

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU SUMSEL-8)

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU SUMSEL-8) merupakan jenis pembangkit listrik yang memanfaatkan energi panas dari pembakaran bahan bakar fosil, adapun bahan bakar fosil yang paling banyak digunakan yaitu batu bara (Praevia and Widayat, 2022). Batu bara yang dibakar untuk memanaskan air didalam boiler akan menghasilkan uap dan uap tersebut digunakan untuk menggerakkan turbin uap yang kemudian menghasilkan listrik. Secara umum, proses kerja PLTU SUMSEL-8 terdiri dari empat tahap utama: pembakaran bahan bakar, pengubahan air menjadi uap, penggerakan turbin oleh uap, dan konversi energi mekanik menjadi energi listrik menggunakan generator (Febriani *et al.*, 2024). PLTU SUMSEL-8 sering digunakan karena mampu menghasilkan daya listrik dalam jumlah besar dan stabil, sehingga cocok untuk memenuhi kebutuhan dasar (*base load*) sistem tenaga listrik. Namun, penggunaan batu bara sebagai bahan bakar utama menimbulkan beberapa dampak negatif, terutama emisi gas rumah kaca (GRK) seperti karbon dioksida (CO₂), sulfur dioksida (SO₂), dan nitrogen oksida (NO_x), yang berkontribusi terhadap perubahan iklim dan pencemaran udara (Febriani *et al.*, 2024).

2.2 Energi Baru Terbarukan

Energi Baru Terbarukan (EBT) adalah sumber energi yang berasal dari proses alam yang berkelanjutan dan tidak akan habis jika dikelola dengan benar (Ahsan, 2021). Di Indonesia, istilah ini mengacu pada beragam sumber energi yang terbarukan atau dapat diperbarui terus-menerus, seperti tenaga surya, angin, air (hidro), bioenergi (biomassa, biogas), panas bumi (geothermal), maupun energi laut (gelombang, pasang surut).

Sesuai dengan Peraturan Pemerintah Nomor 79 Tahun 2014 mengenai Kebijakan Energi Nasional, ditetapkan bahwa target penggunaan bauran energi baru dan terbarukan (EBT) di Indonesia pada tahun 2025 adalah minimal 23%. Sumber EBT yang dapat dimanfaatkan untuk mencapai target bauran energi tersebut mencakup energi panas bumi, energi angin, bioenergi, energi surya, energi dari aliran dan terjunan air, energi gerakan, serta perbedaan

suhu lapisan laut. Selain itu, juga termasuk teknologi baru untuk sumber energi tidak terbarukan seperti nuklir, hidrogen, gas metana dari batu bara (*coal bed methane*), batu bara tercairkan (*liquified coal*), dan batu bara tergaskan (*gasified coal*). Secara keseluruhan, rasio antara potensi dan pemanfaatan energi terbarukan (EBT) di Indonesia hingga tahun 2022 dapat dilihat pada Gambar 2.1 berikut



Gambar 2.1 Potensi Pemanfaatan Energi Terbarukan Indonesia
(Sumber Kementerian ESDM, 2022)

2.3 Potensi Energi Matahari di Indonesia

Energi Matahari adalah energi yang berasal dari radiasi sinar matahari dan dapat dimanfaatkan untuk berbagai keperluan, terutama sebagai sumber energi listrik melalui teknologi fotovoltaik (panel surya) dan energi panas melalui sistem termal (Alamsyah, dkk, 2019). Energi ini merupakan salah satu sumber Energi Baru Terbarukan (EBT) yang paling potensial karena tersedia melimpah dan ramah lingkungan. Dalam kondisi cuaca yang cerah, permukaan bumi dapat menerima sekitar 1.000 watt energi matahari per meter persegi. Secara umum, energi matahari dapat dimanfaatkan secara langsung dalam bentuk panas (energi termal) maupun sebagai listrik (fotovoltaik). Energi matahari dapat diubah menjadi energi listrik yang dapat digunakan untuk mengoperasikan berbagai perangkat elektronik, seperti menyalakan lampu, menggerakkan motor, dan lain-lain (Lubis, dkk, 2022). Energi surya memiliki beberapa keunggulan, di antaranya adalah ketersediaannya yang melimpah, dampak lingkungan yang minimal, kesesuaian untuk berbagai kondisi geografis, serta kemudahan dalam instalasi, pengoperasian, dan perawatan. Selain itu, energi listrik yang dihasilkan dari sumber ini dapat disimpan dalam baterai.

Menurut data dari Rencana Umum Energi Nasional (RUEN), potensi pembangkitan energi surya di Indonesia diperkirakan dapat mencapai 207,89 GW dengan intensitas sebesar 4,80 kWh/m²/hari.

