

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Energi Baru dan Terbarukan

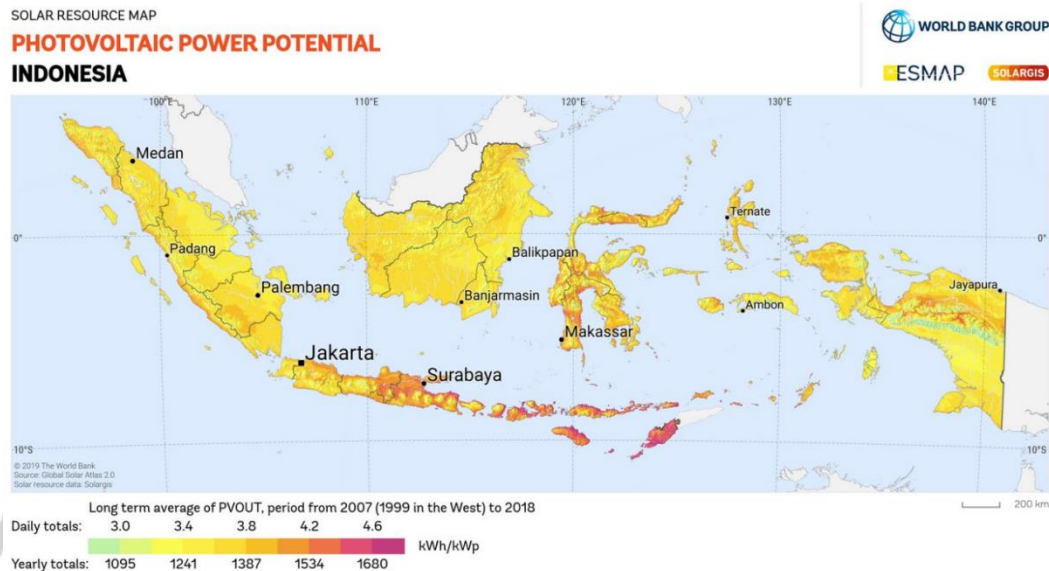
Energi terbarukan merupakan salah satu sumber energi yang dapat memenuhi kebutuhan energi, serta berperan dalam bauran energi nasional dan upaya mitigasi perubahan iklim global. Penggunaannya telah meluas di hampir seluruh dunia sebagai solusi strategis untuk mengatasi potensi krisis energi..

Sebagai negara yang terletak di garis khatulistiwa, Indonesia memiliki sumber energi yang melimpah, baik dari sumber energi fosil maupun non-fosil. Meskipun demikian, hingga saat ini, sebagian besar energi yang dihasilkan dan digunakan di Indonesia berasal dari fosil, mencapai 95% dari total bauran energi. Indonesia, dengan kekayaan sumber daya alam yang melimpah, memiliki luas wilayah sekitar 1,9 juta km² dan jumlah penduduk saat ini mencapai 267 juta jiwa (BPS, 2022) dengan pertumbuhan ekonomi rata-rata 5% per tahun, dihadapkan pada kecenderungan peningkatan kebutuhan dan konsumsi energi. Dengan pertumbuhan ekonomi yang stabil dan kuat dalam beberapa tahun terakhir, permintaan energi diperkirakan akan terus meningkat. Ketergantungan yang tinggi pada energi fosil, yang jumlahnya terbatas, berisiko menyebabkan krisis energi di Indonesia. Oleh karena itu, isu energi akan tetap menjadi prioritas utama pemerintah di masa depan, terutama dengan semakin meningkatnya dampak lingkungan akibat pembakaran energi fosil untuk berbagai aktivitas sosial dan ekonomi.

Indonesia memiliki potensi besar untuk pengembangan energi baru terbarukan. Sebagai negara tropis yang terletak di garis khatulistiwa, Indonesia memiliki sumber energi surya yang signifikan dan relatif stabil sepanjang tahun. Energi surya ini dapat dimanfaatkan dalam dua bentuk, yaitu sebagai solar thermal untuk pemanasan dan solar photovoltaic untuk pembangkitan listrik..

Hampir seluruh wilayah Indonesia memiliki potensi untuk pengembangan pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) dengan rata-rata daya mencapai 4 kWh/m². Di kawasan barat Indonesia, potensi ini sekitar 4,5 kWh/m²/hari dengan variasi bulanan sekitar 10%, sementara di kawasan timur, potensi mencapai sekitar 5,1 kWh/m²/hari dengan variasi bulanan sekitar 9%. Secara nasional, potensi tenaga surya mencapai 4,8 kWh/m²/hari atau setara dengan 207.898 MW,

namun pemanfaatan energi surya di Indonesia saat ini baru mencapai sekitar 0,05% atau 100 MW. (Bayu, 2021).



Gambar 1. Potensi Pengembangan PLTS di Indonesia

Energi primer dan bauran energi primer nasional tertuang dalam Peraturan Pemerintah No. 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional (KEN). Peraturan Pemerintah ini merupakan turunan dari Undang-Undang No. 30 Tahun 2007 tentang Energi. Adapun tujuan dan sasaran dari disusunnya KEN adalah sebagai pedoman untuk memberi arah pengelolaan energi nasional guna mewujudkan kemandirian energi dan ketahanan energi nasional untuk mendukung pembangunan nasional. Pada Pasal 8 Peraturan Pemerintah No. 79 Tahun 2014 tentang KEN disebutkan sasaran penyediaan dan pemanfaatan energi primer dan energi final. Sasaran tersebut mencakup penyediaan energi primer, pemanfaatan energi primer per kapita, penyediaan kapasitas pembangkit listrik dan pemanfaatan listrik per kapita.

