

# **BAB 1**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Pertumbuhan ekonomi, hilirisasi industri, serta kesejahteraan masyarakat sangat bergantung pada ketersediaan energi listrik. Pasokan daya yang memadai dan andal menjadi syarat mutlak bagi operasional sektor industri, komersial, maupun rumah tangga. Kondisi ini pada akhirnya memberikan kontribusi signifikan terhadap pembangunan ekonomi negara (Stern, 2011). Akan tetapi, penyediaan energi primer pada sistem ketenagalistrikan di Indonesia masih menghadapi kendala. Berdasarkan Handbook of Energy & Economic Statistics of Indonesia, pembangkit berbahan bakar batu bara masih mendominasi kelistrikan nasional. Hal ini menunjukkan tingginya ketergantungan negara terhadap sumber energi fosil (Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral [ESDM], 2025). Dominasi batu bara tersebut memunculkan kerentanan pada sistem ketenagalistrikan. Keandalan pasokan daya dapat dengan mudah terdampak oleh fluktuasi harga energi global, masalah rantai pasok bahan bakar, hingga perubahan arah kebijakan energi (International Energy Agency [IEA], 2023; Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral [ESDM], 2025). Tantangan lainnya juga muncul dari sisi konsumen akibat lonjakan kebutuhan kelistrikan. Data operasional tahun 2025 mencatat konsumsi listrik nasional menyentuh 1.584 kWh per kapita dengan total penjualan 317,69 TWh. Menariknya, sektor rumah tangga menyerap porsi terbesar yakni 41,99%, jauh melampaui sektor industri (29,38%) dan kawasan komersial (19,12%) (PT PLN (Persero), 2026). Tingginya serapan rumahan ini memicu fluktuasi profil beban harian yang tajam, terutama saat memasuki periode beban puncak. Oleh sebab itu, infrastruktur kelistrikan dituntut mampu merespons lonjakan permintaan tersebut secara adaptif agar pasokan tetap stabil tanpa gangguan.

Menghadapi situasi tersebut, pemerintah berupaya menekan penggunaan energi fosil melalui berbagai kebijakan transisi menuju Energi

Baru Terbarukan (EBT). Namun, karena capaian bauran energi hijau nasional saat ini masih di bawah target, percepatan pengembangan teknologi pembangkit ramah lingkungan menjadi sangat krusial. Di sisi lain, pemanfaatan pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) dan pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB) tidak lepas dari kendala teknis, terutama sifat keluaran dayanya yang intermiten. Produksi energi dari kedua pembangkit ini sangat dikontrol oleh kecepatan angin dan intensitas radiasi matahari, sehingga rentan berfluktuasi. Apabila tidak dibarengi dengan manajemen energi yang tepat, fluktuasi tersebut berisiko mengganggu stabilitas sistem jaringan kelistrikan (Olatomiwa et al., 2016; Suganthi et al., 2015). Integrasi PLTS dan PLTB ke dalam sebuah Hybrid Renewable Energy System (HRES) menjadi salah satu solusi menjanjikan untuk mengatasi masalah intermitensi daya. Penggabungan kedua sumber ini dapat saling melengkapi kelemahan masing-masing, sehingga kontinuitas pasokan listrik lebih terjamin. Tentu saja, operasional sistem hibrida mutlak membutuhkan kehadiran Energy Management System (EMS). Sistem inilah yang nantinya bertugas mengatur alur distribusi daya secara dinamis menyesuaikan perubahan cuaca, sisa kapasitas baterai, dan fluktuasi beban pengguna.

Dalam penerapan EMS, peneliti kerap memilih algoritma Fuzzy Logic Control (FLC) sebagai otak pengendali utama. Pemilihan algoritma ini bukan tanpa alasan. FLC memiliki fleksibilitas tinggi dalam menangani sistem nonlinier dan mengakomodasi berbagai ketidakpastian parameter lingkungan. Lebih jauh lagi, metode ini mampu mengeksekusi keputusan dari berbagai variabel secara bersamaan tanpa mengharuskan perumusan model matematis yang kompleks (Zadeh, 1965; Olatomiwa et al., 2016).

Percepatan pengembangan EBT juga dibutuhkan untuk memastikan target bauran energi nasional dalam Kebijakan Energi Nasional dapat terealisasi. Mengingat penerapan EBT di lapangan masih menemui banyak hambatan, adopsi teknologi pembangkit yang inovatif serta peningkatan iklim investasi di sektor kelistrikan hijau mutlak diperlukan (Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral [ESDM], 2024).

