

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

1.1 Pembangkit Listrik

Pembangkit listrik adalah sistem yang berfungsi mengubah energi primer menjadi energi listrik yang dapat digunakan oleh masyarakat, industri, maupun fasilitas publik. Energi primer dapat berupa energi mekanik, termal, kimia, hingga energi terbarukan. Dalam konteks penyediaan energi modern, pembangkit listrik memiliki peranan penting dalam menjaga kontinuitas suplai energi dan mendukung perkembangan teknologi serta pertumbuhan ekonomi (Irwanto, 2024).

Pembangkit listrik di Indonesia dikelompokkan berdasarkan sumber energi yang digunakan, dengan tujuan untuk mengoptimalkan pemanfaatan sumber daya energi nasional. Saat ini, Indonesia sedang mengalami transformasi energi menuju pemanfaatan energi baru terbarukan sebagai respon terhadap peningkatan kebutuhan energi dan isu perubahan iklim. Selain itu, perkembangan pembangkit listrik tidak hanya ditujukan untuk memenuhi kebutuhan energi dalam negeri, tetapi juga untuk mendukung capaian target bauran energi nasional yang menempatkan energi baru terbarukan sebagai komponen utama penyediaan energi masa depan. Oleh karena itu, pengembangan berbagai jenis pembangkit, terutama pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) dan pembangkit energi terbarukan lainnya, menjadi prioritas nasional. Upaya ini diharapkan mampu meningkatkan kemandirian energi, menekan biaya operasional dalam jangka panjang, serta menciptakan sistem ketenagalistrikan yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan (Nurhasanah et al., 2023).

Selain itu, perkembangan teknologi pembangkit listrik saat ini semakin mengarah pada sistem yang lebih efisien, ramah lingkungan, dan berkelanjutan. Pembangkit listrik modern tidak hanya berfokus pada kapasitas produksi energi, tetapi juga pada efisiensi konversi energi serta dampak lingkungan yang dihasilkan. Oleh karena itu, pemanfaatan energi baru terbarukan seperti tenaga surya, tenaga angin, tenaga air, dan biomassa semakin dikembangkan sebagai alternatif pengganti energi fosil. Energi terbarukan memiliki keunggulan karena sumbernya tersedia secara alami, dapat diperbarui, serta menghasilkan emisi yang lebih rendah dibandingkan pembangkit berbasis bahan bakar fosil. Dengan perkembangan teknologi tersebut, sistem pembangkit listrik diharapkan mampu menyediakan energi listrik secara lebih stabil, efisien, dan berkelanjutan untuk mendukung kebutuhan energi di masa depan (Andari, 2021).

1.2 Prinsip Kerja PLTS

Prinsip kerja PLTS didasarkan pada efek fotovoltaiik, yaitu proses ketika foton cahaya matahari mengenai material semikonduktor umumnya silicon dan melepaskan elektron dari atomnya. Proses tersebut menghasilkan pasangan elektron-hole yang kemudian bergerak akibat adanya medan listrik internal pada sambungan p-n (*p-n junction*). Pergerakan elektron inilah yang kemudian menghasilkan arus listrik ketika panel surya dihubungkan dengan rangkaian dan beban listrik. Dalam konteks operasional, intensitas radiasi matahari dan suhu lingkungan juga menjadi faktor penting, karena suhu yang terlalu tinggi dapat menurunkan tegangan keluaran panel sehingga mengurangi daya total yang dihasilkan (Rahman et al., 2021).