10 Provinsi dengan Potensi Teknis Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Terbesar di Indonesia

Dengan skenario
kemungkinan lahan paling
optimal

Potensi Pembangkitan
(TWh/tahun)

Kalimantan Barat	2.948
Kalimantan Timur	2.096
Kalimantan Tengah	1.877
Riau	1.557
Sumatera Utara	1.509
Sumatera Selatan	1.495
Sulawesi	1.398
Jawa Timur	1.362
Papua	955
Jawa Barat	946



Gambar 2.2 Provinsi Dengan Potensi Teknis PLTS
(Sumber : *Institute for Essential Services Reform*, 2021)

Data yang disajikan oleh *Global Environmental Institute* dan *IESR (Institute for Essential Services Reform)* ini menyoroti bahwa Kalimantan Barat memiliki potensi terbesar dengan kapasitas teknis mencapai 2.203 GWp dan potensi pembangkitan listrik sebesar 2.948 TWh/tahun. Selain itu, Kalimantan Timur dan Kalimantan Tengah juga memiliki potensi besar masing-masing sebesar 2.096 TWh/tahun dan 1.807 TWh/tahun. Hal ini menunjukkan bahwa Kalimantan memiliki peluang besar untuk pengembangan PLTS karena luas wilayahnya memungkinkan penggunaan lahan yang optimal. Selain Kalimantan, beberapa provinsi di Sumatera juga memiliki potensi signifikan, seperti Riau (1.557 TWh/tahun), Sumatera Utara (1.509 TWh/tahun), dan Sumatera Selatan (1.495 TWh/tahun). Sementara itu, di Pulau Jawa, Jawa Timur dan Jawa Barat masing-masing memiliki potensi sebesar 1.362 TWh/tahun dan 946 TWh/tahun, yang tetap penting mengingat kebutuhan energi di Pulau Jawa sangat tinggi. Papua juga memiliki potensi besar dengan kapasitas teknis mencapai 955 TWh/tahun, menunjukkan peluang pengembangan PLTS yang signifikan di wilayah timur Indonesia.

Secara keseluruhan, distribusi potensi PLTS di Indonesia menunjukkan dominasi Kalimantan dan Sumatera sebagai daerah dengan potensi energi surya terbesar. Pulau Kalimantan dengan tiga provinsi utamanya memiliki peluang besar untuk menjadi pusat pengembangan PLTS, sementara Sumatera juga berperan penting dalam pengembangan energi terbarukan. Pulau Jawa meskipun memiliki potensi lebih kecil, tetap menjadi wilayah strategis karena konsumsi listrik yang tinggi. Di sisi lain, Papua menunjukkan potensi besar

yang dapat dimanfaatkan untuk meningkatkan elektrifikasi di wilayah timur. Dengan potensi energi surya yang sangat besar, Indonesia memiliki peluang besar untuk melakukan transisi energi dari bahan bakar fosil ke energi terbarukan. Pengembangan PLTS di daerah dengan potensi tinggi dapat berkontribusi dalam meningkatkan akses listrik di daerah terpencil serta mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil (Supriyatna, 2024). Oleh karena itu, diperlukan dukungan kebijakan, investasi, dan infrastruktur yang memadai untuk memaksimalkan pemanfaatan energi matahari dan mewujudkan ketahanan energi nasional berbasis energi terbarukan.

2.4 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) adalah sistem pembangkit listrik yang memanfaatkan energi matahari sebagai sumber utama untuk menghasilkan listrik (Jaka Windarta, *et al.*, 2021) PLTS bekerja dengan menggunakan panel surya (solar panel) yang menangkap radiasi sinar matahari dan mengubahnya menjadi energi listrik melalui proses fotovoltaik. Energi listrik yang dihasilkan kemudian dapat digunakan secara langsung atau disimpan dalam baterai untuk digunakan saat matahari tidak bersinar. Menurut (Ardiansyah, dkk, 2022) PLTS dibagi menjadi beberapa jenis diantaranya adalah sebagai berikut :

1. *PLTS Off-Grid*

Sistem yang berdiri sendiri tanpa terhubung ke jaringan listrik nasional (PLN). Umumnya digunakan di daerah terpencil atau yang belum terjangkau jaringan listrik. Penggunaannya memerlukan sistem penyimpanan energi, seperti baterai, untuk memastikan pasokan listrik tetap tersedia saat malam hari atau saat cuaca mendung.



Gambar 2.3 PLTS Off-Grid (Sumber : atonergi.com/2025)

2. PLTS *On-Grid*

Terhubung langsung dengan jaringan listrik PLN. Listrik yang dihasilkan dapat digunakan untuk kebutuhan sendiri, dan kelebihan listrik bisa dijual kembali ke PLN (sistem *net metering*) (Hasnul, dkk, 2024). Tidak memerlukan baterai karena bisa menggunakan listrik dari jaringan PLN ketika produksi energi surya tidak mencukupi.



