untuk mengatur proses pengisian baterai berdasarkan pemantauan tegangan *battery*. Ketika tegangan baterai berada pada kondisi rendah, *solar charge controller* akan mengaktifkan relay sehingga pengisian *battery* berlangsung. Sebaliknya, jika tegangan baterai sudah penuh, relay akan dimatikan oleh *solar charge controller* untuk menghentikan proses pengisian (Noer Soedjarwanto et al., 2022).



Gambar II. 7 Solar Charge Controller (Irawati et al., 2023)

2.9 Perhitungan Teknis

1. Perhitungan kapasitas PV Modul (Latupono et al., 2023)

$$PV\ Area = \frac{EL}{G_{AV} \times \eta_{PV} \times TCF \times \eta_{out}} \dots\dots\dots(Pers. 1)$$

Dimana :

- $PV\ Area$: Luas permukaan panel surya [m^2]
- EL : Energi yang dibangkitkan [kWh/hari]
- TCF : *Temperature coefficient factor* [%]
- G_{AV} : Intensitas Matahari harian [$kW/m^2/hari$]
- η_{PV} : Efisiensi panel surya [%]
- η_{out} : Efisiensi keluaran [%] asumsi 0,9

2. Perhitungan daya yang dibangkitkan PLTS

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

$$PV\ Watt\ peak = PV\ Area \times PSI \times \eta_{PV} \dots\dots\dots(Pers. 2)$$

Dimana :

- $PV\ Watt\ peak$: Daya produksi PLTS
- $PV\ Area$: Luas Permukaan panel surya (m^2)
- PSI : *Peak Solar Insolation*, yaitu sebesar $1.000\ W/m^2$
- η_{PV} : Efisiensi panel surya (%)

3. Perhitungan energi surya yang datang

Besarnya energi surya yang akan diterima dapat ditentukan melalui perhitungan intensitas cahaya matahari yang masuk yaitu : (Budiyanto & Setiawan, 2021)

$$P_{in} = E \cdot A_{\text{panel}} \dots\dots\dots (\text{Pers. 3})$$

Dimana :

P_{in} : Energi/daya yang masuk ke panel surya (Watt)

A_{panel} : Luas permukaan panel (m^2)

E : Intensitas/ iradiasi cahaya matahari (W/m^2)

4. Besar energi yang Dihasilkan Solar Sel

Jumlah energi yang dihasilkan oleh panel surya (P_{out}) dapat dihitung dengan mengukur tegangan keluaran dan arus keluaran dari panel surya, sehingga energi yang dihasilkan adalah daya keluaran dari panel surya yang dapat dihitung dengan rumus : (Fuaddin & Daud, 2021)

$$P_{out} = V \cdot I \dots\dots\dots (\text{Pers. 4})$$

Dimana :

P_{out} : Energi/daya keluaran dari panel surya (Watt)

V : Voltage yang terjadi (Volt)

I : Kuat arus (Ampere)

5. Besar Efisiensi

Dapat dihitung besarnya efisiensi yang dihasilkan oleh panel surya dalam mengisi baterai dengan menghitung jumlah energi matahari yang masuk (P_{in}) dan jumlah energi matahari yang keluar (P_{out}) terlebih dahulu, sehingga efisiensi yang diperoleh adalah efisiensi keluaran panel surya dalam mengisi baterai (Kariongan, 2022).

Berikut adalah perhitungan efisiensinya:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \% \dots\dots\dots (\text{Pers. 5})$$

Dimana:

η : Efisiensi

P_{out} : Energi/daya keluaran dari panel surya (Watt)

P_{in} : Energi/daya yang masuk ke panel surya (Watt)

6. Perhitungan jumlah panel surya (Latupono et al., 2023)

$$\text{Jumlah panel surya} = \frac{P_{\text{watt peak}}}{P_{\text{MPP}}} \dots\dots\dots (\text{Pers. 6})$$

Dimana :

$P_{\text{watt peak}}$: Daya yang dibangkitkan (Watt)

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

7. Perhitungan *Fill Factor* (FF)

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

$$\text{FF} = V_{\text{mp}} \times I_{\text{mp}} / V_{\text{oc}} \times I_{\text{sc}} \dots\dots\dots (\text{Pers. 7})$$

