# BAB II
# TINJAUAN PUSTAKA

## 2.1. Penelitian yang Relevan

Didalam berbagai penelitian menunjukkan bahwa analisis keekonomian PLTS harus mengintegrasikan aspek teknis dan finansial untuk memperoleh efisiensi biaya listrik. Jamil et al. (2012), Kumar et al. (2018), Ibrik (2020), Imam et al. (2020), dan Gamonwet dan Dhakal (2023) menjelaskan bahwa desain sistem, kapasitas, produksi energi, serta karakteristik beban sangat memengaruhi penghematan listrik dan kelayakan investasi. Evaluasi ekonomi umumnya menggunakan indikator Payback Period, Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), dan Return on Investment (ROI) (Murnawati, 2016; Hasibuan, 2020; Shou, 2022; Maulita & Arifin, 2018). Selain itu, kinerja, degradasi modul, operasi dan pemeliharaan, serta nilai Levelized Cost of Electricity (LCOE) turut menentukan manfaat ekonomi PLTS dalam jangka panjang.

*Research gap* penelitian ini terletak pada integrasi dua perspektif dalam model solar rental with zero upfront cost. Kajian terdahulu belum secara spesifik menghubungkan penghematan pelanggan yang tidak menanggung CAPEX awal dengan kelayakan arus kas investor yang membiayai, memiliki, mengoperasikan, dan memelihara aset PLTS. Oleh karena itu, penelitian ini menilai manfaat PT Paman Persada sebagai pengguna energi sekaligus kelayakan PT Xurya sebagai investor dalam skema harga energi PLTS sebesar 90% dari tarif PLN.

Putra dan Prabowo (2025) menggunakan NPV, IRR, dan Payback Period untuk menilai kelayakan PLTS apung; Arif et al. (2025) mengevaluasi kinerja fotovoltaik hibrida; Rendroyoko et al. (2024) mengintegrasikan optimasi operasi dan kelayakan finansial microgrid; Pramono et al. (2020) membahas pemanfaatan PLTS pada gedung bertingkat; dan Arifin dan Fitri (2023) mengkaji BESS untuk menurunkan biaya produksi sistem. Selain itu, Diantari et al. (2024a) menganalisis kinerja inverter PLTS on-grid, Diantari et al. (2024b) menunjukkan penggunaan metering ekspor-impor dan penghematan tagihan pada PLTS on-grid laboratorium ITPLN, sedangkan Siregar et al. (2017) mengembangkan sistem monitoring kinerja

panel surya berbasis Arduino Uno. Meskipun relevan secara teknis dan ekonomi, publikasi tersebut belum membahas pembagian manfaat pelanggan-investor pada PLTS rental tanpa biaya awal *(Solar Rental with Zero Upfront Cost)*

Tabel 1. Penelitian yang Relevan

| Judul Penelitian | Peneliti | Tahun |
|---|---|---|
| Techno-Economic Feasibility Analysis of Solar Photovoltaic Power Generation: A Review | Jamil, Majid; Kirmani, Sheeraz; Rizwan, Mohammad | 2012 |
| Analisis Payback Period Sebagai Dasar Kelayakan Investasi | Murnawati | 2016 |
| Sistem Monitoring Kinerja Panel Listrik Tenaga Surya Menggunakan Arduino Uno | Siregar, R. R. A., Wardana, N., & Luqman | 2017 |
| PENGARUH RETURN ON INVESTMENT (ROI) DAN EARNING PER SHARE (EPS) TERHADAP RETURN SAHAM SYARIAH (Studi Kasus Pada Perusahaan Manufaktur Sub Sektor Makanan dan Minuman Yang Terdaftar Pada Indeks Saham Syariah Indonesia Periode 2012-2016) | Dian Maulita, Muhammad Arifin | 2018 |
| On-Grid Solar Photovoltaic System: Components, Design Considerations, and Case Study | Kumar, Nallapaneni Manoj; Subathra, M. S. P; Moses, J. Edwin | 2018 |
| Techno-economic feasibility assessment of grid-connected PV systems for residential buildings in Saudi Arabia-A case study | Imam, Amir A.; Al-Turki, Yusuf A.; Sreerama Kumar, R. | 2020 |
| Techno-Economic Assessment of On-Grid Solar Pv System In Palestine | Ibrik I | 2020 |
| Pemanfaatan Pembangkit Listrik Tenaga Surya pada Gedung Bertingkat | Pramono, T. J., Erlina, Arifin, Z., & Saragih, J. | 2020 |
| NPV vs IRR: | Daniel Hasibuan | 2020 |

| | | |
|---|---|---|
| Mana yang Harus Digunakan Dalam Mengukur Kelayakan Bisnis | | |
| Solar Levelized Cost of Energy Projection in Indonesia | **Arifin,** Z., Setiawan, A., Supriyono, E., & Triyono, N. A. | 2021 |
| Visual degradation and performance evaluation of utility scale solar photovoltaic power plant in hot and dry climate in western India | Neha Bansal et al. | 2021 |
| A Literature Review on the Net Present Value (NPV) Valuation Method | Tianle Shou | 2022 |
| Performance Evaluation of 1.1 MW Grid-Connected Solar Photovoltaic Power Plant in Louisiana | Deepak Jain Veerendra Kumar et al. | 2022 |
| Influence of Electricity Consumption of Industrial and Business, Electricity Price, Inflation and Interest Rate on GDP and Investments in Indonesia | Adi, T. W., **Prabowo, E**., & Prasadjaningsih, O. | 2022 |
| Performance Ratio Analysis Based on Energy Production for Large-Scale Solar Plant | Irfan Jamil et al. | 2022 |
| A Double-Layer Optimization Maintenance Strategy for Photovoltaic Power Generation Systems Considering Component Correlation and Availability | Li Xubin et al. | 2022 |
| Long-term outdoor performance and degradation evaluation of CIS PV plant under the semi-arid climate of Benguerir Morocco | Said Elhamaoui et al. | 2023 |
| Performance evaluation of solar power plants for excess energy based on energy production | Irfan Jamil et al. | 2023 |
| Implementation of Battery Energy Storage System at Cirata PV Solar Floating for | **Arifin, Z.**, & Fitri, L. | 2023 |

| | | |
|---|---|---|
| Reducing the Electricity Cost Production on Jamali Grid | | |
| Comparative techno-economic assessment and minimization of the levelized cost of electricity for increasing capacity wind power plants by row and angle layout optimization | Ali J. Sultan et al. | 2023 |
| The assessment of the value of electricity saving and economic benefit to residential solar rooftop PV customer: The case of Thailand | Gamonwet, P., & Dhakal, S. | 2023 |
| Photovoltaic systems operation and maintenance: A review and future directions | Abdulla Hind et al. | 2024 |
| Integration of Solar Photovoltaic Plant in the Eastern Sumba Microgrid Using Unit Commitment Optimization | **Rendroyoko,** I., Sinisuka, N. I., Debusschere, V., Koesrindartoto, D. P., & Yasirroni, M. | 2024 |
| Performance and degradation assessment of two different solar PV cell technologies in the remote region of eastern India | Dipankar Pramanick, Jitendra Kumar | 2024 |
| Analysis Inverter of PLTS On Grid | Diantari, R. A., Suyanto, H., Erlina, & Hidayat, S. | 2024 |
| Power Energy Export Import Metering Performance System on PLTS On Grid in the Laboratory Renewable Energy Institute of Technology PLN | Diantari, R. A., Suyanto, H., Erlina, & Hidayat, S. | 2024 |
| Annual relative performance degradation in photovoltaic solar plants | Alberto Boretti, Stefania Castelletto | 2024 |
| Evaluasi Teknis Sistem Fotovoltaik Hibrida Off-Grid untuk Substitusi Daya Pemakaian Sendiri pada Instalasi WTP PLTU Malinau | Arif, M., **Prabowo,** E., & Nurdin, M. F. | 2025 |

| | | |
|---|---|---|
| Analisis Kelayakan Proyek Pembangunan Pusat Listrik Tenaga Surya (PLTS) Apung Tembesi 40 MWp di Sistem Kelistrikan Batam–Bintan | Putra, M. A., & **Prabowo, E.** | 2025 |
| Techno-Economic Analysis and Hybrid PV-Diesel Power Plant Design for the Dedieselization Program in Nusa Penida Island | Rifalda, R., Dwiyantoro, B. A., & Marbun, M. P. | 2026 |

## 2.2. Landasan Teori

### 2.2.1 Sistem Energi Terbarukan

Energi merupakan elemen kunci dalam pembangunan sosial-ekonomi di setiap negara. Bahkan, energi sangatlah esensial bagi masyarakat global untuk mewujudkan Tujuan Pembangunan Berkelanjutan yang ditetapkan oleh Perserikatan Bangsa-Bangsa (Afonaa-Mensah et al., 2024). Sumber energi dunia telah mengalami beberapa transformasi signifikan. Awalnya, mayoritas kebutuhan energi dipenuhi oleh biomassa seperti kayu bakar. Namun, dengan adanya revolusi industri pada tahun 1900-an, terjadi pergeseran besar menuju penggunaan bahan bakar fosil seperti batu bara, minyak, dan gas alam (Setyono & Kiono, 2021). Walaupun beberapa negara telah mencapai tingkat penetrasi energi terbarukan yang signifikan dalam pasokan listrik mereka dalam beberapa dekade terakhir, banyak negara dan sektor lain, seperti transportasi, masih berada pada tahap permulaan dalam adopsi energi terbarukan (Østergaard et al., 2020).

Ulasan yang dibuat oleh Østergaard et al., (2020) mengkaji potensi tenaga angin dan gelombang, teknologi energi angin, panas bumi, surya, dan gradien salinitas, serta dampak keberlanjutan dan sistem skala besar dari penggunaan energi terbarukan. Ulasan ini didasarkan pada penelitian yang dipresentasikan dalam seri konferensi tentang *Sustainable Development of Energy, Water and Environmental Systems* (SDEWES), yang diterbitkan dalam edisi khusus berbagai jurnal, dan menghubungkan penelitian tersebut dengan konteks yang lebih luas. Berikut ulasannya:

1. Ketersediaan Sumber Tenaga Angin dan Gelombang

Karena sumber daya angin di darat terbatas oleh faktor lanskap dan lingkungan sekitar, serta kebutuhan peningkatan signifikan yang diprediksi dalam berbagai skenario energi terbarukan yang tinggi, pengembangan kini beralih ke wilayah lepas pantai.

Beberapa penelitian dilakukan di berbagai belahan dunia tentang ketersediaan sumber tenaga angin dan gelombang. Berdasarkan analisis ulang data selama 17 tahun, (Rusu, 2019) mengevaluasi potensi energi gelombang dan angin di 10 lokasi Atlantik dari Portugal hingga Rusia di Eropa, serta 10 lokasi di lepas pantai Amerika Selatan. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa sumber daya tertinggi ditemukan di Irlandia dan *Tierra del Fuego*. Meskipun sistem tenaga gelombang memiliki faktor kapasitas yang jauh lebih rendah dibandingkan turbin angin, penelitian ini menyimpulkan bahwa sumber daya angin dan gelombang yang dapat diandalkan dapat dimanfaatkan untuk pengembangan sistem energi berkelanjutan di masa depan di kawasan pesisir Laut Hitam.

Chung et al., (2018) melakukan evaluasi ekonomi energi terbarukan untuk perencanaan yang berkelanjutan dan optimal dari sistem energi dalam konteks micro-grid, On Grid, dan on-grid di Korea. Kapasitas energi terbarukan, termasuk angin dan matahari, dihitung berdasarkan data meteorologi dari 28 stasiun di Korea. Selain itu, sel bahan bakar dan generator mesin diesel dipilih sebagai sumber daya utama, serta perangkat penyimpanan baterai dimasukkan untuk manajemen energi yang efisien. Analisis menunjukkan bahwa integrasi berbagai sumber energi dapat digunakan secara efektif untuk meningkatkan keberlanjutan sistem energi.

2. Teknologi Tenaga Angin

Angin terdapat di seluruh permukaan bumi, dan pemanfaatan energi kinetik dari angin yang berhembus untuk menghasilkan tenaga disebut sebagai energi angin (Basit et al., 2020). Menurut (Aso & Cheung, 2015; Bortolini et al., 2014) dalam (Basit et al., 2020), energi angin kini dianggap sebagai teknologi yang matang dan telah digunakan secara komersial untuk pembangkit listrik sejak tahun 1990-an di seluruh dunia. Tren penggunaan teknologi angin terus meningkat terutama di negara-negara yang kebutuhan energinya masih dipenuhi melalui pembakaran

bahan bakar fosil, menunjukkan potensi signifikan untuk peralihan ke sumber energi yang lebih berkelanjutan.

Terdapat dua jenis ladang angin berdasarkan lokasinya: ladang angin onshore (darat) dan offshore (lepas pantai). Ladang angin onshore biasanya ditempatkan di dekat stasiun jaringan di daratan atau pegunungan, terutama di wilayah pesisir, sedangkan ladang angin offshore dipasang jauh di tengah laut. Dalam beberapa tahun terakhir, teknologi ladang angin offshore semakin banyak diadopsi karena kecepatan angin yang lebih konsisten di lautan dalam.

3. Energi Geotermal

Energi panas bumi merujuk pada sumber energi yang secara alami tersimpan di dalam bumi. Cadangan energi panas bumi yang besar terdapat di antara kerak bumi dan inti dalam bentuk panas atau uap. Cadangan ini tidak tersebar merata, sering kali tidak terkonsentrasi, dan di beberapa lokasi berada pada kedalaman yang memungkinkan untuk dieksploitasi secara mekanis dengan pengeboran (Basit et al., 2020).

Energi panas bumi merupakan salah satu sumber energi yang paling menjanjikan untuk perencanaan energi berkelanjutan di masa depan. Penggunaannya telah diusulkan dalam berbagai sistem energi berkelanjutan di seluruh dunia, baik sebagai bagian dari siklus daya konvensional maupun untuk aplikasi suhu rendah dan sedang dalam pembangunan yang berkelanjutan. Selain menyediakan panas untuk sektor pertanian, perikanan, dan industri, energi panas bumi juga dapat dimanfaatkan untuk menyediakan pemanasan dan pendinginan melalui pompa panas sumber tanah (Østergaard et al., 2020).