Gambar 2.4 PLTS *ON-Grid* (Sumber : atonergi.com/2025)

3. PLTS *Hybrid*

Kombinasi antara PLTS *off-grid* dan *on-grid*, yang dapat terhubung dengan jaringan listrik PLN sekaligus memiliki sistem penyimpanan energi (baterai). Memungkinkan penggunaan listrik dari energi surya dan sumber lain secara bergantian untuk memastikan ketersediaan daya yang lebih stabil.



Gambar 2.5. PLTS *Hybrid* (Sumber : atonergi.com/2025)

Hambatan utama dalam pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) adalah tingginya biaya investasi per Watt daya yang dihasilkan, serta ketergantungan

pada impor beberapa bahan baku komponen PLTS, terutama sel surya (Octavia *et al.*, 2023). Oleh karena itu, pengembangan industri sel surya lokal menjadi sangat penting untuk kemajuan PLTS di masa depan. Selain itu, kebijakan tarif pembelian listrik yang menarik bagi para investor juga merupakan faktor krusial dalam mendorong pertumbuhan investasi swasta dalam pembangunan PLTS. Menurut Permana, dkk (2023), beberapa keunggulan PLTS antara lain:

1. Energi matahari dapat ditemukan di berbagai lokasi di permukaan bumi dengan ketersediaan yang melimpah, sehingga tidak pernah menimbulkan konflik sosial terkait pemanfaatan sumber energi ini;
2. Teknologi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) memiliki tingkat pemahaman yang tinggi di kalangan masyarakat umum, dapat dipasang oleh tenaga kerja lokal, serta dapat dioperasikan oleh pengguna dengan perawatan yang minimal dan bersifat lokal;
3. Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) memiliki dampak positif terhadap lingkungan, karena tidak menghasilkan emisi gas, beroperasi dengan tingkat kebisingan yang rendah, berfungsi pada suhu ruangan, serta tidak menimbulkan risiko bencana bagi keselamatan manusia maupun lingkungan;
4. Perangkat Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) kini telah banyak tersedia di pasaran dengan berbagai pilihan daya, harga, dan kualitas.

2.5 Kebijakan & Peraturan Pengembangan PLTS

Indonesia telah mengimplementasikan sejumlah kebijakan untuk mendukung peralihan menuju energi hijau, di antaranya melalui Rencana Umum Energi Nasional (RUEN). Rencana ini bertujuan untuk mencapai target proporsi energi terbarukan sebesar 23% pada tahun 2025. Selain itu, pemerintah juga telah mengeluarkan berbagai regulasi untuk mendorong pengembangan energi terbarukan, termasuk Peraturan Presiden No. 22 Tahun 2017 mengenai RUEN, yang menetapkan komposisi energi dan mendorong pemanfaatan energi terbarukan.

Peraturan Menteri ESDM No. 49 Tahun 2018 mengenai pemanfaatan PLTS atap bertujuan untuk memberikan kemudahan bagi masyarakat, industri, dan sektor komersial dalam memanfaatkan energi surya sebagai sumber energi alternatif. Selain itu, terdapat

kebijakan lain yang mendukung peralihan menuju energi hijau, yaitu peluncuran Grand Strategi Energi Nasional (GSEN) yang menekankan pada diversifikasi sumber energi dan upaya mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil. Rencana Umum Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) 2021-2030 juga menjadi bagian penting dari kebijakan ini, dengan fokus pada pengembangan energi terbarukan dan pengurangan penggunaan batubara, termasuk di dalamnya energi surya.

2.6 Kajian Teknis PLTS

Pembangkit Listrik Tenaga Surya, menjadi salah satu pembangkit energi alternatif yang ramah lingkungan. Dalam perencanaannya PLTS dapat dihitung kapasitasnya melalui inisialisasi dari kebutuhan beban, inisialisasi dari besaran biaya investasi, inisialisasi dari tujuan pemasangan, atau besaran dari area yang akan dipasang. Dalam Thesis ini, studi penentuan kapasitas panel surya yang digunakan didasarkan pada area luasan dalam instalasi panel yang dipasang. Pemasangan PLTS dilakukan di area parkir mobil listrik sebagai bentuk pemanfaatan penggunaan PLTS untuk proses pengisian mobil listrik.

Pemilihan jenis panel surya sangat mempengaruhi efisiensi dan kinerja sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). *Monocrystalline* lebih sering dipilih dibandingkan *polycrystalline* karena memiliki efisiensi yang lebih tinggi, biasanya mencapai 18-22%, sedangkan *polycrystalline* hanya sekitar 15-18%. Efisiensi yang lebih tinggi memungkinkan *monocrystalline* menghasilkan lebih banyak energi dalam luas area yang lebih kecil, sehingga lebih cocok untuk lahan terbatas atau aplikasi dengan kebutuhan daya yang tinggi.