Selanjutnya agar penjabaran KEN dapat dilakukan secara lebih rinci oleh Kementerian dan Lembaga terkait, maka diterbitkan Peraturan Presiden No. 22 Tahun 2017 tentang Rencana Umum Energi Nasional (RUEN). Penjabaran dari KEN dan merupakan acuan pengelolaan energi untuk mencapai target KEN dimuat secara rinci (per tahun) lintas K/L dan dituangkan dalam bentuk Matrik RUEN. Beberapa target penting yang ada pada RUEN, di antaranya adalah:

1. Mencapai kapasitas pembangkit listrik EBT sebesar 45,2 GW pada tahun 2025 dan 167,7 GW pada tahun 2050,

2. Menghasilkan bahan bakar terbarukan (biofuel, biomassa, biogas, dan CBM) sebesar 23 MTOE pada tahun 2025 dan 79,4 MTOE pada tahun 2050,
3. Menurunkan emisi sebesar 476 juta t-CO₂eq pada tahun 2025 (34,8%) dan 2726 juta t-CO₂eq pada tahun 2050 (58,3%) (BPPT, 2021).

Dari penjelasan diatas dapat diketahui bahwa seluruh negara di dunia sepakat berkomitmen untuk mengurangi efek gas rumah kaca. Langkah-langkah untuk menguranginya antara lain dilakukannya transisi penggunaan energi fosil ke energi baru terbarukan. Sumber energi terbarukan yang dimanfaatkan antara lain tenaga air, matahari, angin, biomass, dan nuklir. Indonesia sebagai negara di daerah khatulistiwa sangat melimpah akan sumber energi terbarukan namun sampai dengan saat ini pemanfaatannya masih belum maksimal. Untuk itu pada penulisan ini akan melihat beberapa permasalahan yang menyebabkan pemanfaatannya belum maksimal ditinjau dari sisi kebijakan dan dasar hukum

Secara nasional, pemerintah telah menginisiasi transisi energi melalui kebijakan yang mendukung penggunaan energi baru dan terbarukan. Salah satu contohnya adalah Peraturan Pemerintah No. 79 Tahun 2014 yang menguraikan strategi transisi energi. Pada tahun 2025, pemerintah menargetkan 23% dari total bauran energi Indonesia berasal dari energi baru dan terbarukan (EBT), dan pada tahun 2050, targetnya adalah 31%. Namun, realisasi target ini masih jauh dari harapan. Berdasarkan laporan Dewan Energi Nasional (DEN) tahun 2019, kontribusi EBT dalam total bauran energi masih sangat rendah dibandingkan target yang ditetapkan. Jika dibandingkan dengan negara tetangga, Indonesia tampak kurang ambisius dalam mengejar transisi energi. Dalam dekade terakhir, Indonesia hanya berhasil menambah kapasitas EBT sekitar 224 MW per tahun, sedangkan Vietnam telah menambah kapasitas EBT hingga 1.745 MW per tahun (BPPT, 2021). Penundaan beberapa proyek EBT nasional juga menambah permasalahan Indonesia dalam transisi energi.

Energi matahari telah dimanfaatkan di berbagai wilayah dunia, dan jika dikelola secara optimal, energi ini berpotensi memenuhi kebutuhan energi global secara efisien dan untuk jangka waktu yang lebih lama. Sebagai salah satu sumber energi terbarukan, energi matahari memiliki potensi besar karena ketersediaannya yang melimpah serta dapat diakses di hampir seluruh wilayah dunia. Oleh karena itu, energi matahari sangat menjanjikan untuk dikembangkan, khususnya di Indonesia. Prospek energi matahari di masa depan hanya terbatas oleh seberapa besar keinginan untuk memanfaatkan peluang ini. Berbagai metode dapat diterapkan untuk

memaksimalkan pemanfaatan energi matahari. Sebagai gambaran, proses fotosintesis pada tumbuhan merupakan contoh alami konversi energi matahari menjadi energi kimia yang digunakan sebagai sumber nutrisi. Proses ini tidak hanya memperlihatkan cara alami pemanfaatan energi matahari, tetapi juga menginspirasi pengembangan teknologi modern untuk mengubah energi matahari menjadi sumber daya yang berguna bagi manusia, seperti sistem fotovoltaiik yang kini semakin banyak digunakan.

2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) adalah jenis pembangkit yang mengandalkan sumber energi yang bersifat intermittent, menghasilkan listrik dalam jumlah yang bervariasi. Selama operasionalnya, PLTS memerlukan sistem pembangkit cadangan yang dapat berfungsi secara fleksibel untuk mengatasi fluktuasi energi yang disebabkan oleh penurunan intensitas cahaya matahari, baik akibat awan maupun pada malam hari. Sistem cadangan ini penting untuk memastikan kontinuitas pasokan listrik dan mengurangi dampak dari ketidakstabilan produksi energi surya. PLTS terbagi tiga jenis yaitu *Off Grid*, *On Grid* dan *Hybrid*. Menurut Al Bahar et al. (2018), perbedaan antara sistem PLTS (Pembangkit Listrik Tenaga Surya) terletak pada cara integrasinya dengan jaringan listrik. Sistem on-grid menghubungkan PLTS dengan jaringan listrik utama, seperti jaringan PT. PLN di Indonesia. Dalam sistem ini, Energi yang dihasilkan oleh PLTS akan disalurkan ke jaringan utama untuk memenuhi kebutuhan listrik. Jika ada surplus energi, surplus tersebut dapat disuplai kembali ke perusahaan penyedia listrik, tergantung pada regulasi yang berlaku di setiap negara. Dengan cara ini, pengguna PLTS tidak hanya memenuhi kebutuhan energi mereka sendiri tetapi juga dapat berkontribusi pada penyediaan listrik secara lebih luas dan berpotensi mendapatkan kompensasi dari kelebihan energi yang dihasilkan. Sistem on-grid tidak memerlukan fasilitas penyimpanan energi karena daya yang dihasilkan langsung disalurkan ke jaringan utama. Sebaliknya, sistem PLTS off-grid adalah sistem mandiri yang tidak terhubung dengan jaringan listrik utama. Sistem ini memerlukan fasilitas penyimpanan energi, karena daya yang dihasilkan hanya digunakan untuk jaringan listrik internal gedung atau bangunan yang memasang sistem PLTS tersebut.

