

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Potensi dan Pemanfaatan Energi Surya

Secara umum, wilayah tropis dan subtropis menerima paparan sinar matahari yang paling tinggi. Negara-negara di kawasan tersebut, termasuk Indonesia, memiliki potensi lebih besar untuk pengembangan energi matahari atau surya. Sebagian besar wilayah Indonesia memiliki potensi radiasi matahari harian antara 3.8 hingga 4.6 kWh/m² (Global Solar Atlas, 2018). Analisis potensi energi surya yang dilakukan Rahwanda et al. (2022) di Pontianak, yang terletak dekat garis khatulistiwa, bahkan menunjukkan produksi listrik hingga 5,25 kWh/m², dengan puncak produksi tepat saat musim kemarau yaitu bulan Agustus dan September. Variasi intensitas radiasi matahari dan produksi listrik yang diamati menegaskan bahwa potensi energi surya sebagai alternatif energi terbarukan sangat bergantung pada kondisi cuaca dan lokasi geografis wilayah.



Gambar 1. Sebaran Potensi Energi Surya Tiap Provinsi Di Indonesia
Sumber: Dewan Energi Nasional (2023)

Indonesia memiliki potensi energi surya total 3.294,4 GWp pada tahun 2021. Gambar 3 menunjukkan sebaran potensi energi surya tiap provinsi di Indonesia. Lima provinsi dengan potensi surya terbesar adalah Nusa Tenggara Timur (NTT) dengan 370 GWp, diikuti Riau (290 GWp), Sumatera Selatan (285 GWp), Papua (252 GWp), dan Jawa Tengah (186 GWp)

(DEN, 2023). Optimalisasi pemanfaatan energi surya ini perlu dilakukan dalam upaya mencapai target bauran energi baru dan terbarukan (EBT) nasional sebesar 23% pada tahun 2025 (PP No. 79, 2014). Pemanfaatan energi surya terbukti memberikan manfaat signifikan dalam mengurangi emisi CO₂, dengan potensi penurunan 214 hingga 384 ton per tahun untuk setiap instalasi seluas 100 m² (Budi et al., 2024). Pengembangan PLTS secara langsung berkontribusi pada upaya mitigasi global warming, krisis iklim, dan penurunan konsentrasi GRK di atmosfer.

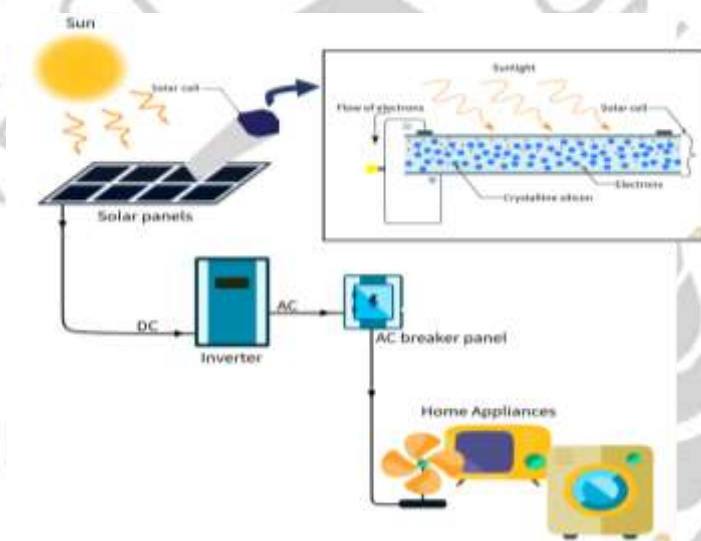
Untuk memaksimalkan potensi energi surya Indonesia, adaptasi model Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dilakukan dengan mempertimbangkan kondisi lingkungan dan sumber daya. Dua model utama yang dikembangkan adalah PLTS atap (kapasitas kecil-sedang, desentralisasi) dan PLTS terapung (kapasitas besar, terpusat).

- PLTS atap (skala kecil-sedang) memanfaatkan ruang atap bangunan yang sudah ada, sehingga mampu mengurangi kebutuhan lahan dan biaya instalasi. Fokus utama model ini adalah pemenuhan kebutuhan listrik internal bangunan, sehingga cocok untuk perumahan, bangunan komersial, dan industri yang ingin mandiri energi. Integrasi PLTS atap dapat mengurangi kehilangan daya hingga 10% selama puncak produksi energi surya dan meningkatkan profil tegangan sehingga jaringan gedung dapat bekerja lebih optimal (Putra et al., 2024)
- PLTS terapung (floating solar PV) (skala besar) memanfaatkan permukaan perairan seperti waduk dan danau. Fokus utama model ini adalah produksi energi dalam skala besar dengan meminimalisir dampak lingkungan terhadap lahan produktif, seperti lahan pertanian atau permukiman. PLTS terapung juga memiliki keunggulan dalam mengurangi penguapan air, menjaga stabilitas suhu air, dan meningkatkan efisiensi PV-panel melalui pendinginan alami oleh air (Pambudi et al., 2023)

Data tahun 2023 menunjukkan bahwa bauran energi nasional masih didominasi oleh energi fosil (batu bara 40,46%, minyak bumi 30,18%, dan gas bumi 16,28%), sementara kontribusi EBT hanya 13,09%, dengan pemanfaatan energi surya baru mencapai 0,01% dari total seluruh potensinya (DEN, 2024). Rendahnya pemanfaatan ini diduga disebabkan oleh beberapa tantangan utama, di antaranya kendala teknis terkait sifat intermiten energi surya yang sangat bergantung pada kondisi cuaca, tingginya biaya investasi awal untuk pembangunan PLTS, serta ketidakstabilan kebijakan yang dapat menghambat investasi dan pengembangan sektor ini (Kharisma et al., 2024).

