

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Perkembangan kebutuhan energi listrik di Indonesia menunjukkan tren peningkatan yang signifikan seiring pertumbuhan penduduk, urbanisasi,. Hingga saat ini, sebagian besar pasokan listrik nasional masih bergantung pada energi fosil, khususnya batu bara, yang berkontribusi besar terhadap emisi gas rumah kaca dan perubahan iklim. Kondisi ini menjadi tantangan global yang mendorong berbagai negara, termasuk Indonesia, untuk melakukan transisi menuju pemanfaatan energi baru terbarukan (EBT). Pemerintah Indonesia melalui Rencana Umum Energi Nasional menargetkan bauran energi terbarukan sebesar 23% pada tahun 2025 sebagai bagian dari strategi penurunan emisi karbon nasional (Kementerian ESDM, 2023). Di antara berbagai jenis EBT, energi surya dinilai memiliki potensi paling besar untuk dikembangkan karena Indonesia berada di wilayah khatulistiwa dengan tingkat penyinaran matahari rata-rata berkisar antara 4,8–5,1 kWh/m² per hari (Lestari & Nugroho, 2021).

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) berbasis teknologi fotovoltaik telah berkembang pesat sebagai solusi penyediaan energi bersih yang fleksibel, khususnya melalui konsep PLTS atap *On-Grid*. Sistem ini memungkinkan pengguna memproduksi listrik secara mandiri untuk memenuhi kebutuhan beban lokal, sementara kelebihan daya dapat diekspor ke jaringan PLN melalui skema net metering. Keunggulan PLTS *On-Grid* terletak pada kemudahan instalasi, minimnya kebutuhan lahan, serta biaya operasi dan perawatan yang relatif rendah dibandingkan pembangkit konvensional (Sukmajati, 2020). Di lingkungan kampus dan institusi pendidikan, instalasi PLTS atap semakin relevan karena tingginya konsumsi energi pada waktu siang hari yang bertepatan dengan puncak radiasi matahari, sehingga memungkinkan optimalisasi pemanfaatan energi surya secara langsung.

Universitas HKBP Nommensen Medan merupakan salah satu perguruan tinggi yang telah mengimplementasikan sistem PLTS atap *On-Grid* berkapasitas terpasang sebesar 618,8 kWp sebagai bagian dari komitmen institusi terhadap

pengembangan energi berkelanjutan. Sistem ini dirancang untuk mensuplai sebagian kebutuhan listrik kampus sekaligus menekan beban penggunaan listrik dari PLN. Pada tahap perencanaan, sistem PLTS biasanya dirancang menggunakan simulasi berbasis data radiasi matahari historis, profil beban, spesifikasi modul surya, dan efisiensi inverter untuk memperoleh estimasi produksi energi tahunan. Namun, pengalaman implementasi di berbagai lokasi menunjukkan bahwa terdapat perbedaan yang cukup signifikan antara performa desain teoretis dan kinerja aktual lapangan (Adi & Pratama, 2022). Perbedaan ini dapat dipicu oleh beragam faktor seperti kondisi cuaca lokal, suhu operasi modul, sudut orientasi pemasangan, efek bayangan (shading) dari bangunan sekitar, degradasi modul, kualitas instalasi, serta efektivitas sistem pemeliharaan.

Selain sistem PLTS On-Grid berkapasitas 618,8 kWp yang diterapkan di Universitas HKBP Nommensen Medan (UHN), terdapat beberapa kampus dan institusi di Medan yang sudah mulai mengimplementasikan pemanfaatan energi surya, meskipun dalam skala lebih kecil dan umumnya berfungsi sebagai bagian dari inisiatif kampus hijau.

Salah satu implementasi serupa dapat ditemukan di Universitas Sumatera Utara (USU) yang mengoperasikan instalasi solar panel atap dengan total kapasitas lebih dari 40 kWp tersebar pada beberapa bangunan kampus, seperti Gedung Administrasi Utama dan fasilitas lain termasuk penerangan jalan berbasis solar. Sistem ini merupakan bagian dari Kebijakan Green Campus kampus tersebut untuk meningkatkan penggunaan energi terbarukan dan mengurangi jejak karbon melalui renewable energy integration dalam aktivitas operasional kampus.

Selain itu, walaupun bukan di Medan tapi penting sebagai konteks nasional, kampus-kampus lain seperti Universitas Multimedia Nusantara (di kawasan Jakarta) telah memasang instalasi solar atap yang mendukung kebutuhan listrik beberapa gedung, menunjukkan tren peningkatan adopsi PLTS di lingkungan perguruan tinggi Indonesia. Penting dicatat bahwa sampai saat ini, belum banyak kampus di Medan yang memasang PLTS dalam skala besar seperti yang ada di UHN Medan, sehingga UHN menjadi salah satu pelopor skala besar di wilayah ini.