Intensitas radiasi matahari dan suhu permukaan panel juga memainkan peranan penting. Peningkatan suhu, misalnya, dapat menurunkan tegangan keluaran panel sehingga mengurangi daya total yang dihasilkan, meskipun arus dapat meningkat. Kondisi ini terjadi karena meningkatnya suhu pada sel surya dapat mempengaruhi karakteristik listrik dari material semikonduktor yang digunakan pada panel. Semakin tinggi suhu panel, maka efisiensi konversi energi dari cahaya matahari menjadi energi listrik cenderung menurun. Oleh karena itu, pengaturan posisi pemasangan panel serta sirkulasi udara di sekitar panel sangat penting untuk membantu menjaga suhu panel tetap stabil. Selain itu, faktor lingkungan seperti kecepatan angin, kelembaban udara, dan tingkat kebersihan permukaan panel juga dapat mempengaruhi kinerja sistem panel surya secara keseluruhan. Dengan memperhatikan faktor-faktor tersebut, kinerja panel surya dapat dioptimalkan sehingga energi listrik yang dihasilkan menjadi lebih maksimal dan stabil (Ardianto et al., 2024).

Faktor teknis seperti pengkabelan, resistansi beban, serta kesesuaian titik kerja panel terhadap titik daya maksimum atau *Maximum Power Point* (MPP) turut menentukan efisiensi sistem PLTS secara keseluruhan. Oleh karena itu, pemahaman yang mendalam mengenai karakteristik material, efek fotovoltaik, dan faktor eksternal perlu diperhatikan dalam merancang dan mengoperasikan sistem PLTS baik pada skala rumah tangga maupun fasilitas pendidikan. Selain itu, pemilihan komponen yang tepat seperti inverter, solar charge controller, dan baterai juga sangat berpengaruh terhadap kinerja sistem secara keseluruhan. Setiap komponen harus memiliki spesifikasi yang sesuai dengan kapasitas panel surya agar energi yang dihasilkan dapat dimanfaatkan secara optimal. Sistem instalasi yang baik, termasuk pengaturan sudut

kemiringan panel dan arah pemasangan terhadap matahari, juga dapat meningkatkan penyerapan radiasi matahari. Dengan perancangan sistem yang tepat serta pemeliharaan yang rutin, sistem PLTS dapat bekerja secara lebih efisien, stabil, dan memiliki umur operasional yang lebih panjang (Ardianto et al., 2024).

Tahapan prinsip kerja PLTS secara umum :

1. Penyerapan cahaya matahari oleh panel fotovoltaik.
2. Konversi energi cahaya menjadi energi listrik DC melalui efek fotovoltaik.
3. Pengaturan dan penyimpanan energi melalui controller dan baterai.
4. Konversi energi DC ke AC menggunakan inverter.
5. Distribusi energi listrik ke beban seperti lampu, peralatan elektronik, atau ke jaringan listrik.

2.2.1 Jenis-Jenis Komponen dalam PLTS

Berikut jenis-jenis komponen utama dalam Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS):

1. Panel Surya (Solar Module)

Panel surya (solar module) merupakan perangkat yang digunakan untuk mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik melalui proses yang disebut efek fotovoltaik. Panel surya tersusun dari beberapa sel surya (solar cell) yang biasanya terbuat dari bahan semikonduktor seperti silikon. Ketika cahaya matahari mengenai permukaan sel surya, energi dari cahaya tersebut akan melepaskan elektron pada material semikonduktor sehingga menghasilkan arus listrik. Berfungsi untuk menangkap radiasi matahari dan mengonversinya menjadi listrik DC.



Gambar 2.1.1 Panel Surya Polikristalin (*Polycrystalline*).

2.2.2 Solar Charge Controller

Berikut tentang Solar Charge Controller :

2. Solar Charge Controller

Solar Charge Controller adalah perangkat dalam sistem tenaga surya yang berfungsi untuk mengatur aliran listrik dari panel surya ke baterai agar proses pengisian berlangsung aman dan efisien. Alat ini mencegah pengisian berlebih (overcharging) dan pengosongan berlebihan (overdischarging) pada baterai sehingga umur baterai dapat lebih panjang dan sistem tenaga surya bekerja dengan stabil. Berfungsi untuk mengatur arus dan tegangan dari panel ke baterai agar pengisian optimal serta mencegah overcharge dan overdischarge.



