

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan listrik nasional terus meningkat sejalan dengan pertumbuhan penduduk dan aktivitas ekonomi. Di sisi lain, dominasi pembangkit berbasis fosil memunculkan tantangan ganda yakni keterbatasan sumber daya dan tekanan penurunan emisi. Ketergantungan yang tinggi terhadap sumber energi fosil menimbulkan dua permasalahan utama, yaitu keterbatasan sumber daya yang dapat mengancam ketahanan energi nasional serta dampak lingkungan berupa peningkatan emisi gas rumah kaca yang berkontribusi terhadap perubahan iklim global. Oleh karena itu, diversifikasi sumber energi melalui pemanfaatan energi baru dan terbarukan menjadi langkah strategis dalam mendukung transisi menuju sistem energi yang berkelanjutan [1], [2], [3]. Dalam konteks penerapan di sisi pelanggan, PLTS atap *on-grid* menjadi opsi yang relatif cepat dan relevan karena dapat dipasang dekat pusat beban dan memanfaatkan radiasi surya secara langsung. Sejalan dengan itu, arah pengembangan ketenagalistrikan juga mendorong peningkatan pemanfaatan surya sekaligus penguatan operasi jaringan yang lebih berbasis data dan digitalisasi, karena produksi PLTS bersifat variabel mengikuti cuaca dan waktu (PLN). Artinya, pengembangan PLTS atap tidak hanya soal pemasangan, tetapi juga bagaimana kontribusinya terhadap konsumsi pelanggan dan interaksinya dengan jaringan dapat dipantau serta dievaluasi secara terukur.

Namun, pada sistem *on-grid*, manfaat PLTS tidak hanya ditentukan oleh besarnya energi yang dihasilkan, melainkan juga oleh kesesuaian waktu antara produksi PV dan profil konsumsi pelanggan. Kesesuaian waktu tersebut menjadi isu utama pada skala rumah tangga karena keluaran fotovoltaik umumnya memuncak saat tengah hari, sedangkan kebutuhan listrik cenderung meningkat pada pagi dan terutama malam. Ketidakcocokan ini membuat sebagian besar produksi siang hari tidak termanfaatkan langsung oleh penghuni, sehingga proporsi self-consumption menurun dan ketergantungan pada pasokan jaringan kembali meningkat ketika matahari tidak tersedia. Dampaknya terlihat pada tingginya impor energi pada jam beban puncak, sementara siang hari berpotensi terjadi surplus yang hanya sesekali terserap oleh beban rumah. Kondisi tersebut juga menyulitkan evaluasi kinerja, sebab ukuran efisiensi bergeser bukan hanya soal besaran energi, melainkan juga timing konsumsi. Diperlukan pemetaan perilaku beban yang lebih presisi misalnya dengan memisahkan perangkat dasar, beban, dan beban fleksibel agar strategi *load shifting*, penjadwalan otomatis, atau pengendalian permintaan dapat dirancang tepat sasaran menangkap aspek harian maupun musiman, sehingga keputusan optimasi pemanfaatan PV dapat didukung oleh bukti yang kuat dan terukur [4], [5].

Sejalan dengan kebutuhan indikator tersebut, ketersediaan data pengukuran yang rinci, kontinu, dan konsisten menjadi prasyarat penting dalam mengevaluasi kinerja PLTS atap *on-grid*, terutama karena aliran energi bersifat dua arah (impor–ekspor). Dalam konteks ini, konsep *Advanced Metering Infrastructure* (AMI) relevan karena menekankan metering dan pengelolaan data yang tertib sehingga aliran energi dapat ditelusuri dari waktu ke waktu dan perhitungan SCR/SSR lebih akurat serta dapat dipertanggungjawabkan (PLN). Kemajuan *Internet of Things* (IoT) kemudian memberi cara yang praktis dan relatif rendah biaya untuk merekam data beresolusi tinggi secara *real-time* menggunakan ESP32 yang dipadukan modul metering PZEM mampu merekam tegangan, arus, daya, energi, hingga faktor daya dan mengirimkannya ke dashboard daring untuk analisis kinerja serta pembacaan impor–ekspor yang lebih detail [6],[7]. Dalam konteks penelitian ini, IoT difokuskan pada fungsi pengukuran, akuisisi Agar rancangan ini relevan untuk implementasi di Indonesia, penelitian juga merujuk kerangka teknis-operasional yaitu Permen ESDM No. 2 Tahun 2024 mengatur instalasi, proses perizinan, operasi paralel, dan pengukuran PLTS atap di Indonesia [8]. Sementara RUPTL PLN 2025–2034 menekankan dukungan implementasi *on-grid* melalui penataan dengan penggunaan advanced meter untuk membaca pemakaian dan energi ekspor, penerapan pengembangan berbasis kuota, serta penguatan layanan dan pengelolaan berbasis digital yang pada akhirnya membutuhkan *monitoring* dan analitik yang presisi (PLN).