Evaluasi efisiensi sistem PLTS menjadi aspek krusial untuk memastikan keberhasilan investasi energi surya. Salah satu indikator utama yang digunakan

dalam penilaian kinerja PLTS adalah *Performance ratio (PR)*, yaitu rasio antara energi aktual yang dihasilkan dengan energi teoretis yang seharusnya dihasilkan berdasarkan kapasitas terpasang dan intensitas radiasi matahari. Nilai PR mencerminkan keseluruhan kerugian sistem akibat faktor lingkungan, peralatan, maupun operasional. Secara umum, sistem PLTS yang dirancang dengan baik memiliki nilai PR berkisar antara 70–85%, sedangkan nilai di bawah rentang tersebut mengindikasikan adanya potensi inefisiensi atau permasalahan teknis (IRENA, 2020). Selain PR, analisis *yield* energi dan identifikasi losses juga menjadi bagian penting dalam mengevaluasi performa komprehensif suatu sistem PLTS.

Meski pemasangan PLTS atap di institusi pendidikan semakin meningkat, penelitian evaluasi performa sistem yang berbasis data operasional aktual di Indonesia masih tergolong terbatas. Banyak studi sebelumnya lebih menekankan aspek potensi teknis atau simulasi desain dibandingkan dengan kajian lapangan jangka menengah hingga panjang (Nugraha & Wibowo, 2021). Oleh karena itu, penelitian yang berfokus pada evaluasi kinerja nyata PLTS menjadi sangat mendesak guna mengisi kesenjangan antara teori perencanaan dan realitas implementasi. Selain itu, hasil evaluasi ini memberikan gambaran empiris mengenai tingkat keberhasilan proyek PLTS, yang sangat penting sebagai bahan pertimbangan pengambil kebijakan, investor, maupun institusi lain yang berencana mengadopsi sistem energi surya.

Penelitian ini mengambil objek sistem PLTS atap *On-Grid* berkapasitas 618,8 kWp yang terpasang di Universitas HKBP Nommensen Medan. Sistem tersebut menjadi objek kajian yang relevan karena merepresentasikan instalasi PLTS skala menengah di sektor pendidikan, dengan karakteristik beban yang unik serta interaksi langsung dengan jaringan PLN. Dengan kapasitas cukup besar, sistem ini memungkinkan dilakukan analisis yang komprehensif terhadap produksi energi harian, bulanan, dan tahunan serta perbandingan terhadap potensi radiasi matahari lokal. Pengambilan objek penelitian di lingkungan kampus juga memberikan nilai strategis karena hasil evaluasi dapat langsung diterapkan sebagai dasar perbaikan operasional maupun pengembangan sistem energi terbarukan lanjutan di institusi tersebut.

Dari sisi metodologi, penelitian ini dirancang menggunakan pendekatan evaluatif kuantitatif dengan mengandalkan data produksi energi aktual yang diperoleh dari sistem *monitoring* PLTS. Data ini dikombinasikan dengan data radiasi matahari setempat, spesifikasi teknis modul surya dan inverter, serta profil konsumsi listrik kampus. Selanjutnya dilakukan perhitungan *Performance ratio (PR)* sebagai indikator utama performa sistem, disertai analisis *yield* energi (kWh/kWp) untuk mengukur produktivitas pembangkit dan *losses analysis* guna mengidentifikasi sumber-sumber kehilangan energi sepanjang rantai konversi daya. Performa aktual kemudian dibandingkan dengan estimasi desain awal atau standar perhitungan teoretis untuk menilai tingkat deviasi kinerja.

Dengan mengintegrasikan evaluasi teknis, penelitian ini diharapkan mampu memberikan gambaran menyeluruh tentang efektivitas pemanfaatan PLTS atap di lingkungan kampus. Hasil penelitian tidak hanya relevan bagi Universitas HKBP Nommensen Medan sebagai bahan evaluasi internal, tetapi juga dapat menjadi referensi praktis bagi institusi pendidikan lain, sektor komersial, serta pemerintah daerah dalam mengembangkan kebijakan pemanfaatan energi surya yang berbasis bukti empiris. Melalui kajian ini, diharapkan kontribusi nyata terhadap pencapaian target bauran EBT nasional sekaligus pengurangan emisi karbon dapat semakin ditingkatkan.

1.2. Identifikasi Masalah

Implementasi sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) atap *On-Grid* di Universitas HKBP Nommensen Medan dengan kapasitas terpasang sebesar 618,8 kWp merupakan langkah strategis dalam mendukung transisi energi menuju pemanfaatan energi baru terbarukan (EBT). Namun, keberhasilan penerapan sebuah sistem PLTS tidak hanya ditentukan oleh kapasitas terpasang semata, tetapi terutama diukur melalui tingkat efisiensi dan performa operasional sistem secara aktual. Dalam praktiknya, sejumlah permasalahan potensial kerap muncul yang dapat menyebabkan kinerja sistem berbeda dari target perencanaan awal.