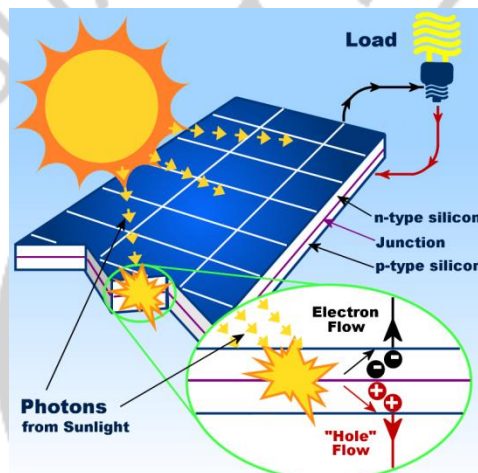
Tabel 1. Perbedaan PLTS On Grid, Off Grid, dan Hybrid

Jenis PLTS	Sistem Operasi	Koneksi Dengan Grid	Fungsi	Kondisi Lokasi
PLTS On Grid	Sistem beroperasi tanpa <i>battery</i>	Tersambung dengan jaringan PLN	Tidak menyediakan daya cadangan selama pemadaman listrik	Lokasi-lokasi yang sudah terpasang KWh meter eksim, serta yang sedang dalam proses pemasangan atau pengurusan KWh meter eksim
PLTS Off Grid	Sistem beroperasi Menggunakan <i>battery</i>	Tidak tersambung dengan jaringan PLN	Memberikan daya cadangan selama pemadaman listrik	Lokasi-lokasi yang berada di daerah terpencil dan jauh dari jangkauan jaringan listrik, seperti pulau-pulau terluar, kepulauan, daerah perbatasan, dan pedalaman hutan, yang belum memiliki sumber listrik mandiri.
PLTS Hybrid	Sistem beroperasi menggunakan <i>battery</i>	Tidak tersambung dengan jaringan PLN	Memberikan daya cadangan Selama pemadaman	Lokasi-lokasi yang telah dipasang KWh meter eksim, serta lokasi-lokasi yang sedang dalam proses pemasangan atau pengurusan KWh meter eksim

Pembangkit Listrik Tenaga Surya adalah pembangkit yang mengubah energi foton dari matahari menjadi listrik. PLTS dapat menghasilkan listrik arus searah (DC) dari sinar matahari dan mengubahnya menjadi arus bolak-balik (AC) bila diperlukan. PLTS pada dasarnya adalah catu daya yang dirancang untuk kebutuhan daya kecil hingga besar, baik *stand-alone* maupun *hybrid*. Sel surya ini dapat menghasilkan listrik tak terbatas langsung dari matahari, tanpa bahan bakar. Inilah mengapa panel surya disebut ramah lingkungan dan bersih.

2.2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Surya *Photovoltaic* (PLTS fotovoltaiik)

Teknologi fotovoltaik memanfaatkan cahaya matahari untuk menghasilkan listrik. Proses ini melibatkan bahan semikonduktor yang dirancang untuk melepaskan elektron, partikel bermuatan negatif yang mendasari energi listrik. Prinsip dasar dari sistem fotovoltaik adalah bahwa ketika sel surya terkena cahaya matahari, reaksi kimia terjadi yang menyebabkan elektron berpindah dari area dengan potensial tinggi ke area dengan potensial rendah, menghasilkan aliran listrik. Penjelasan lebih mendalam mengenai prinsip dasar proses ini akan ditunjukkan pada gambar berikut:



Gambar 2. Solar Panel Diagram

(<https://www.mrsolar.com/what-is-a-solar-panel/>, diakses pada tanggal 18 Agustus 2023)

Dari gambar di atas, dapat diketahui proses konversi energi cahaya menjadi energi listrik terjadi. Bahan semikonduktor yang paling umum digunakan dalam teknologi fotovoltaik adalah silikon, yang banyak ditemukan dalam pasir. Setiap sel fotovoltaik terdiri dari minimal dua lapisan semikonduktor: satu lapisan bermuatan positif dan satu lapisan bermuatan negatif. Ketika sel fotovoltaik terpapar sinar matahari, elektron bergerak menuju area dengan potensial tinggi. Interaksi antara kedua lapisan ini menciptakan aliran listrik, menghasilkan arus DC. Intensitas cahaya yang diterima berbanding lurus dengan besar aliran listrik yang dihasilkan.

Foton adalah bentuk energi alami yang unik karena tidak dapat dideteksi secara langsung oleh indra manusia. Foton merupakan partikel dasar dalam radiasi elektromagnetik dan berfungsi sebagai unit terkecil dari radiasi tersebut. Radiasi elektromagnetik ini muncul dalam berbagai bentuk, termasuk cahaya tampak, gelombang radio, sinar-X, inframerah, ultraviolet, dan sinar gamma. Meskipun foton tidak memiliki muatan listrik atau massa, mereka bergerak dengan kecepatan cahaya, sehingga tidak bisa langsung ditangkap oleh mata manusia.

Konversi energi matahari menjadi listrik melalui dua cara yakni :

1. fotovoltaik (PV) atau sel surya, yang mengubah cahaya matahari secara langsung menjadi listrik. Metode ini sering digunakan di daerah terpencil yang belum terhubung dengan jaringan listrik konvensional. Sel surya umumnya digunakan untuk perangkat seperti kalkulator, jam tangan, rambu lalu lintas, lampu taman, dan aplikasi lainnya.

2. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (Solar Power Plants), yang tidak menghasilkan listrik secara langsung. Sebaliknya, panas yang dihasilkan dari alat pengumpul sinar matahari digunakan untuk memanaskan cairan, yang kemudian menghasilkan uap untuk menggerakkan generator dan menghasilkan listrik.

2.2.2 Prinsip Kerja Sel fotovoltaik (Sel Surya)

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) adalah sistem yang mengubah energi matahari menjadi energi listrik. Ada dua metode utama untuk memperoleh listrik dari tenaga surya: secara langsung dan tidak langsung. Metode langsung melibatkan penggunaan teknologi fotovoltaik, sementara metode tidak langsung memanfaatkan energi surya yang dipusatkan melalui cermin. Secara prinsip, ada dua cara utama untuk menghasilkan listrik dari tenaga surya: pertama, melalui teknologi fotovoltaik (PV) yang mengubah energi cahaya matahari langsung menjadi listrik menggunakan efek fotoelektrik; kedua, melalui sistem konsentrasi tenaga surya (CSP) yang mengumpulkan dan memfokuskan sinar matahari untuk menghasilkan panas, yang kemudian digunakan untuk menghasilkan uap dan menggerakkan turbin untuk menghasilkan listrik.

