

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Potensi Energi Matahari

Energi matahari yang juga dikenal sebagai energi surya, merupakan salah satu bentuk energi terbarukan yang bersumber dari radiasi sinar matahari. Karena posisinya yang berada di sekitar garis khatulistiwa, Indonesia memiliki potensi radiasi sinar 4,80 kWh/m² per hari. Potensi ini dapat dimanfaatkan melalui dua pendekatan utama, yaitu sistem termal surya (*solar thermal*) yang digunakan untuk keperluan pemanasan, serta sistem fotovoltaik (*solar photovoltaic*) yang berfungsi untuk menghasilkan energi listrik dari cahaya matahari (Safrizal, 2017).



Gambar 2.1 Sebaran Potensi Energi Surya di Indonesia

(Sumber: Global Solar Atlas 2.0, 2019)

Berdasarkan data dari *Indonesian Renewable Energy Agency* (IRENA), Indonesia memiliki potensi energi surya yang sangat tinggi, dengan distribusi radiasi matahari yang bervariasi antar wilayah. Kawasan Barat Indonesia (KBI) menerima radiasi matahari rata-rata sekitar 4,5 kWh/m² per hari dengan variasi bulanan sekitar 10%. Sementara itu, Kawasan Timur Indonesia (KTI) memiliki tingkat radiasi lebih tinggi, yaitu sekitar 5,1 kWh/m² per hari dan variasi bulanan sebesar 9%. Jika dirata-ratakan secara nasional, Indonesia menerima radiasi matahari sekitar 4,8 kWh/m² per hari dengan fluktuasi bulanan sekitar 9%. Dengan

intensitas radiasi yang konsisten sepanjang tahun, energi matahari berperan sebagai sumber energi utama yang berpotensi besar untuk dikembangkan menjadi teknologi pembangkit listrik berbasis energi terbarukan (IRENA, 2020).

Pemanfaatan teknologi yang tepat memungkinkan energi surya tidak hanya dikonversi menjadi energi listrik, tetapi juga digunakan dalam aplikasi termal seperti sistem pemanas air. Radiasi matahari yang terdiri atas berbagai panjang gelombang dalam spektrum elektromagnetik, mulai dari ultraviolet, cahaya tampak, hingga inframerah, dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan energi melalui teknologi fotovoltaik dan termal. Sebagai bagian dari strategi transisi energi nasional, PT PLN (Persero) telah mencanangkan target bauran energi surya dalam Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) sebesar 4.200 MW hingga tahun 2025–2028. Target ini mencakup kontribusi dari konsumen melalui instalasi panel surya skala rumah tangga dan industri. Namun demikian, realisasi pemanfaatan energi surya saat ini baru mencapai sekitar 0,092 GWp dari total potensi sebesar 207,8 GWp. Angka tersebut menunjukkan bahwa tingkat adopsi teknologi PLTS di Indonesia masih sangat rendah jika dibandingkan dengan negara-negara lain di kawasan Asia Tenggara (Handayani & Ariyanti, 2012).

Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) diprediksi akan menjadi kontributor utama dalam bauran energi baru terbarukan di Indonesia, dengan proyeksi kapasitas produksi mencapai sekitar 421,4 TWh. Angka ini setara dengan sekitar 68% dari total potensi energi terbarukan yang tersedia. Proyeksi yang tinggi tersebut didorong oleh semakin luasnya implementasi PLTS atap (*rooftop*), terutama pada segmen rumah mewah yang diperkirakan menyumbang sekitar 25% dari total instalasi. Selain itu, perkembangan industri baterai di berbagai wilayah turut mendukung integrasi sistem penyimpanan energi, terutama untuk konfigurasi PLTS off-grid yang membutuhkan ketersediaan listrik saat malam hari atau cuaca mendung (Suharyati et al., 2019).

2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Surya

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan sistem yang memanfaatkan energi radiasi matahari dan mengubahnya menjadi energi listrik melalui proses konversi. Sistem ini terdiri atas sejumlah komponen utama seperti

panel surya, inverter, serta unit kendali (*controller*). Berdasarkan konfigurasi sistem dan cara pengoperasiannya, PLTS umumnya diklasifikasikan menjadi dua jenis utama, yaitu sistem *off-grid* dan *on-grid*. Pada sistem *off-grid*, listrik yang dihasilkan panel surya disimpan ke dalam baterai melalui pengatur daya (*charge controller*), kemudian dialirkan melalui inverter untuk digunakan pada beban listrik. Sebaliknya, pada sistem *on-grid*, panel surya langsung terhubung ke inverter dan disalurkan ke jaringan listrik PLN tanpa menggunakan baterai sebagai media penyimpanan (Putra, 2020).

2.2.1 PLTS On Grid

PLTS jenis *on-grid* dirancang untuk terhubung langsung dengan jaringan listrik milik PLN tanpa menggunakan baterai sebagai media penyimpanan energi. Sistem ini memanfaatkan listrik yang dihasilkan dari panel surya dan langsung mendistribusikannya ke beban maupun ke jaringan publik. Untuk menjaga stabilitas jaringan, sistem *on-grid* umumnya memiliki kapasitas terbatas dan dilengkapi fitur proteksi otomatis. Salah satu fitur pentingnya adalah kemampuan untuk melakukan pemutusan otomatis saat terjadi gangguan tegangan pada jaringan utama, sehingga tidak mengganggu kinerja sistem PLN secara keseluruhan. Karena efisiensinya dalam mendukung konsumsi energi pada siang hari, sistem ini banyak diterapkan pada gedung perkantoran, pusat perbelanjaan, rumah sakit, serta berbagai fasilitas publik lainnya (Mohite & Butale, 2019).



Gambar 2.2 Ilustrasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya Jenis *On-Grid*

(Sumber: Sunergi, 2022)

2.2.2 PLTS Off Grid

PLTS tipe *off-grid* merupakan sistem pembangkit listrik tenaga surya yang beroperasi secara mandiri tanpa terhubung ke jaringan listrik PLN. Seluruh energi listrik yang dihasilkan dari panel surya digunakan untuk memenuhi kebutuhan beban secara langsung dan disimpan ke dalam baterai sebagai cadangan energi. Peran baterai dalam sistem ini sangat penting, terutama untuk memastikan ketersediaan listrik saat intensitas cahaya matahari menurun atau pada malam hari. Ketika beban listrik rendah atau tidak ada konsumsi, energi yang dihasilkan akan secara otomatis dialihkan untuk mengisi daya baterai hingga kapasitas penuh (Mohite & Butale, 2019).