2.2 Teknologi Pembangkit Listrik Tenaga Surya Atap (PLTS Atap)

Proses konversi energi surya menjadi energi listrik memanfaatkan efek fotolistrik yang terjadi pada sel surya berbahan dasar semikonduktor, seperti silikon. Ketika sinar matahari mengenai permukaan sel surya, energi foton akan melepaskan elektron dan menghasilkan arus listrik searah (DC) yang kemudian diubah menjadi arus bolak-balik (AC) oleh inverter (Wibowo et al., 2024). Efisiensi PV-panel dalam spesifikasi PV-panel menunjukkan persentase energi matahari yang dapat dikonversi menjadi energi listrik. Semakin tinggi efisiensi panel, semakin besar radiasi matahari yang diubah menjadi energi listrik (Rahwanda et al., 2022). Gambar 4 menunjukkan prinsip kerja sel surya atau PV-panel.



Gambar 2. Prinsip Kerja Sel Surya atau PV-panel

Dalam Rencana Umum Energi Nasional (RUEN), pemerintah menargetkan kapasitas PLTS nasional sebesar 6,5 GW pada tahun 2025 dan meningkat menjadi 45 GW pada tahun 2050 (Asdiyan et al., 2023). Mendukung pencapaian target tersebut, pemanfaatan melalui PLTS atap saat ini banyak didorong untuk dapat diterapkan baik di sektor rumah tangga, industri, maupun sosial. Terdapat dua sistem konfigurasi PLTS Atap yang dapat diterapkan yaitu sistem PLTS Atap on-grid (Utility Connected System), PLTS Atap off-grid (Stand Alone System) dan PLTS Atap Hybrid

- **PLTS Atap on-grid (Utility Connected System)**

PLTS atap on-grid memaksimalkan pemanfaatan energi matahari untuk meminimalkan penggunaan listrik dari jaringan pusat (PLN). Sistem ini tanpa dilengkapi dengan baterai sehingga energi yang dihasilkan dari PV-panel akan langsung disalurkan ke instalasi pelanggan (Kadang & Windarta, 2021). Berdasarkan Gambar 5, aliran energi pada

PLTS Atap sistem on-grid dimulai dengan mengubah energi matahari menjadi listrik DC melalui PV-modul yang kemudian dikumpulkan dan dilindungi oleh Combiner Box. Listrik DC lalu diubah menjadi arus AC oleh Inverter agar dapat digunakan oleh perangkat listrik pelanggan. Aliran listrik yang dihasilkan tersebut disalurkan melalui Perangkat Sakelar dan Kendali (PSDK).

Jika energi yang dihasilkan berlebih, listrik akan dialirkan ke jaringan listrik umum melalui Advanced Meter. Advance Meter ini bertindak sebagai pengatur aliran dua arah antara sistem PLTS dan jaringan listrik, memastikan keseimbangan aliran energi masuk dan keluar. Ketika produksi listrik dari PV-panel tidak mencukupi, listrik dari jaringan PLN akan secara otomatis digunakan untuk memenuhi kebutuhan pelanggan. Sebaliknya, jika surplus produksi dari PLTS Atap, maka listrik tersebut akan tersalurkan ke jaringan pusat (PLN).



Gambar 3. Diagram Konfigurasi Sistem PLTS Atap On-Grid
(Sumber: Permen ESDM No.2 Tahun 2024)

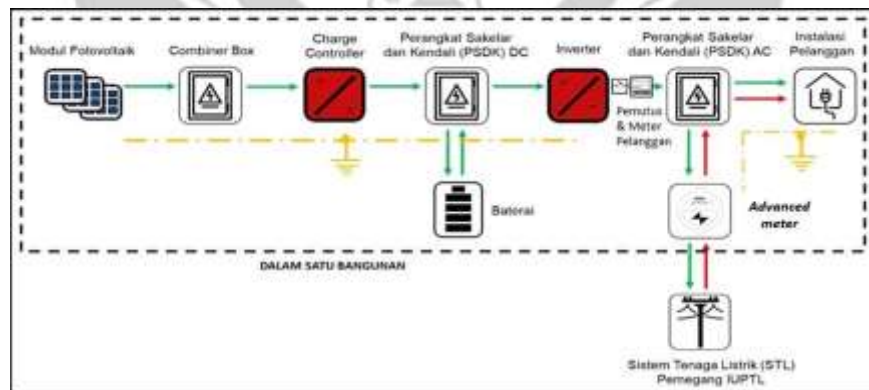
- PLTS Atap off-grid (Stand Alone System)

PLTS Atap off-grid atau Stand Alone System merupakan sistem pembangkit listrik yang berdiri sendiri tanpa terhubung ke jaringan listrik utiliti atau PLN. Sistem ini memanfaatkan PV-panel untuk mengonversi energi matahari menjadi listrik, kemudian disimpan dalam baterai (Kadang & Windarta, 2021). Energi surya yang intermiten dapat dikontrol karena surplus energi yang dihasilkan saat kondisi cuaca ideal dapat disimpan dalam baterai sebagai cadangan untuk digunakan pada malam hari atau saat intensitas matahari rendah. Penelitian Garcia et al., (2024), menunjukkan bahwa PLTS dengan sistem off-grid efektif dikembangkan untuk elektrifikasi di daerah terpencil yang sulit dijangkau oleh jaringan listrik konvensional (PLN).

- PLTS Atap Hybrid

Sistem PLTS Atap Hibrida (Gambar 6), mengintegrasikan tiga elemen penting: panel surya untuk menghasilkan listrik, baterai untuk menyimpan energi, dan koneksi ke jaringan listrik PLN (jaringan utilitas). Kadang dan Windarta (2021) menjelaskan bahwa sistem ini dioperasikan dengan pembangkit atau jaringan Utility PLN dengan pengaturan dan pembagian waktu operasi secara optimal.