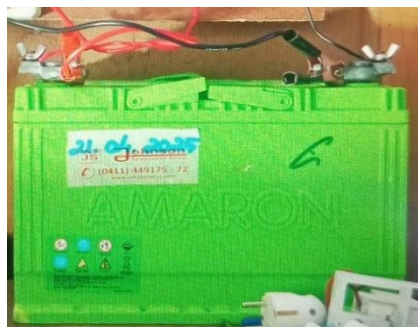
Gambar 2.1.2 Solar Charge Controller tipe PWM.

2.2.3 Battery

Berikut tentang battery:

1. Battery

Baterai adalah perangkat yang berfungsi untuk menyimpan energi listrik dalam bentuk energi kimia dan mengubahnya kembali menjadi energi listrik ketika dibutuhkan. Dalam sistem tenaga surya maupun sistem kelistrikan lainnya, baterai digunakan sebagai media penyimpanan energi sehingga listrik dapat digunakan kapan saja, termasuk saat sumber energi utama tidak menghasilkan listrik.



Gambar 2.1.3 Battery 12 volt

2.2.4 Inverter

Berikut tentang Inverter:

1. Inverter

Inverter adalah perangkat elektronik yang berfungsi untuk mengubah arus listrik searah (DC – Direct Current) menjadi arus listrik bolak-balik (AC – Alternating Current). Inverter sangat penting dalam sistem tenaga surya karena

listrik yang dihasilkan oleh panel surya dan baterai berupa arus DC, sedangkan sebagian besar peralatan listrik rumah tangga menggunakan arus AC. Berfungsi untuk Mengubah listrik DC (dari panel atau baterai) menjadi listrik AC yang dapat digunakan oleh peralatan rumah tangga atau diintegrasikan ke jaringan PLN.



Gambar 2.1.4 Inverter 12V DC ke 220V AC.

[\(https://www.victronenergy.com/\)](https://www.victronenergy.com/)

2.2.5 Beban Listrik (Load)

Beban listrik (load) adalah semua peralatan atau perangkat yang menggunakan energi listrik untuk melakukan suatu kerja atau menghasilkan energi lain, seperti cahaya, panas, gerak, atau suara. Dalam sistem kelistrikan, termasuk pada sistem tenaga surya, beban listrik merupakan komponen akhir yang memanfaatkan energi listrik yang dihasilkan oleh sumber listrik seperti panel surya, baterai. fungsi beban listrik beban listrik memiliki fungsi utama yaitu menggunakan energi listrik untuk menjalankan berbagai peralatan listrik yang menggunakan energi dari PLTS, seperti lampu, charger, dan lainnya.

2.2.6 Rangkaian Pengaman

Rangkaian pengaman merupakan sistem atau komponen yang berfungsi untuk melindungi seluruh peralatan dalam sistem tenaga surya dari kerusakan akibat gangguan listrik, seperti arus lebih, hubung singkat (short circuit), tegangan berlebih, atau petir. Rangkaian pengaman sangat penting untuk menjaga keamanan sistem, meningkatkan keandalan, serta memperpanjang umur komponen PLTS seperti panel surya, baterai, inverter, dan beban listrik.

1.3 Solar Cell

Solar cell atau sel surya merupakan perangkat semikonduktor yang berfungsi mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik melalui mekanisme yang dikenal sebagai efek fotovoltaiik. Ketika foton cahaya mengenai permukaan material semikonduktor, energi foton akan diserap dan menyebabkan elektron berpindah dari pita valensi ke pita konduksi sehingga menghasilkan pasangan elektron-hole. Perpindahan muatan ini kemudian menciptakan aliran arus listrik ketika sel surya dihubungkan dalam suatu rangkaian listrik. Secara fisik, sebuah solar cell tersusun atas lapisan semikonduktor tipe-n dan tipe-p yang membentuk sambungan p-n (*p-n junction*). Sambungan ini menghasilkan medan listrik internal yang berfungsi memisahkan elektron dan hole yang terbentuk akibat paparan cahaya. Solar cell kemudian dapat dirangkai secara seri maupun paralel untuk membentuk modul surya (*solar module*), dan beberapa modul digabungkan menjadi array surya untuk menghasilkan daya listrik yang lebih besar (Kartikasari, 2025).