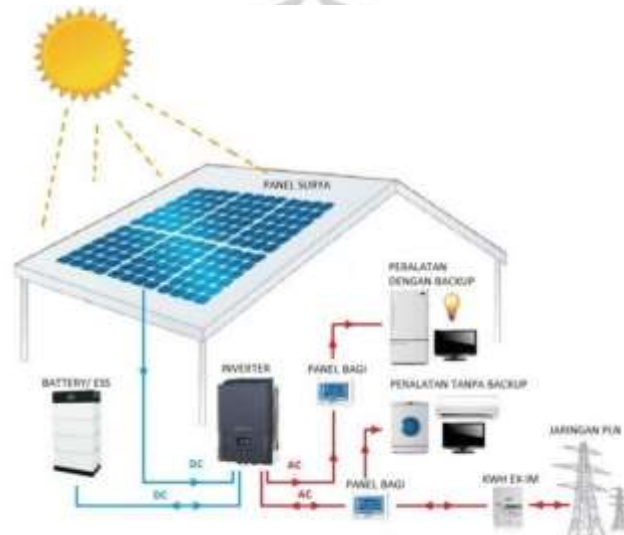


Gambar 2.3 Ilustrasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya Jenis *Off-Grid*
(Sumber: Sunergi, 2022)

2.2.3 PLTS Hybrid

Sistem hybrid merupakan kombinasi antara konfigurasi PLTS *on-grid* dan *off-grid*, yang memungkinkan integrasi sumber energi surya dengan sistem penyimpanan dan jaringan cadangan. Sistem ini dirancang agar tetap dapat menyediakan listrik secara mandiri saat terjadi pemadaman jaringan utama, berkat keberadaan baterai penyimpan energi. Secara umum, istilah *hybrid* juga merujuk pada integrasi dua atau lebih sumber energi, seperti tenaga surya yang dikombinasikan dengan pembangkit lain seperti genset atau turbin angin.

Sistem pembangkit hybrid banyak diterapkan di wilayah terpencil yang belum terjangkau jaringan listrik PLN secara andal. Dalam konfigurasi ini, PLTS berfungsi sebagai sumber energi utama (primer), sedangkan pembangkit cadangan seperti genset digunakan sebagai penopang saat produksi energi surya tidak mencukupi. Fleksibilitas sistem ini menjadikannya solusi yang efektif dan adaptif untuk kawasan dengan tantangan akses energi listrik.



Gambar 2.4 Ilustrasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya Jenis *Hybrid*
(Sumber: Sunergi, 2022)

2.3 Kebijakan Implementasi PLTS

PLTS Atap, atau dikenal juga sebagai *rooftop solar power system*, merupakan sistem pembangkit listrik tenaga surya yang memanfaatkan modul fotovoltaik (PV) yang dipasang di bagian atap bangunan. Sistem ini dirancang untuk memenuhi sebagian atau seluruh kebutuhan energi listrik suatu gedung secara mandiri. Penerapan PLTS Atap tidak hanya mampu mengurangi ketergantungan terhadap pasokan listrik dari jaringan PLN, tetapi juga berkontribusi dalam meningkatkan proporsi energi bersih yang digunakan secara langsung oleh konsumen (Bayu & Windarta, 2021).

Lebih jauh, pemanfaatan energi matahari melalui teknologi PLTS sejalan dengan komitmen Indonesia terhadap perjanjian internasional seperti *Paris Agreement*. Dalam konteks ini, transisi menuju energi terbarukan menjadi bagian penting dari strategi nasional dalam menekan emisi karbon dan mendukung upaya global dalam menahan laju pemanasan bumi (Agung & Maharta Yasa, 2021).

Dalam Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No. 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional, khususnya pada Pasal 9f Ayat 1, disebutkan bahwa pemerintah menargetkan kontribusi energi baru terbarukan (EBT) minimal sebesar 24% pada tahun 2025, serta peningkatan hingga 41% apabila secara keekonomian dinilai layak (Setyono et al., 2019). Selaras dengan hal tersebut, Undang-Undang No. 40 Tahun 2009 tentang Ketenagalistrikan menekankan pentingnya optimalisasi pemanfaatan sumber energi primer dalam penyediaan tenaga listrik.

Untuk mendukung pencapaian target tersebut, strategi nasional diarahkan pada pengembangan pembangkit berbasis EBT, termasuk pemanfaatan sistem PLTS untuk kebutuhan sendiri (*self-use*) pada infrastruktur kelistrikan yang sudah ada. Kebijakan ini secara eksplisit tercantum dalam dokumen Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PT PLN (Persero) tahun 2021–2040 sebagai bagian dari komitmen transisi energi nasional (RUPTL PLN, 2021).

2.4 Komponen – Komponen Sistem PLTS (*Off Grid*)

Rangkaian dasar dari sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) tipe *off-grid*, yaitu sistem pembangkit energi mandiri yang tidak terhubung langsung ke jaringan PLN. Sistem ini terdiri dari beberapa komponen utama: modul surya, pengatur pengisian daya (*solar charge controller*), baterai VRLA, inverter, dan sumber keluaran berupa stop kontak. Modul surya berfungsi menangkap radiasi matahari dan mengubahnya menjadi energi listrik arus searah (DC), yang kemudian dikontrol oleh charge controller untuk menjaga kestabilan arus dan tegangan selama proses pengisian baterai (Syahwil dkk., 2021).

Energi yang telah dialirkan dan disimpan dalam baterai dapat digunakan saat tidak ada sinar matahari, seperti pada malam hari. Listrik DC dari baterai kemudian diubah menjadi arus bolak-balik (AC) oleh inverter, sehingga dapat dimanfaatkan untuk peralatan listrik rumah tangga atau industri ringan melalui stop kontak (Taufik & Purnama, 2022).



Gambar 2.5 Sistem PLTS
(Sumber: Sianipar, 2014)

2.4.1 Panel Surya

Panel surya merupakan perangkat yang terdiri dari sejumlah sel fotovoltaiik yang berfungsi untuk mengubah energi radiasi matahari menjadi energi listrik melalui mekanisme efek fotovoltaiik. Efek ini terjadi ketika cahaya matahari diserap oleh sel surya, menyebabkan pergerakan elektron di antara dua lapisan semikonduktor yang bermuatan berlawanan, sehingga menghasilkan arus listrik.

Secara umum, satu sel surya menghasilkan tegangan sekitar 0,6 volt dalam kondisi tanpa beban, dan sekitar 0,45 volt saat terhubung dengan beban. Untuk mendapatkan tegangan yang lebih tinggi, sel-sel surya dirangkai secara seri. Sebagai contoh, jika 46 sel dirangkai secara seri, maka sistem tersebut mampu menghasilkan tegangan sekitar 16 volt, cukup untuk mengisi baterai 12 volt pada sistem off-grid (Purwoto et al., 2018). Semakin banyak jumlah sel surya yang disusun secara seri, maka semakin tinggi pula tegangan listrik yang dapat dihasilkan oleh rangkaian tersebut (Roza & Mujiurudin, 2019).

Beberapa panel surya yang dirangkai bersama akan membentuk suatu konfigurasi yang disebut array. Konfigurasi ini dapat meningkatkan output daya

listrik, tergantung pada pola penyusunannya. Apabila panel-panel disusun secara seri, maka tegangan output dari array akan meningkat. Sebaliknya, penyusunan secara paralel akan meningkatkan arus listrik yang dihasilkan. Prinsip ini menjadi dasar dalam perancangan sistem PLTS agar sesuai dengan kebutuhan beban dan sistem penyimpanan energi (Prayogi et al., 2018).