Masalah pertama yang teridentifikasi adalah ketidaksesuaian antara performa aktual dengan performa teoretis sistem PLTS. Nilai produksi energi yang dicapai di lapangan sering kali tidak sebanding dengan estimasi energi hasil simulasi desain.

Hal ini dapat disebabkan oleh faktor lingkungan seperti variasi intensitas radiasi matahari, kondisi cuaca lokal yang tidak menentu, peningkatan suhu panel di atas kondisi standar pengujian (STC), serta potensi shading akibat bangunan atau vegetasi di sekitar lokasi pemasangan. Faktor-faktor tersebut dapat menurunkan efisiensi konversi energi modul surya sehingga berdampak langsung terhadap total energi listrik yang dihasilkan.

Masalah kedua berkaitan dengan potensi kehilangan energi (*energy losses*) pada sistem PLTS. Kehilangan energi dapat terjadi pada berbagai tahap proses konversi, mulai dari modul surya, sistem string dan kabel distribusi, inverter, hingga proses interkoneksi dengan jaringan PLN. Losses akibat degradasi modul, mismatch antar panel, kotoran dan debu (*soiling*), serta efisiensi inverter yang tidak optimal sering kali sulit terdeteksi tanpa dilakukan evaluasi kinerja terukur melalui parameter khusus seperti *Performance ratio (PR)* dan *yield* energi. Tanpa analisis losses yang komprehensif, potensi optimasi sistem menjadi terabaikan.

Permasalahan berikutnya adalah belum diketahui secara pasti tingkat efisiensi sistem PLTS secara kuantitatif dan berkelanjutan. Meskipun tersedia sistem *monitoring* yang mencatat data produksi energi secara harian atau bulanan, data tersebut sering kali hanya dimanfaatkan sebagai catatan operasional tanpa dianalisis secara ilmiah untuk mengevaluasi performa sistem jangka menengah atau panjang. Tidak adanya pemetaan tren kinerja yang terstruktur menyebabkan potensi penurunan performa akibat degradasi sistem tidak dapat teridentifikasi secara dini.

Masalah keempat terkait dengan hubungan antara produksi energi PLTS dengan pola konsumsi listrik kampus. Sistem PLTS *On-Grid* dirancang agar energi yang dihasilkan dapat dimanfaatkan secara optimal untuk memenuhi beban lokal. Namun dalam kenyataannya, pola aktivitas kampus yang fluktuatif, libur akademik, dan variasi jam penggunaan fasilitas dapat menyebabkan ketidakseimbangan antara produksi PLTS dan kebutuhan energi. Akibatnya, sebagian energi berpotensi diekspor ke jaringan atau bahkan tidak termanfaatkan maksimal sesuai dengan potensi sistem. Minimnya analisis keterpaduan antara profil beban dan profil produksi PLTS menghambat upaya optimalisasi pemanfaatan energi surya di lingkungan kampus.

Masalah selanjutnya menyangkut efektivitas sistem *monitoring* dan pemeliharaan (operation & maintenance/O&M). *Monitoring* yang belum dimanfaatkan secara optimal berpotensi menyebabkan keterlambatan deteksi gangguan teknis seperti performa string yang menurun, inverter yang bekerja tidak maksimum, atau modul yang mengalami kerusakan fisik. Di sisi lain, jadwal pemeliharaan yang tidak berbasis data kinerja aktual sering kali belum efektif dalam menjaga kondisi optimal sistem. Hal ini dapat berakibat pada penurunan performa berkepanjangan yang tidak disadari.

Berdasarkan berbagai permasalahan tersebut, dapat disimpulkan bahwa terdapat kebutuhan mendesak untuk melakukan identifikasi dan evaluasi kinerja menyeluruh terhadap sistem PLTS atap *On-Grid* di Universitas HKBP Nommensen Medan. Evaluasi ini tidak hanya bertujuan untuk mengetahui tingkat efisiensi energi secara kuantitatif, tetapi juga untuk mengidentifikasi sumber-sumber kehilangan energi, keterkaitan antara produksi dan konsumsi energi, efektivitas sistem *monitoring* dan pemeliharaan, dampak Efisiensi dari implementasi PLTS. Tanpa adanya kajian ilmiah yang sistematis, pengelolaan sistem PLTS berpotensi berjalan tidak optimal dan mengurangi manfaat teknis yang seharusnya diperoleh dari pemanfaatan energi surya.