Dimana :

V_{mp} : Tegangan maksimum (Volt)

I_{mp} : Arus maksimum (Ampere)

V_{oc} : Tegangan *open circuit* (Volt)

I_{sc} : Arus *short circuit* (Ampere)

8. Perhitungan *Performance Ratio* (PR) (Kual et al., 2022)

$$\text{PR} = \frac{\text{Energi aktual output PLTS}}{\text{GHI} \times A \times \eta} \dots\dots\dots (\text{Pers.8})$$

Dimana :

η : Efisiensi (%)

GHI : *Global Horizontal Irradiance* (KWh/m²)

A : Luas string panel (m²)

2.10 Analisis Data Lingkungan

1. Perhitungan Emisi CO₂ PLTU (ton/tahun)

Perhitungan Emisi CO₂ PLTU batu bara dapat dihitung dengan cukup akurat menggunakan rumus beerdasarkan jumlah batubara yang dibakar dan faktor emisi standar.

$$\text{Emisi CO}_2 (\text{ton}) = \text{Jumlah batu bara terbakar (ton)} \times \text{Faktor Emisi CO}_2 \dots\dots (\text{Pers.9})$$

$$\text{Faktor Emisi} = \frac{\text{Massa CO}_2}{\text{Massa Batu bara}} \dots\dots\dots (\text{Pers.10})$$

Tabel II. 1Tabel Faktor Emisi CO₂ Batu bara

Jenis Batubara	Faktor Emisi (ton CO ₂ / ton batubara)
Lignite (batubara muda)	~1.1 – 1.2
Sub-bituminous	~1.8 – 2.0
Bituminous	~2.2 – 2.4
Anthracite	~2.5 – 2.6

2. Total Debu yang Menempel di Permukaan *Coal Field*

$$M = A \times T \dots\dots\dots(\text{Pers.11})$$

Dimana :

M : Total massa debu yang menempel (g atau ton)

A : Luas permukaan *coal field* (m²)

T : Durasi waktu (detik atau jam)

2.11 Analisis Keekonomian

3. *Net Present Value* (NPV)

Net Present Value adalah metode untuk menghitung nilai bersih saat ini berdasarkan *factor diskonto*. Teknik ini menghitung selisih antara seluruh arus kas bersih dalam nilai yang sekarang dan investasi awal yang dilakukan (Santiari, 2011). Perhitungan *Net Present Value* (NPV) menggunakan rumus sebagai berikut : (Mohammad et al., 2023)

$$NPV = PWB - PWC \dots\dots\dots(\text{Pers.12})$$

Present Worth of Benefit (PWB) adalah *Cash flow* yang dalam perhitungannya hanya mempertimbangkan benefit atau uang masuk saja.

$$PWB = \sum_{t=0}^n \frac{CB_t}{(FBP)^t} \dots\dots\dots(\text{Pers.13})$$

Present Worth of Cost (PWC) adalah *Cash flow* yang dalam perhitungannya hanya mempertimbangkan arus keluar atau uang keluar.

$$PWC = \sum_{t=0}^n \frac{CC_t}{(FBP)^t} \dots\dots\dots(\text{Pers.14})$$

Dimana:

CB : *Coss flow benefit*

CC : *Cash flow cost*

FBP : Faktor bunga present

t : Periode

Metode NPV memiliki dua kriteria untuk menentukan kelayakan ekonomi suatu investasi,yaitu : (Kariongan, 2022)

- $NPV > 0$, maka investasi dapat dikatakan layak / *feasible*
- $NPV < 0$, maka investasi dapat dikatakan tidak layak / *unfeasible*

4. *Pay Back Periode* adalah metode yang digunakan untuk menentukan jangka waktu pengembalian modal investasi dengan mempertimbangkan *discount factor* dari arus kas bersih kumulatif yang diperkirakan sesuai dengan investasi awal yang digunakan (Kariongan, 2022).

Pay Back Periode=Nilai Investasi awal/Arus kas bersih+Arus kas masuk (Pers.12)

Dalam menentukan payback period terdapat beberapa kondisi yaitu :

- *Payback period* yang lebih pendek dari perkiraan umur proyek dapat dianggap layak.
- *Payback period* yang lebih panjang dari perkiraan umur proyek dapat dianggap tidak layak.