Panel surya sendiri tersedia dalam berbagai jenis yang umum digunakan pada berbagai sektor, baik skala rumah tangga, industri, maupun komersial. Berikut ini adalah beberapa jenis panel surya yang paling sering digunakan:

1. Monokristal (*Mono-Crystalline*)

Panel surya tipe monokristalin dikenal sebagai jenis modul fotovoltaik yang memiliki efisiensi paling tinggi dibandingkan jenis panel lainnya. Efisiensi konversinya berkisar antara 15% hingga 20%, menjadikannya pilihan utama untuk lokasi dengan keterbatasan ruang namun memerlukan output daya yang optimal. Panel ini juga memiliki ketahanan yang baik terhadap kondisi lingkungan ekstrem, sehingga cocok diaplikasikan di daerah dengan cuaca yang keras. Meski demikian, performa panel monokristalin cenderung menurun jika dipasang di wilayah dengan intensitas penyinaran matahari yang rendah (Prayogi, dkk., 2018).



Gambar 2.6 Panel Surya Monokristal

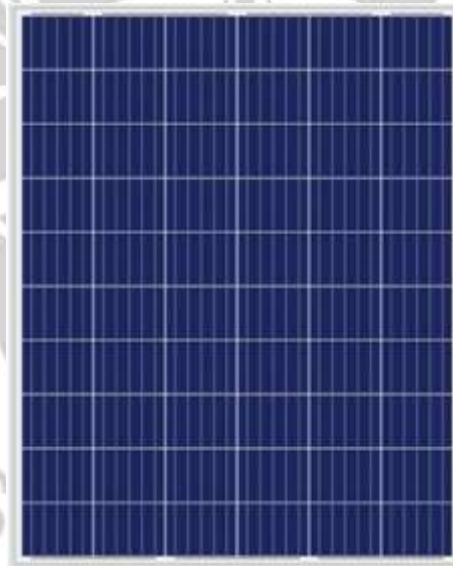
(Sumber: Aslansolar, 2022)

Berdasarkan Gambar 2.6, panel surya jenis monokristal umumnya digunakan untuk kebutuhan energi listrik dalam skala besar, terutama di wilayah yang

memiliki iklim ekstrem dan suhu lingkungan yang tinggi. Panel ini mampu beroperasi secara efisien pada kondisi lingkungan yang menantang, dengan tingkat efisiensi mencapai sekitar 15%. Ciri khas panel monokristalin terletak pada tampilannya yang berwarna hitam pekat, yang berasal dari material silikon murni. Sel-sel silikon tersebut biasanya memiliki bentuk menyerupai segi delapan akibat proses pemotongan dari batangan kristal tunggal berbentuk silinder.

2. Polikristal (*Poly-Crystalline*)

Panel surya tipe polikristal dibuat melalui proses pengecoran silikon cair yang kemudian dibiarkan membeku dalam cetakan, sehingga menghasilkan struktur kristal yang tersusun secara acak. Proses ini menjadikan permukaan panel polikristalin cenderung lebih luas dibandingkan panel monokristalin untuk menghasilkan daya yang setara. Meskipun demikian, efisiensi konversi energi listriknya cenderung lebih rendah. Keunggulan utama dari panel jenis ini adalah harganya yang lebih terjangkau, sehingga banyak digunakan pada sistem PLTS berskala menengah hingga besar (Prayogi, dkk., 2018).



Gambar 2.7 Panel Surya Polikristal

(Sumber: Aslansolar, 2022)

Panel surya jenis polikristalin dibuat dari material silikon yang terdiri atas banyak kristal dengan susunan yang tidak beraturan. Karena karakteristik struktur kristalnya, panel ini memiliki efisiensi konversi energi yang lebih

rendah dibandingkan jenis monokristalin, yaitu berkisar antara 14% hingga 16%. Untuk menghasilkan daya listrik yang setara, panel polikristalin umumnya memiliki ukuran penampang yang lebih besar. Oleh karena itu, instalasi panel jenis ini memerlukan area pemasangan yang lebih luas agar dapat beroperasi secara optimal.

3. *Thin Film Photovoltaic*

Panel surya tipe thin film merupakan modul fotovoltaik yang terdiri dari dua lapisan material tipis, yaitu mikrokristalin silikon dan amorf silikon. Meskipun efisiensinya relatif rendah, yakni sekitar 8,5%, panel ini mampu menghasilkan daya yang cukup besar apabila dibandingkan dengan panel jenis lain pada luas permukaan yang sama. Hal ini disebabkan oleh kemampuan material thin film dalam menyerap cahaya lebih merata meskipun intensitas sinar matahari tidak terlalu tinggi. Inovasi terbaru dalam teknologi ini, khususnya pada konfigurasi tiga lapisan (*triple-junction*), menunjukkan peningkatan signifikan dalam performa, dengan potensi menghasilkan energi listrik hingga 45% lebih tinggi dibandingkan panel konvensional seperti monokristalin dan polikristalin (Purwoto, dkk., 2018).



Gambar 2.8 *Thin Film Photovoltaic*
(Sumber: Solar Power World, 2018)

2.4.2 Solar Charge Controller

Solar Charge Controller (SCC) merupakan komponen penting dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) yang berfungsi untuk mengelola aliran energi dari panel surya menuju baterai. Perangkat ini bertugas memastikan bahwa tegangan dan arus listrik yang diterima baterai tetap berada dalam batas yang sesuai dengan spesifikasi teknisnya. SCC berperan penting dalam mencegah kondisi

overcharge maupun overdischarge, yang keduanya dapat memperpendek masa pakai baterai.

Beberapa jenis SCC telah dilengkapi dengan teknologi *Pulse Width Modulation* (PWM) maupun *Maximum Power Point Tracking* (MPPT). Teknologi MPPT sangat efektif dalam mengoptimalkan daya yang diperoleh dari panel surya, terutama saat intensitas cahaya matahari berfluktuasi akibat faktor cuaca. Dengan adanya fitur MPPT, SCC mampu menyesuaikan titik kerja panel agar tetap berada pada kondisi paling efisien dalam menghasilkan energi, sebelum dialirkan ke sistem penyimpanan atau inverter (Sianipar, 2014).



Gambar 2.9 *Solar Charge Controller*
(Sumber: Sianipar, 2014)

2.4.3 Inverter

Inverter, atau dikenal juga sebagai DC to AC Converter, merupakan salah satu komponen utama dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Fungsinya adalah untuk mengubah arus searah (DC) yang dihasilkan dari panel surya atau baterai menjadi arus bolak-balik (AC), sesuai dengan kebutuhan sebagian besar perangkat elektronik rumah tangga. Karena mayoritas beban listrik di sektor perumahan dan komersial menggunakan tegangan AC, keberadaan inverter menjadi sangat krusial dalam sistem PLTS.