Dalam Basit et al., (2020), survei yang dilakukan pada tahun 2017 memperkirakan energi panas bumi adalah 84,8 TWh. Kapasitas kumulatif telah mencapai 13,3 GW untuk pembangkit listrik tenaga panas bumi pada tahun 2018. Menurut data dari REN21 (2019), Indonesia dan Turki adalah kontributor terbesar dalam pembangkit listrik tenaga panas bumi, diikuti oleh Islandia dan Amerika Serikat. Hal tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.2 berikut.

Tabel 2. Penambahan dan Jumlah Kapasitas Energi Geotermal Negara di Dunia

| Negara | Ditambahkan pada 2018 | Jumlah di akhir 2018 |
|---|---|---|
| | MW | GW |
| Negara dengan penambahan (kapasitas) tertinggi | | |
| Turki | 219 | 1,28 |
| Indonesia | 140 | 1,95 |
| Amerika Serikat | 58 | 2,54 |
| Islandia | 45 | 0,75 |
| Kroasia | 18 | 1,03 |
| Filipina | 12 | 0,02 |
| Kenya | 11 | 1,93 |
| Negara dengan jumlah kapasitas tertinggi | | |
| Amerika Serikat | 58 | 2,54 |
| Indonesia | 140 | 1,95 |
| Filipina | 12 | 1,93 |
| Turki | 219 | 1,28 |
| Selandia Baru | 25 | 1,03 |
| Meksiko | - | 0,92 |
| Italia | - | 0,76 |
| Islandia | 45 | 0,75 |
| Kenya | 11 | 0,68 |
| Jepang | - | 0,53 |
| **Total di Dunia** | **527** | **13,3** |

Indonesia terus meningkatkan kapasitas energi panas buminya dengan penambahan sebesar 140 MW, melebihi Filipina dengan sedikit selisih untuk menduduki peringkat kedua secara global untuk kapasitas terpasang, dan mencapai total kapasitas operasional sebesar 1,95 GW pada akhir tahun 2018 (REN21, 2019).

4. Listrik Tenaga Surya

Ocon & Bertheau, (2019) dalam (Østergaard et al., 2020) menjelaskan tentang penelitiannya tentang peralihan energi dari sistem yang sepenuhnya bergantung pada bahan bakar fosil ke sistem hibrida tenaga surya PV di Filipina, serta

melakukan penilaian tekno-ekonomi untuk pengembangan sistem energi berkelanjutan. Mereka menemukan bahwa biaya listrik tanpa subsidi di daerah-daerah terpencil yang bergantung pada bahan bakar fosil sangat tinggi. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa sistem hibrida berbasis energi terbarukan, seperti solar PV-baterai-diesel, dapat menjadi solusi yang lebih ekonomis. Hasilnya menunjukkan bahwa di pulau-pulau di Filipina, terdapat potensi ekonomi yang signifikan untuk beralih dari diesel ke sistem hibrida solar PV-baterai-diesel, dengan rata-rata pengurangan biaya listrik sebesar 20%, yang sangat penting untuk mencapai tujuan pembangunan berkelanjutan di masyarakat.

Blaschke et al., (2013) menuturkan dalam Basit et al., (2020) bahwa energi matahari memiliki potensi yang sangat besar untuk memenuhi kebutuhan energi global jika para ilmuwan dapat mengembangkan peralatan teknis yang diperlukan untuk menghasilkan listrik darinya. Berdasarkan Sampaio & González, (2017) dalam Basit et al., (2020), menjelaskan bahwa cahaya dan panas merupakan dua bentuk energi surya yang mencapai permukaan bumi. Teknologi fotovoltaik (PV) memanfaatkan sinar matahari untuk menghasilkan listrik. Pembangkitan listrik bergantung pada intensitas sinar matahari daripada pengaruh panasnya. Selanjutnya, Liu et al., (2016) dalam (Basit et al., 2020) menuturkan bahwa *Concentrating Solar Thermal Power* (CSP) memanfaatkan baik panas maupun cahaya matahari untuk menghasilkan listrik. Ada subkategori dari CSP termasuk piringan surya, sistem penerima pusat surya, dan melalui surya parabolic (Basit et al., 2020).

(Albino et al., 2014; Bhandari & Stadler, 2011; Ortiz et al., 2017; Slimani et al., 2016) menuturkan dalam (Østergaard et al., 2020) bahwa penelitian dalam beberapa tahun terakhir menunjukkan bahwa energi surya dapat digunakan untuk menghasilkan listrik bersih dan berkelanjutan berdasarkan teknologi fotovoltaik.

5. *Solar Heating*

Seiring dengan meningkatnya kekhawatiran terkait konservasi energi dan perlindungan lingkungan, banyak negara membatasi penggunaan alat pemanas yang menggunakan listrik atau bahan bakar fosil di bangunan. Sebagai gantinya, penggunaan energi surya diusulkan melalui berbagai undang-undang. Konversi

radiasi matahari menjadi panas merupakan cara paling sederhana dan langsung dalam memanfaatkan energi surya, yang memiliki potensi lebih besar dibandingkan dengan sumber energi terbarukan lainnya (Ge et al., 2018).

Taler et al., (2019) melakukan simulasi terhadap kinerja sistem pemanas bertenaga surya yang terintegrasi dengan sistem penyimpanan energi, di mana sistem ini diisi dan dikosongkan melalui aliran panas (Østergaard et al., 2020). Dalam Østergaard et al., (2020), dijelaskan bahwa Maraj et al., (2019) telah melakukan analisis eksperimental pada kolektor surya tabung vakum yang terintegrasi dengan sistem penyimpanan panas untuk penggunaan rumah tangga. Hasil eksperimen di bawah kondisi iklim Mediterania menunjukkan bahwa efisiensi kolektor mencapai 62% dari aliran surya yang masuk hingga keluaran air panas. Namun, setelah mempertimbangkan kerugian dari radiasi surya hingga penggunaan akhir air panas, efisiensi efektifnya berkurang menjadi 51,6%.

Sumber daya energi untuk pemanasan bangunan sangat krusial karena sektor pemanasan adalah salah satu sektor dengan permintaan energi terbesar dalam sistem energi (Østergaard et al., 2020). Dalam Østergaard et al., (2020) terdapat beberapa pemanfaatan energi surya, antara lain:

- Bangunan perorangan (Žandeckis et al., 2013).
- Pabrik pemanas distrik konvensional (Bussar et al., 2014; Dehghan & Pfeiffer, 2017; Felipe Andreu et al., 2016; Turanjanin et al., 2009).
- Penyediaan energi untuk sistem desalinasi dengan tenaga surya (Buonomano et al., 2018a; Huang et al., 2014).
- Mesin pendingin absorpsi dan adsorpsi (Buonomano et al., 2018a).
- Pengering surya pada produk pertanian (Orbegoso et al., 2017).

6. *Solar Cooling*

Dalam Østergaard et al., (2020), (Ban et al., 2012) menyoroti pentingnya penyimpanan energi termal dingin dalam mengintegrasikan energi terbarukan dan mengurangi beban puncak. Mereka menemukan bahwa penggunaan energi terbarukan pada bangunan berkelanjutan dapat menjadi solusi yang efektif, tetapi penyimpanan energi termal dingin juga diperlukan untuk mengelola beban puncak dan mengatasi ketidakstabilan energi terbarukan. Penelitian mereka menunjukkan

bahwa beban pendinginan dan beban kompresor sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan, yang dapat menyebabkan rendahnya faktor beban dan peralatan yang berukuran terlalu besar.

Allesina et al., (2019) dalam (Østergaard et al., 2020) juga mengeksplorasi potensi untuk mendinginkan dan memanaskan bangunan dengan fokus pada ruang berjemur yang berventilasi. Pada musim dingin, ruang berjemur ini menciptakan ruang tertutup yang memberikan efek rumah kaca, sedangkan pada musim panas, balkon dibuka untuk mengurangi efek rumah kaca di area tersebut.

Selanjutnya, Buonomano et al., (2018b) dalam Østergaard et al., (2020) menyatakan bahwa sistem pemanas dan pendingin tenaga surya adalah teknologi yang menjanjikan untuk mengurangi emisi gas rumah kaca, meningkatkan efisiensi energi, dan meningkatkan proporsi penggunaan energi terbarukan di sektor bangunan. Studi ini membandingkan dua sistem cadangan dengan konfigurasi berbeda, yaitu pemanas berbahan bakar gas kondensasi dan pendingin listrik, sebagai sistem referensi bangunan. Analisis parametrik ini menghasilkan panduan komprehensif bagi perancang sistem, praktisi, dan peneliti yang fokus pada pengembangan dan penggunaan sistem pemanas dan pendingin tenaga surya.

7. *Salinity Gradient Power*

Salah satu sumber energi terbarukan yang masih belum banyak dimanfaatkan adalah perbedaan tekanan osmotik antara air laut dengan berbagai tingkat salinitas (Østergaard et al., 2020). Altaee dan Cipolina  dalam (Østergaard et al., 2020) memodelkan sistem pembangkit listrik berdasarkan gradien salinitas dan menguji kinerja optimalnya berdasarkan beberapa faktor penentu. Faktor-faktor ini, diurutkan dari yang paling kecil hingga terbesar dampaknya, meliputi tekanan hidraulik, laju aliran larutan penarik, dan laju aliran umpan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa output energi dari proses osmosis dengan tekanan yang dioptimalkan bisa mencapai hingga 54% lebih tinggi dibandingkan metode konvensional.

8. Penilaian Keberlanjutan dan Dampak Sistem

Aberilla et al., (2019) dalam Østergaard et al., (2020) mengevaluasi keberlanjutan lingkungan dari tiga teknologi pembangkit listrik berbasis biomassa—pembakaran, gasifikasi, dan pencernaan anaerobik—dengan menggunakan penilaian siklus hidup. Studi ini tidak membandingkan secara langsung penggunaan berbagai sumber biomassa, melainkan menganalisis pembakaran dan gasifikasi sisa-sisa padi dan kelapa serta produksi biogas dari kotoran ternak. Dari hasil analisis, produksi biogas dari kotoran ternak terbukti sebagai solusi terbaik dalam sebagian besar kategori dampak *Life Cycle Assesment*. Bahkan, produksi biogas dari kotoran ternak menunjukkan dampak lingkungan yang negatif menurut sebagian besar kategori, disebabkan oleh buruknya dampak lingkungan jika kotoran ternak dibiarkan begitu saja di tanah.

Bramstoft & Skytte, (2017) dalam Østergaard et al., (2020) mengembangkan model untuk mendekarbonisasi sistem energi transportasi di Swedia sebagai upaya keberlanjutan. Mereka mengeksplorasi dua skenario: elektrifikasi tinggi pada transportasi dan penggunaan biofuel serta bio-metan yang tinggi dalam sistem energi. Studi ini menghitung biaya sosial dan ekonomi dari berbagai sistem dan mengevaluasi integrasi sistem transportasi, kilang bahan bakar, gas, listrik, dan panas. Hasilnya menunjukkan bahwa elektrifikasi sebagian besar transportasi jalan di Swedia adalah opsi dengan biaya terendah. Namun, analisis sensitivitas menunjukkan bahwa biaya kendaraan merupakan parameter paling sensitif dalam analisis komparatif untuk pengembangan sistem energi berkelanjutan.

### 2.2.2 Ekonomi Teknik

1. Internal Rate of Return (IRR)

Internal Rate of Return (IRR) merupakan salah satu metode analisis kelayakan investasi yang sering digunakan dalam studi kelayakan finansial dalam suatu produk investasi atau proyek. IRR didefinisikan sebagai tingkat diskonto yang membuat nilai bersih sekarang (Net Present Value/NPV) dari seluruh arus kas suatu proyek menjadi nol (Choiri et al., 2023; Agitiya et al., 2024 sebagaimana dikutip dalam Faridhiya et al. (2024). Dengan kata lain, IRR menunjukkan tingkat pengembalian investasi di mana seluruh biaya awal dapat ditutup oleh arus kas yang diterima selama umur proyek. Perhitungan IRR menjadi penting karena memberikan informasi yang langsung mengenai

potensi keuntungan proyek dalam bentuk persentase tahunan, yang mudah dipahami dan dibandingkan dengan tingkat pengembalian investasi lainnya.

Menurut Purnatiyo (2021), IRR merupakan tingkat suku bunga yang menyamakan nilai sekarang dari investasi awal dengan nilai sekarang dari arus kas bersih yang dihasilkan di masa depan. IRR berfungsi untuk mengukur tingkat efisiensi dan profitabilitas suatu proyek atau investasi. Jika IRR yang diperoleh lebih besar dari tingkat pengembalian minimum yang disyaratkan *(cost of capital)*, maka proyek dianggap layak dan sebaliknya. Dalam konteks ini, IRR menjadi indikator yang sangat berguna bagi manajemen untuk menilai kelayakan ekonomi proyek dan mengambil keputusan investasi secara tepat. IRR memberikan gambaran mengenai potensi pengembalian relatif dari suatu proyek karena disajikan dalam bentuk persentase. Hal ini memudahkan manajemen dalam membandingkan berbagai alternatif proyek investasi. Proyek dengan IRR tertinggi umumnya dianggap lebih menarik karena menjanjikan tingkat pengembalian yang lebih besar. Oleh sebab itu, IRR menjadi salah satu metode yang sering dijadikan dasar dalam proses seleksi proyek, khususnya pada perusahaan dengan keterbatasan modal atau sumber daya.

Selain itu, fungsi utama dari metode IRR adalah untuk mengidentifikasi apakah suatu aset atau proyek investasi menghasilkan peningkatan nilai secara finansial. IRR mengukur tingkat bunga maksimum yang dapat dihasilkan oleh suatu proyek, dengan asumsi bahwa semua arus kas positif yang diterima akan digunakan untuk menutup investasi awal hingga nilai bersihnya menjadi nol. Artinya, semakin tinggi nilai IRR, semakin besar potensi keuntungan yang ditawarkan oleh proyek tersebut.

Dalam praktiknya, IRR juga dapat digunakan untuk memperkirakan waktu pengembalian dana investasi secara tidak langsung, karena semakin besar IRR maka semakin cepat nilai investasi dapat dikembalikan. IRR juga sering digunakan bersamaan dengan metode lain seperti Payback Period, Net Present Value (NPV), dan Benefit-Cost Ratio (BCR) untuk memberikan gambaran yang lebih menyeluruh terhadap kelayakan ekonomi suatu proyek. Kombinasi beberapa metode ini dapat mengurangi risiko pengambilan keputusan yang hanya berdasarkan pada satu indikator saja.