Aliran energi dimulai dengan penangkapan energi matahari oleh modul fotovoltaik dan konversinya menjadi listrik DC. Listrik DC ini kemudian dikumpulkan dan diamankan di dalam combiner box. Pada siang hari, ketika produksi energi dari PLTS atap mencapai tingkat optimal, kebutuhan listrik pelanggan dipasok langsung dari sistem PLTS, melalui charge controller, Perangkat Sakelar dan Kendali (PSDK) DC, inverter (yang mengubah DC menjadi AC), dan PSDK AC, menuju instalasi pelanggan. Kelebihan energi pada siang hari disimpan di baterai melalui charge controller. Pada malam hari, saat konsumsi listrik meningkat dan PLTS tidak aktif, kebutuhan listrik dipenuhi terutama melalui jaringan PLN. Baterai berperan sebagai penyimpan energi cadangan, yang dapat digunakan saat kebutuhan listrik meningkat atau selama terjadi pemadaman listrik dari PLN. Advanced meter mencatat aliran energi antara sistem PLTS, baterai, jaringan PLN, dan instalasi pelanggan.



Gambar 4. Diagram Konfigurasi Sistem PLTS Atap Hybrid

(Sumber: Permen ESDM No.2 Tahun 2024)

2.3 Analisis Teknis dan Ekonomi Penerapan PLTS Atap

Analisis ekonomi terhadap penerapan PLTS Atap bertujuan untuk mengevaluasi keberhasilan investasi dan prospek keberlanjutan produksi energi. Evaluasi ini mencakup perhitungan efektivitas biaya instalasi, termasuk investasi awal, biaya pemeliharaan, serta potensi penghematan dari pengurangan tagihan energi. Keputusan investasi dipengaruhi oleh resiko teknis, keuangan, dan operasional, serta faktor eksternal seperti insentif pemerintah,

fluktuasi harga energi, dan kondisi lingkungan (Zweifel et al., 2017). Risiko teknis berkaitan dengan teknologi PV-panel yang akan menentukan efisiensi kinerja PLTS Atap. Efisiensi ini mengindikasikan seberapa besar energi matahari yang bisa dikonversikan menjadi energi listrik dalam satuan persen (Ristandi, 2021).

Efisiensi kinerja PV-panel yang lebih tinggi berarti mampu produksi listrik yang lebih besar dari radiasi matahari yang sama sehingga dapat mempercepat pengembalian modal investasi (payback period). Peningkatan efisiensi PV-panel juga dapat mengurangi ketergantungan pada area instalasi yang luas, sehingga menjadi lebih ekonomis dan fleksibel untuk diterapkan di lokasi dengan keterbatasan ruang (Budi et al., 2022). Penelitian Windarta et al. (2021) menunjukkan bahwa desain sistem dengan PV-panel berkapasitas 360 Wp dan efisiensi kerja 18,5% menghasilkan produksi energi tahunan hingga 1084 kWh, dengan rasio performa (PR) mencapai 0,502. Kajian Dallaev et al., (2023) membuktikan bahwa material PV-panel dengan kandungan silikon monokristalin dapat meningkatkan efisiensi kerja sistem PLTS sebesar 15–24%. Penelitian ini menegaskan bahwa analisis dan perencanaan teknis, termasuk pemilihan teknologi PV-panel yang efisien dan optimalisasi desain sistem, penting dilakukan dalam menentukan keberhasilan ekonomi investasi PLTS Atap.

Perencanaan teknis dan ekonomi PLTS Atap umumnya menggunakan dua pendekatan: perhitungan langsung dan simulasi. Perhitungan langsung dilakukan berdasarkan data lapangan seperti radiasi matahari, luas panel, dan efisiensi sistem untuk memperkirakan potensi produksi energi. Metode ini mencakup pemilihan lokasi pemasangan sistem PLTS, pemilihan material, dan desain implementasi sistem. Penelitian oleh Iswanjono & Tjendro (2022) menerapkan perhitungan langsung dengan pengukuran menggunakan kWh meter pada pelanggan PLN dan kWh meter digital untuk memantau produksi energi PLTS, sehingga menghasilkan data daya rata-rata harian, efisiensi sistem, dan penghematan biaya listrik bulanan. Hasil penelitian tersebut mengungkapkan bahwa sistem PLTS atap berkapasitas 1000 WP dapat mencapai efisiensi energi hingga 23%, dengan penghematan biaya tagihan listrik sebesar 8% selama periode enam bulan. Rumus-rumus yang digunakan yaitu:

- Daya maksimum PV-panel ($P_{\max}$) = Tegangan (Volt) $\times$ Arus (Ampere).....Per. 1.
- Efisiensi PV-panel (η) = $\frac{P_{\max} \text{ (watt)}}{\text{Intensitas radiasi } \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2}\right) \times \text{Luas PV-panel (m}^2\text{)}} \times 100\%$Per. 2.
- Energi Harian (E_{harian})= $P_{\max} \text{ (watt)} \times \text{Durasi penyinaran (jam/hari)} \times \text{Performance Rasio..Per. 3.}$
- Efisiensi Sistem PLTS (η_{sistem}) = $\frac{E_{\text{harian (kWh)}}}{P_{\max} \text{ (watt)} \times \text{Durasi penyinaran } \left(\frac{\text{jam}}{\text{hari}}\right)} \times 100\%$Per. 4.

- Penghematan Biaya Listrik (S) = $E_{\text{harian}} \times 365 \text{ hari} \times \text{Tarif listrik (Rp/kWh)}$Per. 5.