Solar cell dikategorikan sebagai teknologi energi terbarukan karena sumber energi utamanya berasal dari radiasi matahari yang tersedia secara melimpah di alam dan dapat diperbarui secara terus-menerus. Selain itu, pemanfaatan energi matahari

melalui teknologi solar cell tidak menghasilkan emisi gas buang maupun polusi lingkungan selama proses operasinya. sehingga teknologi ini dianggap sebagai salah satu solusi dalam mengurangi ketergantungan terhadap energi berbasis bahan bakar fosil serta mendukung upaya pengurangan emisi karbon global. Oleh karena itu, penggunaan solar cell semakin berkembang dan banyak diterapkan dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) baik pada skala rumah tangga, komersial, maupun industri untuk memenuhi kebutuhan energi listrik secara lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan (Nurhasanah et al., 2023).

Dalam sistem PLTS, solar cell berfungsi sebagai komponen utama yang mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik melalui proses fotovoltaiik. Kinerja dan efisiensi solar cell dalam menghasilkan energi listrik dipengaruhi oleh beberapa faktor penting, antara lain karakteristik material semikonduktor yang digunakan, intensitas radiasi matahari yang diterima oleh panel, suhu operasi panel, serta nilai beban listrik yang terhubung pada sistem. Intensitas radiasi matahari yang tinggi umumnya akan meningkatkan arus keluaran panel, sedangkan peningkatan suhu panel dapat menurunkan tegangan keluaran sehingga berdampak pada penurunan efisiensi konversi energi. Selain itu, kesesuaian beban listrik juga sangat berpengaruh terhadap titik kerja panel surya, karena beban yang tidak sesuai dapat menyebabkan panel tidak bekerja pada kondisi daya maksimum atau Maximum Power Point (MPP) (Ardianto et al., 2024).

1.4 Efisiensi PLTS

Efisiensi PLTS adalah kemampuan panel surya dalam mengubah energi cahaya matahari menjadi energi listrik yang dapat digunakan. Efisiensi daya pada solar cell

dapat dipengaruhi oleh variasi beban yang terhubung pada sistem. Ketika beban dinaikkan secara bertahap dari kondisi beban rendah, daya listrik yang dihasilkan oleh solar cell dapat mengalami peningkatan karena titik operasi panel bergerak menuju titik daya maksimum (Maximum Power Point/MPP). Pada kondisi tertentu, peningkatan beban dapat menyebabkan arus keluaran meningkat sehingga daya keluaran solar cell juga meningkat. Dengan demikian, efisiensi daya dapat semakin meningkat selama perubahan beban tersebut membuat titik operasi solar cell semakin mendekati MPP. Penelitian mengenai karakteristik solar cell menunjukkan bahwa penentuan beban optimal sangat berkaitan dengan pencapaian titik daya maksimum, sehingga pemilihan nilai beban menjadi faktor penting dalam memperoleh daya dan efisiensi keluaran yang optimal.

Namun, peningkatan beban tidak dapat terus-menerus meningkatkan efisiensi daya solar cell. Apabila beban dinaikkan melewati kondisi optimal, titik operasi panel dapat menjauh dari MPP sehingga daya keluaran dan efisiensi sistem berpotensi mengalami penurunan. Hal ini menunjukkan bahwa terdapat nilai beban tertentu yang menghasilkan efisiensi paling tinggi, bergantung pada intensitas radiasi matahari, temperatur panel, karakteristik I-V solar cell, dan kondisi sistem.

