

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Transisi menuju sistem kelistrikan yang lebih ramah lingkungan dan rendah karbon menjadi urgensi global dalam menghadapi perubahan iklim dan krisis energi. Penggunaan bahan bakar fosil, seperti batu bara, masih menjadi salah satu penyumbang utama emisi gas rumah kaca dunia, dengan kontribusi sekitar 25% [1]. Dekarbonisasi sektor ketenagalistrikan menjadi prioritas utama dalam agenda global, sebagaimana tercantum dalam Tujuan Pembangunan Berkelanjutan *Sustainable Development Goals (SDGs)* nomor 7 dan 13 [2]. Indonesia pun telah menyatakan komitmennya dalam dokumen *Enhanced Nationally Determined Contribution (Enhanced NDC)* yang disampaikan kepada *United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC)* pada September 2022, yaitu untuk mengurangi emisi gas rumah kaca sebesar 31,89% secara *unconditional* dan 43,20% secara *conditional* pada tahun 2030 [3]. Selain itu, Indonesia juga memiliki visi jangka panjang menuju netral karbon (*net-zero emission*) pada tahun 2060 atau lebih cepat [4].

Energi terbarukan, khususnya tenaga surya dan angin, semakin diandalkan sebagai solusi masa depan karena lebih ramah lingkungan, aman, dan berkelanjutan. Dalam beberapa tahun terakhir, pemerintah Indonesia telah mendorong penggunaan Energi Baru Terbarukan (EBT) untuk mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil [5], [6]. Salah satu sumber EBT yang potensial adalah energi surya. Berdasarkan *National General Energy Plan* dan data *Global Horizontal Irradiation (GHI)*, potensi energi surya Indonesia diperkirakan mencapai sekitar 208 GW dengan rata-rata radiasi matahari harian sebesar 4,8 hingga 5,1 kWh/m² [7], [8]. Namun, sifat intermiten dari pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) sangat bergantung pada intensitas cahaya matahari yang fluktuatif akibat perubahan cuaca [9]. Sifat intermiten *Photovoltaic (PV)* ini menimbulkan isu kualitas dan operasi daya pada sistem interkoneksi, sekaligus membatasi pemanfaatan pada aplikasi skala kecil atau *off-grid*. Oleh karena itu, diperlukan

mekanisme penyimpanan energi yang mampu menyerap kelebihan daya dan melepaskannya kembali secara terkendali [10].

Agar sumber energi intermiten ini andal memenuhi kebutuhan beban pada konteks *off-grid*, diperlukan sistem penyimpanan yang mampu menyerap surplus daya ketika tersedia dan menyalurkannya kembali saat terjadi defisit [11]. Salah satu teknologi yang sedang berkembang sekarang adalah *Pumped Hydro Storage (PHS)*, yang menyimpan energi sebagai energi potensial air dan ketika terjadi surplus daya, air dipompa dari reservoir bawah ke reservoir atas. Ketika energi dibutuhkan, air dialirkan kembali melalui turbin-generator untuk menghasilkan listrik [12], [13].

Sistem *PHS* berbeda dengan Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) atau Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) konvensional yang umumnya hanya mengandalkan aliran air dari ketinggian secara satu arah tanpa mekanisme pemompaan ulang. PLTA dan PLTMH bersifat *open-loop* dan sangat bergantung pada sumber air alami yang kontinu, sehingga tidak dapat digunakan sebagai sistem penyimpanan energi [14], [15]. Sistem *PHS* yang dikembangkan dalam penelitian ini menerapkan prinsip *closed-loop*, di mana air dapat dipompa kembali dari reservoir bawah ke atas menggunakan energi surplus dari PLTS, dan kemudian dialirkan kembali ke bawah untuk menghasilkan listrik saat diperlukan. Skema ini memungkinkan sistem bekerja secara siklus tertutup tanpa tergantung pada sumber air luar [12], [16].

Meskipun *PHS* menawarkan solusi penyimpanan energi yang andal, konfigurasi konvensional dengan satu pompa dan satu turbin-generator masih memiliki keterbatasan. Kapasitas pemompaan yang tetap membuat sistem kurang adaptif terhadap fluktuasi pasokan daya dari PLTS, sehingga tidak semua surplus energi dapat dimanfaatkan secara optimal. Selain itu, penggunaan satu unit turbin-generator membatasi sistem untuk beroperasi dalam satu jalur konversi energi, padahal karakteristik aliran air dan beban listrik dapat berubah-ubah. Untuk meningkatkan fleksibilitas, diperlukan penerapan multi-pompa yang dapat dioperasikan secara selektif sesuai ketersediaan daya [17], [18], serta konfigurasi turbin-generator *cascading* baik seri maupun paralel. Dalam penelitian ini, kedua konfigurasi tersebut dianalisis secara eksperimental dan dibandingkan untuk

mengevaluasi konfigurasi mana yang paling optimal dalam menghasilkan daya pada berbagai kondisi beban operasional [19].