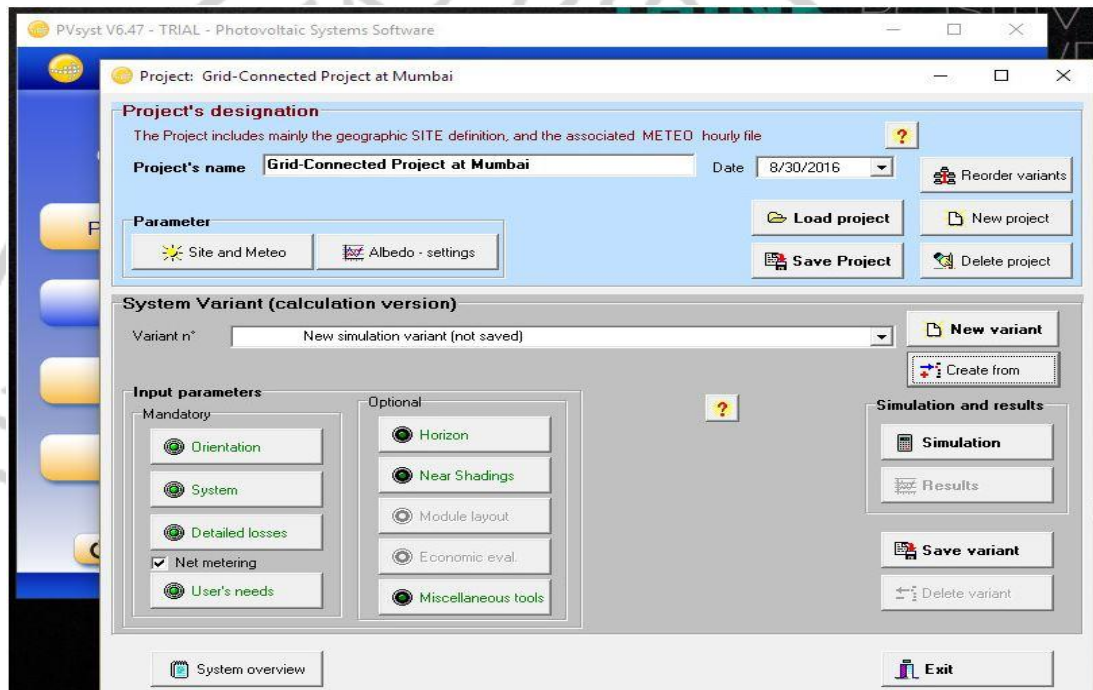
Dewasa ini telah banyak perangkat lunak yang dapat digunakan untuk membantu analisis keekonomian sebuah pembangkit berbasis EBT. Salah satu perangkat lunak tersebut adalah PVSyst. PVSyst adalah perangkat lunak yang dikembangkan oleh Universitas Genewa (Swiss) dan dirancang untuk industri energi surya. PVsyst membuat, mensimulasikan, dan menganalisis semua jenis sistem energi matahari. PVsyst terkenal dengan akurasi dan fleksibilitasnya karena dua alasan: (Kual et al., 2022)

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

Selain itu, PVsyst menawarkan serangkaian opsi penyesuaian tingkat lanjut untuk desain sistem PV. Ini termasuk memodelkan teknologi panel yang berbeda, menggabungkan

naungan dan faktor spesifik lokasi lainnya, dan mengoptimalkan kinerja sistem berdasarkan berbagai kriteria. Contoh: Produksi energi, biaya, atau emisi CO₂.

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



Gambar II. 8 Tampilan Awal PVSyst (Fuaddin & Daud, 2021)

Pada perangkat lunak PVSyst parameter input yang dibutuhkan antara lain: Data yang dibutuhkan untuk simulasi pada RETScreen terdiri dari biaya investasi awal (komponen PLTS), biaya operasional dan pemeliharaan, serta biaya penghematan dan penjualan energi PLTS. Sedangkan untuk parameter output perangkat lunak ini dapat menyajikan Net Present Value (NPV), Benefit Cost Ratio (BCR) serta Pay Back Period (PBP) (Kual et al., 2022).