Konsep photovoltaic bekerja dengan mengubah cahaya matahari langsung menjadi listrik melalui efek fotoelektrik. Sementara itu, sistem pemusatan energi surya menggunakan lensa atau cermin untuk memfokuskan sinar matahari ke satu titik, sering kali dengan bantuan sistem pelacak, untuk menggerakkan mesin kalor. Teknologi photovoltaic memanfaatkan energi foton dari sinar matahari untuk melepaskan elektron pada bahan semikonduktor, yang kemudian menghasilkan energi listrik dalam bentuk arus searah (DC).

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) tipe fotovoltaik menghasilkan listrik dengan memanfaatkan perbedaan tegangan yang muncul akibat efek fotoelektrik. Solar panel terdiri dari tiga lapisan: lapisan atas yang bermuatan positif (P), lapisan pembatas di tengah, dan lapisan bawah yang bermuatan negatif (N). Efek fotoelektrik terjadi ketika sinar matahari memicu pelepasan elektron dari lapisan P, yang kemudian mengalir ke lapisan N, menghasilkan aliran arus listrik.

Karena satu sel surya (solar cell) hanya menghasilkan daya sekitar 1 hingga 2 Watt, yang terlalu kecil untuk memenuhi kebutuhan listrik dalam jumlah besar, beberapa sel surya digabungkan menjadi satu unit yang disebut modul fotovoltaik (PV Modul) untuk meningkatkan kapasitas output daya. Bumi menerima sekitar 120.000 TeraWatt energi matahari, yang menjadikan sel surya sebagai sumber energi terbarukan yang sangat potensial. Sel surya memiliki berbagai aplikasi, terutama di daerah terpencil yang tidak terhubung ke jaringan listrik, seperti pada satelit yang mengorbit Bumi, kalkulator genggam, pompa air, dan kini semakin banyak digunakan untuk memenuhi kebutuhan listrik rumah tangga. Selain itu, sel surya dapat dipasang di atap bangunan dan terhubung ke jaringan listrik melalui inverter dalam sistem net metering, memungkinkan pemilik rumah untuk menghasilkan listrik dan bahkan menjualnya kembali ke jaringan.

Teknologi sel surya berawal dari penemuan efek fotovoltaik oleh Alexandre Edmond Becquerel pada 1839, diikuti oleh pengembangan sel surya pertama berbahan selenium oleh Charles Fritts pada 1883 dengan efisiensi rendah sekitar 1%. Kemajuan signifikan terjadi pada 1954 ketika Bell Laboratories menciptakan sel surya berbasis silikon dengan efisiensi 6%, yang kemudian digunakan dalam satelit seperti Vanguard I pada 1958. Krisis energi tahun 1970-an mendorong pengembangan lebih lanjut, diikuti dengan inovasi material seperti thin-film dan silikon monokristal yang meningkatkan efisiensi hingga 20% pada 1990-an

Saat ini, tenaga surya telah banyak digunakan dalam berbagai perangkat elektronik seperti kalkulator, lampu jalan, lampu lalu lintas, dan perangkat kecil lainnya. Teknologi fotovoltaik juga sangat berguna untuk menyediakan listrik di daerah-daerah terpencil yang tidak memiliki akses ke jaringan listrik konvensional. Peneliti telah mengembangkan sistem sel surya berbasis teknologi fotovoltaik untuk mengatasi kekurangan listrik di lokasi-lokasi yang sulit dijangkau oleh infrastruktur listrik. Pembangkit tenaga surya kini menjadi solusi alternatif yang efektif untuk memenuhi kebutuhan listrik, baik di daerah terpencil, rumah tangga, instansi, pabrik, maupun gedung bertingkat. Penggunaan teknologi fotovoltaik membantu mengurangi beban maksimum pada sistem kelistrikan. Teknologi ini dapat diterapkan baik dalam skala besar maupun kecil, dengan sistem on-grid untuk terhubung ke jaringan listrik atau sistem off-grid untuk menyimpan energi dalam *battery*.

2.2.3 Komponen – komponen PLTS

Rangkaian solar cell mencakup berbagai komponen utama yang berperan penting dalam meningkatkan kinerja sistem tersebut, yaitu:

1. Panel surya

fotovoltaik adalah komponen utama yang menghasilkan arus listrik, yang kemudian disimpan dalam *battery* atau aki. Setiap solar cell atau fotovoltaik memiliki daya yang bervariasi, seperti 5 Watt peak, 30 Watt peak, 50 Watt peak, 100 Watt peak, dan seterusnya. Solar cell ini dapat dibedakan menjadi tiga jenis berdasarkan proses pembuatannya::

- *Monokristalin*
- *Polikristalin*
- *Thin film*

Dari ketiga teknologi tersebut, perbedaan dapat dilihat dari tingkat efisiensinya. Monokristalin adalah photovoltaic dengan tingkat efisiensi tertinggi saat ini, meskipun harganya masih lebih mahal dibandingkan dengan polikristalin. Panel surya terdiri dari sel-sel surya yang kemudian disusun membentuk modul-modul surya, dan dari modul-modul ini akan terbentuk satu array. Setiap sel memiliki tegangan dan daya tertentu, dan dengan merangkainya atau menyusunnya, akan membentuk solar cell yang sesuai dengan kebutuhan.