Seperti yang telah disinggung, hambatan paling nyata dalam mengoperasikan PLTS dan PLTB berpusat pada ketiadaan stabilitas daya. Pasokan listrik dari kedua pembangkit murni didikte oleh kondisi alam sekitar. Fluktuasi daya yang ditimbulkan wajib dikendalikan melalui strategi manajemen yang presisi guna mencegah gangguan pada stabilitas sistem jaringan secara keseluruhan (Olatomiwa et al., 2016). Berpijak pada permasalahan tersebut, kontinuitas pasokan listrik hanya bisa dipertahankan jika terdapat sistem yang mampu meregulasi aliran energi secara fleksibel. Penerapan HRES yang memadukan energi surya dan bayu kembali menjadi alternatif logis. Sinergi antara dua sumber ini mampu menutupi kekurangan produksi daya pada waktu-waktu tertentu. Untuk memaksimalkan potensi tersebut, fungsi EMS sangat dibutuhkan dalam menyeimbangkan alur kelistrikan berdasarkan dinamika beban, kapasitas baterai, dan faktor cuaca (Olatomiwa et al., 2016). Algoritma Fuzzy Logic Control (FLC) kembali dinilai sebagai instrumen pengendali yang paling sesuai untuk arsitektur EMS ini. Kemampuan FLC dalam menjembatani ketidakpastian lingkungan tanpa memerlukan perhitungan matematis rumit menjadikannya pilihan ideal untuk optimasi sistem hibrida (Zadeh, 1965; Suganthi et al., 2015). Jika ditinjau dari ketersediaan sumber daya, Indonesia sebenarnya memiliki modal energi terbarukan yang sangat berlimpah untuk menopang sistem pembangkit HRES. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (2024) mencatat potensi energi bayu nasional mencapai angka 154,9 GW. Titik potensial ini tersebar luas melintasi Nusa Tenggara, Sulawesi Selatan, Maluku, Papua, hingga deretan pesisir Pulau Jawa. Temuan ini sejalan dengan data Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) mengenai rata-rata kecepatan angin domestik yang berada di angka 4–6 m/s. Di beberapa wilayah pesisir dan kawasan timur, kecepatannya bahkan dapat melampaui 6 m/s, sebuah parameter yang sudah sangat ideal untuk menggerakkan turbin angin skala kecil maupun menengah (BMKG, 2023).

Keunggulan geografis Indonesia yang dilintasi garis khatulistiwa juga memberikan limpahan potensi energi surya. Tingkat intensitas radiasi matahari rata-rata nasional tercatat cukup tinggi, yakni di kisaran 4,5–5,1 kWh/m<sup>2</sup>/hari. Angka tersebut menegaskan bahwa hampir seluruh sudut daratan Indonesia memendam prospek yang luar biasa untuk dimanfaatkan sebagai lokasi pengembangan PLTS berskala masif (Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2022). Beragam studi terkait HRES sejauh ini telah banyak dieksplorasi guna merumuskan formulasi terbaik dalam menjaga keandalan listrik hijau. Kolaborasi antara tenaga surya dan angin terbukti secara empiris mampu memberikan kepastian pasokan daya yang lebih stabil bila dibandingkan dengan pembangkit energi tunggal (Olatomiwa et al., 2016).

Menelaah rekam jejak penelitian sebelumnya, studi dari Mochamad Arifan Yuliono (2023) merupakan salah satu rujukan yang sangat relevan. Studi tersebut merancang sekaligus menganalisis unjuk kerja pada purwarupa pembangkit hibrida surya dan bayu. Arsitektur kelistrikannya menggunakan panel surya 10 Wp, turbin angin bergenerator 18 V/1 A, modul baterai, solar charge controller, dan sebuah inverter pembah arus DC ke AC 220 V. Selama periode pengujian antara pukul 09.00 hingga 17.00 WIB, performa sistem memperlihatkan tegangan keluaran yang fluktuatif di rentang 13,1–13,7 V (rata-rata 13,4 V), dengan arus 0,61 A dan daya 8,25 W. Merujuk pada temuan tersebut, peneliti merekomendasikan perlunya integrasi sistem pemantauan jarak jauh (remote monitoring), pemakaian pelacak surya (solar tracking), pemanfaatan konverter DC–DC, serta penambahan durasi pengujian untuk memperoleh himpunan data yang representatif (Yuliono, 2023). Secara konseptual, fokus penelitian saat ini beririsan erat dengan riset Yuliono (2023), khususnya dalam pemanfaatan objek penelitian HRES. Perbedaan yang paling mendasar justru terletak pada kebaruan sistem kendali dan mekanisme manajemen energinya. Jika studi terdahulu cenderung membedah perangkat keras dan profil luaran daya secara pasif, penelitian ini menawarkan pengembangan sistem yang lebih cerdas melalui integrasi teknologi Internet of Things (IoT) untuk

pemantauan data secara seketika (real-time). Di samping itu, fungsi EMS dioptimalkan menggunakan algoritma Fuzzy Logic Control (FLC). Adopsi logika fuzzy memungkinkan sistem untuk mengambil keputusan terkait pengaturan distribusi daya secara otonom, murni berdasarkan dinamika fluktuasi beban dan kondisi State of Charge (SoC) baterai. Melalui pendekatan kendali yang adaptif ini, efisiensi pemakaian daya diharapkan dapat meningkat signifikan, yang pada bermuara pada bertambahnya masa pakai komponen baterai (Olatomiwa et al., 2016; Suganthi et al., 2015).