Inverter tersedia dalam berbagai tipe berdasarkan kualitas gelombang listrik yang dihasilkannya. Dua jenis yang umum dijumpai di pasaran adalah pure sine wave dan modified square wave. Untuk aplikasi sistem PLTS, inverter jenis *pure sine wave* lebih direkomendasikan karena mampu menyediakan daya yang stabil dan kompatibel dengan berbagai jenis peralatan listrik, termasuk yang sensitif terhadap perubahan bentuk gelombang. Dengan demikian, inverter tidak hanya

berfungsi sebagai pengubah tegangan, tetapi juga berperan dalam menjamin kualitas dan kontinuitas suplai listrik (Sianipar, 2014). Terdapat beberapa jenis inverter yang umum digunakan pada sistem PLTS, antara lain:

1. *String Inverter*

Sistem inverter string merupakan konfigurasi di mana setiap rangkaian panel surya (*string*) dihubungkan secara independen ke inverter masing-masing, tanpa koneksi paralel antar string. Dengan demikian, setiap string memiliki unit *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) tersendiri, yang memungkinkan pengoptimalan daya secara individual. Keuntungan dari konfigurasi ini adalah ketidaksesuaian modul, bayangan sebagian, atau gangguan lainnya pada satu string tidak akan memengaruhi performa string lain dalam sistem.

Selain itu, sistem ini memungkinkan fleksibilitas penggunaan jenis dan jumlah modul yang berbeda dalam satu instalasi. Apabila terjadi kerusakan pada salah satu inverter, bagian lain dari sistem tetap dapat beroperasi secara normal. Meskipun demikian, penggunaan beberapa inverter secara terpisah dapat meningkatkan biaya instalasi awal (Yilmaz & Dincer, 2017).

Inverter string umumnya digunakan dalam sistem PLTS skala kecil hingga menengah, dengan kapasitas berkisar antara 0,4 hingga 2 kW per rangkaian modul PV, terutama pada sistem atap (*rooftop*). Namun, seiring perkembangan teknologi, jenis inverter ini juga mulai diterapkan pada pembangkit skala utilitas dengan kapasitas hingga ratusan kilowatt (Silva et al., 2020).

Penggunaan string inverter dalam sistem PLTS dapat memberikan keuntungan dalam hal efisiensi pemasangan. Konfigurasi ini tidak memerlukan peralatan berat seperti crane atau jumlah tenaga kerja yang besar, sehingga biaya instalasi awal dapat ditekan. Meskipun demikian, jika dilihat dari total kapasitas yang diinstal, investasi string inverter secara keseluruhan mungkin sedikit lebih mahal dibandingkan dengan inverter pusat (*central inverter*) untuk kapasitas daya yang setara.

Selain itu, sistem string inverter memerlukan ruang fisik yang lebih luas untuk pemasangan, serta membutuhkan waktu yang lebih banyak dalam hal perawatan berkala karena jumlah unit inverter yang lebih banyak. Namun, salah satu keunggulan dari sistem ini adalah kemudahan dalam perawatan. Apabila terjadi

kerusakan pada salah satu unit inverter, proses penggantinya dapat dilakukan langsung di lokasi tanpa harus menghentikan keseluruhan sistem pembangkit (Phap & Hang, 2019).



Gambar 2.10 *String Inverter*
(Sumber: DS New Energy, 2022)

2. *Central Inverter*

Pada sistem PLTS dengan konfigurasi inverter central, sejumlah panel surya (modul PV) dihubungkan secara seri membentuk beberapa string, kemudian digabungkan secara paralel dan dikoneksikan ke satu inverter utama. Keunggulan utama dari konfigurasi ini adalah kesederhanaan dalam desain dan biaya instalasi yang relatif rendah. Namun, karena seluruh array hanya dikendalikan oleh satu titik pelacakan daya maksimum (*Maximum Power Point Tracking* / MPPT), maka efisiensi energi sistem sangat bergantung pada keseragaman kondisi kerja setiap string.

Perbedaan intensitas penyinaran matahari (iradiasi), suhu lingkungan, maupun kondisi bayangan pada sebagian modul dapat menyebabkan penurunan kinerja secara keseluruhan, karena sistem tidak dapat mengoptimalkan daya tiap string secara individual (Yilmaz & Dincer, 2017). Inverter tipe ini umumnya digunakan untuk pembangkit listrik berskala besar dengan kapasitas antara 100 kW hingga 6 MW. Biasanya menggunakan topologi tiga fase dan memiliki desain modular agar sesuai dengan kebutuhan sistem berskala utilitas (Silva et al., 2020).

Dalam sistem dengan *central inverter*, seluruh rangkaian panel surya biasanya digabungkan secara paralel melalui *junction box* (kotak sambungan) sebelum disalurkan ke satu unit inverter utama. Konfigurasi ini ideal digunakan pada *solar farm* yang memiliki desain sistem panel surya seragam, karena central inverter umumnya hanya dilengkapi satu hingga dua unit MPPT.

Salah satu keuntungan utama dari sistem ini adalah kemudahan dalam hal pengawasan dan pengendalian, karena jumlah inverter dan panel kendali yang dibutuhkan menjadi lebih sedikit. Namun demikian, sistem ini memiliki kelemahan dari sisi keandalan: kegagalan pada salah satu rangkaian panel dapat berdampak pada keseluruhan kinerja sistem, bahkan menghentikan operasi seluruh pembangkit. Selain itu, inverter pusat memiliki dimensi besar dan menghasilkan panas yang signifikan, sehingga memerlukan pondasi beton serta sistem pendingin tambahan untuk menjaga suhu operasi tetap optimal. Walau terdapat tantangan teknis, inverter sentral tetap dianggap lebih hemat dari sisi investasi awal dibandingkan penggunaan banyak inverter string, terutama untuk proyek skala besar (Phap & Hang, 2019).



Gambar 2.11 *Central Inverter*
(Sumber: DS New Energy, 2022)

3. *Micro Inverter*

Pada sistem dengan *micro inverter*, setiap panel fotovoltaik (PV) memiliki inverter tersendiri yang terintegrasi langsung, sehingga konversi energi dari arus searah (DC) ke arus bolak-balik (AC) dilakukan secara individual pada masing-masing modul. Pendekatan ini mengurangi dampak kerugian akibat ketidaksesuaian (*mismatch losses*) antar panel, seperti perbedaan orientasi,

degradasi, atau efek bayangan. Dengan pengaturan yang independen, penurunan kinerja pada satu modul tidak akan memengaruhi produksi daya dari panel lainnya.

Meskipun *micro inverter* memiliki tingkat efisiensi individual yang lebih rendah dibandingkan jenis inverter lainnya, seperti *string inverter* atau *central inverter*, sistem ini cenderung lebih andal dalam mengurangi kerugian energi secara keseluruhan. Sebagai contoh, ketika terjadi kerusakan pada salah satu inverter mikro, hanya satu panel PV yang terpengaruh, berbeda dengan sistem inverter terpusat di mana gangguan dapat berdampak pada banyak modul sekaligus. Namun demikian, karena instalasi dan pemeliharaan *micro inverter* relatif lebih kompleks, penggunaannya lebih umum dijumpai pada sistem berskala kecil seperti rumah tinggal atau fasilitas kecil lainnya (Yilmaz & Dincer, 2017).