Namun demikian, penggunaan IRR tidak lepas dari keterbatasan. Salah satu asumsi utama dalam perhitungan IRR adalah bahwa semua arus kas yang dihasilkan proyek akan diinvestasikan kembali dengan tingkat pengembalian yang sama sebesar

IRR. Asumsi ini seringkali tidak realistis, terutama dalam kondisi pasar yang dinamis dan tingkat suku bunga yang fluktuatif. Oleh karena itu, hasil perhitungan IRR perlu diinterpretasikan secara hati-hati dan tidak dijadikan satu-satunya dasar keputusan investasi.

Perhitungan IRR umumnya dilakukan melalui metode iterasi atau pendekatan numerik, karena tidak ada rumus langsung untuk mendapatkan nilai IRR secara eksak. Dalam banyak kasus, perhitungan IRR menggunakan bantuan perangkat lunak seperti Microsoft Excel, yang menyediakan fungsi IRR untuk menghitung tingkat pengembalian berdasarkan arus kas yang dimasukkan. Fungsi ini akan menghasilkan nilai IRR yang mendekati nilai aktual berdasarkan pendekatan numerik terhadap kondisi NPV = 0.

Secara matematis, IRR dinyatakan dalam bentuk persamaan:

NPV = 0

$$\sum_{t=0}^{n} \frac{CF_t}{(1+IRR)^t} = 0$$

Dimana $CF_t$: *Cash Flow* atau arus kas pada tahun ke-t

i: suku bunga yang digunakan

$$IRR = RR + \frac{NVV\ rr}{TVP\ rr + TVP\ rt}\ x\ (rt - rr) \qquad (3)$$

Keterangan :
rr = Tingkat discount rate (r) lebih rendah
rt = Tingkat discount rate (r) lebih tinggi
TPV = Total present value
NPV = Net Present Value
Kriteria Seleksi :
Jika IRR > dari tingkat bungan yang disyaratkan, maka proyek investasi layak
Jika IRR < dari tingkat bunga yang disyaratkan, maka proyek investasi kurang layak (Sutrisno, 2009)

Persamaan ini menunjukkan bahwa IRR adalah nilai diskonto yang menyamakan antara total nilai sekarang dari arus kas masa depan dengan investasi awal, sehingga menghasilkan NPV sebesar nol.

Dalam konteks penerapan pada proyek energi baru terbarukan seperti Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), IRR memiliki peranan penting dalam menilai kelayakan

investasi proyek tersebut. Proyek PLTS umumnya memerlukan investasi awal yang besar dan menghasilkan arus kas dalam jangka panjang melalui penghematan biaya listrik. Oleh karena itu, IRR dapat digunakan untuk mengukur seberapa besar keuntungan finansial yang akan diperoleh selama masa operasional sistem PLTS, dan apakah proyek tersebut layak dijalankan dari sisi finansial. Dengan demikian, IRR menjadi salah satu indikator penting dalam studi kelayakan proyek PLTS maupun proyek infrastruktur lainnya. Meskipun memiliki keunggulan dalam memberikan gambaran langsung mengenai tingkat pengembalian investasi, IRR sebaiknya digunakan bersamaan dengan metode evaluasi lainnya untuk menghasilkan keputusan investasi yang lebih akurat dan komprehensif. Pendekatan ini akan meningkatkan keandalan hasil analisis, serta mengurangi potensi kesalahan dalam menilai risiko dan prospek proyek jangka panjang.

Penggunaan lebih dari satu indikator finansial juga diterapkan pada penelitian energi terbarukan. Rendroyoko et al. (2024) menggunakan NPV, IRR, dan Simple Payback Period untuk menilai kelayakan integrasi PLTS, sedangkan Rifalda et al. (2026) membandingkan Net Present Cost dan LCOE antara sistem eksisting dan sistem yang dioptimalkan. Penggunaan beberapa indikator diperlukan karena setiap metode memberikan informasi yang berbeda mengenai nilai tambah, tingkat pengembalian, waktu pengembalian modal, dan biaya sepanjang umur proyek.

2. Payback Period (PbP)

Payback Period (PP) merupakan salah satu metode evaluasi kelayakan investasi yang paling sederhana dan banyak digunakan, khususnya dalam tahap awal analisis proyek. PP mengukur jangka waktu yang diperlukan agar arus kas masuk kumulatif dari suatu investasi dapat menyamai jumlah modal yang dikeluarkan dalam bentuk nilai sekarang (present value) Murnawati (2016). Dengan kata lain, metode ini membantu untuk mengetahui dalam berapa tahun investasi awal akan kembali.

Metode ini memiliki kelebihan dari sisi kesederhanaan dan kemudahan dalam penggunaan. Karena hanya membutuhkan data arus kas masuk tahunan dan nilai investasi awal, PP menjadi pilihan utama bagi pelaku usaha kecil maupun pengambil keputusan yang membutuhkan estimasi waktu pengembalian modal secara cepat. Metode payback period berguna untuk memilih investasi dengan masa pemulihan tercepat, yang sering kali dikaitkan dengan risiko yang lebih rendah. Semakin cepat modal kembali, semakin

kecil kemungkinan proyek tersebut terkena dampak dari ketidakpastian jangka panjang seperti perubahan harga, teknologi, atau regulasi. Selain itu, PP juga dapat digunakan sebagai alat prediksi risiko. Masa pemulihan modal yang singkat menandakan bahwa proyek tersebut memiliki potensi untuk segera menghasilkan arus kas positif, sehingga mampu mengurangi risiko kerugian apabila terjadi perubahan kondisi eksternal yang tidak diinginkan. Oleh karena itu, banyak manajer keuangan menggunakan PP sebagai indikator awal sebelum melanjutkan evaluasi lebih lanjut dengan metode yang lebih kompleks.

Namun, di balik kesederhanaannya, metode payback period juga memiliki keterbatasan yang perlu dipahami. Salah satu kekurangannya adalah metode ini tidak memperhitungkan nilai waktu dari uang *(time value of money)*. Artinya, arus kas yang diterima pada tahun pertama dianggap memiliki nilai yang sama dengan arus kas pada tahun kelima, padahal secara ekonomi nilainya berbeda. Selain itu, PP tidak mempertimbangkan arus kas yang terjadi setelah masa pengembalian tercapai, sehingga dapat mengabaikan potensi keuntungan jangka panjang yang signifikan. Fungsi utama dari metode payback period adalah untuk mengukur waktu yang dibutuhkan agar investasi mencapai titik impas, yaitu ketika jumlah arus kas masuk sama dengan jumlah investasi awal. Metode ini memberikan gambaran kasar tentang tingkat likuiditas dari proyek, namun tidak memberikan informasi langsung mengenai tingkat profitabilitasnya. Oleh karena itu, hasil analisis PP sebaiknya tidak dijadikan dasar tunggal dalam pengambilan keputusan, melainkan digunakan bersamaan dengan metode lain seperti *Net Present Value* (NPV) atau *Internal Rate of Return* (IRR).

Payback period bertujuan untuk menentukan seberapa cepat investor bisa mendapatkan kembali modal yang telah ditanamkan dalam suatu proyek atau usaha. Waktu pengembalian ini digambarkan sebagai rentang waktu kumulatif dari arus kas yang dibangkitkan oleh investasi hingga menyamai total investasi awal (Hasibuan, 2020). Dengan demikian, semakin singkat waktu yang dibutuhkan untuk mencapai titik impas, semakin menarik proyek tersebut dari sisi pemilik modal.

Metode payback period tidak dirancang untuk mengukur tingkat keuntungan secara menyeluruh, melainkan lebih fokus pada kecepatan pengembalian investasi. Hal ini menjadikan metode ini relevan dalam situasi di mana aspek likuiditas lebih penting daripada keuntungan jangka panjang. Misalnya, dalam proyek yang memiliki risiko tinggi

atau memiliki masa manfaat yang relatif pendek, investor lebih tertarik untuk mengetahui seberapa cepat dana mereka akan kembali. Dalam praktiknya, tidak terdapat standar baku mengenai berapa lama payback period yang ideal, karena tergantung pada karakteristik masing-masing proyek, industri, dan preferensi risiko dari investor. Namun, secara umum, semakin pendek waktu pengembalian modal, semakin menarik proyek tersebut. Hal ini menunjukkan bahwa proyek tersebut tidak hanya mampu menghasilkan arus kas yang cukup cepat, tetapi juga memiliki fleksibilitas yang lebih tinggi terhadap perubahan kondisi pasar.

Perhitungan Payback Period secara matematis dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$Payback\ Period = \frac{I}{Ab}\ x\ 1\ Tahun$$

Dimana I: Nilai investasi

Ab: Kas masuk bersih yang telah diperhitungkan nilai waktu dari uangnya

Walaupun metode payback period tidak terlalu komprehensif jika dibandingkan dengan metode-metode lain dalam menilai kelayakan proyek, perannya tetap penting sebagai salah satu indikator awal dalam seleksi investasi. Terutama pada sektor-sektor yang dinamis dan memiliki ketidakpastian tinggi, PP dapat memberikan gambaran cepat mengenai keamanan finansial dari suatu investasi. Dalam konteks proyek energi seperti PLTS, penggunaan metode ini dapat memberikan pandangan awal mengenai kapan sistem mulai memberikan penghematan riil terhadap biaya operasional listrik. Oleh karena itu, meskipun metode payback period memiliki keterbatasan dalam hal akurasi dan tidak memperhitungkan nilai waktu uang atau keuntungan jangka panjang, tetap layak digunakan sebagai salah satu alat bantu dalam proses evaluasi investasi. Untuk menghasilkan analisis yang lebih menyeluruh, penggunaan PP sebaiknya dikombinasikan dengan metode lain seperti NPV dan IRR yang mampu memperhitungkan nilai waktu dan total keuntungan proyek secara lebih holistic.

3. Net Present Value (NPV)

Net Present Value (NPV) merupakan salah satu metode evaluasi investasi yang paling fundamental dan sering digunakan dalam studi kelayakan proyek. Metode ini bertujuan untuk menilai kelayakan finansial suatu proyek dengan mempertimbangkan konsep nilai waktu dari uang (time value of money). Dalam pendekatannya, NPV

menghitung selisih antara nilai sekarang dari seluruh arus kas masuk dan nilai sekarang dari seluruh arus kas keluar yang terjadi selama umur proyek. Artinya, setiap arus kas yang terjadi di masa depan akan didiskontokan ke nilai sekarang menggunakan tingkat diskonto tertentu yang mencerminkan risiko dan biaya modal dari investasi tersebut (Hasibuan, 2020).

Konsep dasar dari NPV adalah bahwa uang yang diterima hari ini memiliki nilai lebih tinggi dibandingkan uang yang diterima di masa depan karena potensi untuk diinvestasikan dan menghasilkan keuntungan. Oleh karena itu, dalam menghitung NPV, setiap arus kas masa depan dikurangi (didiskontokan) dengan tingkat bunga tertentu agar diperoleh nilai saat ini. NPV dinyatakan dalam satuan mata uang dan merupakan indikator absolut dari keuntungan investasi. Bila NPV bernilai positif (NPV > 0), maka proyek atau investasi tersebut dianggap layak secara finansial karena menghasilkan keuntungan setelah memperhitungkan seluruh biaya dan risiko. Sebaliknya, jika NPV bernilai negatif (NPV < 0), maka investasi tidak layak dilanjutkan karena nilai sekarang dari arus kas masuk tidak mampu menutupi biaya yang telah dikeluarkan.

NPV juga sering didefinisikan sebagai total nilai bersih sekarang dari seluruh arus kas bisnis, yaitu pendapatan dikurangi dengan biaya, yang dihitung selama periode tertentu dengan mempertimbangkan time value of money. Rumus dasar untuk menghitung NPV secara matematis adalah:

$$NPV = \sum_{t=0}^{n} \frac{CF_t}{(1+i)^t}$$

Dimana $CF_t$: *Cash Flow* atau arus kas pada tahun ke-t

i: suku bunga yang digunakan

t: tahun ke-t

n: jangka waktu perhitungan

Rumus ini mencerminkan bahwa semua arus kas masa depan harus disesuaikan ke nilai sekarang agar dapat dibandingkan secara adil dengan investasi awal.

Menurut Arshad et al. (2014), NPV mencerminkan jumlah dari semua arus kas masa depan untuk menentukan nilai bersih saat ini dari suatu proyek. Baik arus kas masuk maupun keluar harus didiskontokan dengan tingkat suku bunga yang relevan agar

memberikan gambaran yang objektif mengenai seberapa besar nilai tambah yang dihasilkan proyek tersebut. Hal ini penting terutama dalam proyek-proyek jangka panjang, di mana pengaruh inflasi, risiko, dan perubahan suku bunga dapat memengaruhi nilai riil dari arus kas masa depan.

Salah satu keunggulan dari metode NPV adalah kemampuannya dalam memberikan gambaran kuantitatif mengenai besaran nilai tambah suatu proyek bagi pemilik modal. Nilai NPV yang tinggi menunjukkan bahwa proyek mampu memberikan return lebih besar dari biaya modal yang dikeluarkan, sehingga semakin menarik dari sisi investasi. Metode ini juga bersifat fleksibel karena dapat digunakan untuk mengevaluasi berbagai jenis proyek, baik skala kecil maupun besar, serta mempertimbangkan semua faktor risiko keuangan yang relevan.

Di sisi lain, kelemahan dari metode NPV terletak pada sensitivitasnya terhadap estimasi arus kas dan tingkat diskonto. Perubahan kecil dalam asumsi dapat memengaruhi hasil akhir secara signifikan. Oleh karena itu, analisis NPV sebaiknya dikombinasikan dengan analisis sensitivitas dan skenario untuk mengevaluasi dampak dari berbagai kondisi ketidakpastian, seperti fluktuasi harga energi, biaya operasi, atau tingkat bunga pasar.