Meskipun perhitungan langsung menyediakan data proyeksi yang cukup detail dan gambaran teknis yang jelas, metode ini memiliki keterbatasan dalam aspek akurasi dan cakupan analisis. Perhitungan langsung cenderung mengabaikan variabel dinamis seperti pola perubahan cuaca, pengaruh bayangan dari lingkungan sekitar, dan risiko teknis jangka panjang. Oleh karena itu, untuk meningkatkan akurasi dan validitas hasil perencanaan, perlu kombinasi dengan simulasi berbasis perangkat lunak yang mampu mempertimbangkan lebih banyak variabel serta memproyeksikan risiko dan dinamika cuaca jangka panjang. Perangkat lunak mampu mempertimbangkan berbagai faktor lingkungan dan teknis yang sulit dihitung secara manual.

Beberapa perangkat lunak yang umum digunakan antara lain PVSyst, PVSOL, dan HelioScope. Keunggulan utama dari simulasi dengan perangkat lunak adalah kemampuannya untuk menghasilkan analisis yang lengkap, mencakup aspek teknis seperti produksi energi, efisiensi sistem, Performance Rasio, yang kemudian menjadi bahan acuan dalam proyeksi ekonomi seperti biaya investasi, Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), Payback Period (PBP) dan Levelized Cost of Energi (LCOE).

$$\text{Net Present Value (NPV)} = \sum_{t=0}^n \frac{B_t - C_t}{(1+i)^t} \dots\dots\dots \text{Per. 6}$$

Keterangan:

- B_t : Benefit atau penerimaan usaha pada tahun t
- C_t : Cost/ Biaya pada tahun t
- t : Tahun kegiatan usaha (0, 1, 2, 3, ...n) tahun awal dari tahun 0
- i : Tingkat suku bunga yang berlaku (%)

$$\text{Internal Rate of Return (IRR)} = i_1 + \frac{NPV_1}{NPV_1 - NPV_2} - (i_2 - i_1) \dots\dots\dots \text{Per. 7}$$

Keterangan:

- i_1 : Discount rate yang menghasilkan NPV Positif
- i_2 : Discount rate yang menghasilkan NPV Negatif
- NPV_1 : NPV positif
- NPV_2 : NPV negatif

$$\text{Payback Period (PBP)} = \frac{C_f}{A} \dots\dots\dots \text{Per. 8}$$

Keterangan :

- Cf : Biaya Investasi Awal
- A : Arus kas pertahun

$$\text{Benefit-Cost Ratio (BCR)} = \frac{\text{Present Value Benefits}}{\text{Present Value Cost}} \dots\dots\dots \text{Per. 9}$$

Keterangan:

- Present Value Benefits : Pendapatan per tahun
- Present Value Cost : Pengeluaran per tahun

Kurniawan (2021) telah melakukan perbandingan fitur dari ketiga perangkat lunak tersebut (Tabel 3), hasilnya menunjukkan bahwa PVSOL dan PVSyst lebih lengkap fiturnya dibandingkan HelioScope. PVSOL dan PVSyst cocok digunakan bagi perusahaan ataupun instansi untuk membuat laporan yang mencakup segi teknis maupun finansial. PVSyst direkomendasikan secara khusus untuk simulasi sistem on-grid, standalone, dan pumping, menunjukkan keunggulannya dalam aplikasi spesifik ini.

Tabel 1. Perbandingan fitur dalam perangkat lunak PVSOL, PVSYST, HelioScope

Fitur	PVSOL	PVSYST	HelioScope
Basis	Windows	Windows	Web
Lingkup Simulasi	PV dengan beban listrik, baterai, kendaraan listrik, Jaringan/Grid	On-grid, Standalone, Pumping	On-grid
Lisensi	Trial/Berbayar	Trial/Berbayar	Trial/Berbayar
3D Shading Modeling	Ada	Ada	Sederhana
Import Data Meteonorm	Ya	Ya	Tidak
Skema Finansial	Kompleks	Kompleks	Sederhana
Antarmuka	Sederhana	Kompleks	Sederhana

Sumber: Karuniawan (2021)

2.4 Kebijakan Penerapan PLTS Atap

Berkaitan dengan perjanjian paris tahun 2015 yang mengupayakan pembatasan kenaikan suhu bumi 1,5°C dan penurunan penggunaan bahan bakar fosil, Indonesia sebagai pihak terlibat berkomitmen untuk mengurangi emisi GRK nasional sebesar 29% pada tahun 2030, atau 41% dengan bantuan internasional (Zuhir et.al, 2015). Oleh karena itu untuk mencapai

target kapasitas pembangkit Listrik pada tahun 2025 sekitar 115 GW dan pemanfaatan Listrik perkapita pada tahun 2025 sekitar 2.500 KWh, kebijakan energi nasional diarahkan untuk melakukan eksplorasi dan pengembangan sumber energi baru dan terbarukan yang lebih ramah lingkungan. Ditegaskan dalam Pasal 9 PP No. 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional (KEN) yang menjelaskan target bauran energi nasional, yaitu peran EBT minimal 23% dan pada tahun 2050 minimal 31%.

Meskipun bauran energi nasional masih didominasi batu bara, pemerintah Indonesia berkomitmen untuk mengembangkan EBT, yang diimplementasikan melalui Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PLN 2021-2030. Pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), termasuk PLTS atap (Rooftop PV), merupakan bagian penting dari strategi ini. PLTS atap memberikan manfaat ganda, yaitu diversifikasi energi dan pengurangan ketergantungan pada energi fosil, serta memungkinkan masyarakat dan industri menghasilkan listrik secara mandiri. Sejak 2018, regulasi PLTS atap terus disempurnakan, hingga saat ini yang sedang berlaku yaitu Permen ESDM Nomor 2 Tahun 2024. Beberapa kebijakan terkait PLTS Atap disajikan dalam Tabel 1, dan penjelasannya sebagai berikut:

1. Permen ESDM No. 19 Tahun 2016 tentang Pembelian Tenaga Listrik Dari PLTS PV
Permen ESDM No. 19 Tahun 2016 menjadi kebijakan awal dalam mendorong investasi di sektor EBT, khususnya PLTS PV. Regulasi ini menetapkan skema Perjanjian Jual Beli Listrik (PJBL) antara investor pembangkit listrik skala besar dengan PLN. Fokus utama kebijakan ini membahas terkait tarif dan mekanisme jual beli energi listrik. Peraturan ini tidak spesifik mengatur penggunaan PLTS Atap, namun untuk PLTS PV skala besar yang menjual listrik ke jaringan PLN.
2. Permen ESDM No. 49 Tahun 2018 tentang Penggunaan Sistem PLTS Atap
Permen ESDM No. 49 Tahun 2018 merupakan langkah awal dalam mengatur penggunaan PLTS Atap di Indonesia. Regulasi ini bertujuan untuk membantu pelanggan mengurangi biaya tagihan listrik, meningkatkan penggunaan energi terbarukan, dan menurunkan emisi gas rumah kaca. Kajian penting yang dibahas dalam Peraturan ini yaitu terkait kapasitas maksimum PLTS Atap yang dapat diinstal pelanggan, skema impor-ekspor atau insentif kredit bagi pelanggan, dan perizinan. Kapasitas maksimum PLTS Atap dibatasi hingga 100% dari daya tersambung pelanggan (Pasal 6), sedangkan skema ekspor-impor energi diatur dengan rasio 1:0,65 (Pasal 7). Terkait perizinan, hanya pelanggan dengan kapasitas lebih dari 200 kVA

yang diwajibkan memiliki izin operasi (Pasal 8). Kemudian terkait biaya Instalasi PLTS atap untuk sektor Industri sistem on-grid dikenakan biaya operasi paralel yaitu biaya kapasitas dan biaya pembelian energi listrik darurat.

3. Permen ESDM No. 13 Tahun 2019 tentang Refisi Permen ESDM No. 49 Tahun 2018

Permen ESDM No. 13 Tahun 2019 bertujuan untuk meningkatkan pengawasan dan transparansi dalam penerapan PLTS Atap. Perubahan utamanya adalah kewajiban bagi semua pelanggan, tanpa memandang kapasitas, untuk memiliki izin operasi (Pasal 8) dan Sertifikat Laik Operasi (SLO) wajib dimiliki oleh setiap instalasi (Pasal 11). Penyempurnaan ini diharapkan dapat memastikan standar keamanan dan kepatuhan teknis pada setiap instalasi PLTS Atap. Meski demikian, skema insentif finansial, seperti rasio ekspor-impor energi, tidak mengalami perubahan.

4. Permen ESDM No. 16 Tahun 2019 tentang Refisi Permen ESDM No. 49 Tahun 2018

Permen ESDM No. 16 Tahun 2019 menyesuaikan biaya kapasitas dan mekanisme izin operasional untuk pelanggan PLTS Atap di sektor industri. Biaya kapasitas hanya diberlakukan untuk pelanggan industri dengan sistem on-grid (Pasal 14). Penyempurnaan ini bertujuan untuk meningkatkan efisiensi dalam pengelolaan PLTS Atap untuk pelanggan industri.

5. Permen ESDM No 12 Tahun 2019 tentang Kapasitas Pembangkit Tenaga Listrik Untuk Kepentingan Sendiri yang Dilaksanakan Berdasarkan Izin Operasi

Permen ini mengatur kapasitas pembangkit tenaga listrik untuk kepentingan sendiri dan mekanisme izin operasi. Konsumen dengan kapasitas di atas 500 kVA wajib memiliki izin operasi (Pasal 2). Sementara itu, kapasitas di bawah 500 kVA hanya memerlukan pelaporan ke Kementerian ESDM (Pasal 3). Instalasi kecil juga dinyatakan memenuhi SLO melalui uji pabrikan (Pasal 4). Penyederhanaan izin diharapkan dapat meningkatkan adopsi PLTS Atap di sektor rumah tangga atau industri skala kecil.

6. Permen ESDM No 26 Tahun 2021 tentang PLTS Atap Terhubung pada Jaringan Tenaga Listrik Pemegang Izin Usaha Penyediaan Tenaga Listrik untuk Kepentingan Umum

Permen ESDM No. 26 Tahun 2021 memperkenalkan perubahan penting dengan menaikkan rasio ekspor-impor energi menjadi 1:1, sehingga pelanggan mendapatkan kredit penuh untuk energi yang diekspor ke jaringan PLN. Selain itu, izin operasi diwajibkan bagi konsumen dengan kapasitas lebih dari 500 kVA, sementara kapasitas di bawahnya hanya memerlukan SLO. Melalui regulasi ini diharapkan meningkatkan