Selain faktor suhu, jenis panel, dan kesesuaian beban, efisiensi sistem PLTS juga dipengaruhi oleh kondisi operasional selama proses konversi energi berlangsung. Faktor seperti sudut kemiringan panel terhadap arah datangnya sinar matahari, kebersihan permukaan panel, serta stabilitas intensitas radiasi matahari turut menentukan besarnya energi yang dapat diserap oleh panel surya. Apabila sudut pemasangan panel tidak optimal atau permukaan panel tertutup debu dan kotoran,

maka radiasi matahari yang diterima akan berkurang sehingga daya keluaran yang dihasilkan juga menurun. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa optimasi posisi panel serta pemeliharaan yang baik dapat meningkatkan kinerja dan efisiensi sistem fotovoltaik secara signifikan (Suryanto et al., 2023). Oleh karena itu, dalam penelitian mengenai efisiensi solar cell, penting untuk memperhatikan kondisi operasional panel agar hasil pengukuran dapat mencerminkan kinerja sistem secara lebih akurat dan optimal. Berikut rumus efisiensi daya panel surya (PLTS) beserta keterangan:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\%$$

Keterangan:

1. η : Efisiensi daya panel surya (%).

Menunjukkan seberapa besar energi listrik yang dihasilkan dibandingkan energi listrik yang dikeluarkan panel.

2. P_{out} : Daya keluaran panel surya (Watt).

Dihitung dari perkalian antara tegangan dan arus

3. P_{in} : Daya masuk pada panel (Watt).

Faktor-faktor yang mempengaruhi efisiensi PLTS:

1. Intensitas cahaya matahari Semakin tinggi radiasi, semakin besar daya yang dihasilkan.
2. Suhu panel Suhu tinggi menurunkan tegangan sehingga daya berkurang.
3. Beban listrik (Load) Nilai beban menentukan apakah panel bekerja mendekati titik daya maksimum (MPP) atau tidak. Load yang tidak sesuai menyebabkan panel bekerja jauh dari kondisi ideal.

4. Jenis panel surya Panel monocrystalline memiliki efisiensi tertinggi (18–22%), polycrystalline sekitar 15–18%, dan thin-film 10–12%.
5. Kebersihan permukaan panel Debu dan kotoran mengurangi transmisi cahaya.
6. Sistem kontrol (MPPT) memungkinkan panel selalu bekerja mendekati MPP sehingga meningkatkan efisiensi sistem secara keseluruhan.

Penelitian terbaru menunjukkan bahwa variasi beban dapat menyebabkan perubahan efisiensi panel hingga lebih dari 40% pada kondisi radiasi matahari yang sama (Suryanto et al., 2023). Hal ini membuktikan bahwa efisiensi tidak semata-mata ditentukan oleh kualitas panel, tetapi juga oleh desain sistem dan pemilihan beban yang tepat.

1.5 Penelitian Terdahulu

Tabel 2.1 Penelitian terdahulu

NO	Nama/Tahun	Judul Penelitian	Metode	Hasil Penelitian
1	Rahman & Utami (2021)	Pemanfaatan Energi Matahari sebagai Alternatif Energi Terbarukan	Studi literatur & analisis data radiasi	Memiliki potensi yang sangat besar sebagai sumber energi terbarukan di Indonesia karena intensitas penyinaran matahari yang relatif tinggi sepanjang tahun. Pemanfaatan panel surya mampu menjadi solusi penyediaan energi listrik yang ramah lingkungan dan dapat mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil.
2	Suharto (2020)	Tantangan Pemerataan Energi Listrik di Wilayah Terpencil	Studi kasus beberapa daerah Indonesia	Infrastruktur jaringan listrik menjadi kendala utama pemerataan energi di daerah terpencil. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dinilai sebagai solusi yang efektif karena mudah dipasang, biaya operasional rendah, dan mampu menyediakan pasokan listrik secara mandiri bagi masyarakat.
3	Alamsyah & Sutopo (2020)	Analisis Potensi Radiasi Matahari di Indonesia	Observasi dan pemetaan radiasi	Indonesia memiliki rata-rata intensitas radiasi matahari sebesar 4,8 kWh/m ² /hari yang tersebar hampir merata di berbagai wilayah. Nilai tersebut menunjukkan bahwa Indonesia sangat potensial untuk pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) sebagai sumber energi terbarukan yang berkelanjutan. Tingginya potensi radiasi matahari berpengaruh langsung terhadap peningkatan daya keluaran dan efisiensi panel surya.
4	Prasetyo (2021)	Analisis Kinerja Panel Surya	Eksperimen dan	intensitas radiasi matahari berpengaruh langsung terhadap tegangan, arus, dan daya keluaran panel surya. Semakin

