

BAB I PENDAHULUAN

1. 1 Latar Belakang

Transisi menuju sistem energi yang lebih bersih dan berkelanjutan menjadi isu global yang semakin mendesak dalam menghadapi perubahan iklim dan krisis energi. Penggunaan bahan bakar fosil seperti batu bara masih mendominasi sektor ketenagalistrikan dan berkontribusi signifikan terhadap emisi gas rumah kaca global, dengan estimasi mencapai sekitar 25% dari total emisi[1]. Oleh karena itu, upaya dekarbonisasi sektor energi menjadi fokus utama dalam agenda internasional sebagaimana tertuang dalam *Sustainable Development Goals* (SDGs), khususnya tujuan ke-7 mengenai energi bersih dan terjangkau serta tujuan ke-13 terkait penanganan perubahan iklim[2]. Indonesia juga menunjukkan komitmennya melalui dokumen *United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC), dengan target penurunan emisi sebesar 31,89% secara mandiri dan hingga 43,20% dengan dukungan internasional pada tahun 2030[3]. Selain itu, Indonesia menargetkan pencapaian *net-zero emission* pada tahun 2060 atau lebih cepat sebagai bagian dari strategi pembangunan rendah karbon[4].

Dalam mendukung target tersebut, pemanfaatan energi terbarukan menjadi salah satu solusi utama yang terus dikembangkan, khususnya energi surya yang memiliki potensi sangat besar di Indonesia. Pemerintah telah mendorong peningkatan bauran Energi Baru Terbarukan (EBT) guna mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil. Berdasarkan data *Global Horizontal Irradiation* (GHI), potensi energi surya Indonesia diperkirakan mencapai sekitar 208 GW dengan intensitas radiasi harian rata-rata sebesar 4,8–5,1 kWh/m²[5][6]. Besarnya potensi tersebut menjadikan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) sebagai salah satu teknologi yang menjanjikan untuk memenuhi kebutuhan energi listrik secara berkelanjutan. Namun demikian, PLTS memiliki karakteristik intermiten karena daya yang dihasilkan sangat dipengaruhi oleh kondisi cuaca, tingkat radiasi matahari, dan waktu operasional. Akibatnya, daya keluaran PLTS sering mengalami fluktuasi sehingga dapat memengaruhi kontinuitas dan keandalan pasokan energi pada sistem kelistrikan[7].

Pada sistem PLTS konvensional, energi berlebih yang tidak digunakan oleh beban umumnya disimpan menggunakan baterai. Meskipun memiliki respons yang cepat dan mudah diimplementasikan, penggunaan baterai memiliki beberapa keterbatasan seperti umur pakai yang relatif pendek, biaya investasi yang tinggi, kebutuhan perawatan berkala, serta penurunan kapasitas penyimpanan seiring waktu. Selain itu, penggunaan baterai dalam skala besar juga menimbulkan permasalahan lingkungan terkait proses produksi dan limbah baterai setelah masa pakainya berakhir. Oleh karena itu, diperlukan alternatif sistem penyimpanan energi

yang lebih ramah lingkungan, memiliki umur operasi yang panjang, dan mampu menyimpan energi dalam kapasitas yang lebih besar.

Salah satu teknologi yang berpotensi menjadi pengganti sistem penyimpanan energi berbasis baterai adalah *Pumped Hydro Storage* (PHS). Teknologi ini bekerja dengan mengubah energi listrik menjadi energi potensial air melalui proses pemompaan air dari reservoir bawah menuju reservoir atas. Ketika energi listrik dibutuhkan, air yang tersimpan pada reservoir atas dialirkan kembali ke reservoir bawah melalui turbin yang terhubung dengan generator sehingga menghasilkan energi listrik. Dengan prinsip tersebut, PHS dapat berfungsi sebagai media penyimpanan energi jangka panjang yang memiliki efisiensi tinggi, umur operasi yang panjang, serta dampak lingkungan yang relatif rendah dibandingkan sistem penyimpanan berbasis baterai.