Gambar 3. Panel Surya

(<https://sunenergy.id/blog/panel-surya>, diakses pada tanggal 18 Agustus 2023)

Berikut ini adalah sistem rangkaian pada solar cell :

- Rangkaian secara seri

Koneksi seri pada modul fotovoltaik terjadi ketika terminal positif (+) dari satu sel surya dihubungkan dengan terminal negatif (-) dari sel surya berikutnya, atau

sebaliknya. Dengan konfigurasi seri ini, tegangan dari sel surya akan dijumlahkan saat dihubungkan secara seri :

$$V_{total} = V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n \quad (1)$$

Arus solar cell sama apabila dihubungkan seri satu sama lain :

$$I_{total} = I_1 = I_2 = I_3 \dots = I_n \quad (2)$$

- Rangkaian secara paralel

Rangkaian paralel modul fotovoltaik diperoleh ketika terminal kutub positif dan negatif dari beberapa sel surya dihubungkan secara paralel, sehingga tegangan output tetap sama dengan tegangan satu sel surya, namun kapasitas daya atau arus yang dihasilkan meningkat sesuai dengan jumlah sel yang dihubungkan. Dalam konfigurasi ini, meskipun tegangan output tetap, arus yang dihasilkan menjadi lebih besar, memungkinkan peningkatan daya output total dari sistem fotovoltaik tersebut.

$$U_{total} = U_1 = U_2 = U_3 \dots = U_n \quad (3)$$

Arus yang timbul dari hubungan ini langsung dijumlahkan.

$$I_{total} = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n$$

2. Charge Controller

Solar charge controller adalah perangkat yang berfungsi untuk mengatur tegangan dan arus yang dihasilkan oleh modul surya. Peran utamanya adalah mencegah pengisian *battery* yang berlebihan dan mengendalikan proses pengosongan *battery*. Dalam penggunaan charge controller, penting untuk memperhatikan tegangan dan daya yang dihasilkan oleh modul surya serta yang dapat diterima oleh *battery*.



Gambar 4. Solar Charge Controller

(<https://tdsolarshop.ca/products/30a-12-24v-pwm-charge-controller>, diakses pada tanggal 18 Agustus 2023)

Charge controller, atau *charge regulator*, merupakan komponen penting dalam sistem panel surya yang melindungi *battery*. Solar cell dengan tegangan 12 volt umumnya menghasilkan tegangan output antara 16 hingga 21 volt. Tanpa charge controller, *battery* bisa rusak akibat pengisian berlebihan atau ketidakstabilan tegangan. *Battery* 12 volt biasanya diisi pada tegangan sekitar 14 hingga 14,7 volt. Fungsinya meliputi mengatur arus yang masuk ke *battery* agar sesuai dengan kapasitasnya, mencegah over-charging, melindungi dari over-discharging, dan menjaga kestabilan sistem fotovoltaiik secara keseluruhan. Selain itu, charge controller juga memonitor temperatur *battery* untuk mencegah kerusakan akibat suhu yang terlalu tinggi.

Saat menggunakan charge controller, ada beberapa hal yang perlu diperhatikan:

- **Tegangan:** Pilih sesuai dengan sistem, seperti 12 volt DC atau 24 volt DC.
- **Kemampuan Arus:** Pastikan charge controller mampu menangani arus yang diperlukan, seperti 10 Ampere, 20 Ampere, dan seterusnya.
- **Pengaturan Pengisian Penuh dan Pemotongan Tegangan Rendah:** Periksa fitur-fitur ini untuk melindungi *battery*..

3. *Battery*

Battery adalah komponen vital dalam sistem pembangkit tenaga surya. *Battery* menyimpan energi listrik yang diterimanya selama siang hari dan menyediakan listrik pada malam hari untuk memenuhi kebutuhan beban, terutama untuk penerangan. Selain itu, *battery* juga berfungsi untuk menyediakan daya ketika tidak ada sinar matahari dan menstabilkan fluktuasi pada beban. Ada berbagai tipe *battery* yang tersedia di pasaran, masing-masing dengan kelebihan dan kekurangan.



Gambar 5. *Battery*

Hal-hal yang perlu diperhatikan dalam memilih peralatan *battery* untuk sistem PLTS antara lain:

- **Kapasitas Satuan:** Diukur dalam ampere-hour (Ah), menunjukkan berapa lama *battery* dapat diisi penuh dengan arus tertentu, seperti *battery* 100 Ah yang dapat diisi dengan 1 ampere selama 100 jam.
- **Kemampuan Penerimaan Arus Pengisian Kecil:** *Battery* harus dapat menerima arus kecil, terutama saat cuaca buruk, agar tidak ada energi surya yang terbuang.
- **Efisiensi Ah:** Efisiensi penyimpanan energi dalam bentuk Ah biasanya sekitar 90%, yang menunjukkan seberapa efektif *battery* menyimpan energi.
- **Efisiensi Wh:** Mengukur perbandingan energi yang tersimpan dengan yang dapat dikeluarkan, dengan efisiensi sekitar 80%, lebih rendah daripada efisiensi Ah

2.3 PLTU Banten 2 Labuan

PLTU Banten 2 Labuan merupakan pembangkit listrik tenaga uap berbahan bakar batu bara dengan kapasitas besar yang berlokasi di Pandeglang, Banten. Dengan luas lahan mencapai 66.579 m² (66,45 Ha), pembangkit ini memiliki peran penting dalam mendukung kebutuhan listrik di jaringan Jawa-Bali. Kompleks PLTU yang luas ini memberikan peluang besar untuk memanfaatkan sebagian lahannya untuk instalasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), sejalan dengan inisiatif PT PLN (Persero) dalam mendukung transisi energi dan peningkatan penggunaan Energi Baru Terbarukan (EBT)..



Gambar 6. PLTU Banten 2 Labuan

Gedung administrasi di kompleks PLTU Labuan, yang dilengkapi dengan atap beton kokoh, merupakan lokasi ideal untuk pemasangan solar panel. Atap tersebut dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan listrik ramah lingkungan, yang berfungsi untuk kebutuhan operasional non-kritis seperti penerangan, sistem pendingin ruangan, dan peralatan kantor. Dengan memanfaatkan teknologi panel surya modern, sistem ini dapat mengurangi ketergantungan pada listrik berbasis bahan bakar fosil sekaligus menekan emisi karbon, menciptakan lingkungan kerja yang lebih hijau.

Selain instalasi di atap, area lahan terbuka di kompleks PLTU dapat digunakan untuk membangun PLTS berskala lebih besar. Potensi ini tidak hanya mendukung bauran energi terbarukan di lingkungan pembangkit, tetapi juga memberikan kontribusi nyata terhadap pencapaian target energi terbarukan nasional, yaitu 23% pada 2025. Penerapan teknologi seperti panel monokristalin dan sistem penyimpanan energi berbasis *battery* dapat meningkatkan efisiensi sistem secara keseluruhan, sekaligus menciptakan model penerapan EBT yang dapat direplikasi di lokasi lain.