		pada Berbagai Kondisi Cuaca Metode eksperimen dan pengukuran lapangan	pengukuran lapangan	tinggi intensitas cahaya yang diterima panel, semakin besar daya yang dihasilkan dan semakin tinggi efisiensi sistem.
5	Saputra & Wijaya (2022)	Pengaruh Suhu Permukaan Panel Surya terhadap Efisiensi Daya	Eksperimen dengan variasi suhu panel	Peningkatan suhu permukaan panel surya menyebabkan penurunan tegangan keluaran sehingga efisiensi sistem menurun. Efisiensi terbaik diperoleh pada kondisi suhu panel yang lebih rendah dan stabil.
6	Kurniawan (2022)	Analisis Efisiensi Sistem PLTS Skala Rumah Tangga Pengukuran tegangan, arus, dan daya	Pengukuran tegangan, arus, dan daya	Efisiensi sistem PLTS dipengaruhi oleh kualitas komponen yang digunakan, terutama inverter dan solar charge controller. Efisiensi sistem rata-rata berada pada kisaran 70–90% tergantung kondisi operasi dan beban yang digunakan.
7	Siregar & Putra (2022)	Analisis Rugi-Rugi Daya pada Sistem PLTS	Daya masuk dan daya keluar sistem	Rugi-rugi daya terbesar terjadi pada inverter dan kabel distribusi. Semakin besar rugi-rugi daya yang terjadi, semakin rendah nilai efisiensi keseluruhan sistem PLTS.
8	Saputra & Hidayat (2020)	Pengaruh Variasi Beban pada Output Daya Solar Cell	Eksperimen panel 20 Wp	variasi beban memiliki pengaruh langsung terhadap tegangan, arus, dan daya keluaran panel surya. Pada kondisi beban yang sesuai dengan kapasitas panel, daya keluaran yang dihasilkan lebih optimal dan efisiensi sistem meningkat. Sebaliknya, beban yang terlalu besar atau terlalu kecil menyebabkan titik kerja panel menjauhi kondisi daya maksimum (Maximum Power Point), sehingga terjadi penurunan daya keluaran dan efisiensi sistem secara signifikan.

9	Putra & Sari (2022)	Analisis Resistansi Beban terhadap Efisiensi PLTS Mini	Pengujian laboratorium	resistansi beban berpengaruh langsung terhadap tegangan, arus, dan daya keluaran panel surya. Efisiensi sistem mencapai nilai optimum pada rentang beban menengah ($20\text{--}40\ \Omega$), karena panel surya bekerja mendekati titik daya maksimum (Maximum Power Point). Pada resistansi yang terlalu rendah atau terlalu tinggi, daya keluaran dan efisiensi sistem mengalami penurunan akibat ketidaksesuaian karakteristik beban.
10	Suryanto et al. (2023)	Efisiensi Panel Surya dengan Variasi Resistansi	Eksperimen outdoor	Efisiensi sistem menurun hingga 35–40% ketika nilai beban tidak sesuai dengan kondisi operasi optimum panel. Efisiensi tertinggi diperoleh pada kondisi beban yang mampu mempertahankan panel surya bekerja pada titik daya maksimum sehingga energi yang dihasilkan dapat dimanfaatkan secara lebih efektif.

Contoh Sumber : data di olah (2025)

Penelitian ini menunjukkan bahwa kinerja panel surya dipengaruhi oleh beberapa faktor utama, seperti intensitas radiasi matahari, suhu panel, karakteristik material sel surya, serta nilai beban listrik yang dihubungkan. Berdasarkan berbagai studi variasi beban terbukti memiliki pengaruh signifikan terhadap posisi titik kerja panel pada kurva I–V dan P–V. Ketika beban tidak sesuai dengan karakteristik panel, maka titik kerja panel bergerak menjauhi *Maximum Power Point* (MPP), dan hal ini menyebabkan daya keluaran serta efisiensi panel menurun.