Dalam praktiknya, NPV sering digunakan sebagai tolok ukur utama dalam pengambilan keputusan investasi jangka panjang, termasuk dalam proyek infrastruktur energi terbarukan seperti Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Melalui pendekatan ini, pengambil keputusan dapat menilai apakah proyek akan memberikan keuntungan finansial yang cukup setelah memperhitungkan seluruh pengeluaran dan pendapatan yang diproyeksikan selama umur sistem PLTS. NPV tidak hanya membantu dalam menilai kelayakan finansial proyek, tetapi juga memberikan dasar yang kuat untuk membandingkan beberapa alternatif proyek atau skenario investasi. Misalnya, dua proyek dengan nilai investasi yang sama dapat dibandingkan berdasarkan nilai NPV-nya untuk menentukan mana yang memberikan hasil lebih besar bagi perusahaan atau investor. Dalam konteks perencanaan energi, hal ini sangat penting karena menyangkut efisiensi penggunaan dana dalam jangka panjang.

Secara keseluruhan, metode NPV menawarkan pendekatan evaluasi yang lebih akurat dan menyeluruh dibandingkan metode lain yang lebih sederhana, karena mempertimbangkan semua arus kas yang relevan dan nilai waktu dari uang. Oleh karena

itu, metode ini sangat direkomendasikan untuk digunakan sebagai bagian dari analisis kelayakan finansial proyek-proyek skala menengah hingga besar, termasuk dalam studi kelayakan pembangunan PLTS on-grid maupun off-grid yang memerlukan perhitungan investasi jangka panjang dan keberlanjutan keuangan proyek.

4. ROI (Return On Investment)

Return on Investment (ROI) mengukur tingkat efisiensi dan profitabilitas dari modal yang diinvestasikan dengan membandingkan keuntungan bersih yang dihasilkan terhadap total dana atau aktiva yang digunakan dalam kegiatan operasional. Secara umum, ROI menggambarkan kemampuan keseluruhan dari perusahaan atau proyek untuk menghasilkan keuntungan dari seluruh sumber daya (aktiva) yang tersedia, tanpa memandang dari mana sumber dana tersebut berasal (Mastur et al., 2017). Dengan kata lain, ROI menunjukkan seberapa efektif dan efisien suatu entitas dalam memanfaatkan asetnya untuk menciptakan nilai tambah finansial.

Semakin tinggi nilai ROI, maka semakin baik kondisi keuangan proyek atau perusahaan karena menunjukkan bahwa investasi yang dilakukan memberikan tingkat pengembalian yang tinggi. ROI biasanya dinyatakan dalam bentuk persentase, sehingga dapat dengan mudah digunakan untuk membandingkan performa berbagai alternatif investasi. Rasio ini tidak hanya penting untuk mengevaluasi keberhasilan finansial proyek yang sedang berjalan, tetapi juga sangat berguna untuk menilai potensi keberhasilan dari proyek baru sebelum investasi dilakukan (Kurniawan, 2019).

ROI atau yang juga dikenal sebagai *Return on Assets* (ROA), adalah kemampuan perusahaan dalam menghasilkan laba dari total aset yang dimilikinya. Dengan menghitung rasio ini, manajemen dan investor dapat menilai efisiensi penggunaan aset untuk mendukung kegiatan operasional dan menghasilkan laba bersih. Rasio ROI dapat dihitung dengan rumus:

$$\text{a. ROI} = \frac{Net\ profit\ after\ taxes}{Total\ assets} = \frac{\text{Laba bersih setelah pajak}}{\text{Total aktiva}} \text{x } 100\%$$

$$\text{ROI} = \frac{\text{Pemasukan}}{\text{Investasi}} \times 100\%$$

Rumus ini memberikan gambaran langsung mengenai tingkat keuntungan yang diperoleh dari setiap satuan modal yang diinvestasikan, sehingga menjadi alat evaluasi yang relevan dalam menilai efektivitas strategi keuangan dan operasional.

ROI tidak hanya mencerminkan profitabilitas, tetapi juga menjadi alat ukur penting dalam pengambilan keputusan investasi. Dengan membandingkan ROI dari beberapa proyek atau unit usaha, investor dan manajer dapat menentukan alternatif investasi mana yang paling menguntungkan. Dalam konteks proyek pembangunan infrastruktur energi seperti Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), ROI dapat digunakan untuk mengukur seberapa besar pengembalian finansial yang diperoleh dari dana yang ditanamkan dalam sistem pembangkitan tersebut. Hal ini penting untuk mengetahui seberapa cepat modal kembali dan seberapa besar potensi keuntungan jangka panjang yang dapat dihasilkan.

Lebih jauh, ROI juga berfungsi sebagai indikator yang relevan dalam mengidentifikasi kekuatan dan kelemahan dari aspek keuangan proyek. Jika nilai ROI rendah atau bahkan negatif, hal ini bisa menjadi sinyal bahwa manajemen belum mengelola sumber daya secara optimal, atau proyek belum menunjukkan kelayakan finansial. Sebaliknya, ROI yang tinggi mencerminkan bahwa proyek mampu menciptakan nilai tambah secara signifikan dan layak untuk dipertahankan atau dikembangkan lebih lanjut.

Dengan demikian, ROI memberikan manfaat ganda, yaitu sebagai alat ukur performa keuangan dan sebagai panduan dalam pengambilan keputusan strategis. Oleh karena itu, analisis ROI perlu dilakukan secara menyeluruh dalam studi kelayakan finansial proyek, khususnya pada proyek-proyek jangka panjang seperti PLTS on-grid atau off-grid, yang membutuhkan perhitungan akurat untuk memastikan keberlanjutan investasi dan minimisasi risiko finansial di masa depan.

### 2.2.3 Kebijakan Energi di Indonesia

Langkah strategis lainnya yang diambil oleh pemerintah di Indonesia untuk mencapai kemandirian energi, ketahanan energi nasional, serta mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil adalah dengan menerbitkan kebijakan energi baru terbarukan (EBT). Hal ini guna mendukung keberlanjutan lingkungan agar

tidak terus menerus tercemar oleh polusi udara, air, ataupun suara yang ikut dihasilkan oleh teknologi yang berbahan bakar fosil.

Menurut Ramadani, (2018) dalam Ayu Arsita et al., (2021), Peraturan Pemerintah (PP) tentang Kebijakan Energi Nasional tahun 2014 menyatakan dalam pasal 2 bahwa kebijakan energi nasional adalah kebijakan pengelolaan energi didasarkan atas prinsip berkeadilan, berkelanjutan, dan berwawasan lingkungan untuk mencapai kemandirian energi dan ketahanan energi nasional. Pengelolaan energi yang dimaksud adalah penyelenggaraan kegiatan pengediaan pengusahaan, dan pemanfaatan energi, pengediaan Cadangan strategis, dan konservasi sumber daya energi (Ayu Arsita et al., 2021).

Menurut Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 30 Tahun 2007 pasal 1 ayat 1, definisi energi dijelaskan bahwa energi adalah kemampuan untuk melakukan kerja yang dapat berupa panas, cahaya, mekanika, kimia, dan elektromagnetika.

Definisi sumber energi terbarukan menurut Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 30 Tahun 2007 tercantum pada pasal 1 ayat 6 yang tertulis bahwa sumber energi terbarukan adalah sumber energi yang dihasilkan dari sumber daya energi yang berkelanjutan jika dikelola dengan baik, antara lain panas bumi, angin, bioenergi, sinar matahari, aliran dan terjunan air, serta gerakan dan perbedaan suhu lapisan laut.

Kebijakan dalam dekade 2000-an memunculkan tujuh produk hukum terkait kebijakan energi. Melansir dari Jaringan Dokumentasi dan Informasi Hukum, produk tersebut berupa yaitu UU Ketenaganukliran No. 10 Tahun 1997, UU No. 22 Tahun 2001 tentang Minyak dan Gas Bumi, UU No. 20 Tahun 2002 tentang Ketenagalistrikan, UU No. 27 Tahun 2003 tentang Panas Bumi, UU No. 30 Tahun 2007 tentang Energi, UU No. 4 Tahun 2009 tentang Pertambangan Mineral dan Batubara yang kini diubah dalam UU No. 3 Tahun 2020 dan Ciptaker. UU No. 7. Tahun 2004 tentang Sumber Daya Air. Dalam periode ini menuju akhir 2000-an, terdapat banyak pembangunan PLTU (Ayu Arsita et al., 2021).

Menurut BRIN, (2016) dalam Ayu Arsita et al., (2021) dekade tahun 2010-an, arah kebijakan energi di Indonesia mulai mengarah ke dalam perumusan energi nasional. Kebijakan Energi Nasional atau KEN terbit dalam Peraturan Pemerintah

No. 79 Tahun 2014 dan memuat empat aspek kebijakan utama dalam pengelolaan energi nasional. Aspek tersebut berupa ketersediaan energi dalam memenuhi kebutuhan nasional, prioritas mengembangkan energi, pemanfaatan sumber daya energi nasional, dan kewajiban menyediakan cadangan energi nasional. Hal ini juga didukung oleh diversifikasi, konservasi energi, dan kajian energi terhadap dampak lingkungan hidup. Target dalam KEN ini digapai maksimal pada tahun 2025. Untuk PLTS on-grid yang terhubung ke jaringan PLN, regulasi utama yang saat ini menjadi rujukan adalah Permen ESDM Nomor 2 Tahun 2024 tentang Pembangkit Listrik Tenaga Surya Atap yang Terhubung pada Jaringan Tenaga Listrik Pemegang IUPTLU, dimana mengatur ketentuan mengenai kapasitas sampai dengan 500 kW secara eksplisit terdapat pada Pasal 18, sedangkan Pasal 21–22 mengatur pelaksana pembangunan dan kewajiban memperoleh persetujuan sebelum pemasangan.

Pemerintah melakukan Kerjasama dengan berbagai pihak dalam pengembangan energy surya untuk mendorong penggunaan EBT. Komitmen Indonesia dalam mencapai 23% porsi EBT di tahun 2-25 merupakan bentuk pemenuhan target KEN dan Paris Agreement. Harapan utamanya adalah Indonesia dapat mencapai net zero emission seperti negara maju. Pertumbuhan industry hijau untuk pemanfaata EBT adalah produk global dengan skema Renewable Energi Based Industrial Development (REBID). Sektor industry memakan 36,64% total konsumsi energi pada 2019. Salah satu tantangan industry dalam negeri adalah impor komponen dikarenakan biaya masuk yang tinggi (Ayu Arsita et al., 2021).

Masih menurut Ayu Arsita et al., (2021), kebijakan dalam energi terbarukan turut membutuhkan dorongan secara kelembagaan dan juga secara lebih inklusif. Transisi energi dunia yang juga mendukung net zero dan mengurangi emisi karbon perlu partisipasi inklusif khususnya anak muda untuk memastikan Pembangunan berkelanjutan menjangkau semua pihak. Anak muda memiliki peran strategi dalam pengembangan energi terbarukan.

Dinamika pembentukan kebijakan energi nasional di Indonesia mengalami perbedaan warna setiap dekadenya. Namun, semakin hari kebijakan tersebut semakin bertumpu pada transisi energi ke energi terbarukan. Permasalahan energi nasional di Indonesia seperti rasio elektrifikasi dapat diatasi dengan EBT. Upaya

pengoptimalan EBT terlihat dalam bagaimana proses kebijakan dalam EBT terbentuk (Ayu Arsita et al., 2021).

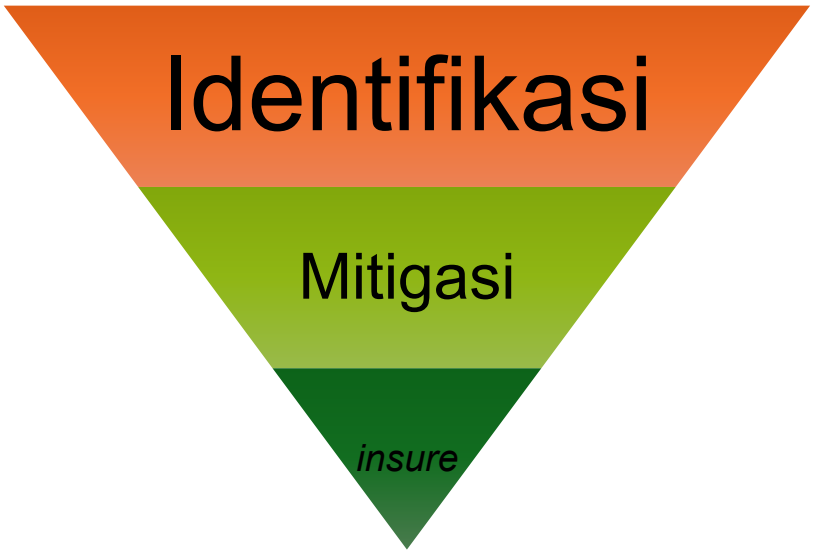
### 2.2.4 Manajemen Risiko

Praktik manajemen risiko yang efektif dalam siklus proyek PV dapat membantu mencapai tujuan ini dengan menurunkan biaya modal dan dengan demikian berkontribusi pada pengurangan biaya non-hardware (Lowder et al., 2013). Lowder et al., (2013) menuturkan juga bahwa Jika pengembang dapat berhasil menunjukkan kemampuan mereka dalam mengelola risiko yang melekat pada fase perencanaan, konstruksi, dan operasional proyek PV, investasi dalam PV mungkin akan dianggap kurang berisiko daripada yang diindikasikan oleh biaya pembiayaan saat ini.

Mendelsohn & Harper, (2008) dalam Lowder et al., (2013) menuturkan bahwa terdapat berbagai risiko dalam siklus proyek PV. Beberapa, seperti risiko konstruksi, terbatas pada fase pengembangan tertentu, sementara yang lain berlanjut sepanjang siklus, dari perencanaan hingga operasional (seperti risiko gagal bayar). Sebagian besar risiko proyek akan dialokasikan ke sejumlah pihak yang terlibat dalam pengembangan proyek, dan pihak-pihak ini akan bertanggung jawab atas sebagian atau seluruh potensi kerugian yang timbul dari risiko-risiko tersebut. Tingkat ketidakpastian atau total kerugian maksimum untuk risiko individu tidak serta-merta mendiskualifikasi seluruh proyek dari memperoleh investasi, selama risiko-risiko lainnya terbukti dikelola dengan efektif. Misalnya, sebuah proyek yang menggunakan teknologi baru atau berlokasi di tempat yang belum memiliki sumber daya yang terbukti kuat dapat tetap dianggap layak investasi selama aspek-aspek lain dari pengembangan proyek tersebut dipandang sebagai berisiko rendah. Investor ekuitas pajak mungkin akan mengambil proyek dengan risiko tinggi jika mereka menilai pengembalian modal yang diharapkan dapat mengimbangi tingkat risiko tersebut. Namun, institusi-institusi ini umumnya konservatif dan lebih mengutamakan kualitas proyek daripada hasil yang lebih tinggi.