2.4 Perancangan Sistem PLTS

Perancangan manual dilakukan untuk menentukan beberapa nilai yang akan digunakan sebagai parameter dalam simulasi. Hasil perhitungan teoritis ini akan digunakan sebagai pembanding terhadap nilai yang diperoleh dari simulasi menggunakan PVSyst. Tahap-tahap perancangan sistem PLTS meliputi:

1. Penentuan titik lokasi

Beberapa faktor yang perlu diperhatikan saat menentukan lokasi sistem PLTS antara lain kondisi fisik lokasi, penentuan koordinat lintang dan bujur, ketinggian tempat, perhitungan total luas area untuk peletakan panel, kemiringan dan sistem pemasangan PLTS, serta estimasi kebutuhan daya yang akan dipasang di lokasi tersebut. Untuk menentukan kapasitas sistem PLTS yang dirancang, dapat digunakan persamaan berikut :

$$P_{peak} = \frac{\text{Energi per hari}}{\text{Radiasi Matahari Rata-Rata}} \quad (4)$$

Nilai P_{peak} perlu ditambahkan 15-25% karena sistem PLTS mengalami rugi-rugi

2. Nilai radiasi matahari

Radiasi matahari adalah total energi matahari yang diterima di suatu lokasi dalam satuan kWh/m²/hari. Pengukuran radiasi matahari dapat dilakukan dengan dua metode: secara langsung, yaitu dengan mengukur radiasi selama siang hari, dan melalui data dari satelit. Dalam penelitian ini, nilai radiasi matahari diperoleh dari database Meteonorm.

3. Pemilihan spesifikasi panel surya

Pemilihan panel surya merupakan langkah krusial dalam perancangan sistem PLTS. Faktor-faktor yang harus dipertimbangkan meliputi efisiensi panel surya, luas modul, dan biaya perancangan. Untuk menentukan jumlah panel surya yang diperlukan, perhitungan dapat dilakukan dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\eta_{PV} = \frac{P_{max}}{A \cdot G} \times 100\% \quad (5)$$

Dimana:

P_{max} = Daya maksimum (watt) dari panel surya A = Luas permukaan panel (m²)

A = Luas permukaan panel (m²)

G = Intensitas radiasi matahari (W/m²), biasanya sekitar 1000 W/m² di kondisi standar tes (STC).

4. Pemilihan spesifikasi inverter

Pemilihan inverter harus disesuaikan dengan kapasitas sistem PLTS yang dirancang. Spesifikasi inverter untuk sistem PLTS dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\text{Kapasitas inverter} = \text{jumlah panel} \times \text{kapasitas panel} \quad (6)$$

5. Konfigurasi rangkaian array sistem PLTS

Saat merancang PLTS, penting untuk memperhatikan jenis panel surya dan inverter yang digunakan. Untuk memastikan produksi daya yang optimal, array panel surya harus disesuaikan dengan inverter. Konfigurasi rangkaian array dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan-persamaan berikut:

$$\text{Seri minimal} = \frac{V_{\min \text{ Inverter}}}{V_{oc \text{ Panel Surya}}} \quad (7)$$

$$\text{Seri maksimal} = \frac{V_{\max \text{ Inverter}}}{V_{mp \text{ Panel Surya}}} \quad (8)$$

$$\text{Paralel} = \frac{I_{\max \text{ Input Inverter}}}{I_{mp \text{ Panel Surya}}} \quad (9)$$

Analisis ketenagalistrikan ini bertujuan untuk mengevaluasi kelayakan penerapan sistem PLTS on-grid. Salah satu indikator kunci dalam menilai kelayakan sistem PLTS dari segi ketenagalistrikan adalah Performance Ratio (PR). PR merupakan rasio yang membandingkan jumlah energi yang benar-benar dikirim dari panel surya ke jaringan PLN selama periode tertentu dengan jumlah energi yang seharusnya dihasilkan secara teoritis oleh panel surya. Nilai PR, yang dinyatakan dalam persentase, mencerminkan efektivitas sistem PLTS dalam menghasilkan energi total dibandingkan dengan sistem PLTS yang ideal, dengan memperhitungkan kehilangan energi yang terjadi. Sebuah sistem PLTS dianggap layak jika nilai PR-nya berada dalam rentang 70% hingga 90%. Perhitungan PR dilakukan dengan menggunakan rumus berikut:

$$\text{Performance Ratio} = \frac{E_{\text{yield}}}{E_{\text{ideal}}} \quad (10)$$

Dimana:

E_{yield} : energi keluaran sistem PLTS dalam setahun

E_{ideal} : energi ideal sistem PLTS

Energi keluaran dan energi ideal dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$E_{\text{yield}} = \text{kapasitas PV} \times N \times H_{\text{tilt}} \times \text{efisiensi} \quad (11)$$

$$H_{\text{tilt}} = PSH \times 365 \text{ hari} \quad (12)$$

Dimana:

E_{yield} : rata-rata keluaran energi PLTS (Wh)
N : jumlah panel dalam array sistem PLTS
 H_{tilt} : radiasi matahari (1 PSH = 1 kWh/m²)
PSH : *Peak Sun Hours* (kWh/m²)
Efisiensi : 100% - losses (%)

Sedangkan untuk mengetahui nilai dari energi ideal yang dihasilkan dari PLTS dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$E_{ideal} = \text{kapasitas PV} \times N \times H_{tilt} \quad (13)$$

Dimana:

E_{ideal} : keluaran produksi energi PLTS tanpa losses (Wh)
N : jumlah panel dalam array sistem PLTS
 H_{tilt} : radiasi matahari (1 PSH = 1 kWh/2)