Selain itu, *monocrystalline* memiliki umur pakai yang lebih panjang dan tingkat degradasi yang lebih rendah dibandingkan *polycrystalline*. Struktur sel yang lebih murni pada *monocrystalline* memungkinkan daya tahannya lebih baik terhadap suhu tinggi, sehingga kinerjanya lebih stabil di berbagai kondisi cuaca. Meskipun harga *monocrystalline* umumnya lebih mahal, investasi ini seringkali lebih menguntungkan dalam jangka panjang karena menghasilkan lebih banyak listrik dengan lahan yang lebih kecil dan umur operasional yang lebih panjang.

Dengan keunggulan dalam efisiensi, ketahanan, dan stabilitas kinerja, *monocrystalline* menjadi pilihan utama untuk proyek PLTS yang membutuhkan kapasitas daya tinggi dengan

ruang terbatas serta pengembalian investasi yang lebih optimal. Dalam melakukan perencanaan, dapat dilakukan estimasi produksi listrik yang dihasilkan dengan menghitung total energi listrik yang dihasilkan sistem PLTS selama periode satu tahun dengan menggunakan rumus berikut (Hernández & Baier, 2021) :

$$E = A \times r \times H \times PR \quad (2.1)$$

Keterangan :

E = Energi listrik yang dihasilkan (Kwh)

A = Luas total panel surya (m²)

r = Efisiensi panel surya (%)

H = Intensitas radiasi matahari rata-rata harian (kWh/m²/hari)

PR = *Performance ratio*

Dari perhitungan tersebut dapat diketahui nilai minimum dari daya yang dihasilkan dari pemasangan PLTS di area parkir. Kemudian dapat dihitung untuk kebutuhan sistem penyimpanan energi yang diperlukan agar sistem dapat beroperasi secara optimal dalam kondisi *off-grid*. Kapasitas pada sistem penyimpanan dapat dihitung dengan menggunakan rumus berikut (Mohanty et al., 2021):

$$E_{\text{baterai}} = E_{\text{harian}} \times \text{Cadangan Hari} \quad (2.2)$$

Jika menggunakan baterai dengan tegangan 48V dan *Depth of Discharge* (DoD) 80%, maka kapasitas baterai dalam Ah (*Ampere-hour*) (Bertolini et al., 2024):

$$\text{Kapasitas Baterai (Ah)} = \frac{E_{\text{baterai}}}{\text{Tegangan} \times \text{DoD}} \quad (2.3)$$

Dari hasil perhitungan berikut nantinya akan dibandingkan dengan data hasil simulasi menggunakan perangkat lunak Helioscope dan HOMER. Dalam studi yang dilakukan juga akan menghitung kajian ekonomi dan lingkungan dari pemasangan PLTS di area parkir tersebut.

2.7 Aspek Ekonomi PLTS

Pemasangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *off grid* menawarkan sejumlah keuntungan ekonomi, meskipun investasi awal yang tinggi sering menjadi hambatan utama bagi banyak pengguna. Namun, dalam jangka panjang, penggunaan PLTS dapat mengurangi biaya energi dan memberikan potensi penghematan yang signifikan.

2.7.1 Biaya Investasi Awal PLTS

Penelitian yang dilakukan oleh Fauzi, dkk (2024) menunjukkan bahwa meskipun biaya modul surya dan inverter telah mengalami penurunan, total biaya investasi untuk sistem PLTS off-grid tetap tinggi, terutama karena kebutuhan penyimpanan energi dalam baterai. Dalam studi mereka mengenai proyek PLTS atap off-grid, ditemukan bahwa baterai berkualitas tinggi sangat penting untuk memastikan pasokan listrik yang stabil, tetapi biaya investasi yang mahal menjadi hambatan utama bagi masyarakat di daerah terpencil yang ingin beralih ke energi surya.

Sementara itu, penelitian yang dilakukan oleh Hayusman and Saputera (2022) mengenai perencanaan sistem PLTS off-grid menyoroti bahwa meskipun harga panel surya semakin terjangkau, total biaya investasi yang mencakup panel surya, inverter, dan baterai tetap cukup tinggi. Biaya ini dapat mencapai puluhan juta rupiah per kWp untuk kebutuhan rumah tangga. Meskipun sistem ini dapat mengurangi biaya operasional dalam jangka panjang, biaya awal yang tinggi sering kali menjadi faktor utama dalam keputusan investasi, terutama di daerah dengan pendapatan rendah atau akses pembiayaan yang terbatas.