Gambar 2.12 Micro Inverter
(Sumber: <http://tandem-solar-systems.com>)

2.4.4 Baterai

Kinerja panel surya sangat dipengaruhi oleh intensitas radiasi matahari, sehingga pada malam hari atau saat cuaca mendung, produksi energi listrik dari panel akan menurun atau bahkan terhenti. Oleh karena itu, sistem PLTS membutuhkan media penyimpanan energi yang dapat pembangkitan tidak berlangsung, terutama untuk menjamin kontinuitas suplai daya.

Dalam sistem PLTS, energi listrik yang dihasilkan disimpan dalam baterai, yang fungsinya serupa dengan penyimpanan cadangan. Namun, jenis baterai yang digunakan berbeda dengan aki konvensional pada kendaraan. Baterai yang umum digunakan adalah jenis *deep cycle lead-acid*, karena dirancang untuk mampu melakukan proses *discharge* secara berulang hingga kapasitas maksimumnya tanpa mengalami kerusakan signifikan. Berbeda dengan baterai standar, baterai jenis ini

memiliki umur operasional yang lebih panjang dan stabil dalam siklus pengisian dan pelepasan energi yang dalam. Penggunaan baterai yang tidak sesuai, seperti aki kendaraan, berpotensi mempercepat degradasi dan menurunkan kapasitas simpan energi (Sianipar, 2014).



Gambar 2.13 Baterai
(Sumber: Sianipar, 2014)

2.5 Potensi Losses Pada PLTS

Energi matahari yang diserap oleh panel surya tidak seluruhnya dapat dikonversi menjadi energi listrik dan disalurkan secara utuh ke beban atau jaringan listrik (*grid*). Hal ini disebabkan oleh adanya berbagai faktor kerugian sistem (*losses*) yang dapat menurunkan tingkat efisiensi keseluruhan dari sistem PLTS. Berbagai komponen dan kondisi operasional dapat memengaruhi tingkat efisiensi konversi ini, sehingga penting untuk memahami sumber-sumber potensial dari kerugian tersebut. Beberapa faktor utama yang perlu diperhatikan dalam sistem PLTS terkait potensi *losses* antara lain adalah:

2.5.1 Kotoran (*Soilage*)

Akumulasi kotoran atau debu pada permukaan panel surya dapat menjadi salah satu penyebab utama penurunan efisiensi sistem PLTS. Kotoran yang menempel menghalangi sinar matahari untuk mencapai permukaan sel fotovoltaik, sehingga mengurangi intensitas radiasi yang dapat dikonversi menjadi energi listrik. Akibatnya, daya output sistem mengalami penurunan, dan keseluruhan sistem tidak dapat beroperasi secara optimal (Rawat & Hod, 2017).

Oleh karena itu, diperlukan tindakan pemeliharaan rutin, terutama dalam bentuk pembersihan permukaan panel secara berkala, untuk menjaga kinerja sistem

tetap maksimal dan mencegah kerugian energi yang signifikan akibat hambatan fisik tersebut.

2.5.2 Bayangan (*Shading*)

Bayangan (*shading*) yang mengenai permukaan panel surya dapat berdampak signifikan terhadap penurunan kinerja sistem. Ketika sebagian atau seluruh permukaan panel tertutup oleh bayangan—baik dari objek sekitar seperti pohon, tiang, atau bangunan—jumlah radiasi matahari yang diterima oleh sel fotovoltaik akan berkurang. Hal ini menyebabkan proses konversi energi menjadi tidak optimal, yang pada akhirnya menurunkan total daya listrik yang dihasilkan oleh sistem PLTS (Colli, 2015). Efek bayangan dapat menginterupsi sistem PLTS apabila:

1. Ketika bagian dari susunan panel surya (array) tertutupi oleh bayangan, intensitas radiasi matahari yang diterima akan menurun, sehingga tegangan output yang dihasilkan juga ikut berkurang. Tegangan yang lebih rendah ini berdampak langsung pada kinerja inverter, karena inverter memerlukan tegangan input minimum tertentu untuk dapat bekerja secara optimal. Jika nilai tegangan dari array tidak mencukupi, inverter dapat gagal melakukan konversi atau bahkan berhenti beroperasi sementara.
2. Dalam konfigurasi *string inverter*, beberapa rangkaian panel surya (*string*) dihubungkan dalam satu jalur input ke inverter. Salah satu kelemahan dari konfigurasi ini adalah efek *shading parsial* pada satu panel dalam satu string dapat menurunkan kinerja seluruh string. Lebih jauh lagi, ketika beberapa string digabungkan dalam satu inverter, penurunan performa pada satu string dapat turut memengaruhi efisiensi keseluruhan sistem karena inverter bekerja berdasarkan titik operasi gabungan dari semua string yang terhubung.

Dalam kedua kondisi tersebut, estimasi terhadap keluaran daya dari susunan panel (array) menjadi kurang akurat, karena adanya perbedaan karakteristik kerja antar inverter yang dipengaruhi oleh kondisi bayangan. Variasi dalam efek shading akan menghasilkan kinerja yang tidak seragam, sehingga menyulitkan dalam melakukan proyeksi produksi energi secara konsisten. Oleh karena itu, dalam perencanaan sistem PLTS, pemilihan lokasi pemasangan panel sangat krusial, dan

sebaiknya dilakukan pada area yang bebas dari potensi bayangan seperti gedung tinggi, pepohonan, atau struktur lainnya yang dapat menghalangi radiasi matahari secara langsung.

2.5.3 Temperatur Panel Surya

Suhu lingkungan, khususnya pada permukaan modul fotovoltaik, merupakan salah satu faktor yang memengaruhi efisiensi sistem pembangkitan tenaga surya. Ketika suhu permukaan sel surya meningkat, tegangan output setiap sel akan mengalami penurunan, yang pada akhirnya berdampak pada penurunan daya total yang dihasilkan oleh sistem. Besarnya pengaruh ini sangat bergantung pada karakteristik termal masing-masing jenis panel yang digunakan. Secara umum, panel surya mengalami penurunan produksi daya sebesar sekitar 0,5% untuk setiap kenaikan suhu sebesar 1°C di atas kondisi standar pengujian. Artinya, pada lingkungan yang cenderung panas, sistem PLTS berpotensi mengalami penurunan efisiensi yang signifikan jika tidak diimbangi dengan desain ventilasi atau sistem pendinginan yang memadai (Colli, 2015).