### **1.2 Identifikasi Masalah**

Berdasarkan latar belakang dan rencana penelitian yang akan dilakukan, maka permasalahan dalam penelitian ini dapat diidentifikasi sebagai berikut:

1. Belum diketahui efisiensi dari penerapan *Fuzzy Logic Controller* sebagai kontrol pendistribusian daya.
2. Belum diketahui seberapa optimal sistem *Hybrid* pada PLTS dan PLTB untuk pemakaian sehari-hari.
3. Diperlukan suatu sistem monitoring yang mampu menampilkan data secara real time untuk mempermudah proses pengujian dan analisis kinerja PLTS dan PLTB.

### **1.3 Batasan Masalah**

Agar penelitian ini lebih terarah dan sesuai dengan tujuan yang telah ditetapkan, maka batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini difokuskan pada sistem PLTS PLTB hybrid dan tidak membahas implementasi pada skala industri atau jaringan listrik PLN.
2. Pengujian PLTS dibatasi pada ruang lingkup yang kecil, dan tidak membahas seberapa banyak intensitas radiasi matahari yang diterima.
3. Analisis PLTB dibatasi pada pengukuran daya listrik yang dihasilkan terhadap variasi kecepatan angin, tanpa membahas desain aerodinamika turbin secara mendalam.

4. Kecepatan angin alami hanya di gunakan sebagai data referensi, yang di peroleh melalui pengukuran menggunakan anemometer digital, tidak digunakan secara langsung sebagai sumber penggerak turbin.
5. Sistem monitoring berbasis IoT dibatasi pada pemantauan data secara real-time, seperti kecepatan angin, tegangan, arus, dan daya, tanpa membahas aspek keamanan jaringan (*cyber security*) secara mendalam.

#### 1.4 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang, identifikasi masalah, dan batasan masalah yang telah diuraikan, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang sistem monitoring dan kontrol PLTS ,PLTB yang di implementasikan dengan *Fuzzy logic Control* ?
2. Bagaimana kinerja sensor arus, tegangan dan anemometer pada sistem monitoring PLTS dan PLTB?
3. Bagaimana pengaruh kecepatan angin dan intensitas radiasi matahari terhadap daya yang di hasilkan oleh PLTS dan PLTB?
4. Bagaimana kinerja metode *Fuzzy Logic Controller* dalam mengendalikan pendistribusian daya berdasarkan kondisi *State of Charge (SoC)* baterai dan daya beban?

#### 1.5 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Merancang dan mengimplementasikan sistem monitoring dan kontrol pada PLTS dan PLTB berbasis IoT serta menerapkan *Fuzzy* sebagai sistem kontrol distribusi prioritas daya.
2. Menguji tingkat akurasi dan kinerja pembacaan sensor arus , tegangan, dan anemometer pada sistem monitoring PLTS dan PLTB.
3. Menganalisis pengaruh variasi kecepatan angin dan intensitas radiasi matahari terhadap total daya listrik yang di hasilkan.
4. Mengevaluasi efektivitas penerapan *Fuzzy Logic Controller* dalam mengendalikan daya secara akurat berdasarkan SoC dan daya beban.

## 1.6 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari pelaksanaan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Memberikan kontribusi terhadap pengembangan ilmu pengetahuan di bidang sistem energi terbarukan, khususnya terkait penerapan sistem PLTS dan PLTB hybrid.
2. Memberikan kontribusi nyata kepada masyarakat jika membutuhkan sistem PLTS dan PLTB *Hybrid* sebagai alternatif penyediaan energi listrik, khususnya di daerah yang belum terjangkau jaringan listrik secara optimal.
3. Memberikan informasi mengenai kinerja sistem PLTS dan PLTB *Hybrid* berdasarkan hasil pengukuran parameter yang ada sehingga menjadi acuan dalam pengembangan sistem energi terbarukan di masa mendatang.
4. Mendukung upaya pemanfaatan energi terbarukan sebagai pengganti alternatif sehingga dapat mengurangi ketergantungan terhadap energi berbahan bakar fosil.

*Intelligentia - Dignitas*