Untuk mengevaluasi kelayakan finansial dari sistem PLTS off-grid, penelitian oleh Abbas and Sardju (2022) menyarankan pendekatan analisis ekonomi dengan menghitung selisih antara total manfaat ekonomi yang diperoleh dari sistem PLTS dengan total biaya investasinya. Hal ini bertujuan untuk menilai apakah investasi tersebut layak secara ekonomi dalam jangka panjang, dengan total biaya investasi dan operasional yang dikeluarkan atau biasa disebut *Net Present Value* (NPV). Jika $NPV > 0$, maka investasi dianggap layak. Nilai tersebut dapat dihitung menggunakan persamaan berikut (Sari et al., 2023) :

$$NPV = \sum \frac{(B_t - C_t)}{(1+r)^t} \quad (2.4)$$

Keterangan :

Bt = Manfaat atau benefit pada tahun ke-t

C_t = Biaya pada tahun ke-t

R = Tingkat diskonto

T = Tahun ke-t

Selain itu, Kharisma, Pinandita and Jayanti (2024) dalam studi mereka mengenai biaya PLTS di kawasan Asia Tenggara menyebutkan bahwa biaya awal investasi yang tinggi sering kali membuat banyak konsumen lebih memilih untuk tetap bergantung pada sumber energi konvensional, seperti generator diesel atau pembangkit listrik berbasis fosil. Meskipun penggunaan energi surya *off grid* dapat menghasilkan penghematan dalam jangka panjang, tingginya biaya modal awal membuat teknologi ini kurang menarik bagi sebagian besar rumah tangga yang memiliki anggaran terbatas.

2.7.2 Biaya Penghematan Energi PLTS

PLTS *off grid* dapat menghasilkan penghematan energi yang signifikan dalam jangka panjang. (Putra, 2021) dalam penelitiannya menunjukkan bahwa dengan menggunakan sistem PLTS *off grid*, rumah tangga dapat menghemat hingga 70% dari total biaya energi bulanan dibandingkan dengan menggunakan pembangkit listrik berbasis diesel atau listrik PLN di daerah terpencil. Dalam beberapa kasus, sistem PLTS dapat menghasilkan penghematan lebih besar apabila dikombinasikan dengan teknologi penyimpanan energi, seperti baterai, yang dapat mengurangi ketergantungan pada sumber energi konvensional. (Santosa, *et al*, 2022) berpendapat mengenai penerapan PLTS *off grid* pada skala komunitas di wilayah Indonesia Timur menunjukkan bahwa penggunaan PLTS untuk pemenuhan energi di desa-desa terpencil dapat menghasilkan penghematan biaya energi yang signifikan, hingga 50-60%. Komunitas yang sebelumnya bergantung pada generator diesel untuk penerangan dan pemenuhan kebutuhan energi lainnya, dapat menggantikan sistem tersebut dengan energi surya, yang jauh lebih murah dalam operasional jangka panjang. Dalam analisisnya dapat dilakukan perhitungan melalui perbandingan biaya energi atau *Levelized Cost of Electricity* (LCOE). Nilai LCOE dapat diperoleh melalui perhitungan biaya rata-rata produksi listrik per kWh dari sistem PLTS dibandingkan dengan harga listrik konvensional. LCOE dapat diperoleh melalui persamaan berikut (Veronese et al., 2021):

$$LCOE = \frac{\sum C_t}{\sum E_t} \quad (2.5)$$

Keterangan :

Ct = Total biaya (investasi, operasional, dan pemeliharaan)

Et = Total energi yang dihasilkan selama umur system

2.7.3 Biaya Operasional dan Pemeliharaan PLTS

Beberapa Penelitian mengungkapkan bahwa biaya operasional dan pemeliharaan untuk sistem PLTS *off grid* relatif rendah. Supriyono, dkk (2023) menunjukkan bahwa biaya pemeliharaan tahunan untuk sistem PLTS biasanya berkisar antara 1-2% dari biaya awal pemasangan, yang jauh lebih rendah dibandingkan dengan biaya pemeliharaan pembangkit listrik berbasis fosil yang membutuhkan bahan bakar dan perawatan mesin yang lebih sering. Oleh karena itu, sistem PLTS dapat menawarkan biaya operasional yang stabil dan tidak terpengaruh oleh fluktuasi harga bahan bakar fosil. Sistem PLTS *off grid* di China menunjukkan bahwa biaya pemeliharaan tahunan untuk sistem PLTS relatif rendah, berkisar antara 1-2% dari total biaya instalasi. Penelitian ini mencatat bahwa sistem PLTS *off grid* tidak memerlukan bahan bakar dan memiliki komponen yang relatif sedikit dibandingkan dengan pembangkit listrik berbasis mesin pembakaran, yang memerlukan perawatan rutin yang lebih intensif dan biaya bahan bakar yang tinggi. Panel surya hanya memerlukan pembersihan berkala dan pemeriksaan sistem inverter serta baterai untuk memastikan kinerja yang optimal (Syifai *et al.*, 2024).