Kajian terdahulu menunjukkan bahwa capaian self-consumption dan self-sufficiency dipengaruhi oleh konfigurasi sistem serta dinamika profil beban dan produksi. Ciocia dkk. (2021) menunjukkan bahwa pembatasan injeksi ke jaringan dan penggunaan penyimpanan baterai mengubah distribusi aliran energi, baik pada pemakaian sendiri, ekspor, maupun pengisian baterai, sehingga berimplikasi pada evaluasi kinerja dan keputusan *sizing* pada prosumer yang terhubung ke jaringan. Selanjutnya, Branchetti dkk. (2022) menggunakan data konsumsi riil rumah tangga dan kantor untuk menghitung SCR dan SSR, dan hasilnya memperlihatkan bahwa perubahan pola aktivitas seperti *work from home* atau kondisi *lockdown* dapat menggeser nilai indikator, bahkan pada beberapa skenario penerapan BESS mampu meningkatkan SCR dan SSR. Sementara itu, Hassan (2022) menekankan bahwa penggunaan data resolusi tinggi, hingga pada interval 1 menit, penting untuk kebutuhan *sizing* PLTS *on-grid* yang menargetkan maksimum self-consumption, karena mismatch produksi dan konsumsi dapat dianalisis lebih presisi. [9]. Meskipun demikian, kajian yang mengintegrasikan pemantauan berbasis AMI dan IoT untuk menganalisis aliran energi impor, ekspor, serta konsumsi beban secara terpadu sekaligus mengembangkan pendekatan prediktif terhadap indikator kinerja masih relatif terbatas. Padahal, pada praktik operasional rumah tangga, kemampuan memperkirakan SCR dan SSR lebih awal akan bermanfaat untuk mendukung keputusan manajemen energi berbasis data, misalnya dalam menentukan waktu

penggunaan beban fleksibel agar porsi pemanfaatan PV meningkat dan ketergantungan pada impor menurun. Pada titik inilah pendekatan prediksi berbasis model regresi menjadi relevan, karena model regresi dapat memanfaatkan fitur-fitur hasil pemantauan beresolusi tinggi untuk memperkirakan nilai SCR dan SSR tanpa harus menunggu seluruh siklus operasi harian selesai, sehingga memberikan dasar pengambilan keputusan yang lebih proaktif.

Berdasarkan celah riset tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis kinerja PLTS atap *on-grid* tanpa baterai melalui sistem pemantauan energi dua arah berbasis *Advanced Metering Infrastructure* (AMI) dan *Internet of Things* (IoT). Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi antara sistem pemantauan energi dua arah, evaluasi kinerja PLTS atap menggunakan indikator *Self-consumption Ratio* (SCR) dan *Self-sufficiency Ratio* (SSR), serta prediksi indikator kinerja menggunakan model *Long Short-Term Memory* (LSTM) berdasarkan data operasi aktual. Dengan pendekatan tersebut, penelitian ini tidak hanya mencatat parameter kelistrikan, tetapi juga menelusuri hubungan antara energi PLTS, energi beban, energi impor, dan energi ekspor sebagai dasar evaluasi kinerja harian. Selain itu, penggunaan LSTM diarahkan untuk memperkirakan nilai SCR dan SSR sehingga evaluasi kinerja tidak hanya bersifat deskriptif, tetapi juga dapat mendukung estimasi operasional berbasis data historis. Oleh karena itu, penelitian berjudul “**Analisis Kinerja PLTS Atap On-grid Berbasis AMI pada Pemantauan Energi Menggunakan Indikator SCR dan SSR dengan Model LSTM**” diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan sistem pemantauan dan evaluasi kinerja PLTS atap yang lebih terukur, prediktif, dan relevan untuk manajemen energi rumah tangga.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka permasalahan yang dirumuskan dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana merancang sistem pemantauan energi dua arah berbasis AMI dan IoT yang mampu merekam parameter kelistrikan pada sistem PLTS atap *on-grid*?
2. Bagaimana karakteristik aliran energi PLTS, energi beban, energi impor, dan energi ekspor selama periode pengamatan?
3. Bagaimana kinerja PLTS atap *on-grid* berdasarkan indikator SCR dan SSR yang dihitung dari data hasil pemantauan energi?
4. Bagaimana kemampuan model LSTM dalam memprediksi nilai SCR dan SSR harian berdasarkan pola data pemantauan energi?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah ini, maka tujuan dari penelitian ini, yaitu:

1. Merancang dan mengimplementasikan sistem pemantauan energi dua arah berbasis AMI dan IoT pada PLTS atap *on-grid* tanpa baterai.
2. Mengukur dan menganalisis parameter kelistrikan berupa tegangan, arus, daya, energi, frekuensi, serta status impor–ekspor.
3. Menghitung dan mengevaluasi nilai SCR dan SSR untuk menilai tingkat pemanfaatan energi PV dan tingkat kemandirian energi beban.
4. Menganalisis hubungan antara pola produksi PLTS, konsumsi beban, energi impor, dan energi ekspor terhadap perubahan nilai SCR dan SSR.
5. Mengembangkan dan mengevaluasi model LSTM untuk memprediksi nilai SCR dan SSR harian berdasarkan data hasil pemantauan energi.

1.4 Manfaat Penelitian

Berdasarkan tujuan penelitian ini, maka manfaat dari penelitian ini, yaitu:

1. Memberikan solusi teknis berupa sistem AMI yang dapat digunakan untuk menilai performa PLTS Atap.
2. Menyediakan data kuantitatif serta indikator performa, yaitu *Self-consumption ratio* (SCR) dan *Self-sufficiency ratio* (SSR), yang dapat digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan dalam pengelolaan konsumsi energi rumah tangga.
3. Memberikan dukungan analitis melalui pengembangan model prediksi berbasis LSTM untuk memperkirakan nilai SCR dan SSR harian berdasarkan fitur hasil pemantauan, sehingga evaluasi kinerja tidak hanya bersifat deskriptif, tetapi juga dapat dimanfaatkan untuk estimasi kinerja secara lebih operasional.
4. Mendukung pengembangan konsep smart energy management yang adaptif terhadap variasi produksi dan konsumsi energi pada sistem PLTS Atap, khususnya melalui pemanfaatan data pemantauan dan hasil prediksi indikator kinerja.
5. Memberikan kontribusi ilmiah dan praktis terhadap pengembangan teknologi integrasi energi terbarukan dalam sistem kelistrikan rumah tangga, termasuk penguatan pendekatan evaluasi berbasis indikator dan pemodelan prediktif.
6. Meningkatkan kesadaran terhadap efisiensi dan keberlanjutan energi melalui implementasi sistem pemantauan, evaluasi berbasis data, serta pemanfaatan hasil prediksi sebagai bahan pertimbangan strategi penggunaan energi

1.5 Batasan Masalah

Berdasarkan manfaat penelitian, untuk menjaga fokus dan keterukuran penelitian, batasan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Sistem yang diteliti adalah PLTS atap *on-grid* tanpa baterai pada satu lokasi rumah tangga.
2. Data pengukuran dianalisis pada periode 18–23 September 2025 dengan jendela pengamatan pukul 10.00–20.00 WIB.
3. Parameter yang dianalisis meliputi tegangan, arus, daya, energi, frekuensi, energi impor, energi ekspor, SCR, dan SSR.
4. Perhitungan SCR dan SSR dilakukan berdasarkan energi PV total, energi PV yang dimanfaatkan beban, energi beban, energi impor, dan energi ekspor.
5. Model LSTM digunakan untuk memprediksi nilai SCR dan SSR harian sebagai pendekatan awal berbasis data historis, bukan untuk generalisasi jangka panjang atau prediksi musiman.
6. Penelitian ini tidak membahas analisis ekonomi, kontrol beban otomatis, sistem baterai, prediksi cuaca, maupun variasi musiman radiasi matahari.

1.6 Keterbaruan Tesis

Berdasarkan fokus dan kontribusi penelitian, keterbaruan yang ditawarkan dalam penelitian ini adalah:

1. Integrasi sistem monitoring energi dua arah berbasis AMI–IoT dengan analisis kinerja PLTS atap menggunakan indikator SCR dan SSR.
2. Penerapan LSTM untuk memprediksi energi PLTS yang digunakan langsung oleh beban sebagai dasar perhitungan SCR dan SSR.

1.7 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan laporan penelitian disusun sebagai berikut:

BAB I

PENDAHULUAN

Bab ini berisi terkait uraian latar belakang penelitian, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah dan sistematika penulisan penelitian.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi teori dasar yang mendukung penelitian Tesis.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini memuat tentang prosedur penelitian, metode penelitian, rencana tabel yang akan digunakan pada penelitian, dan *flowchart* penelitian.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi data hasil pengujian dan pembahasan dalam penelitian Tesis.

BAB V

PENUTUP

Bab ini berisikan kesimpulan dan saran terkait penelitian Tesis.