Oleh karena itu, identifikasi masalah dalam penelitian ini diarahkan pada upaya menjawab kebutuhan evaluasi berbasis data aktual untuk memperoleh gambaran komprehensif tentang performa sistem PLTS kampus, sekaligus merumuskan rekomendasi perbaikan yang dapat meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan operasional sistem di masa mendatang.

1.3. Rumusan masalah

Berdasarkan latar belakang dan identifikasi masalah, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana tingkat efisiensi energi sistem PLTS atap *On-Grid* 618,8 kWp di Universitas HKBP Nommensen Medan berdasarkan indikator *Performance ratio (PR)* dan *yield* energi aktual?
2. Bagaimana perbandingan kinerja aktual sistem PLTS dengan performa teoretis sesuai desain awal?

3. Faktor teknis dan lingkungan apa saja yang memengaruhi kinerja dan efisiensi sistem PLTS?
4. Di bagian mana saja terjadi kehilangan energi terbesar pada sistem PLTS (energy losses)?
5. Bagaimana keterpaduan antara produksi energi PLTS dan pola konsumsi listrik kampus?
6. Rekomendasi teknis dan operasional apa yang dapat diajukan untuk meningkatkan performa sistem PLTS?

1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Menentukan tingkat efisiensi energi sistem PLTS atap *On-Grid* berkapasitas 618,8 kWp di Universitas HKBP Nommensen Medan berdasarkan nilai *Performance ratio (PR)* dan *yield* energi aktual.
2. Menganalisis perbandingan antara performa aktual sistem PLTS dengan performa teoretis atau desain awal.
3. Mengidentifikasi faktor-faktor teknis dan lingkungan yang memengaruhi kinerja dan efisiensi sistem PLTS.
4. Menganalisis sumber dan besaran kehilangan energi (energy losses) yang terjadi pada sistem PLTS.
5. Mengkaji keterpaduan antara produksi energi PLTS dengan pola konsumsi listrik kampus.
6. Merumuskan rekomendasi teknis dan operasional guna meningkatkan efisiensi, kinerja, dan keberlanjutan operasional sistem PLTS di Universitas HKBP Nommensen Medan.

1.5. Manfaat Penelitian

Penelitian mengenai evaluasi efisiensi energi sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) atap *On-Grid* berkapasitas 618,8 kWp di Universitas HKBP Nommensen Medan diharapkan memberikan manfaat baik dari sisi teoretis maupun praktis.

1. Manfaat Teoritis

Secara teoretis, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan ilmu pengetahuan dan kajian akademik di bidang teknik energi terbarukan, khususnya pada evaluasi performa sistem fotovoltaik *On-Grid* di kondisi iklim tropis Indonesia. Hasil penelitian akan memperkaya basis data empiris mengenai karakteristik kinerja PLTS atap skala menengah di sektor pendidikan, yang selama ini masih terbatas dibandingkan kajian simulasi dan studi potensi. Melalui analisis *Performance ratio (PR)*, *yield* energi, dan identifikasi losses, penelitian ini juga berperan dalam memvalidasi konsep-konsep evaluasi performa PLTS yang banyak digunakan pada standar internasional dengan kondisi nyata di lapangan. Dengan demikian, penelitian ini dapat dijadikan referensi akademik bagi pengembangan metode evaluasi kinerja PLTS di wilayah beriklim serupa serta mendukung penyempurnaan model perencanaan dan prediksi produksi energi surya di masa mendatang.

2. Manfaat Praktis

Dari sisi praktis, hasil penelitian ini memberikan manfaat langsung bagi pengelola dan manajemen Universitas HKBP Nommensen Medan sebagai dasar evaluasi efektivitas pemanfaatan sistem PLTS kampus. Informasi mengenai tingkat efisiensi sistem, potensi kehilangan energi, serta keterpaduan antara produksi energi surya dengan pola konsumsi listrik kampus dapat dimanfaatkan untuk meningkatkan strategi pengoperasian dan pemeliharaan (*operation & maintenance/O&M*) sistem PLTS agar tetap bekerja pada kondisi optimal.

Lebih luas lagi, penelitian ini dapat dimanfaatkan oleh institusi pendidikan lain, pelaku industri energi surya, serta pemerintah daerah sebagai referensi dalam merancang dan mengevaluasi proyek PLTS atap berbasis data kinerja aktual. Temuan penelitian ini dapat membantu meningkatkan kepercayaan pemangku kepentingan terhadap implementasi energi surya sebagai solusi energi berkelanjutan yang tidak hanya layak secara teknis. Dengan tersedianya hasil evaluasi

berbasis bukti empiris, penelitian ini turut mendukung percepatan pemanfaatan energi terbarukan di Indonesia serta berkontribusi pada upaya penurunan emisi karbon dan pencapaian target bauran energi nasional.