Penelitian oleh Kriswidijatmoko dkk. menunjukkan bahwa konfigurasi turbin-generator mini seri lebih efisien pada debit rendah dibandingkan paralel, namun studi tersebut belum mengintegrasikan kontrol adaptif dalam konteks *PHS* [19]. Penelitian oleh Yimen dkk. menyoroti pentingnya *PHS* dalam sistem *hybrid off-grid* berbasis PLTS, angin, dan biogas, tetapi masih terbatas pada simulasi dengan *software HOMER Pro* tanpa sistem kendali atau pemantauan *real-time* [20]. Sementara itu, Bordeasu dkk. mengembangkan multi-pompa dengan kontrol adaptif terhadap daya dari PLTS dan jaringan listrik melalui simulasi *MATLAB/Simulink* yang mengindikasikan potensi peningkatan efisiensi dan keandalan sistem [17]. Menindaklanjuti arah tersebut, penelitian ini mengimplementasikan secara nyata kendali adaptif berbasis ESP32 dan komunikasi NRF24L01, serta pemantauan dan kontrol jarak jauh melalui *web Flask* pada Raspberry Pi, sehingga lebih aplikatif dan responsif dalam mendukung penyimpanan energi PLTS secara *real-time*.

Penelitian ini juga merupakan pengembangan dari studi yang dilakukan oleh Syafii dkk. (2024), yang merancang sistem otomatisasi pompa tenaga surya untuk aplikasi *PHS* menggunakan kombinasi *PLC* dan Arduino, dengan fokus utama penelitian tersebut adalah proteksi pompa melalui pemantauan debit dan ketinggian air secara lokal [21]. Meskipun sistem tersebut telah berhasil mengatur operasi pompa secara otomatis, pendekatannya masih terbatas pada satu unit pompa, tanpa dukungan komunikasi antar perangkat maupun pemantauan jarak jauh.

Sebagai pengembangan dari kajian tersebut, penelitian ini merancang sistem *PHS cascading multi-unit* yang lebih kompleks, di mana beberapa pompa dan katup (*valve*) pada reservoir atas dan bawah dikendalikan secara adaptif berdasarkan parameter operasional seperti ketersediaan daya dari PLTS, dan volume kedua reservoir. Strategi pengaktifan multi-pompa bersifat selektif agar dapat menyerap surplus daya secara efisien. Kontrol sistem difokuskan pada unit pompa dan katup, yang dikendalikan secara nirkabel melalui modul NRF24L01 yang terdapat pada setiap mikrokontroler ESP32. Setiap *node* mengirimkan data ke satu unit *master*, yang kemudian terhubung ke Raspberry Pi 5 sebagai server lokal

dengan antarmuka *web* berbasis *flask* untuk pemantauan *real-time*, pencatatan data, dan kontrol jarak jauh. Pendekatan ini memberikan fleksibilitas dan skalabilitas yang lebih baik dibandingkan studi terdahulu pada konteks *PHS closed-loop* skala kecil.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini berfokus pada perancangan sistem *PHS closed-loop* dengan pengaturan operasi multi-pompa berbasis ketersediaan daya surya serta evaluasi eksperimental konfigurasi turbin–generator *cascading* (seri dan paralel) untuk menentukan kinerja yang paling sesuai pada berbagai kondisi beban. Hingga kini, pengembangan konfigurasi *cascading* yang dikendalikan nirkabel dan dimonitor melalui antarmuka *web* masih terbatas, sehingga penelitian ini memberikan kontribusi teknis sekaligus aplikatif. Sistem yang dirancang menggunakan beberapa unit pompa dan katup yang dapat dioperasikan secara independen namun saling terhubung, dengan kendali berbasis mikrokontroler cerdas untuk menghasilkan penyimpanan energi yang adaptif, efisien, dan andal. Penelitian ini diangkat dengan judul “**Perancangan Sistem Pumped Hydro Storage dengan Pengaturan Operasi Multi-Pompa dan Konfigurasi Turbin–Generator Cascading Berbasis Ketersediaan Daya Tenaga Surya**”.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah disampaikan, terdapat beberapa permasalahan yang perlu dikaji lebih lanjut, yaitu:

1. Bagaimana merancang sistem *PHS* bertingkat dengan operasi multi-pompa dan konfigurasi turbin–generator *cascading* yang adaptif?
2. Bagaimana membangun monitoring & kendali *real-time* (ESP32–NRF24L01 + *web*) untuk memperoleh ketersediaan daya surya terukur dan kondisi tandon sebagai basis pengaturan operasi?
3. Bagaimana menetapkan nilai *optimum* daya surya terukur untuk aktivasi 1, 2, atau 3 pompa melalui pengujian eksperimental, serta menerapkannya sebagai dasar pengaturan operasi?
4. Bagaimana membandingkan performa konfigurasi seri dan paralel melalui pengujian eksperimental untuk menentukan konfigurasi yang paling sesuai pada variasi beban?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Merancang dan merealisasikan sistem *PHS* bertingkat dengan operasi multi-pompa serta konfigurasi turbin–generator *cascading* yang adaptif.
2. Mengembangkan sistem monitoring dan kendali *real-time* berbasis ESP32–NRF24L01 dan antarmuka *web* untuk memantau ketersediaan daya surya terukur serta kondisi tandon sebagai dasar pengaturan operasi sistem.
3. Menetapkan nilai optimum daya surya terukur untuk mengaktifkan 1, 2, atau 3 pompa melalui pengujian eksperimental.
4. Melakukan uji eksperimental konfigurasi seri dan paralel untuk membandingkan kinerja dan menentukan konfigurasi yang sesuai.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini memberikan manfaat dari sisi teoretis dan praktis sebagai berikut:

1. Memberikan kontribusi baru dalam pengembangan sistem *PHS* skala laboratorium dengan pendekatan *closed-loop* yang memanfaatkan multi-pompa dan konfigurasi turbin–generator *cascading* (seri dan paralel).
2. Menyediakan referensi rancangan arsitektur kendali adaptif berbasis mikrokontroler ESP32 dan komunikasi nirkabel NRF24L01, yang dapat diimplementasikan pada sistem penyimpanan energi terdistribusi.
3. Menghasilkan data eksperimental terkait kinerja konfigurasi seri dan paralel pada turbin–generator mini, yang dapat menjadi acuan dalam penelitian lanjutan atau penerapan sistem sejenis.
4. Mengembangkan antarmuka pemantauan dan pengendalian berbasis *web* (Raspberry Pi 5 + *Flask*) yang memungkinkan monitoring *real-time*, pencatatan data, serta kontrol jarak jauh, sehingga dapat meningkatkan efisiensi dalam pengoperasian sistem penyimpanan energi.
5. Menjadi bahan acuan bagi penelitian dan pengembangan selanjutnya dalam bidang sistem penyimpanan energi terbarukan, khususnya pada integrasi PLTS dengan teknologi *PHS* berskala kecil.

1.5 Batasan Masalah

Penelitian ini dibatasi pada pengembangan dan pengujian sistem *PHS* skala kecil dengan ruang lingkup sebagai berikut:

1. Fokus penelitian adalah pada perancangan operasi multi-pompa berbasis ketersediaan daya tenaga surya serta evaluasi eksperimental konfigurasi turbin-generator *cascading* (seri dan paralel) untuk menilai kinerja sistem pada berbagai variasi beban.
2. Sistem menggunakan satu sumber energi utama, yaitu PLTS sederhana tanpa integrasi dengan jaringan PLN. PLTS hanya digunakan untuk menyuplai pompa sebagai beban utama, sehingga beban eksternal lain tidak diperhitungkan.
3. Terdiri dari tiga unit pompa dan tiga unit turbin-generator mini yang diuji secara bergantian dalam konfigurasi seri maupun paralel, bukan dioperasikan bersamaan sekaligus.
4. Kendali dan pemantauan sistem dilakukan melalui mikrokontroler ESP32 dengan komunikasi nirkabel NRF24L01, serta antarmuka *web* berbasis *Flask* pada Raspberry Pi 5.
5. Penelitian ini tidak membahas perhitungan efisiensi hidrolis secara detail, seperti rugi-rugi tekanan (*head loss*), gesekan pipa, efisiensi pompa dan turbin secara fisik, degradasi komponen atau efisiensi fluida.
6. Implementasi dilakukan pada skala laboratorium, belum untuk skala industri.
7. Sistem dikendalikan secara manual *real-time*, tanpa penerapan algoritma otomatisasi cerdas, seperti logika fuzzy, kontrol adaptif tingkat lanjut, atau *machine learning*.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam proposal Tugas Akhir ini disusun secara sistematis untuk memberikan gambaran yang jelas mengenai arah dan ruang lingkup penelitian. Adapun susunan isi proposal ini adalah sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Memuat latar belakang, rumusan masalah, tujuan, manfaat, batasan, dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Berisi teori pendukung, konsep *PHS*, *PLTS*, konfigurasi pompa–turbin, teknologi kendali berbasis *ESP32*, *NRF24L01*, serta studi terdahulu (*state of the art*).

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Menjelaskan perancangan sistem, integrasi perangkat keras dan sensor, konfigurasi eksperimen seri–paralel, serta skema pemantauan melalui *web*.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Menyajikan data hasil pengujian, analisis kinerja multi-pompa, perubahan level tandon, dan keluaran turbin pada konfigurasi seri dan paralel.

BAB V PENUTUP

Berisi kesimpulan penelitian dan saran untuk pengembangan lebih lanjut.

DAFTAR PUSTAKA

Memuat seluruh referensi ilmiah yang digunakan.