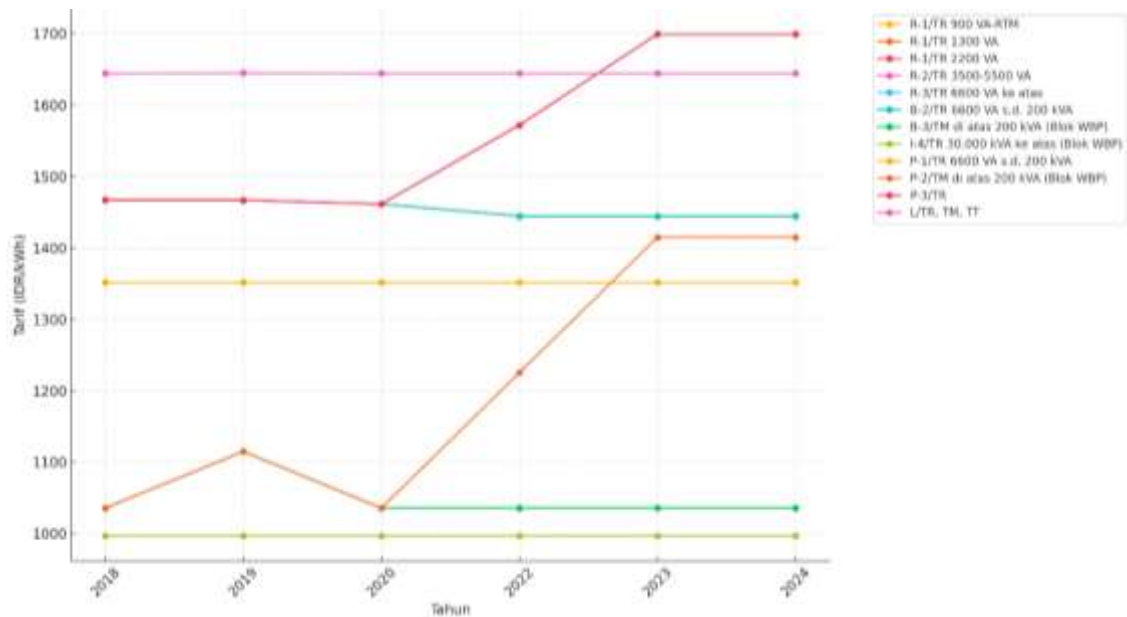
daya tarik investasi PLTS Atap, terutama bagi pelanggan rumah tangga dan sosial dengan kebutuhan energi yang kecil.

7. Permen ESDM No 2 Tahun 2024 tentang PLTS Atap Terhubung Pada Jaringan Tenaga Listrik Pemegang Izin Usaha Penyediaan Tenaga Listrik Untuk Kepentingan Umum

Permen ESDM No. 2 Tahun 2024 membawa perubahan besar dalam pengaturan PLTS Atap di Indonesia. Salah satu perubahan penting adalah penghapusan batasan kapasitas 100% daya tersambung PLN, yang kini bergantung pada sistem kuota yang ditentukan oleh PLN. Selain itu, surplus energi listrik dari ekspor energi tidak lagi diperhitungkan, yang mengurangi insentif finansial bagi pelanggan terutama pelanggan sektor rumah tangga dan sosial. Namun karena kapasitas terpasang tidak dibatasi, hal ini cukup menarik bagi pelanggan sektor industri dengan kebutuhan energi listrik yang besar.

Dinamika regulasi meskipun bertujuan positif, namun berpotensi menimbulkan persepsi ketidakpastian hukum di kalangan konsumen dan calon konsumen PLTS Atap (Sun et al., 2018). Zhang et al., (2022) meneliti dampak kebijakan feed-in tariff terhadap investasi PLTS di China. Hasil penelitian menemukan bahwa keberadaan feed-in tariff dapat memperpendek payback period rata-rata hingga 4–6 tahun. Selain itu, setiap penurunan feed-in tariff sebesar 0,1 CNY/kWh mengurangi minat konsumen, terlihat dari total kapasitas terpasang nasional rata-rata menurun sebesar 3,73 GW dalam kurun waktu setengah tahun.

Selain kebijakan PLTS Atap yang terus mengalami perubahan, tarif listrik yang dikenakan kepada pelanggan juga mengalami beberapa kali penyesuaian dari kebijakan PLN. Penyesuaian tarif ini dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti nilai tukar rupiah terhadap dolar AS, harga minyak mentah Indonesia (ICP), dan inflasi. Menurut data PLN (2024), selama periode 2018-2024 terjadi beberapa fluktuasi tarif listrik PLN. Pada tahun 2019, tarif untuk pelanggan rumah tangga dengan daya 1300 VA dan di atasnya mengalami kenaikan. Kemudian, pada kuartal IV tahun 2020, pelanggan bisnis dengan daya di bawah 5000 VA mengalami penurunan tarif. Selanjutnya, pada kuartal III tahun 2022, tarif kembali mengalami kenaikan signifikan untuk pelanggan industri. Selanjutnya hingga tahun 2024 tarif PLN tetap. Fluktuasi tarif ini, terutama kenaikan yang terjadi, diduga kuat menjadi salah satu pendorong minat pelanggan untuk beralih ke PLTS Atap sebagai solusi mengurangi biaya energi jangka panjang dan mencapai kemandirian energi. Detail fluktuasi tarif listrik PLN disajikan dalam Gambar 7.



Gambar 5. Rata-Rata Tarif Listrik PLN per Tahun berdasarkan Kelompok Pelanggan

2.5 Implementasi PLTS Atap di Sektor Rumah Tangga, Industri, dan Sosial

Pemanfaatan PLTS Atap di Indonesia menjangkau berbagai kelompok pelanggan PLN, meliputi rumah tangga, industri, komersial, sosial, gedung pemerintah, dan penerangan jalan umum. Masing-masing kelompok pelanggan ini memiliki karakteristik yang berbeda dalam hal kapasitas produksi, tujuan instalasi PLTS Atap, serta konfigurasi sistem. PLTS atap skala rumah tangga dirancang untuk memenuhi kebutuhan listrik harian di lingkungan perumahan dengan kapasitas relatif rendah berkisar antara 1–10 kWp. Sistem ini biasanya terintegrasi langsung dengan jaringan listrik PLN (on-grid) untuk mengurangi konsumsi listrik dari jaringan PLN sehingga dapat menghemat tagihan listrik. Penelitian oleh Dewi et al. (2022) pada rumah tangga dengan daya terpasang 1300 VA menunjukkan bahwa sistem PLTS atap berkapasitas 1 kWp mampu menghasilkan energi rata-rata 124 kWh per bulan, yang mencukupi sekitar 42% dari total kebutuhan listrik rumah tangga.