Strategi manajemen risiko yang umum selama siklus proyek PV dapat dibagi menjadi tiga langkah: (1) mengidentifikasi semua risiko proyek; (2) mengurangi risiko-risiko tersebut dan mengalokasikannya di antara pihak-pihak proyek yang

relevan (pengalokasian itu sendiri dapat dianggap sebagai mitigasi risiko); dan (3) mengasuransikan risiko-risiko tersebut yang tidak dapat diserap secara biaya efektif atau efisien oleh pihak-pihak proyek (Lowder et al., 2013).




Gambar 1. Strategi Manajemen Resiko untuk Siklus Proyek PV

Sumber: (Lowder et al., 2013)

1. Risiko Teknis

Risiko teknis adalah risiko yang timbul dari modul, inverter, dan komponen mekanikal dan elektrikal lainnya, serta teknik sistem, pemodelan energi, dan instalasi (Lowder et al., 2013).

a. *Development Project Risks*

Risiko teknis selama siklus pengembangan proyek PV (perencanaan dan konstruksi) mencakup berbagai aspek desain sistem, estimasi dan validasi sumber daya, evaluasi lokasi, dan interkoneksi ke jaringan listrik (Lowder et al., 2013). Dalam laporan teknisnya, Lowder et al., (2013) terdapat tabel sebagai berikut:

Tabel 3. Risiko Teknis Selama Pengembangan Proyek dan Potensi Kerusakan atau Kerugian yang Timbul dari Risiko Tersebut

| Risiko | Pertimbangan | Potensi Kerusakan dan Kerugian |
|---|---|---|
| Perkiraan Sumber Daya | Tingkat kepercayaan apa yang harus diterapkan pada data historis? | Kekurangan produksi terkait sumber daya |
| | | Keterlambatan atau gagal bayar layanan hutang. |
| Spesifikasi Komponen | Apa riwayat kinerja atau spesifikasi produk yang dipilih*?* | Kepailitan produsen |
| | | Cacat beruntun |
| | | Kematian bayi |
| Rancangan Sistem | Seberapa baik desain sistem terintegrasi dengan komponen-komponennya*?* | Kegagalan komponenen |
| | Apakah sistem tersebut memastikan keandalan, ketersediaan, dan pemeliharaan? | Kekurangan produksi |
| | | Waktu henti yang dipaksakan |
| Perkiraan Kinerja dan *Acceptance*/Uji Komisioning | Seberapa baik validasi perkiraan kinerja tersebut? | Kekurangan produksi relatif terhadap perkiraan dapat membebani layanan utang |
| | Tes apa yang dilakukan untuk mengonfirmasi kinerja awal? | |

| Risiko | Pertimbangan | Potensi Kerusakan dan Kerugian |
|---|---|---|
| Karakteristik Lapangan | Apa yang sudah diketahui dan apa yang mungkin belum diketahui tentang kondisi lapangan? | Keterbatasan/larangan lingkungan |
| | Apa kondisi cuaca, air, geoteknik, dan infrastruktur? | |
| Risiko Pemasangan/Transportasi | Apakah komponen dikirim dan dipasang sesuai dengan praktik terbaik*?* | Keterlambatan akibat kerusakan peralatan |

b. Risiko Operasional Proyek

Risiko utama dalam fase operasional proyek adalah ketidakpastian produksi energi. Jika kinerja aktual proyek tidak memenuhi estimasi produksi yang dianggarkan, proyek akan menghasilkan pendapatan yang lebih rendah dari penjualan listrik, dan sponsor mungkin mengalami kesulitan dalam melunasi utangnya atau memberikan pengembalian kepada investornya. Kekurangan produksi dapat disebabkan oleh kontingensi operasi pembangkit, seperti kegagalan komponen (serial dan lainnya), cacat tersembunyi, pemadaman paksa, degradasi modul, dan variabilitas sumber daya (Lowder et al., 2013).

Tabel 4. Risiko Teknis Selama Operasi Proyek dan Potensi Kerusakan atau Kerugian yang Timbul dari Risiko Tersebut

| Risiko | Pertimbangan | Potensi Kerusakan dan Kerugian |
|---|---|---|
| Operasi dan Pemeliharaan *(O&M)* | Apa risiko kegagalan/keandalan komponen? | Cacat beruntun |
| | | Cacat laten |

| Risiko | Pertimbangan | Potensi Kerusakan dan Kerugian |
|---|---|---|
| | Apakah ketersediaan suku cadang memadai atau dapat diperoleh dengan cepat? | Tingkat degradasi yang tinggi |
| | Seberapa kuat penilaian keandalan tersebut? | Delaminasi modul |
| | Seberapa kuat desain sistem dan rekayasa produksi tersebut? | Kegagalan paksa |
| | Apa ketersediaan produksi? | Waktu henti dan biaya pemeliharaan yang direncanakan dan tidak direncanakan |
| | Apakah ada garansi peralatan? Apakah produsen masih dapat memberikan layanan tersebut? | Kepailitan produsen |
| | Seberapa kuat penyedia O&M (Operasi dan Pemeliharaan) tersebut? | Kekurangan sumber daya. |

c. Risiko Pengembangan non-Teknis

Dua risiko non-teknis terbesar yang mempengaruhi proyek PV adalah lingkungan makroekonomi dan lingkungan kebijakan/regulasi yang berlaku di pasar. Faktor pertama menentukan ketersediaan modal, sementara faktor kedua menentukan kemudahan bagi para pemodal untuk menginvestasikan modal tersebut serta kepastian bahwa mereka bisa mendapatkan pengembalian investasi mereka. Kedua kondisi ini dapat secara signifikan mempengaruhi volume pengembangan proyek dalam satu tahun tertentu (Lowder et al., 2013). Di dalam laporan yang disusun Lowder et al., (2013), ada beberapa narasumber yang diwawancarai. Beberapa narasumber dari industri asuransi mengindikasikan bahwa para pemodal tertarik pada produk transfer risiko yang dapat melindungi mereka dari risiko finansial akibat berinvestasi dalam lanskap kebijakan yang tidak pasti. Seorang broker mengatakan bahwa dia pernah bekerja dengan seorang pemberi pinjaman yang meminta perlindungan kebijakan untuk menutupi kekurangan antara perkiraan dan realisasi pembayaran hibah 1603 Treasury (namun, pada akhirnya, kebijakan seperti itu tidak ditulis). Narasumber umumnya sepakat bahwa asuransi terhadap risiko kebijakan/regulasi sebagian besar tidak tersedia di pasar Amerika Serikat,

meskipun mungkin untuk menuliskannya secara khusus untuk klien, biasanya dengan premi yang cukup besar.

d. Risiko Operasional non-Teknis

Risiko operasional non-teknis yang disebutkan di atas berkaitan dengan kemampuan proyek untuk memasarkan daya secara efektif dan mempertahankan keberlangsungan ekonominya selama masa pakainya (Lowder et al., 2013).

2. Alokasi dan Mitigasi

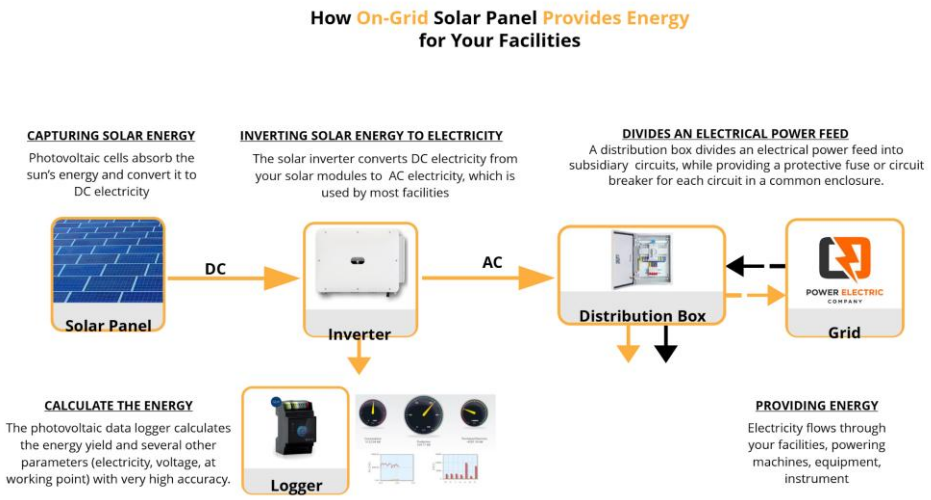
Karena ada banyak pihak dan kontrak dalam proses pengembangan proyek, pengembang harus memahami pihak mana yang memegang risiko apa dan kepada siapa mereka dapat mengajukan klaim jika mengalami kerugian. Jika kontrak-kontrak tersebut tidak jelas dan tanggung jawabnya tetap samar, pengembang mungkin tidak dapat mendapatkan kembali kerugian sebenarnya dari pihak lain dalam proyek. Selain itu, pertempuran hukum yang panjang dapat terjadi yang dapat menguras waktu dan modal. Oleh karena itu, multi-kontrak dapat menjadi risiko tersendiri dan harus dikelola dengan hati-hati sehingga semua risiko yang diidentifikasi dapat ditanggung oleh pihak yang tepat (Lowder et al., 2013).

3. *Insurance*

Dalam laporannya, Lowder et al., (2013) menuturkan bahwa asuransi merupakan garis pertahanan terakhir dalam segitiga terbalik manajemen risiko. Pada tahap ini, risiko-risiko yang tersisa yang tidak dapat dikurangi dan dialokasikan secara efisien dan biaya efektif di antara pihak-pihak proyek, ditransfer dengan membayar premi kepada perusahaan asuransi. Karena mentransfer risiko dari proyek adalah hal yang mahal, asuransi hanya digunakan untuk risiko-risiko tertentu yang dipilih. Umumnya, pengembang proyek PV (energi surya) diharuskan untuk mengasuransikan proyek mereka dengan perlindungan properti dan tanggung jawab. Perlindungan properti dan tanggung jawab merupakan jenis asuransi yang komoditas dan diperlukan oleh sebagian besar perusahaan komersial, terutama yang terlibat dalam konstruksi. Selain itu, proyek PV mungkin juga diharuskan untuk membeli polis khusus, seperti asuransi

kendaraan komersial, asuransi kecelakaan kerja dan tanggung jawab atas pekerja, asuransi kejahatan, asuransi tanggung jawab pencemaran, asuransi laut, dan asuransi keterlambatan operasional (catatan: tidak semua polis ini akan dibutuhkan oleh setiap proyek).

### 2.2.5 Teknologi PLTS On-Grid




Gambar 2. Strategi Manajemen Resiko untuk Siklus Proyek PV

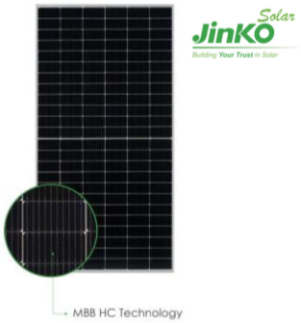
Sumber: Data Sekunder Narasumber

| Solar PV Component | Specification | Warranty | Brand |
|---|---|---|---|
| **PV Module** | • Tier 1 Mono P/N Type with ± 21.48% Module Efficiency | • Product warranty: 10 years<br>• Performance warranty: 25 years. | JinkoSolar, JA SOLAR, LONGi |
| **Inverter** | • Up to 20 Inputs with 10 MPP Trackers @98.7% efficiency.<br>• Fuse free design with integrated DC/AC Surge Arrester and DC disconnect switch | • Product warranty: 10 years.<br>• Extendable up to 20 years. | HUAWEI, SUNGROW, GROWATT, SMA |
| **DC Cable** | • Halogen-free and flame-retardant.<br>• up to 1500 Vdc<br>• IP68 protection rating PV connecttor<br>• Weather/UV-resistant -40°C to +120°C | • Functionality: 25 years.<br>• Product: 1 year. | JJ-LAPP, LEONI, Sicable, KUKA CABLE |
| **AC Cable** | • Single / Multi core power and control cable.<br>• Insulated cable fire-retardant. | • Functionality: 25 years.<br>• Product: 1 year. | SUPREME, JEMBO CABLE, KMI Wire and Cable |
| **Mounting** | • Anodized aluminum for corrosion resistant installation.<br>• Easy & quick installation.<br>• Adjustable to rooftop type. | • Functionality: 25 years.<br>• Product: 10 years. | ANTAI, Clenergy, Newsunpower |
| **AC Combiner Box** | • up to IP 65 for outdoor installation.<br>• Tier 1 protection device provider<br>• corrosion resistant material | • Functionality: 25 years.<br>• Product: 1 year. | Schneider Electric, ABB, MITSUBISHI ELECTRIC |
| **Monitoring & Sensors** | • Compatible with wide range of inverters, sensors, and meters<br>• Web-based monitoring system<br>• Sensor box measure irradiation, wind speed, and ambient temperature | • Functionality: 25 years.<br>• Product: 2 years. | Solar-Log, Lufft |

Gambar 3. Komponen PLTS dan Spesifikasi Komponen

Sumber: Data Sekunder Narasumber

1. Komponen PLTS On-Grid
    a. Modul PV




| | |
|---|---|
| **Product Name** | Jinko Solar JKM555M-72HL4 |
| **Technology** | Monocrystalline, P-type |
| **Rated Maximum Power** | 555 Wp (STC) |
| **Efficiency** | 21.48% |
| **Power Degradation** | 1st year 2%, 2nd – 25th year 0.55% |
| **Certificate** | IEC 61215, IEC 61730 |
| **Warranty** | 12 years for product warranty; 25 years for Linear Power Output |
| **Dimension** | 2278 × 1134 × 35mm |
| **Weight** | 28 kg |

Gambar 4. Modul PV

Sumber: Data Sekunder Narasumber

Berdasarkan data sekunder dan wawancara dengan narasumber, didapat hasil yaitu narasumber merekomendasikan penggunaan modul fotovoltaik (PC) dengan daya 555W sebagai pilihan utama untuk proyek rooftop, dibandingkan dengan modul yang memiliki kelas daya di atas 600Watt. Rekomendasi ini didasarkan pada analisis kebutuhan fleksibilitas di atap yang memiliki ruang terbatas. Modul 555W menunjukkan kecocokan terbaik berkat ukuran dan beratnya yang dapat dikelola, memungkinkan pergerakan di atas atap dengan batasan yang minimal.