2.5.4 Toleransi Manufaktur

Setiap modul panel surya memiliki karakteristik performa yang merujuk pada spesifikasi teknis dari pabrikan, yang biasanya dicantumkan secara lengkap dalam lembar data (*data sheet*) produk. Informasi ini mencakup sejumlah parameter penting yang mencerminkan potensi kinerja panel tersebut, seperti toleransi daya, tegangan dan arus maksimum, efisiensi konversi, serta daya output nominal. Parameter-parameter ini menjadi acuan dalam proses perencanaan dan desain sistem PLTS, serta penting untuk memperkirakan kinerja panel dalam kondisi operasi aktual (Colli, 2015).

2.5.5 Efisiensi Inverter

Tingkat efisiensi dari sebuah inverter umumnya dinyatakan secara spesifik dalam lembar data teknis (*data sheet*) yang disediakan oleh produsen. Efisiensi ini sangat dipengaruhi oleh besarnya tegangan dan arus input yang diterima dari masing-masing array panel surya. Apabila nilai output dari array melebihi batas

optimal yang dapat ditangani inverter, maka konversi daya menjadi kurang efisien dan dapat menimbulkan kerugian energi.

Oleh sebab itu, penting untuk melakukan monitoring berkala terhadap *output array* guna memastikan bahwa parameter input tetap berada dalam rentang kerja yang direkomendasikan oleh produsen inverter. Selain itu, aspek sirkulasi udara atau ventilasi juga menjadi faktor penting dalam instalasi inverter, karena suhu operasional yang tinggi akibat ventilasi buruk dapat menurunkan performa dan efisiensi inverter secara keseluruhan (Colli, 2015).

2.5.6 Lifetime

Umur operasional panel surya memiliki pengaruh signifikan terhadap performa jangka panjang sistem PLTS. Seiring waktu, modul fotovoltaik akan mengalami degradasi kinerja yang mengakibatkan penurunan daya output. Sebagai contoh, panel dengan kapasitas puncak sebesar 400 Watt diperkirakan mengalami penurunan efisiensi sekitar 5% pada tahun ke-5, kemudian mencapai 10% pada tahun ke-10, dan dapat menurun hingga 20% setelah 25 tahun masa penggunaan (EverExceed, 2020).

Fenomena ini dikenal sebagai degradasi panel surya dan merupakan faktor penting dalam analisis kelayakan teknis maupun ekonomi sistem PLTS jangka panjang, terutama untuk investasi skala industri seperti di sektor pertambangan.

2.6 Perhitungan Ekonomi

Analisis ekonomi merupakan pendekatan sistematis yang digunakan untuk mengevaluasi kelayakan suatu investasi atau proyek dengan mempertimbangkan hubungan antara biaya dan manfaat dalam jangka waktu tertentu. Dalam konteks penerapan sistem energi terbarukan seperti solar cell, analisis ekonomi menjadi sangat penting untuk memastikan bahwa investasi yang dilakukan memberikan keuntungan finansial yang layak dan dapat diterima.

Melalui analisis ini, berbagai indikator keuangan digunakan untuk menilai sejauh mana suatu proyek memberikan pengembalian investasi, efisiensi biaya, dan risiko yang mungkin timbul selama masa operasional sistem. Beberapa metode evaluasi yang umum digunakan dalam analisis ekonomi proyek antara lain cash

flow (arus kas), Net Present Value (NPV), Benefit-Cost Ratio (BCR), dan Payback Period (PBP). Masing-masing indikator tersebut memberikan sudut pandang yang berbeda dalam menilai kelayakan proyek secara menyeluruh.

2.6.1 Alur kas (*Cash Flow*)

Alur kas, atau dalam istilah lain disebut *cash flow*, menggambarkan pergerakan dana yang masuk dan keluar dalam suatu kurun waktu tertentu. Komponen utama dalam arus kas mencakup:

1. *Cash in* (Pemasukan), biasanya berasal dari hasil penjualan produk atau nilai ekonomis yang diperoleh dari pemanfaatan suatu produk.
2. *Cash out* (Pegeluaran), merujuk pada jumlah keseluruhan dana yang dikeluarkan untuk mendukung aktivitas operasional dalam suatu periode tertentu.

Dari perspektif ekonomi, analisis aliran kas investasi biasanya dilakukan pada tahap perencanaan sebagai dasar untuk mengevaluasi kelayakan suatu proyek. Oleh karena itu, diperlukan perhitungan estimatif terhadap aliran kas yang diproyeksikan akan terjadi selama masa operasional proyek apabila investasi tersebut direalisasikan. Estimasi ini meliputi prediksi terhadap biaya dan pendapatan di setiap periode, yang akan digunakan untuk menilai keuntungan atau risiko dari investasi yang dilakukan (Giatman, 2022).

2.6.1 Net Present Value (NPV)

Net Present Value (NPV) merupakan metode analisis investasi yang bertujuan untuk menghitung nilai bersih dari aliran kas suatu proyek dengan mengonversi seluruh komponen biaya dan manfaat ke nilai sekarang (*present value*). Dalam pendekatan ini, waktu evaluasi dianggap sebagai tahun ke-0, atau titik awal perhitungan. Artinya, semua arus kas masa depan didiskon ke nilai saat ini agar dapat dibandingkan secara adil dan akurat (Avinda & Darjat, 2022).

Dalam perhitungan NPV, dikenal juga istilah *Present Worth of Benefit* (PWB) yang merujuk pada total nilai kini dari seluruh arus kas masuk (benefit), serta *Present Worth of Cost* (PWC) yang merupakan total nilai kini dari arus kas keluar (biaya). Selisih antara PWB dan PWC menjadi dasar untuk menentukan apakah suatu proyek layak untuk dijalankan secara finansial. Sementara itu nilai dari NPV

sendiri diperoleh dari selisih antara PWB dengan PWC. Berikut rumus untuk menghitung NPV, PWB, dan PWC:

$$PWB = \sum_{t=0}^n Cb_t(FBP)_t \dots\dots\dots (4.1)$$

$$PWC = \sum_{t=0}^n Cc_t(FBP)_t \dots\dots\dots (4.2)$$

$$NPV = PWB - PWC \dots\dots\dots (4.4)$$

Dimana:

PWB = *Present Worth Benefit*

PWC = *Present Worth Cost*

Cb = *Cash flow benefit*

Cc = *Cash flow cost*

FBP = *Faktor Bunga Present*

t = *periode waktu*

n = *Usia investasi*

Metode NPV memiliki dua kriteria untuk menentukan kelayakan ekonomi suatu investasi, yaitu:

1. NPV > 0, maka investasi dapat dikatakan layak / *feasible*.
2. NPV < 0, maka investasi dapat dikatakan tidak layak / *unfeasible*.