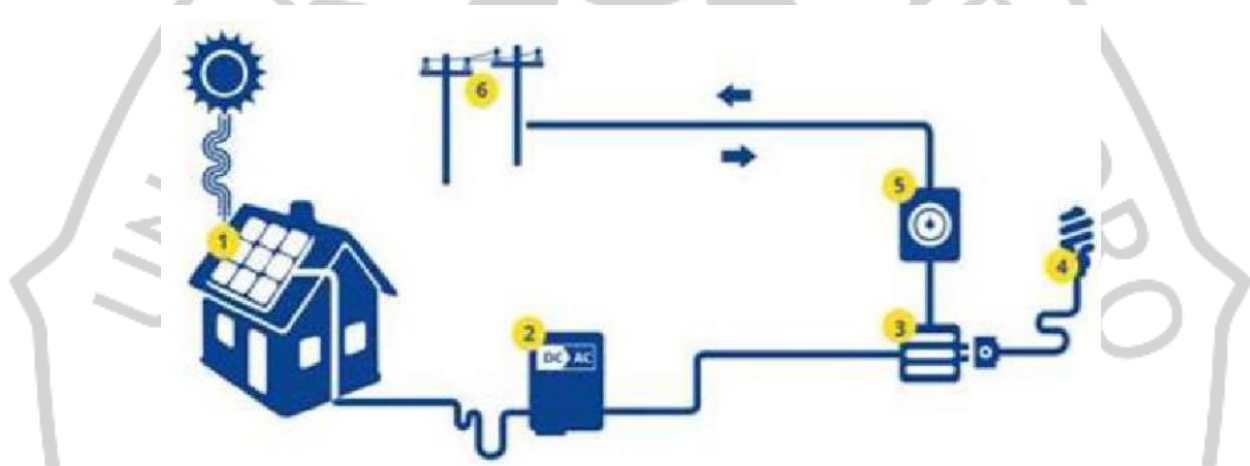
2.5 PLTS Atap

Menurut SNI 8395:2017, PLTS adalah sistem pembangkit listrik yang memanfaatkan energi dari radiasi matahari melalui konversi oleh sel fotovoltaik. Sistem fotovoltaik mengubah radiasi matahari menjadi listrik. Daya listrik yang dihasilkan meningkat seiring dengan meningkatnya intensitas radiasi matahari yang mengenai sel fotovoltaik. Karena Indonesia terletak di daerah tropis dan garis khatulistiwa, dengan kondisi penyinaran matahari yang optimal, PLTS merupakan salah satu teknologi yang sangat potensial untuk digunakan dalam penyediaan tenaga listrik.



Gambar 7. PLTS Atap

Berdasarkan Peraturan Menteri ESDM No. 49 Tahun 2018, serta Permen No. 13 Tahun 2019 dan Permen No. 16 Tahun 2019, sistem PLTS atap merupakan pembangkit listrik yang menggunakan modul fotovoltaik yang dipasang pada atap, dinding, atau bagian lain dari bangunan pelanggan PLN. Sistem ini dirancang untuk memaksimalkan pemanfaatan energi matahari secara efisien dan berkelanjutan. Secara umum, PLTS atap terdiri dari berbagai komponen utama yang bekerja bersama untuk mengubah radiasi matahari menjadi listrik yang dapat digunakan, seperti yang ditunjukkan dalam skema berikut. Mekanisme ini tidak hanya mendukung keberlanjutan energi, tetapi juga berperan penting dalam pengurangan emisi karbon serta penghematan biaya energi bagi penggunaannya.



Gambar 8. Konfigurasi Sistem PLTS Atap
(USAID, 2020)

Penjelasan mekanisme sistem PLTS atap adalah sebagai berikut (USAID, 2020) :

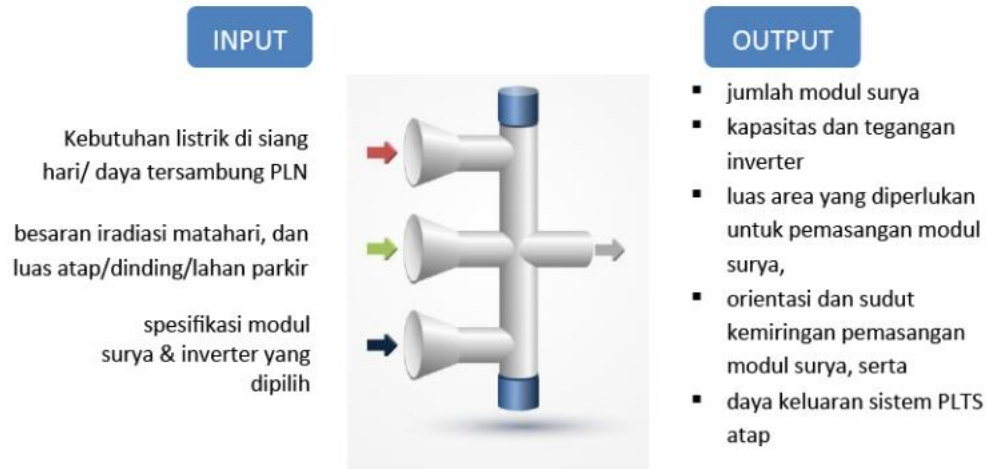
- a. Panel surya mengubah energi matahari menjadi energi listrik, menghasilkan arus listrik DC (arus searah).
- b. Inverter mengubah arus DC yang dihasilkan oleh panel surya menjadi arus AC (arus bolak-balik).
- c. Arus AC yang telah dikonversi kemudian disalurkan ke jaringan listrik rumah melalui panel pemutus arus AC (AC breaker panel).
- d. Energi listrik yang dihasilkan digunakan untuk penerangan dan berbagai peralatan elektronik di rumah.

- e. Sistem net metering digunakan untuk mengukur penggunaan dan pengiriman listrik dengan meter ekspor-impor (exim).
- a. Meter exim mencatat jumlah listrik yang dikirim dari sistem PLTS ke jaringan PLN dan juga jumlah listrik yang diambil dari jaringan PLN oleh pelanggan PLTS

Namun, perlu dicatat bahwa energi surya bersifat intermiten, yang berarti tidak tersedia secara konsisten dan dapat memengaruhi jumlah listrik yang dihasilkan. Selain ketidakadaan sinar matahari pada malam hari, faktor lain yang mempengaruhi intermitensi termasuk adanya awan yang menghalangi sinar matahari dari mencapai panel fotovoltaik, serta bayangan dari pepohonan, bangunan, atau objek lain di sekitar panel surya. Semua faktor ini dapat menyebabkan penurunan produksi listrik oleh panel surya selama periode terkena bayangan (*shading*).