Walaupun pengggunaan modul PV dengan kelas daya yang lebih tinggi memungkinkan, Salah satu aspek dari penelitian ini adalah efisiensi. Dengan menerapkan modul PV yang lebih efisien dan berukuran lebih kecil, saya percaya kita dapat mengoptimalkan penggunaan ruang di atap secara lebih efektif.

Narasumber merkomendasikan agar penggunaan modul dengan kelas daya yang lebih tinggi digunakan untuk proyek *gorund mount*. Selain itu, penting untuk dicatat bahwa modul dengan kelas daya yang lebih tinggi juga cenderung mengalami tingkat degradasi yang lebih tinggi akibat dari berkurangnya daya tahan modul yang lebih besar.

Menurut Parida et al., (2011) di dalam Kumar et al., (2018) menerangkan bahwa Sel surya monokristalin atau yang dikenal sebagai Si-mono, adalah modul atau sel fotovoltaik yang dibuat dari ingot kristal silinder tunggal dengan kemurnian

tinggi. Dari kristal tunggal ini, wafer dapat dipotong dan dibentuk menjadi bentuk oktagonal. Pada Kondisi Uji Standar (Standard Test Conditions) yaitu STC 1000 W/m², sel Si-mono menunjukkan kinerja terbaik. Namun, sel yang sama menunjukkan kinerja yang buruk ketika tingkat suhu meningkat.

Masih di artikel yang sama, Parida et al., (2011) menerangkan bahwa sel surya polikristalin atau yang dikenal sebagai Si-poly, terdiri dari kristal-kristal kecil yang membuat sel atau modul terlihat seperti "butiran kristal yang dikenal sebagai kristalit". Sel Si-poly "diproduksi dengan cara menggergaji balok persegi silikon menjadi batang, lalu menjadi wafer". Sel-sel ini bekerja lebih baik pada STC (Standard Test Conditions) dan kinerjanya berkurang seiring naiknya suhu. Modul Si-poly dikonfigurasikan dalam kombinasi seri dan paralel untuk membentuk generator PV Si-poly sesuai kebutuhan.

Selain monokristalin dan polikristalin, Parida et al., (2011) menerangkan dalam Kumar et al., (2018) terdapat sel surya lain yang dikenal dengan sel surya silikon amorf atau yang dikenal sebagai Si-amorph, adalah generator PV yang dikonfigurasikan dengan kombinasi modul PV Si-amorph. Modul-modul ini berbasis film tipis dan dibuat dengan menyisipkan bahan Si-amorph setebal 1 ɜm di antara dua panel kaca. Generator PV Si-amorph menunjukkan kinerja yang lebih baik dibandingkan dengan sel kristal Si-mono dan Si-poly. Sel-sel ini juga bekerja lebih baik dalam kondisi suhu tinggi dibandingkan dengan sel silikon kristal.

b. *Junction Box*

*Junction box* digunakan terutama di dua tempat berbeda dalam sistem PV, yaitu satu di antaranya adalah pada interkoneksi ke konverter daya. Di sini, semua rangkaian PV digabungkan bersama. Tempat lainnya adalah di enclosure PV surya di mana kotak sambungan ini digunakan dan mencakup dioda bypass yang memungkinkan aliran daya hanya dalam satu arah, yaitu dari panel surya ke sistem utilitas (Kumar et al., 2018).

c. Inverter



| | |
|---|---|
| **Capacity** | 50-200 kW* |
| **Max DC voltage** | 1500 Vdc |
| **Output AC voltage** | 400 / 690 / 800* |
| **IP** | min IP65 |
| **Protection** | AC overcurrent, DC reverse polarity, AC/DC surge protection, etc |
| **Efficiency** | > 98.7% |
| **Certificate** | IEC/EN 62477-1, IEC/EN 61000-6-2, IEC/EN 61000-6-4, EN 50549-1, |
| **Warranty** | 5 years |
| **communication** | RS485, ethernet |

Gambar 5. Power Condition System

Sumber: Data Sekunder Narasumber

Inverter dengan kapasitas 50-200 kW ini dirancang untuk sistem energi surya dengan tegangan DC maksimal 1500 Vdc dan tegangan output AC sebesar 400 / 690 / 800V, memberikan fleksibilitas dalam berbagai instalasi. Memiliki tingkat perlindungan minimum IP65, inverter ini tahan terhadap debu dan air, membuatnya cocok untuk aplikasi di luar ruangan. Fitur perlindungan yang canggih mencakup proteksi terhadap arus berlebih AC, polaritas terbalik DC, dan lonjakan arus AC/DC, memastikan keamanan operasional. Dengan efisiensi lebih dari 98.7%, inverter ini menawarkan performa yang sangat efisien dalam konversi energi. Sertifikasi internasional yang mencakup IEC/EN 62477-1, IEC/EN 61000-6-2, IEC/EN 61000-6-4, dan EN 50549-1 menjamin kualitas dan keamanan produk. Selain itu, inverter ini dilengkapi dengan komunikasi RS485 dan ethernet, memungkinkan pemantauan dan kontrol jarak jauh yang mudah. Produk ini juga dilengkapi dengan garansi 5 tahun, memberikan kepercayaan lebih dalam penggunaannya

Inverter on-grid adalah perangkat yang mengubah daya DC menjadi daya AC. Ini adalah salah satu komponen esensial dari sistem PV untuk terhubung dengan sektor daya saat ini. Terdapat berbagai jenis inverter yang tersedia di pasaran dengan rating mulai dari kVA kecil hingga kVA besar. Inverter yang tersedia saat

ini dilengkapi dengan MPPT (Maximum Power Point Tracking) dan rentang input Vdc yang lebih luas (Kumar et al., 2018).

d. Panel Utama dan Pemutus AC

Dalam sistem fotovoltaik, kotak pemutus DC dan AC adalah dua kotak di mana pemutus AC berfungsi untuk memisahkan konverter daya on-grid, yaitu inverter DC-AC, dari jaringan utilitas listrik. Arus keluaran dari inverter harus diperhitungkan saat menentukan ukuran pemutus AC, yang biasanya berupa pemutus sirkuit. Pemutus ini umumnya ditempatkan di panel utama (Kumar et al., 2018).Kumar et al., (2018) juga menjelaskan bahwa panel utama berfungsi sebelum sistem listrik dapat diintegrasikan ke jaringan listrik. Panel ini umumnya terdiri dari perangkat elektromekanis yang digunakan untuk memutus sambungan sistem fotovoltaik dari jaringan listrik.

e. Net Meter

*Net meter* adalah perangkat yang digunakan untuk memantau aliran masuk dan keluar listrik antara sistem pembangkit listrik dan jaringan utilitas listrik. Dalam sistem fotovoltaik, jika energi yang dihasilkan berlebih, energi tersebut dapat dijual ke utilitas melalui perangkat ini (Kumar et al., 2018).

f. Jaringan Listrik

Jaringan listrik adalah jaringan tenaga listrik yang menghubungkan pusat beban dan penyedia energi. Ini adalah salah satu bagian utama dari jaringan sistem tenaga listrik yang berfungsi sebagai antarmuka antara pembangkit listrik, saluran transmisi listrik, dan saluran distribusi. Jaringan ini mentransmisikan tenaga listrik yang dihasilkan dari sumber mana pun (terbarukan atau tidak terbarukan) di mana saja dan mendistribusikannya kepada konsumen sesuai kebutuhan (baik dalam bentuk 1-fasa atau 3-fasa) (Kumar et al., 2018)

g. Kabel DC




| | |
|---|---|
| **Product Name** | JJ-Lapp OFLEX Solar XLR-E or equivalent |
| **Advantages** | - Halogen free, flame retardant<br>- High temperature/UV/Weather/ozone resistance<br>- very long service life,>25 years at 90°C |
| **Operating Temp** | -40°C up to +120°C |
| **Rated value** | 1500Vdc |
| **Certificate** | IEC 60364-5-52, HD 60364-5-52, EN 50618, EN 60216-1, EN 50396, IEC 60228, |

Gambar 6. Kabel DC

Sumber: Data Sekunder Narasumber

Berdasarkan data sekunder dari narasumber, kabel DC yang digunakan pada proyek yaitu menggunakan Produk JJ-Lapp OFLEX Solar XLR-E adalah kabel berkualitas tinggi yang dirancang untuk aplikasi tenaga surya dan industri lainnya, menawarkan berbagai keunggulan yang signifikan. Dengan sifat halogen-free dan tahan api, kabel ini menjamin keamanan tambahan dengan mengurangi risiko pelepasan asap beracun saat terbakar. Selain itu, kabel ini memiliki ketahanan yang luar biasa terhadap suhu tinggi, sinar UV, cuaca ekstrem, dan ozon, menjadikannya pilihan ideal untuk penggunaan luar ruangan. Umur layanan kabel ini sangat panjang, mencapai lebih dari 25 tahun pada suhu 90°C, sehingga mengurangi kebutuhan untuk penggantian kabel dalam jangka waktu lama. Kabel ini dapat beroperasi dalam rentang suhu yang luas, dari -40°C hingga +120°C, dan memiliki rating tegangan 1500 Vdc, membuatnya cocok untuk berbagai aplikasi yang memerlukan tegangan tinggi. Dengan berbagai sertifikasi seperti IEC 60364-5-52, HD 60364-5-52, dan EN 50618, produk ini menjamin keandalan dan efisiensi, menjadikannya solusi optimal untuk sistem tenaga surya dan instalasi listrik yang menuntut.

h. Kabel AC




| | |
|---|---|
| **Product Name** | Supreme Cable 4 Core NYY |
| **Max Operating Temp** | Up to 70° C (PVC insulation)<br>Up to 90° C (XLPE insulation) |
| **Certificate** | IEC 60502.1, SNI 04.6629.3 2006 |

Gambar 7. Kabel AC

Sumber: Data Sekunder Narasumber

Berdasarkan data sekunder dari narasumber, produk Supreme Cable 4 Core NYY tersedia dengan dua pilihan isolasi: PVC dan XLPE, yang masing-masing dapat beroperasi pada suhu maksimum hingga 70°C dan 90°C. Keunggulan ini menjadikannya pilihan ideal untuk berbagai aplikasi, baik di lingkungan industri maupun residensial. Selain itu, kabel ini telah memenuhi standar sertifikasi internasional seperti IEC 60502.1 dan SNI 04.6629.3 2006, yang menjamin kualitas dan keandalan produk. Dengan desain yang kuat dan tahan lama, Supreme Cable 4 Core NYY menawarkan performa yang konsisten dan aman untuk berbagai kebutuhan instalasi listrik.

i. *Mounting System* (*Clip Lock*)




Gambar 8. Mounting System (Clip Lock)

Sumber: Data Sekunder Narasumber

j. *Mounting System (L-Feet)*




Gambar 9. Mounting System (L-Feet)

Sumber: Data Sekunder Narasumber

k. *Mounting System* (Dak)



Gambar 10. *Mounting System (Dak)*

Sumber: Data Sekunder Narasumber

l. *Mounting System (Ground)*



Gambar 11. *Mounting System (Ground)*

Sumber: Data Sekunder Narasumber

m. *AC Combiner Box*

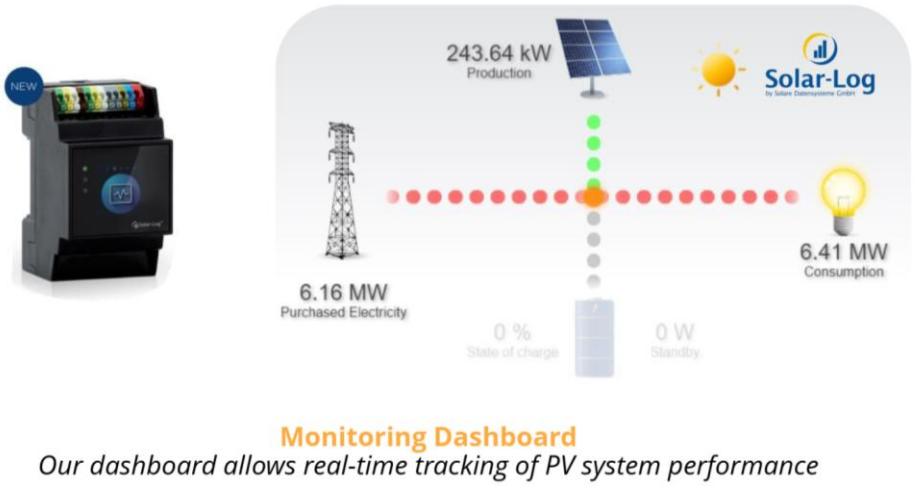


Gambar 12. *AC Combiner Box*

Sumber: Data Sekunder Narasumber

Narasumber menuturkan dalam data sekundernya bahwa komponen *AC Combiner* adalah komponen yang dirancang untuk penggunaan baik di luar ruangan maupun di dalam ruangan, sesuai dengan lokasi pemasangan panel surya. Perangkat ini memiliki ketahanan terhadap korosi dan cuaca, memastikan daya tahan dan keandalan dalam berbagai kondisi lingkungan. Dilengkapi dengan pemutus sirkuit motorisasi, AC Combiner ini dapat secara otomatis memutus aliran listrik saat terdeteksi masalah, memberikan perlindungan tambahan bagi sistem. Selain itu, perangkat ini juga menyertakan perangkat perlindungan lonjakan (Surge Protection Device) yang melindungi sistem dari lonjakan tegangan yang dapat merusak peralatan. Meteran daya yang telah dikalibrasi juga disertakan, memungkinkan pemantauan akurat terhadap penggunaan dan produksi energi. Dengan fitur-fitur ini, AC Combiner menjadi solusi yang efisien dan aman untuk mengelola serta mengoptimalkan sistem tenaga surya di berbagai aplikasi.