Di sektor industri, instalasi PLTS Atap memiliki kapasitas yang lebih besar, biasanya di atas 50 kWp, dan sering kali diintegrasikan dengan sistem jaringan listrik utama dalam konfigurasi hybrid untuk memastikan suplai daya yang berkelanjutan. Analisis IESR (2021) menunjukkan potensi penghematan yang besar, di mana instalasi 1 MWp dapat menghemat 1.460 MWh/tahun, atau setara dengan Rp162–325 juta/tahun. Penghematan ini dapat dicapai melalui skema zero-capex, di mana industri tidak perlu mengeluarkan investasi awal untuk pemasangan PLTS atap, melainkan bekerja sama dengan pihak ketiga yang menyediakan sistem dan menjual listrik yang dihasilkan dengan harga yang lebih rendah dari tarif PLN. Di

sektor sosial, PLTS atap berperan penting dalam menyediakan energi bersih dan terjangkau bagi fasilitas publik. Implementasi ini tidak hanya mengurangi biaya operasional, tetapi juga memastikan keberlanjutan layanan publik, terutama di daerah yang sulit dijangkau jaringan listrik atau rawan pemadaman (Putri, 2023).

Berdasarkan simulasi PVsyst, sistem PLTS atap berkapasitas 3.000 WP yang menggunakan modul JA Solar dan inverter Solis diproyeksikan menghasilkan penghematan biaya listrik tahunan sebesar Rp 3.076.920. Sistem ini terdiri dari tujuh modul dengan kapasitas masing-masing 450 WP, dipasang pada daya terpasang PLN 3.500 VA. Namun, analisis data real pelanggan menunjukkan rata-rata penurunan biaya listrik tahunan sebesar Rp 638.000. Sebelum pemasangan, konsumsi listrik tahunan pelanggan sebesar 7.799 kWh dengan biaya rata-rata Rp 11.374.614. Setelah pemasangan, konsumsi turun menjadi 5.278 kWh per tahun dengan biaya rata-rata Rp 10.736.497, mencerminkan efisiensi energi.

Tabel 2. Penghematan Biaya Listrik sebelum dan setelah pemasangan PLTS Atap

Sebelum Dipasang PLTS Atap		
Tahun	KWh	Rupiah
2017	4.256	11.380.053
2018	8.608	11.519.414
2019	10.147	11.420.841
2020	8.637	11.463.329
2021	7.348	11.089.433
Rata-Rata	7.799	11.374.614
Setelah Dipasang PLTS Atap		
2022	4.990	10.861.696
2023	4.528	10.613.564
2024	6.316	10.734.230
Rata-Rata	5.278	10.736.497

Sumber: Hasil analisis data pelanggan PLTS Atap Jawa Tengah

2.6 Minat Pelanggan PLTS Atap

Minat masyarakat terhadap instalasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Atap dipengaruhi oleh berbagai faktor. Ukuran daya instalasi PLTS Atap on-grid yang perlu disesuaikan dengan kebutuhan listrik internal sangat penting karena akan berpengaruh terhadap nilai modal awal. Produktivitas listrik PLTS Atap yang sangat bergantung pada kondisi alam menyebabkan faktor teknis sangat penting bagi pelanggan. Penelitian Ananda & Junaidi, 2023) membuktikan bahwa efisiensi produksi listrik sistem PLTS dalam

memenuhi kebutuhan listrik rumah tangga menjadi pertimbangan utama, terutama di daerah dengan intensitas cahaya matahari yang tinggi.

Penelitian oleh Frastuti & Royda (2019) membuktikan bahwa faktor ekonomi memiliki pengaruh signifikan terhadap minat pelanggan dalam menggunakan PLTS Atap di Kota Palembang. Melalui analisis kuantitatif, dengan menyebarkan kuesioner pertanyaan kepada responden secara sampling dimana jumlah sampel ditentukan berdasarkan rumus slovin. Rumus Slovin adalah metode yang digunakan untuk menentukan ukuran sampel yang representatif dari suatu populasi tertentu. Rumus ini sering digunakan dalam penelitian sosial, bisnis, dan ekonomi karena kesederhanaannya. Slovin (dalam Sanusi, 2016) memperkenalkan rumus berikut untuk menghitung ukuran sampel:

$$\text{Jumlah Sampel} = \frac{\text{Total Populasi}}{1 + \text{Total Populasi} \cdot \text{margin error}^2} \dots \text{Per. 10}$$

Rumus Slovin berguna dalam kondisi ketika populasi diketahui tetapi waktu, sumber daya, atau biaya terbatas untuk pengambilan sampel. Margin of error, yang biasanya berkisar antara 5-10%, menentukan tingkat keakuratan hasil penelitian (Sugiyono, 2019). Namun jika populasi yang diteliti terbagi atas beberapa kelompok, maka teknik proportionate stratified random sampling perlu dilakukan. Menurut Sanusi (2014), teknik ini memastikan bahwa setiap strata terwakili secara proporsional dalam sampel yang diambil. Prosesnya melibatkan langkah-langkah berikut:

1. Identifikasi strata: Populasi dibagi ke dalam subkelompok berdasarkan karakteristik tertentu, seperti wilayah geografis, jenis pelanggan, atau sektor industri.
2. Penentuan proporsi: Jumlah sampel dari setiap strata dihitung berdasarkan proporsi populasi masing-masing strata terhadap total populasi.
3. Pengambilan sampel acak: Sampel diambil secara acak dari masing-masing strata untuk mengurangi bias