Menurut Suryanti and Tobing (2024) dalam penelitian mereka tentang implementasi PLTS di daerah pedesaan, biaya pemeliharaan sistem PLTS *off grid* jauh lebih rendah daripada pembangkit berbasis diesel. Mereka menyatakan bahwa meskipun ada biaya awal yang tinggi, dalam jangka panjang PLTS *off grid* mengurangi pengeluaran untuk bahan bakar dan perawatan mesin yang memerlukan penggantian suku cadang secara rutin. Biaya pemeliharaan tahunan untuk sistem PLTS hanya mencakup penggantian komponen seperti baterai, yang umumnya memiliki umur 5 hingga 10 tahun, sedangkan pembangkit diesel memerlukan penggantian mesin, suku cadang, dan pengisian bahan bakar secara teratur.

Santosa, dkk (2022) yang mengkaji penerapan PLTS *off grid* di wilayah Indonesia Timur menunjukkan bahwa dengan perkembangan teknologi terbaru, biaya pemeliharaan sistem PLTS semakin berkurang. Penggunaan inverter dan baterai yang lebih efisien serta teknologi panel surya yang lebih tahan lama mengurangi frekuensi penggantian dan perawatan komponen, sehingga mengurangi biaya operasional. Sistem dengan teknologi terbaru juga

lebih efisien dalam menghasilkan energi, sehingga memperpanjang umur sistem dan mengurangi kebutuhan pemeliharaan secara keseluruhan.

2.8 Dampak PLTS Terhadap Lingkungan

Pemanfaatan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) memiliki dampak signifikan terhadap lingkungan, baik dari aspek positif maupun tantangan yang harus dikelola. Sebagai sumber energi baru terbarukan (EBT), PLTS dianggap sebagai solusi yang ramah lingkungan dibandingkan energi berbasis fosil (Maryadi, Tamalika and Mz, 2023). Analisa lingkungan yang dilakukan untuk menilai dampak positif yang dapat dilakukan melalui perhitungan dengan membandingkan energi yang dihasilkan oleh PLTS dengan konsumsi listrik dari sumber energi berbasis fosil. Persamaan yang digunakan adalah (Zhou et al., 2024):

$$\text{CO}_2 \text{ reduction} = E \times EF \quad (2.6)$$

Keterangan :

E = Energi yang dihasilkan PLTS (kWh)

EF = Emmision Factor dari pembangkit listrik berbasis fosil (kg CO₂/kWh)

Namun, meskipun memiliki berbagai manfaat lingkungan, implementasi PLTS juga menghadapi beberapa tantangan yang perlu diperhatikan. Beberapa dampak positif PLTS terhadap lingkungan menurut Naim (2022) diantaranya adalah sebagai berikut :

1. Mengurangi Emisi Gas Rumah Kaca (GRK)

PLTS tidak menghasilkan emisi karbon selama operasionalnya. Berbeda dengan pembangkit listrik berbahan bakar fosil seperti batu bara atau minyak bumi yang menghasilkan karbon dioksida (CO₂), sulfur dioksida (SO₂), dan nitrogen oksida (NO_x), penggunaan PLTS dapat mengurangi jejak karbon dan membantu mitigasi perubahan iklim.

2. Mengurangi Ketergantungan pada Energi Fosil

Dengan memanfaatkan energi matahari, PLTS mengurangi kebutuhan eksploitasi sumber daya fosil yang tidak terbarukan, seperti batu bara, gas alam, dan minyak bumi. Hal ini tidak hanya memperpanjang umur cadangan energi bumi, tetapi juga mengurangi

dampak negatif dari proses ekstraksi bahan bakar fosil, seperti deforestasi, pencemaran air, dan degradasi lahan.

3. Tidak Menyebabkan Polusi Udara dan Air

PLTS tidak menghasilkan polusi udara yang dapat mempengaruhi kesehatan manusia dan ekosistem. Selain itu, tidak seperti pembangkit listrik tenaga uap yang membutuhkan banyak air untuk proses pendinginan, PLTS tidak memerlukan air dalam jumlah besar, sehingga lebih ramah terhadap sumber daya air.

4. Meminimalisir Dampak Kerusakan Ekosistem

PLTS tidak membutuhkan eksploitasi lahan dalam skala besar seperti pertambangan batu bara atau pengeboran minyak bumi. Jika dipasang di atap bangunan atau area yang sudah dikembangkan, dampak terhadap ekosistem dapat diminimalkan. Hal ini menjadikan PLTS sebagai salah satu solusi energi yang lebih berkelanjutan.