n. *Online Monitoring System*




Gambar 13. *Online Monitoring System*

Sumber: Data Sekunder Narasumber

*AC Combiner* adalah perangkat yang dirancang untuk penggunaan baik di luar ruangan maupun di dalam ruangan, sesuai dengan lokasi pemasangan panel surya. Perangkat ini memiliki ketahanan terhadap korosi dan cuaca, memastikan daya tahan dan keandalan dalam berbagai kondisi lingkungan. Dilengkapi dengan pemutus sirkuit motorisasi, AC Combiner ini dapat secara otomatis memutus aliran listrik saat terdeteksi masalah, memberikan perlindungan tambahan bagi sistem. Selain itu, perangkat ini juga menyertakan perangkat perlindungan lonjakan (Surge Protection Device) yang melindungi sistem dari lonjakan tegangan yang dapat merusak peralatan. Meteran daya yang telah dikalibrasi juga disertakan, memungkinkan pemantauan akurat terhadap penggunaan dan produksi energi. Dengan fitur-fitur ini, AC Combiner menjadi solusi yang efisien dan aman untuk mengelola serta mengoptimalkan sistem tenaga surya di berbagai aplikasi.

o. Sensor



| | |
|---|---|
| **Product Name** | Luft WS 501, or Kippzonen SMP6, or Solarlog Weather sensor professional |
| **Outdoor rated** | Yes |
| **Measurement parameters** | Irradiance, ambient temperature |
| **Irradiance range** | up to 1400 W/m2 |
| **Temperature range** | -35 to 80 deg C |
| **Comm. protocol** | Modbus |

*Gambar 14. Sensor*

Sumber: Data Sekunder Narasumber

Luft WS 501, Kippzonen SMP6, atau Solarlog Weather Sensor Professional adalah sensor cuaca profesional yang dirancang untuk penggunaan luar ruangan. Sensor ini mampu mengukur berbagai parameter penting, termasuk radiasi matahari (irradiance) dan suhu lingkungan. Dengan rentang pengukuran irradiance hingga 1400 W/m², perangkat ini sangat cocok untuk aplikasi pemantauan energi surya dan cuaca. Rentang suhu yang dapat diukur oleh sensor ini berkisar antara -35°C hingga 80°C, menjadikannya andal dalam berbagai kondisi lingkungan ekstrem. Sensor ini menggunakan protokol komunikasi Modbus, memastikan integrasi yang mudah dengan sistem monitoring dan kontrol lainnya. Dengan rating outdoor dan spesifikasi yang canggih, perangkat ini ideal untuk aplikasi pemantauan cuaca profesional di sistem tenaga surya atau lingkungan lainnya.

p. Tangga Akses *Rooftop*



| | |
|---|---|
| **Outdoor Readiness** | Corrosion resistant |
| **Type** | Ladder with cage |
| **Standard design** | OSHA standard |

Gambar 15. Tangga Akses *Rooftop*

Sumber: Data Sekunder Narasumber

Tangga dengan kandang ini dirancang untuk penggunaan luar ruangan dan memiliki ketahanan terhadap korosi, menjadikannya andal untuk penggunaan jangka panjang di lingkungan yang keras dan terpapar cuaca. Tangga ini mengikuti standar desain yang ditetapkan oleh **OSHA (Occupational Safety and Health Administration)**, memastikan keselamatan dan kepatuhan terhadap regulasi keselamatan kerja. Dengan fitur kandang pelindung, tangga ini memberikan perlindungan tambahan bagi pengguna, terutama saat bekerja di ketinggian, membuatnya ideal untuk aplikasi industri dan infrastruktur di luar ruangan

q. *Rooftop Walkway*



| | |
|---|---|
| **Material** | Fiberglass Reinforced Plastic material |
| **Advantages** | 70% lighter than steel<br>Corrosion resistant, UV resistant and low maintenance<br>Non-conductive and slip resistant.<br>Fire retardant |
| **Dimension (LxWxH)** | 3660x400mmx30mm |

Gambar 16. Rooftop Walkway

Sumber: Data Sekunder Narasumber

Tangga ini terbuat dari **Fiberglass Reinforced Plastic (FRP)**, yang menawarkan berbagai keunggulan signifikan. Bahan ini 70% lebih ringan dibandingkan baja, menjadikannya lebih mudah untuk diangkut dan dipasang, terutama dalam aplikasi di mana bobot menjadi faktor penting. Selain itu, tangga ini memiliki ketahanan tinggi terhadap korosi dan sinar UV, serta memerlukan perawatan yang rendah, menjadikannya ideal untuk penggunaan luar ruangan dalam jangka panjang. Bahan FRP ini juga tidak menghantarkan listrik, sehingga aman digunakan di lingkungan yang berisiko terkena aliran listrik. Permukaan yang anti-selip dan sifat tahan api menambah aspek keselamatan dalam penggunaannya. Dengan dimensi **3660x400mmx30mm**, tangga ini dirancang untuk memenuhi

berbagai kebutuhan aplikasi industri, terutama dalam lingkungan yang keras dan penuh tantangan.

r. *Safety Line*



Gambar 17. *Safety Line*

Sumber: Data Sekunder Narasumber

Sistem pengaman ini menggunakan kabel baja sebagai *safety line*, yang menawarkan kekuatan dan keandalan tinggi. Meskipun terbuat dari baja, kabel ini tetap ringan dan tahan terhadap cuaca, menjadikannya ideal untuk penggunaan di luar ruangan, bahkan dalam kondisi lingkungan yang ekstrem. Desain kabel ini dapat terhubung secara *interlocking* dengan jalur pejalan (*walkway*), memudahkan pergerakan dan manuver pengguna saat bekerja di ketinggian atau area berbahaya. Dengan fitur ini, sistem keselamatan memberikan perlindungan maksimal, meningkatkan efisiensi sekaligus mengurangi risiko kecelakaan dalam operasi industri atau konstruksi.

s. *CCTV*




Gambar 18. *CCTV*

Sumber: Data Sekunder Narasumber

Penempatan CCTV di area *Balance of System*, tangga akses menuju *rooftop*, dan di sekitar modul Solar PV di atap bertujuan untuk meningkatkan keamanan dan pengawasan operasional. Di area Balance of System, CCTV akan memantau komponen penting seperti inverter, baterai, dan sistem kontrol untuk memastikan keamanan serta efisiensi operasional. Pada tangga akses rooftop, CCTV digunakan untuk mencegah akses yang tidak sah dan memantau keselamatan pekerja selama perawatan. Di sekitar modul Solar PV, CCTV berfungsi untuk melindungi panel surya dari potensi pencurian atau kerusakan, serta memantau kinerja dan kondisi panel. Kamera beresolusi tinggi dipasang untuk menghasilkan rekaman yang jelas, sementara perlindungan IP68 memastikan kamera tetap berfungsi optimal meskipun terkena debu dan air. Fitur pemantauan jarak jauh memungkinkan akses real-time ke rekaman CCTV, memberikan respons cepat dan pengawasan berkelanjutan.

t. *Fire Extinguishers*




Gambar 19. Fire Extingishers

Sumber: Data Sekunder Narasumber

Selama fase konstruksi, pemadam api berbasis *dry powder* digunakan untuk memastikan penanganan cepat dan efektif terhadap berbagai jenis kebakaran, termasuk kebakaran akibat material yang mudah terbakar dan peralatan listrik. Pemadam jenis ini cocok untuk kondisi konstruksi yang melibatkan banyak material yang beragam. Ketika sistem mulai terhubung dan beroperasi, pemadam api berbasis $CO_2$ digunakan untuk meningkatkan keselamatan listrik selama fase interkoneksi dan operasional. $CO_2$ efektif memadamkan kebakaran listrik tanpa meninggalkan residu, sehingga aman digunakan pada peralatan sensitif. Kedua jenis pemadam ini memberikan perlindungan maksimal di setiap tahap proyek, sesuai dengan risiko yang dihadapi.

u. *Energy Storage System*



| | |
|---|---|
| **Battery Type** | Li-ion Based |
| **Capacity** | 100 - 2000 kWh* |
| **Operating temperature** | -30 to 55C |
| **Charge / Discharge rate** | 1C / 0.5C* |
| **Protection degree** | min IP55 |
| **BMS** | Yes, module level |
| **Fire protection** | Yes |
| **Warranty** | 5 Years |
| **Certification** | CE/IEC62619/UL1973/UL9540 A/UN38.3 |

Gambar 20. Energy Storage System

Sumber: Data Sekunder Narasumber

Baterai berbasis *Li-ion* ini dirancang dengan kapasitas antara 100 hingga 2000 kWh, menjadikannya ideal untuk berbagai aplikasi penyimpanan energi. Baterai ini dapat beroperasi dalam rentang suhu -30°C hingga 55°C, memastikan kinerja yang optimal dalam berbagai kondisi lingkungan. Dengan laju pengisian dan pengosongan masing-masing 1C dan 0.5C, baterai ini mendukung siklus energi yang efisien. Tingkat perlindungan minimum IP55 menjamin ketahanan terhadap debu dan air, memungkinkan penggunaan luar ruangan. Dilengkapi dengan *Battery Management System* (BMS) pada level modul, baterai ini memberikan pemantauan yang cermat untuk memastikan keamanan dan kinerja yang stabil. Selain itu, sistem proteksi kebakaran yang terintegrasi meningkatkan keselamatan selama operasional. Baterai ini dilengkapi dengan garansi 5 tahun dan bersertifikasi CE, IEC62619, UL1973, UL9540A, dan UN38.3, menegaskan kualitas dan keamanannya sesuai dengan standar internasional.

.

2. Pengoperasian PLTS On-Grid

(Kumar, Kumar, et al., 2017; Kumar, Reddy, et al., 2017; Romero-Cadaval et al., 2013) dalam (Kumar et al., 2018) menjelaskan bahwa sistem fotovoltaik beroperasi untuk menghasilkan listrik, dan operasinya serupa untuk sistem fotovoltaik off-grid dan on-grid. Ketika energi cahaya yang mengenai modul fotovoltaik cukup untuk menghasilkan elektron, daya DC dihasilkan pada terminal

output array PV dan kemudian diteruskan ke konverter daya yang membantu dalam konversi DC ke AC. Energi AC ini dapat langsung digunakan untuk beban listrik, atau dapat disuplai ke jaringan utilitas melalui fasilitas net metering. Jika energi yang dihasilkan digunakan untuk berbagai aplikasi beban di tingkat pembangkitan itu sendiri, maka disebut sebagai sistem PV mandiri (standalone PV system). Jika energi yang dihasilkan terus menerus disuplai ke jaringan utilitas, maka dapat disebut sebagai sistem fotovoltaik on-grid.

### 2.2.6 Performa PLTS On-Grid

a. Rasio Performa

Menurut Elhamaoui et al. (2023), efisiensi PLTS sangat dipengaruhi oleh sejumlah faktor geografis dan lingkungan, seperti posisi lintang, fluktuasi musiman, intensitas radiasi matahari, indeks kejernihan atmosfer, serta kondisi cuaca lokal lainnya. Faktor-faktor ini menentukan jumlah energi matahari yang tersedia dan seberapa efektif modul PV dapat mengubahnya menjadi energi listrik. Sesuai dengan standar yang ditetapkan oleh International Electrotechnical Commission (IEC), berbagai studi mengenai evaluasi kinerja dan degradasi modul PLTS telah dilakukan di berbagai lokasi dengan karakteristik iklim yang berbeda-beda.

Analisis terhadap kinerja dan degradasi dua jenis teknologi PV yang umum digunakan, yaitu silikon polikristalin (Poly-Si) dan silikon monokristalin (Mono-Si), dalam lingkungan beriklim tropis di kawasan India bagian timur yang dilakukan oleh Pramanick & Kumar (2024) dengan berbagai parameter kinerja sistem PV digunakan sebagai indikator evaluasi, termasuk reference yield, array yield, final yield, array capture loss, capacity factor (CF), dan performance ratio (PR). Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem PV Mono-Si secara konsisten menunjukkan performa yang lebih unggul dibandingkan dengan PV Poly-Si. Secara kuantitatif, energi yang dihasilkan oleh Mono-Si PV tercatat sekitar 12% lebih tinggi, sementara kerugian energinya sekitar 32% lebih rendah dibandingkan dengan sistem Poly-Si PV. Dari sisi efisiensi sistem secara keseluruhan, nilai rasio kinerja tahunan rata-rata (PR) tercatat sebesar 77,5% untuk Mono-Si dan 72,42% untuk Poly-Si. Sementara itu, faktor kapasitas tahunan (CF) masing-masing adalah 16,78% untuk Mono-Si dan 15,44% untuk Poly-Si, menunjukkan bahwa sistem Mono-Si lebih optimal dalam memanfaatkan potensi iradiasi matahari.

Dengan demikian, energi yang dihasilkan dari sistem Mono-Si memiliki biaya produksi sekitar 9% lebih rendah, menjadikannya lebih ekonomis untuk implementasi jangka panjang di wilayah tropis.

Penelitian yang dilakukan oleh Boretti & Castelletto (2024) pada 53 pembangkit listrik tenaga surya selama lebih dari satu dekade, ditemukan bahwa tingkat degradasi tahunan relatif hanya berkisar antara 0–0,29%. Hal ini lebih rendah dari asumsi sebelumnya sebesar 0,5% yang digunakan dalam simulasi SAM. Dengan menurunnya nilai degradasi, biaya listrik rata-rata sepanjang umur proyek (LCOE) juga menurun, menjadikan investasi pada proyek PV semakin ekonomis dan menarik.

Evaluasi terhadap parameter Excess Energy (EE) dan Beneficial Energy (EE) yang dilakukan oleh Jamil et al. (2023) juga mengungkapkan bahwa estimasi teoritis proyek PLTS 100 MW-QASP dapat menghasilkan kelebihan energi yang dihasilkan oleh PLTS 100 MW-QASP sebesar 1.504,32 MWh, dengan Performance Ratio (PR) sebesar 75,64%. PR aktual sistem ini tercatat lebih tinggi 0,7% dibandingkan target sebesar 74,94%. Secara total, sistem menghasilkan Excess Energy (EE) sebesar 165.588,58 MWh, dan memberikan nilai manfaat ekonomi dalam bentuk Beneficial Energy (BE) senilai USD 300.864,87.