Karena sifat intermiten dari energi surya, sistem pembangkit listrik tenaga surya harus dilengkapi dengan komponen *battery* untuk menyimpan energi atau dikombinasikan dengan sumber energi lain yang lebih stabil (seperti PLTD, PLTU, PLTA, dan lain-lain). Menghubungkan PLTS atap ke jaringan PLN, sesuai dengan ketentuan dalam Peraturan Menteri ESDM, bertujuan untuk memastikan kestabilan pasokan listrik bagi pelanggan PLN. Selain itu, penyambungan PLTS atap ke jaringan PLN juga dapat mengurangi biaya pemasangan, mengingat harga *battery* yang relatif tinggi dan umur operasionalnya yang terbatas.

Dalam merencanakan sistem PLTS atap, diperlukan data input dan perhitungan teknis untuk menentukan konfigurasi sistem yang sesuai dengan kebutuhan listrik. Hasil perhitungan ini akan digunakan untuk menyusun RAB (Rencana Anggaran Biaya) pemasangan PLTS atap secara rinci. Perencanaan konfigurasi sistem PLTS atap umumnya dibantu oleh penyedia layanan PLTS atap atau perusahaan yang menawarkan jasa pembangunan dan pemasangan sistem, yang sudah termasuk dalam paket layanan mereka hingga tahap pemasangan selesai. (USAID, 2020).



Gambar 9. Input dan output penggunaan PLTS
(USAID, 2020)

2.6 Penghitungan Daya Listrik

Untuk menentukan energi yang dapat dihasilkan oleh modul surya atau panel fotovoltaik pada sistem PLTS, perlu diketahui jumlah panel yang akan digunakan serta daya maksimum dari setiap panel surya. Informasi mengenai daya maksimum ini dapat ditemukan pada label spesifikasi yang terletak di bagian belakang panel atau dalam Data Sheet dan buku petunjuk yang menyertai modul fotovoltaik. Perlu diperhatikan bahwa setiap panel surya memiliki spesifikasi dan karakteristik yang berbeda. Selain itu, intensitas radiasi matahari dan suhu penyinaran matahari bervariasi di setiap daerah. Oleh karena itu, parameter-parameter ini harus diperhatikan dengan cermat dalam merencanakan pemasangan sistem PLTS fotovoltaik yang efisien..

$$E_L = PV\ Area \times G_{av} \times TCF \times \eta_{PV}$$

$$E_L = \text{Potensi Energi Listrik (kWh)}$$

$$PV\ Area = \text{Total Luas Permukaan Panel Surya (m}^2\text{)}$$

$$G_{av} = \text{Intensitas matahari harian (kWh/m}^2\text{/hari)}$$

$$TCF = \text{Temperature Coefficient Factor (\%)} \\ = 1 + (\text{Temperature Coefficient} \times \text{Temperature Difference})$$

$$\eta_{PV} = \text{Efisiensi Panel Surya (\%)}$$

2.7 Analisis Keekonomian

Salah satu aspek penting dalam merancang sistem baru adalah mempertimbangkan aspek ekonomis yang dihasilkan. Secara prinsip, sebuah desain perlu dianalisis secara kualitatif dengan menghitung besarnya biaya yang akan diinvestasikan. Jumlah investasi yang dibutuhkan dalam suatu desain akan memengaruhi pengambilan keputusan perusahaan. Ada beberapa metode yang digunakan untuk menganalisis ekonomi dalam estimasi investasi, yaitu *Internal Rate of Return* (IRR), *Net Present Value* (NPV), dan *Jangka Waktu Pengembalian* (*Payback Period*) (Zhang, 2022).

1.6.1 Net Present Value (NPV)

NPV (*Net Present Value*) adalah selisih antara nilai arus kas saat ini dan nilai investasi di masa depan. NPV digunakan untuk memperkirakan keuntungan finansial yang akan diperoleh, apakah melebihi atau kurang dari nilai investasi yang dikeluarkan. Nilai ini menjadi indikator kelayakan suatu proyek untuk dilaksanakan atau tidak. Rumus yang digunakan untuk menghitung NPV dapat dilihat pada Persamaan 15 :

$$NPV = -CF_0 + \frac{CF_1}{(1+i)^1} + \frac{CF_2}{(1+i)^2} + \dots + \frac{CF_n}{(1+i)^n} \quad (15)$$

Keterangan:

$CF_{(t)}$: *Cashflow* pada waktu tertentu
 I : *discount rate*
 n : durasi investasi project

1.6.2 Internal Rate of Return (IRR)

Internal Rate of Return (IRR) adalah rasio yang digunakan untuk menghitung tingkat bunga pengembalian dari suatu investasi. Secara prinsip, semakin tinggi nilai IRR, semakin baik suatu investasi. Sebaliknya, jika nilai IRR rendah, investasi tersebut perlu dipertimbangkan kembali. IRR juga merupakan tingkat diskonto di mana nilai *Net Present Value* (NPV) menjadi nol. Persamaan untuk menghitung IRR dapat dilihat pada Persamaan 16 :

$$IRR = i_1 + \frac{NPV_1}{(NPV_1 - NPV_2)} \times (i_2 - i_1) \quad (16)$$

Keterangan:

IRR : *Internal Rate of Return* (%)
 i_1 : nilai suku bunga pada NPV 1

i_2 : nilai suku bunga pada NPV 2
NPV₁ : net present value pada discount rate 1
NPV₂ : net present value pada discount rate 2

1.6.3 Payback Period (PP)

periode pengembalian atau *payback period* adalah waktu total yang diperlukan untuk suatu investasi mencapai titik impas, yaitu ketika arus kas kumulatif tidak lagi negatif terhadap investasi awal. Satuan yang digunakan umumnya berupa tahun. Persamaan yang digunakan untuk menghitung *payback period* dapat dilihat pada Persamaan (17).

$$\text{Payback Period} = \text{Tahun pengembalian modal} + \frac{\text{Cumulative cashflow before recovery}}{\text{Recovery cashflow}} \quad (17)$$