2.9 Kajian Risiko PLTS

Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) memiliki berbagai risiko yang dapat mempengaruhi kinerja dan kelayakan investasi. Risiko utama dalam pengoperasian PLTS meliputi variabilitas radiasi matahari, degradasi panel surya, fluktuasi harga listrik, serta risiko teknis dan keuangan lainnya. Oleh karena itu, diperlukan analisis risiko untuk menilai ketidakpastian dan dampaknya terhadap produksi energi serta aspek ekonomi proyek.

2.9.1 Variabilitas Radiasi Matahari

Radiasi matahari yang tidak stabil akibat faktor cuaca dan musim dapat menyebabkan fluktuasi energi yang dihasilkan oleh PLTS. Untuk menganalisis dampak variabilitas ini, dapat digunakan distribusi probabilitas berdasarkan data historis *Global Horizontal Irradiance* (GHI) (Sianturi, 2021). Energi listrik yang dihasilkan PLTS per hari dapat dihitung menggunakan persamaan berikut (Gueymard & Wilcox, 2023):

$$E = GHI \times A \times \eta \quad (2.7)$$

Dimana:

- E = energi listrik yang dihasilkan (kWh)
- *Global Horizontal Irradiance* (GHI)= radiasi matahari rata-rata (kWh/m²)

- A = luas panel surya (m^2)
- η = efisiensi sistem (%)

Simulasi Monte Carlo sering digunakan dalam software HOMER untuk mensimulasikan skenario terburuk akibat penurunan radiasi hingga 20% dari nilai rata-rata, seperti yang dikaji oleh (Syifai *et al.*, 2024).

2.9.2 Degradasi Panel Surya

Seiring waktu, panel surya mengalami degradasi yang menyebabkan penurunan efisiensi konversi energi. Nilai degradasi rata-rata panel surya berkisar antara 0,5% - 1% per tahun (Piliouline *et al.*, 2021). Penurunan produksi energi akibat degradasi dapat dihitung sebagai berikut (Alafnan, 2024) :

$$E_{tahun,t} = E_{tahun,0} \times (1 - d)^t \quad (2.8)$$

Dengan:

- $E_{tahun,t}$ = energi yang dihasilkan pada tahun ke- t (kWh),
- $E_{tahun,0}$ = energi pada tahun pertama operasi (kWh),
- d = tingkat degradasi panel per tahun (%),
- t = umur operasional panel (tahun).

2.10 HelioScope – Kajian Aspek Teknis

HelioScope digunakan untuk pemodelan tata letak panel surya dengan integrasi data geografis dan model 3D. Perangkat lunak ini melakukan perhitungan produksi energi dengan mempertimbangkan sudut kemiringan, orientasi, dan pengaruh shading terhadap sistem. Analisis teknis dilakukan dengan simulasi berbasis cloud untuk mempercepat proses evaluasi kinerja sistem PLTS. HelioScope juga memungkinkan optimasi desain dengan berbagai konfigurasi modul dan inverter untuk meningkatkan efisiensi sistem (Karuniawan, 2021).

A. Kelebihan:

- Antarmuka yang Intuitif – HelioScope memiliki tampilan yang user-friendly dengan fitur drag-and-drop, memudahkan pengguna dalam merancang sistem PV tanpa perlu pemahaman teknis yang mendalam.
- Simulasi Shading yang Akurat – Menggunakan algoritma canggih untuk menganalisis dampak bayangan dari objek di sekitar, yang sangat penting dalam optimasi desain PV.
- Perhitungan Losses yang Detail – Mempertimbangkan berbagai faktor seperti shading, resistansi kabel, dan inefisiensi inverter untuk menghasilkan estimasi produksi daya yang lebih akurat.
- Integrasi dengan Data Cuaca – Dapat mengimpor data cuaca dari berbagai sumber, seperti NASA POWER, untuk analisis yang lebih realistis.
- Kemudahan Kolaborasi – Sebagai software berbasis cloud, desain dan laporan dapat dibagikan dengan mudah kepada tim proyek.

B. Kekurangan:

- Berbasis Online – Membutuhkan koneksi internet yang stabil untuk mengakses dan menjalankan simulasi.
- Terbatas pada Sistem PV – Tidak mendukung simulasi sistem hibrida yang menggabungkan PV dengan sumber energi lain seperti turbin angin atau genset diesel.
- Model Finansial Sederhana – Tidak memiliki fitur analisis ekonomi yang mendalam seperti HOMER, sehingga kurang cocok untuk kajian kelayakan finansial jangka panjang.
- Berbayar dengan Biaya Langganan – Meskipun ada versi uji coba, akses penuh ke fitur-fitur canggih memerlukan biaya langganan bulanan/tahunan.