2.6.2 *Benefit Cost Rasio (BCR)*

Benefit Cost Ratio (BCR) merupakan salah satu metode yang umum digunakan dalam analisis kelayakan investasi suatu proyek. Pendekatan ini menghitung perbandingan antara total manfaat (*benefit*) dan total biaya (*cost*) dalam nilai sekarang (*present value*), untuk menentukan apakah proyek memberikan nilai ekonomi yang positif. BCR juga kerap digunakan sebagai metode verifikasi tambahan guna memperkuat hasil evaluasi dari teknik analisis lainnya seperti NPV atau Payback Period (Avinda & Darjat, 2022). Metode perhitungan nilai BCR menggunakan persamaan berikut:

$$BCR = \frac{PWB}{PWC} \dots\dots\dots (4.4)$$

2.6.3 *Payback Period (PBP)*

Analisis Payback Period adalah metode evaluasi investasi yang digunakan untuk menentukan jangka waktu yang dibutuhkan untuk mengembalikan modal

awal dari sebuah proyek melalui arus kas bersih yang diperoleh setiap tahun. Dalam pendekatannya, metode ini mempertimbangkan faktor diskonto (*discount factor*) guna mencerminkan nilai waktu dari uang. Periode pengembalian tercapai ketika total kumulatif dari arus kas bersih yang didiskon sama dengan nilai investasi awal yang dikeluarkan (J.PH., 2022). Untuk menentukan payback period terdapat beberapa kondisi yaitu:

1. Apabila periode *payback* lebih singkat dibandingkan estimasi umur proyek, maka investasi tersebut dapat dinilai layak untuk dijalankan.
2. Jika waktu pengembalian modal (*payback period*) melebihi estimasi umur proyek, maka investasi tersebut dapat dianggap tidak layak secara finansial.

Payback period dapat dihitung dengan menggunakan persamaan rumus berikut sebagai berikut (Giatman, 2022):

$$PBP = n + \frac{\text{Arus kas kumulatif tahun } (n-1)}{\text{Arus kas bersih tahun } n} \dots\dots\dots (4.5)$$

2.7 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu menjadi landasan penting dalam mengkaji dan memperkuat fokus serta arah penelitian yang sedang dilakukan. Kajian terhadap penelitian-penelitian sebelumnya memberikan pemahaman mengenai pendekatan, metode, dan hasil yang telah diperoleh dalam studi sejenis, khususnya terkait penerapan energi terbarukan seperti *solar cell* dan analisis kelayakan ekonominya.

Melalui tinjauan ini, peneliti dapat mengidentifikasi kesenjangan (*gap*) penelitian, membandingkan metode analisis yang digunakan, serta menyesuaikan ruang lingkup dan kontribusi ilmiah dari penelitian yang dilakukan. Penelitian terdahulu yang relevan akan disajikan dalam bentuk tabel untuk mempermudah pemahaman terhadap persamaan dan perbedaan aspek-aspek penting, seperti lokasi, metode analisis ekonomi (misalnya NPV, BCR, dan PBP), serta hasil temuan utama dari masing-masing studi.

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu

No	Penulis	Judul Penelitian	Metode	Tujuan	Hasil Penelitian
1	Chandra, Y (2016)	Analisis Ekonomi Energi Perencanaan Pembangunan PLTS (Studi Kasus Gedung Kuliah Politeknik Negeri Ketapang)	Pengumpulan data kebutuhan energi listrik berdasarkan jumlah perangkat elektronik dan AC, perhitungan komponen PLTS, serta analisis kelayakan investasi menggunakan metode NPV, PI, DPP, dan ROR.	Menganalisis kelayakan ekonomi penerapan PLTS sebagai energi alternatif di Gedung Kuliah POLINKA untuk mengatasi pemadaman listrik bergilir.	Beban listrik: 56.764 watt (dengan AC), 18.964 watt (tanpa AC). Investasi: Rp 24,91 miliar (dengan AC), Rp 8,41 miliar (tanpa AC). Biaya energi: Rp 2.640,15/kWh dan Rp 2.642,26/kWh. Hasil analisis menunjukkan bahwa investasi PLTS layak direalisasikan.
2	Hidayat, F., Winardi, B., & Nugroho, A. (2018)	Analisis Ekonomi Perencanaan PLTS Terhubung Jaringan PLN Menggunakan Simulasi HOMER dan PVsyst	Simulasi menggunakan perangkat lunak HOMER dan PVsyst, analisis ekonomi menggunakan metode NPV, Benefit–Cost Ratio (BCR), dan Discounted Payback Period (DPP).	Menganalisis kelayakan ekonomi investasi sistem PLTS yang terhubung dengan jaringan PLN untuk mendukung pengembangan energi baru terbarukan di Indonesia.	Hasil awal menunjukkan harga jual Rp 840,2/kWh tidak layak. Namun, setelah analisis sensitivitas, investasi layak jika harga jual energi Rp 1942,8/kWh (HOMER) dan Rp 1440,2/kWh (PVsyst), karena dapat menutup biaya investasi awal yang tinggi.

No	Penulis	Judul Penelitian	Metode	Tujuan	Hasil Penelitian
4	Hiswandi, M. F., Iswahyudi, F., & Soeroto, W. M. (2024)	Analisis Kelayakan Investasi PLTS Atap On-Grid pada Pabrik Minuman di Kabupaten Bekasi	Studi literatur dan simulasi energi PLTS atap on-grid menggunakan software Helioscope, serta analisis finansial menggunakan metode DPP, NPV, IRR, dan PI untuk mengevaluasi kelayakan investasi.	Menganalisis kelayakan investasi PLTS atap on-grid pada pabrik minuman siap saji sebagai alternatif pengurangan penggunaan energi fosil.	Investasi PLTS atap on-grid dinyatakan layak, ditunjukkan oleh: DPP lebih kecil dari umur proyek, NPV positif, $IRR > \text{discount rate}$, dan $PI > 1$, sehingga memberikan efisiensi biaya tagihan listrik PLN di pabrik minuman siap saji di Kabupaten Bekasi.
4	Windarta, J. et al. (2021)	Analisis Teknis dan Ekonomis Pembangkit Listrik Tenaga Surya Off-grid Menggunakan Software PVSyst untuk Usaha Mikro Kecil dan Menengah (UMKM) Coffeeshop Remote Area	Simulasi desain menggunakan software PVSyst 7.0 untuk membandingkan kinerja dua merk panel surya 720 Wp dan dua merk baterai 160 Ah; analisis ekonomi dilakukan dengan RetScreen dan membandingkan alternatif lain seperti genset dan baterai dengan charging PLN.	Merancang dan menganalisis kelayakan teknis serta ekonomi sistem PLTS off-grid skala kecil untuk UMKM Coffeeshop di daerah terpencil.	Energi tersuplai terbanyak pada variasi 4 sebesar 674,51 kWh/tahun. Meskipun nilai $NPV < 0$ untuk semua variasi, PLTS off-grid tetap lebih menguntungkan dibandingkan genset atau baterai dengan charging dari PLN.