Penelitian yang dilakukan oleh Jamil et al. (2022) menguraikan pendekatan berbasis industri untuk mengevaluasi kinerja pembangkit listrik tenaga surya skala besar (Large-Scale Solar PV Plant/LSSP), dengan fokus pada pengembangan dan penerapan model baru berbasis Performance Ratio (PR) yang dikalkulasi dari hasil produksi energi aktual. PR merupakan salah satu indikator utama yang digunakan dalam menilai efisiensi dan kualitas sistem PLTS skala besar, terutama bagi proyek dengan kapasitas terpasang minimal 20 MWdc. PR memberikan gambaran kuantitatif tentang efisiensi kerja sistem dalam kondisi aktual. Namun, tantangan utama dalam penilaiannya adalah fluktuasi nilai PR dari tahun ke tahun, yang disebabkan oleh ketersediaan data iradiasi global insiden efektif (Global Incident Irradiance / GlobInc) yang tidak selalu dapat diperoleh secara konsisten. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa PR aktual yang dihasilkan oleh sistem berada di atas target. Secara kuantitatif, pembangkitan energi aktual LSSP 100 MWdc tercatat 5% lebih tinggi dibandingkan hasil teoritis berdasarkan kalkulasi PR. Pada Tahun Anggaran (TA) 2018–2019, sistem mencatatkan PR sebesar 76,58%, yang berarti 0,34% lebih tinggi dari nilai PR target sebesar 76,24%. Kelebihan performa tersebut

menghasilkan tambahan energi sebesar 710,72 MWh dan bonus finansial sebesar USD 142.143,62. Capaian ini menunjukkan bahwa pendekatan formula PR berbasis produksi energi aktual memberikan hasil yang lebih akurat dalam menjamin kinerja dan keandalan sistem PLTS.

Sementara menurut penelitian yang dilakukan oleh (Jain et al., 2022) Pada tahun 2018 di Universitas Louisiana di dengan PLTS berkapasitas 1,1 MW memiliki 4.142 modul PV yang dipasang, menggunakan tiga jenis teknologi modul yang berbeda. Hasil menunjukkan bahwa teknologi CIGS (Copper Indium Gallium Selenide) menunjukkan rasio kinerja tertinggi, yaitu 79%, sedangkan silikon monokristalin dan silikon polikristalin masing-masing mencatat rasio 77% dan 73%. Secara umum, bahan PV yang digunakan pada berbagai PLTS juga turut mempengaruhi kinerja rasio energi Listrik yang dihasilkan.

b. Degradasi Performa

Penelitian dari Li et al. (2022) mengusulkan kerangka kerja strategi pemeliharaan berbasis optimasi dua lapis (dual-layer optimization maintenance strategy) yang berfokus pada interdependensi komponen dan bertujuan untuk mengembangkan pendekatan yang tidak hanya mempertimbangkan individualitas komponen, tetapi juga interaksi dan pengaruh timbal baliknya dalam konteks biaya dan ketersediaan sistem, hasilnya menunjukkan bahwa dalam kondisi aksesibilitas rendah, strategi optimasi lapis ganda menghasilkan tingkat efisiensi biaya yang lebih tinggi dan pengurangan ketersediaan sistem yang relatif lebih kecil.

Disamping itu, penelitian yang dilakukan oleh Abdulla et al. (2024) membahas praktik operasi dan pemeliharaan (O&M) untuk sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) berbasis fotovoltaik (PV) dengan melakukan identifikasi empat domain utama yang saling terkait, yaitu: strategi pemeliharaan, indikator kinerja utama (Key Performance Indicators/KPI), pemodelan degradasi, serta proses perencanaan dan optimasi pemeliharaan. Hasil menunjukkan bahwa isu pemeliharaan masih belum mendapat perhatian sebesar aspek operasional lainnya dalam manajemen sistem energi PV. Dalam praktiknya, pengelolaan O&M pada sistem PV harus mempertimbangkan berbagai indikator kinerja, baik dari sisi teknis, ekonomi, maupun operasional. Integrasi

KPI ini akan membantu manajer lapangan atau pengambil keputusan dalam menyusun prioritas pemeliharaan yang efisien dan berdampak nyata.

Penelitian Elhamaoui et al. (2023) menunjukkan bahwa PLTS dengan modul CIS yang beroperasi di luar ruangan mengalami degradasi awal sebesar 1,35% per tahun setelah enam tahun penggunaan di luar ruangan. Namun, angka ini kemudian direvisi menjadi 3,13% per tahun karena penurunan kualitas modul yang disebabkan oleh kondisi sirkuit terbuka dalam waktu lama. Dalam hal ketahanan jangka panjang Pramanick & Kumar (2024) menjelaskan bahwa sistem PV Poly-Si menunjukkan penurunan kinerja yang lebih cepat dibandingkan Mono-Si. Laju degradasi tahunan rata-rata untuk Mono-Si adalah 0,67%, sedangkan untuk Poly-Si mencapai 0,73%. (Bansal et al., 2021) menganalisis kinerja dan degradasi dari PLTS on-grid berkapasitas 5 MW di Gujarat, India, menunjukkan laju penurunan kinerja (degradasi) yang cukup signifikan sekitar 2–2,5% per tahun.

c. Produksi Energi

Menurut Sultan et al. (2023), agar proyek mencapai tingkat pengembalian investasi (ROI) yang positif, diperlukan struktur konfigurasi sistem yang optimal disertai dengan harga jual listrik minimum sebesar 7,03 sen per kWh dalam skema perjanjian jual beli listrik atau Power Purchase Agreement (PPA). Produksi energi pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dipengaruhi oleh berbagai faktor teknis dan lingkungan, El Hammoumi et al. (2022) menyoroti pentingnya teknologi seperti *solar tracker* dan panel apung (*floating solar panels*) untuk memaksimalkan produksi energi dengan meningkatkan efisiensi penangkapan radiasi matahari. Sementara itu, Mansour et al. (2021) menekankan peran sudut kemiringan (*tilt angle*) panel surya dalam mengoptimalkan produksi energi, terutama di wilayah dengan lintang spesifik seperti Arab Saudi, di mana penyesuaian sudut secara musiman dapat meningkatkan output daya hingga 15%. Tantangan lain yang signifikan adalah efek *partial shading* pada susunan panel PV, yang menurut Saiprakash et al. (2020) dapat mengurangi produksi energi secara drastis, tergantung pada konfigurasi *array* dan distribusi bayangan. Selain itu, Shaik et al. (2023) mengidentifikasi parameter seperti suhu lingkungan, kelembaban, dan kecepatan angin sebagai faktor kritis yang memengaruhi kinerja PLTS, di mana peningkatan suhu panel dapat menurunkan efisiensi konversi energi. Studi lapangan oleh Tarigan (2019) di

Surabaya juga mengungkap bahwa akumulasi debu pada permukaan panel dapat mengurangi output energi hingga 20%, terutama di daerah perkotaan dengan tingkat polusi tinggi. Temuan-temuan ini secara kolektif menyiratkan bahwa produksi energi PLTS tidak hanya bergantung pada kondisi radiasi matahari, tetapi juga pada desain sistem, faktor lingkungan, dan strategi pemeliharaan. Optimalisasi produksi energi memerlukan pendekatan holistik yang mencakup pemilihan teknologi, penyesuaian desain, dan mitigasi terhadap faktor-faktor penghambat seperti shading, debu, dan fluktuasi suhu.

Produksi energi dari PLTS sangat dipengaruhi oleh nilai iradiasi matahari. Beberapa referensi menerangkan bahwa Indonesia termasuk kedalam negara tropis dengan nilai iradiasi yang memiliki potensi besar untuk pemanfaatan PLTS. Sumber pertama, Europian Commission, 2024 yang dikelola oleh Joint Research Centre (JRC) Uni Eropa, mencatat nilai iradiasi sebesar 1.446,03 kWh/m²/tahun. Data ini dihasilkan melalui analisis berbasis satelit dan model atmosfer untuk memprediksi potensi energi surya suatu wilayah, dengan tingkat akurasi yang baik namun tetap memerlukan validasi lapangan. Sementara menurut Global Solar Atlas, 2025, platform yang dikembangkan oleh World Bank Group menjelaskan bahwa Indonesia memiliki nilai iradiasi tahunan mencapai 1.657,30 kWh/m²/tahun. Data selanjutnya dari Solargis, 2025 menunjukkan nilai iradiasi sebesar 1.607,00 kWh/m²/tahun. Solargis dikenal memiliki basis data detail dengan pembaruan rutin, memanfaatkan kombinasi pengamatan satelit dan model numerik khusus untuk analisis energi surya.

Tingginya nilai iradiasi menunjukkan bahwa Indonesia khususnya tempat penelitian di kota Palembang provinsi Sumatera Selatan Indonesia berpotensi besar untuk pengembangan PLTS. Dalam perencanaan proyek PLTS, perbedaan nilai iradiasi ini perlu dianalisis lebih lanjut untuk menentukan angka acuan yang lebih tepat. Informasi iradiasi ini menjadi dasar penting dalam menghitung potensi produksi energi tahunan dari PLTS. Secara umum, mencari nilai produksi energi Listrik suatu PLTS ialah sebagai berikut:

$$\text{Energi (kWh)} = P \times H \times PR$$

Dengan:

- P = Kapasitas terpasang sistem PLTS (kWp)

- H = Rata-rata iradiasi matahari harian di lokasi (kWh/m²/hari)
- PR = Performance Ratio (%)

2.2.7 Biaya Modal dan Operasional

A. Biaya Modal Pembangunan PLTS

Teknologi PLTS (solar PV) telah menjadi teknologi yang memiliki tingkat pembelajaran yang paling tinggi dan mengalami penurunan harga paling signifikan di antara semua teknologi energi terbarukan. Menurut laporan (International Renewable Energy Agency, 2024) selama periode Desember 2009 sampai Desember 2023, harga modul silikon kristalin di pasar Eropa menurun drastic hingga 92% - 98% dengan rata-rata 93%. Modul bifacial - yang dapat menangkap sinar matahari dari dua sisi - semakin umum digunakan dengan pertumbuhan pangsa pasar yang meningkat dari 8% di tahun 2019 menjadi 50% pada 2023.

Biaya pemasangan sistem PLTS skala utilitas secara global terus menunjukkan penurunan. Pada tahun 2023 rata-rata biaya total pemasangan berbobot secara global mencapai USD 758 per kW atau Rp 11.370.000 per kW (kurs rupiah Rp15.000 / USD), yang berarti lebih rendah 17% dibandingkan tahun 2022 dan telah turun sebesar 86% dibandingkan tahun 2010. Di tahun yang sama, biaya proyek berada dalam rentang USD 526 per kW (Rp 7.890.000 per kW) atau hingga USD 1.663 per kW (Rp 24.845.000 per kW). Penurunan biaya ini mengindikasikan bahwa semakin banyak pasar di dunia yang mengalami efisiensi struktur biaya dalam pengembangan proyek PLTS. Sementara menurut penelitian dari Arifin et al., 2023yang meneliti tentang pengembangan PLTS on-grid dan off-grid menjelaskan bahwa PLTS on-grid memiliki biaya yang jauh lebih murah. Biaya investasi PLTS on-grid berada pada angka Rp 15.621.635 untuk modul PV nya ditambah dengan Rp 4.367.652 untuk biaya converter tegangan DC ke sistem listrik AC sehingga total biaya investasi PLTS on-grid menjadi Rp 19.989.287 / kW.

B. Biaya Operasional dan Pemeliharaan PLTS

Biaya pemeliharaan PLTS berbanding lurus mengikuti tren penurunan biaya Pembangunan nya. Dalam satu dekade terakhir, biaya operasi dan pemeliharaan (O&M) PLTS skala utilitas mengalami penurunan yang signifikan. Penurunan ini disebabkan oleh meningkatnya efisiensi modul surya yang berdampak pada berkurangnya luas lahan yang

dibutuhkan untuk setiap kapasitas megawatt (MW). Selain itu, persaingan pasar serta meningkatnya keandalan teknologi mendorong perancangan sistem yang lebih efisien dan hemat. Strategi baru dan inovasi, seperti penggunaan otomasi pembersih hingga analisis data untuk mendeteksi dan mencegah gangguan sebelum terjadi, juga turut menurunkan biaya dan *downtime maintenance*.

Laporan (International Renewable Energy Agency, 2024) menjelaskan biaya O&M menurun 74% antara tahun 2011 dan 2022 — dari USD 42,3/kW (Rp 634.500/kW) per tahun menjadi USD 11,2/kW (Rp 168.000/kW) per tahun di Amerika Serikat. Angka ini mencakup biaya pengawasan, rekayasa, pemeliharaan, sewa, serta pelatihan, berdasarkan sampel 122. Di Eropa, biaya O&M rata-rata dilaporkan sebesar USD 10/kW (Rp 150.000/kW) per tahun. Pada tahun 2023 menunjukkan biaya rata-rata O&M adalah USD 10,3/kW (Rp 154.500/kW) per tahun, turun 62% dibandingkan tahun 2010. Estimasi ini mencakup semua komponen biaya O&M, termasuk asuransi dan manajemen aset, yang terkadang tidak dilaporkan dalam survei biaya O&M. Seperti halnya biaya instalasi, biaya O&M sangat bervariasi antar negara. Dalam sampel ini, biaya terendah adalah USD 3,6/kW (Rp 54.000 / kW) per tahun (China), dan tertinggi USD 13,9/kW (Rp 208.000 / kW) per tahun (Jepang). Referensi lain dari (Arifin et al., 2023) menjelaskan bahwa biaya O&M untuk PLTS on-grid ialah Rp 145.588 / kW / tahun. Nilai yang jauh lebih rendah jika dibandingkan dengan biaya O&M untuk PLTS off-grid karena penambahan harga baterai.

Dari sisi kondisi makroekonomi, Adi et al. (2022) menemukan bahwa inflasi memiliki pengaruh positif dan signifikan terhadap tingkat suku bunga di Indonesia. Temuan tersebut digunakan sebagai landasan bahwa inflasi dan biaya pembiayaan perlu dipertimbangkan dalam analisis sensitivitas proyek PLTS jangka panjang. Dalam penelitian ini, inflasi tidak diperlakukan sebagai sumber keuntungan secara otomatis, melainkan sebagai parameter yang memengaruhi eskalasi komponen arus kas sesuai asumsi model.