2.11 HOMER – Kajian Aspek Lingkungan, Ekonomi, dan Risiko

HOMER digunakan untuk menganalisis dampak lingkungan, aspek ekonomi, dan risiko dalam pengoperasian PLTS. Perangkat lunak ini dapat mengestimasi pengurangan emisi karbon akibat penggunaan energi terbarukan (Firdi, dkk, 2023). Dalam aspek ekonomi, HOMER melakukan analisis kelayakan finansial dengan menghitung biaya energi serta optimasi kapasitas sistem. Software ini juga memiliki fitur simulasi risiko menggunakan

metode Monte Carlo untuk mengevaluasi ketidakpastian sumber daya dan fluktuasi harga listrik. Dengan berbagai skenario yang dianalisis, HOMER membantu menentukan konfigurasi sistem yang paling optimal secara teknis, ekonomis dan risiko.

A. Kelebihan:

- Analisis Ekonomi yang Mendalam – HOMER menghitung berbagai indikator ekonomi seperti *Net Present Cost* (NPC), *Levelized Cost of Energy* (LCOE), dan *payback period* untuk mengevaluasi kelayakan proyek.
- Optimasi Sistem Hibrida – Dapat menganalisis kombinasi berbagai sumber energi (PV, angin, diesel, baterai, grid) untuk menemukan konfigurasi paling optimal dari segi biaya dan keandalan.
- valuasi Dampak Lingkungan – Menghitung emisi CO₂ dan dampak lingkungan dari berbagai skenario sistem energi, membantu dalam perencanaan yang lebih berkelanjutan.
- Fleksibilitas dalam Input Data – Dapat menerima data cuaca, harga bahan bakar, serta profil beban untuk memberikan simulasi yang lebih realistis sesuai dengan lokasi dan kondisi proyek.
- Dukungan untuk Berbagai Skenario Operasional – Mampu mensimulasikan berbagai strategi pengoperasian sistem, termasuk demand-side management dan strategi penyimpanan energi.
- Analisis Risiko Keandalan Sistem – Menggunakan metode simulasi Monte Carlo untuk mengevaluasi ketidakpastian sumber daya, degradasi komponen, serta fluktuasi harga listrik dan bahan bakar, sehingga dapat memitigasi risiko teknis dan finansial proyek PLTS.

B. Kekurangan:

- Kurva Pembelajaran yang Curam – Antarmuka yang lebih kompleks dibandingkan HelioScope, membutuhkan waktu untuk memahami parameter dan interpretasi hasil simulasi.
- Keterbatasan dalam Detail Teknikal PV – Tidak memiliki fitur simulasi shading dan optimasi tata letak panel PV seperti HelioScope.

- Memerlukan Data yang Akurat – Kualitas hasil analisis sangat bergantung pada kelengkapan dan akurasi input data, seperti harga bahan bakar, profil beban, dan biaya investasi.
- Berbayar untuk Versi Lengkap – Meskipun tersedia versi gratis dengan fitur terbatas, fitur analisis lanjutan memerlukan lisensi berbayar.
- Keterbatasan dalam Prediksi Risiko Jangka Panjang – Meskipun dapat mensimulasikan risiko operasional, ketidakpastian jangka panjang seperti perubahan kebijakan energi atau perkembangan teknologi tidak selalu dapat diprediksi secara akurat dalam model HOMER.

Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak HOMER Pro, yang merupakan tool berbasis optimasi dan analisis ekonomi untuk sistem energi terdistribusi. HOMER melakukan perhitungan berbasis time series dengan horizon waktu tahunan dan diskonto ke nilai saat ini (*present value*) berdasarkan asumsi *discount rate* dan *expected inflation rate*. Simulasi ini mempertimbangkan data teknis dari HelioScope sebagai profil input daya tahunan, serta data teknis dan ekonomis dari komponen-komponen utama seperti panel surya, inverter, dan baterai. Model HOMER juga memfasilitasi kalkulasi *replacement cost*, biaya O&M, serta pengaruh *excess energy* terhadap performa sistem.

Melalui pendekatan ini, dapat diperoleh indikator ekonomi yang menggambarkan kelayakan sistem secara kuantitatif. Misalnya, *Net Present Cost* memberikan informasi mengenai total biaya sistem selama masa pakai, LCOE menggambarkan biaya rata-rata produksi energi per kWh, sedangkan NPV dan IRR digunakan untuk menilai keuntungan finansial dibandingkan dengan nilai waktu uang (*time value of money*). Analisa ekonomi ini kemudian dijadikan dasar dalam pengambilan keputusan investasi serta perencanaan integrasi sistem energi terbarukan saat diimplementasikan.