Berdasarkan konsep metode tersebut penelitian Frastuti & Royda (2019) selanjutnya mengolah data kuesioner menggunakan uji validitas dan reliabilitas untuk memastikan instrumen penelitian akurat dan konsisten, di mana seluruh item kuesioner dinyatakan valid dan reliabel. Uji asumsi klasik juga dilakukan dengan menunjukkan grafik data terdistribusi normal dan bebas dari heteroskedastisitas. Selanjutnya, analisis regresi linear sederhana mengungkapkan bahwa faktor ekonomi secara signifikan memengaruhi minat pelanggan, dengan persamaan regresi $Y = -13.293 + 2.289X + e$. Nilai koefisien determinasi $R^2 = 0.889$

menunjukkan bahwa 88.9% variasi dalam minat pelanggan dijelaskan oleh faktor ekonomi, sedangkan sisanya dipengaruhi oleh variabel lain. Rumus-rumus yang digunakan dalam penelitian Frastuti & Royda (2019) yaitu sebagai berikut:

- Uji Validitas $r = (N\sum XY - \sum X \sum Y) / \sqrt{((N\sum X^2 - (\sum X)^2)(N\sum Y^2 - (\sum Y)^2))}$Per. 11
- Uji Reliabilitas $\alpha = k/(k-1) (1 - \sum Si^2 / St^2)$Per.12
- Uji Regresi Linear $= Y = \beta_0 + \beta_1 X + e$Per. 13
- Koefisien Determinasi $(R^2) = R^2 = SSR / SST$Per. 14

Analisis lebih lanjut diperlukan untuk mengeksplorasi pengaruh faktor lain yang juga dapat memengaruhi minat pelanggan, terutama yang disebabkan oleh perubahan kebijakan pemerintah yang berpengaruh terhadap minat pelanggan dalam mengadopsi PLTS Atap.

Populasi yang digunakan sebagai subjek dalam penelitian ini adalah pelanggan PLTS Atap On Grid di wilayah Jawa Tengah pada tahun 2024 adalah sebanyak 591 pelanggan. Adapun pengambilan jumlah sample dalam penelitian ini menggunakan rumus Slovin sesuai Per: 10 sehingga didapatkan sebanyak 169 responden dengan margin error (e) yang digunakan penulis sebesar 5 % = 0,05 :

$$\text{Jumlah Sampel} = \frac{\text{Total Populasi}}{1 + \text{Total Populasi} \cdot \text{margin error}^2} \dots\dots\dots \text{Per 10}$$

Jika keterangan di atas dihitung sesuai rumus Slovin (Per. 10) akan menghasilkan jumlah sampel responden sebagai berikut :

$$\text{Jumlah Sampel} = \frac{591}{1 + 591 \cdot (0,05)^2} = 168,85 \rightarrow \text{dibulatkan menjadi 169 responden}$$

Berdasarkan nilai yang didapat sebesar 169 , nilai tersebut akan digunakan sebagai minimal sampel responden yang akan digunakan dalam penelitian yang meliputi sektor rumah tangga 30 % (51 sampel), sektor industri 14 % (24 sampel) dan sektor sosial 24 % (41 sampel)

2.7 Energi Surya di Jawa Tengah

Jawa Tengah merupakan salah satu provinsi terpadat di Indonesia dengan populasi sekitar 37 juta jiwa. Kepadatan penduduk yang tinggi di kota-kota seperti Semarang, Solo, dan Kudus berkontribusi pada tingginya konsumsi energi. Dari sisi permintaan dan pasokan energi,

konsumsi listrik di Jawa Tengah terus meningkat, dengan total konsumsi pada tahun 2023 mencapai 28,4 TWh dan total daya listrik terpasang sebesar 17,16 GW (Tabel 4). Data ini menegaskan tingginya kebutuhan energi di Jawa Tengah. Data DEN 2023 mengungkapkan potensi energi surya di Jawa tengah mencapai 186 GWp. Dengan pengembangan potensi ini, Provinsi Jawa Tengah berpeluang besar memenuhi kebutuhannya melalui PLTS.

Tabel 3. Distribusi Energi Listrik menurut kelompok pelanggan di Jawa Tengah

Kategori	Jumlah Pelanggan	Kapasitas Terpasang (kVA)	Energi Terjual (kWh)
Rumah Tangga	10.833.630	8.982.081.000	13.620.273.636
Usaha	579.523	2.935.257.400	4.104.100.106
Sosial	310.234	993.459.150	1.418.819.923
Penerangan Jalan	53.588	180.332.095	489.176.675
Kantor Pemerintahan	26.710	265.057.900	324.662.621
Industri	17.036	3.810.962.600	8.474.713.932
Jawa Tengah	11.820.721	17.167.150.145	28.431.746.893

Sumber: BPS, Jawa Tengah Dalam Angka 2024

Sebagai upaya mendukung perkembangan energi terbarukan, Pemerintah Provinsi Jawa Tengah telah menetapkan Peraturan Daerah Nomor 12 Tahun 2018 tentang Rencana Umum Energi Daerah (RUED-P). Kebijakan ini bertujuan untuk mencapai bauran energi terbarukan sebesar 21,32% pada tahun 2025 dan 28,82% pada tahun 2050. Salah satu yang di dorong melalui kebijakan ini yaitu pengembangan PLTS Atap. Pemerintah Jawa Tengah menargetkan penerapan PLTS atap di bangunan pemerintah, komersial, dan industri, dengan pemanfaatan minimal 30% dari luas atap untuk energi surya. Selain itu untuk pelanggan kelompok Rumah tangga juga ikut didorong untuk dapat menerapkan PLTS atap.

Sejak diberlakukannya Kebijakan PLTS Atap pada tahun 2018, pertumbuhan jumlah pelanggan dan kapasitas terpasang PLTS atap di Jawa Tengah menunjukkan tren peningkatan yang konsisten dari tahun ke tahun (Gambar 1 dan 2). Pertumbuhan terbesar tercatat pada periode 2020 hingga 2021, dengan lonjakan signifikan baik dalam jumlah pelanggan maupun kapasitas terpasang. Berbagai faktor termasuk perubahan kebijakan nasional dan perkembangan ekonomi di Provinsi ini diduga menjadi pengaruh.