No	Penulis	Judul Penelitian	Metode	Tujuan	Hasil Penelitian
5	Asrori, A. et al. (2022)	Kajian Kelayakan Solar Rooftop On-Grid untuk Kebutuhan Listrik Bengkel Mesin di Polinema	Perencanaan dan simulasi dilakukan menggunakan software PVsyst 6.88. Analisis kelayakan menggunakan indikator NPV, PI, dan Payback Period (PBP) berdasarkan kebutuhan energi harian sebesar 505,8 kWh.	Melakukan studi kelayakan teknis dan ekonomis instalasi solar rooftop on-grid di Gedung Teknik Mesin Polinema.	Daya rencana solar rooftop 442 kWh (65,6%). Dibutuhkan 169 panel monocrystalline 440 Wp dan 6 inverter 12 kVA. Produksi energi 101,6 MWh/tahun, performa sistem 84,64%. Modal awal Rp 1.281.440.000, NPV Rp 919.842.956, PI 1,72, dan PBP 11,18 tahun. Proyek dinyatakan layak.
6	Winardi, B., Nugroho, A., & Dolphina, E. (2019)	Perencanaan Dan Analisis Ekonomi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Terpusat Untuk Desa Mandiri	Menggunakan data beban harian sebesar 8,922 kWh untuk menentukan kapasitas solar array, baterai, charge controller, dan inverter. Analisis ekonomi dilakukan menggunakan metode NPW, ACF, B-CR, FW, dan PP dengan bantuan software MATLAB 2008a.	Menganalisis kebutuhan kapasitas sistem PLTS komunal di Kaliwungu serta potensi reduksi emisi CO ₂ dan kelayakan ekonominya.	Kapasitas sistem: 2,85 kWp (panel), 464,678 Ah (baterai), 60 A (controller), dan 4500 W (inverter). Potensi reduksi emisi CO₂ sebesar 4,64 ton. Hasil ekonomi: NPW = Rp - 266.451.000, ACF = Rp - 24.894.600, FW = Rp 714.064.000, B-CR = 0,4850, PP = 29 tahun → tidak layak secara ekonomi.

No	Penulis	Judul Penelitian	Metode	Tujuan	Hasil Penelitian
7	Ray, P. A. K., Wibowo, R. S., & Pamuji, F. A (2021)	Studi Kelayakan Pemasangan PLTS 80 KW pada Sistem Kelistrikan PT. Indonesia Kendaraan Terminal	Perencanaan sistem PLTS dengan 195 panel surya. Analisis ekonomi teknik dilakukan untuk mengevaluasi kelayakan investasi, menggunakan parameter NPV dan IRR.	Menganalisis kelayakan investasi dan alternatif penerapan PLTS di PT. Indonesia Kendaraan Terminal untuk efisiensi energi di sektor industri besar.	Sistem menghasilkan 89,84 MWh/tahun dengan penghematan Rp 110.051.417,00. Alternatif terbaik memberikan NPV sebesar Rp 81.446.406 dan IRR sebesar 0,54%. Proyek dinyatakan layak untuk dijalankan.
8	Effendy, M. et al. (2024)	Studi Kelayakan Teknis dan Ekonomi Pembangkit Listrik Tenaga Surya Rooftop di Hotel Rayz Universitas Muhammadiyah Malang	Studi kelayakan dengan memanfaatkan atap seluas 267,2 m ² untuk instalasi PLTS. Kapasitas yang direkomendasikan sebesar 47,4 kWp. Analisis teknis menggunakan indikator ACEGE dan Performance Ratio (PR), sedangkan analisis ekonomi menggunakan NPV, BCR, dan PP.	Menganalisis kelayakan teknis dan ekonomi penggunaan PLTS atap on-grid sebagai sumber energi listrik di Hotel Rayz-UMM.	Energi tahunan yang dihasilkan 55.441 kWh. ACEGE sebesar 10,8%, PR sebesar 60,1%. NPV = -Rp 149.199.260,7 (negatif), BCR = 1,8, PP = 14,65 tahun. Secara teknis dan ekonomi, proyek belum layak untuk dibangun.

No	Penulis	Judul Penelitian	Metode	Tujuan	Hasil Penelitian
9	Aristia, G. B. D., Giriantari, I. A. D., & Sukerayasa, I. W. (2024)	Kajian Ekonomi Pemanfaatan PLTS Atap di Gedung Rumah Jabatan Gubernur Provinsi Bali	Perencanaan dan perancangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) atap dengan menggunakan 4 skenario desain, termasuk perhitungan kapasitas, orientasi atap, dan analisis ekonomi investasi.	Mendesain sistem PLTS atap di Gedung Rumah Jabatan Gubernur Provinsi Bali serta mengevaluasi skenario yang paling layak dari sisi teknis dan ekonomis untuk mendukung target NZE 2060 di Indonesia.	Desain skenario 2, yaitu pemanfaatan atap hanya untuk memenuhi beban puncak gedung, memiliki kelayakan ekonomi terbaik: NPV sebesar Rp 158.771.001, PI sebesar 1,42, dan DPP selama 10,7 tahun.
10	Hidayat, M. W. et al. (2024)	Analisis Tekno Ekonomi Pemasangan PLTS Rooftop On Grid 120 Kw (Studi Kasus PLTS di PT Santinilestari Energi Indonesia	Kuantitatif prediktif dengan menggunakan data perolehan energi tahun pertama (2020), serta memperhitungkan degradasi panel 0,5% per tahun untuk estimasi masa hidup proyek.	Melakukan analisis techno-ekonomi pemasangan PLTS Atap On Grid kapasitas 120 kW untuk menilai kelayakan investasi berdasarkan parameter finansial (NPV, IRR, PI, DPP)	NPV: Rp 457.542.400,57; IRR: 8,17% (> MARR 4,75%); PI: 1,42; DPP: tahun ke-17. Menunjukkan bahwa investasi rooftop PLTS 120 kW layak secara ekonomi.

2.8 Research Gap

Berbagai penelitian sebelumnya telah membahas kelayakan penerapan sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) dari sisi teknis maupun ekonomi, terutama pada sektor industri, pendidikan, hotel, dan wilayah terpencil. Penelitian-penelitian tersebut banyak menggunakan parameter ekonomi seperti Net Present Value (NPV), Benefit-Cost Ratio (BCR), Payback Period (PBP), dan Internal Rate of Return (IRR), serta perangkat simulasi seperti HOMER, PVsyst, dan Helioscope. Namun demikian, belum ditemukan penelitian yang secara spesifik meneliti kelayakan PLTS untuk bangunan kantor operasional tambang seperti yang terdapat di Tambang Quarry XYZ, Kabupaten Semarang. Selain itu, penggunaan simulasi Helioscope pada penelitian sebelumnya masih terbatas pada pabrik atau bangunan berskala besar, bukan untuk kantor skala menengah di area dengan vegetasi dan topografi pegunungan. Penelitian ini mengisi celah tersebut dengan menganalisis aspek teknis dan ekonomi pemasangan PLTS di kantor tambang menggunakan simulasi Helioscope, disesuaikan dengan intensitas radiasi matahari di wilayah Ungaran. Fokus penelitian ini juga menekankan sudut pandang manajerial dalam pengambilan keputusan investasi energi terbarukan pada fasilitas pendukung tambang.

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Bentuk Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif deskriptif dengan pendekatan