Pengembangan lebih lanjut dari teknologi ini adalah penerapan konsep *Multi Pumped Hydro Storage*, yaitu penggunaan lebih dari satu pompa dalam proses pemompaan air menuju reservoir atas. Konsep ini memungkinkan peningkatan fleksibilitas operasional sistem penyimpanan energi karena kapasitas penyimpanan dapat disesuaikan dengan besarnya energi yang tersedia dari PLTS. Semakin besar energi berlebih yang dihasilkan PLTS, semakin banyak pompa yang dapat dioperasikan untuk meningkatkan volume air yang dipindahkan ke reservoir atas, sehingga energi yang tersimpan juga semakin besar[8].

Pada penelitian ini, energi yang dihasilkan oleh PLTS diprioritaskan untuk menyuplai kebutuhan beban utama berupa beban AC. Prioritas tersebut diberikan karena beban AC merupakan beban yang secara langsung digunakan oleh pengguna dan harus tetap mendapatkan pasokan energi secara kontinu. Ketika daya yang dihasilkan PLTS lebih besar daripada kebutuhan beban AC, maka kelebihan daya (*excess energy*) tidak dibiarkan terbuang, melainkan dimanfaatkan untuk mengoperasikan pompa DC pada sistem *Multi Pumped Hydro Storage*. Pompa DC akan memindahkan air dari reservoir bawah menuju reservoir atas sehingga energi listrik berlebih dari PLTS dapat dikonversi dan disimpan dalam bentuk energi potensial air.

Pada sistem yang dirancang, proses penyimpanan energi dilakukan secara bertingkat melalui penggunaan beberapa pompa DC yang dikendalikan berdasarkan ketersediaan daya surplus dari PLTS. Ketika daya yang dihasilkan PLTS hanya sedikit melebihi kebutuhan beban AC, sistem akan mengaktifkan satu pompa DC untuk memanfaatkan energi berlebih tersebut. Jika daya surplus meningkat, sistem dapat mengaktifkan pompa tambahan sehingga kapasitas pemompaan air menuju reservoir atas menjadi lebih besar. Mekanisme ini memungkinkan pemanfaatan energi surplus secara lebih fleksibel dan efisien dibandingkan penggunaan satu pompa dengan kapasitas tetap. Semakin besar daya surplus yang tersedia, semakin besar pula volume air yang dipindahkan ke reservoir atas, sehingga energi potensial yang tersimpan dalam sistem meningkat. Energi potensial tersebut kemudian dapat dikonversi kembali menjadi energi listrik melalui generator saat air dialirkan dari

reservoir atas ke reservoir bawah. Dengan demikian, konsep *Multi Pumped Hydro Storage* tidak hanya berfungsi sebagai media penyimpanan energi alternatif pengganti baterai, tetapi juga mampu menyesuaikan kapasitas penyimpanan dengan kondisi daya PLTS yang berubah-ubah secara dinamis sepanjang waktu operasi.

Penerapan konsep ini menjadi penting karena tidak seluruh energi yang dihasilkan PLTS dapat dimanfaatkan secara langsung oleh beban pada setiap waktu. Pada saat intensitas radiasi matahari tinggi, sering kali terjadi kondisi kelebihan daya yang berpotensi terbuang apabila tidak tersedia sistem penyimpanan energi yang memadai. Melalui integrasi PLTS dengan *Multi Pumped Hydro Storage*, energi berlebih tersebut dapat dikonversi menjadi energi potensial air dan disimpan untuk digunakan kembali pada saat produksi energi surya menurun, seperti pada sore hari, malam hari, atau ketika kondisi cuaca mendung. Strategi ini diharapkan mampu meningkatkan pemanfaatan energi surya (*solar energy utilization*), memperbaiki kontinuitas pasokan energi, serta mengurangi ketergantungan terhadap teknologi penyimpanan energi berbasis baterai yang memiliki keterbatasan umur pakai dan biaya penggantian yang relatif tinggi.

Energi potensial yang tersimpan pada reservoir atas selanjutnya dapat dimanfaatkan kembali ketika produksi energi dari PLTS menurun atau tidak mampu memenuhi kebutuhan beban. Pada kondisi tersebut, air dari reservoir atas dialirkan menuju reservoir bawah melalui turbin yang terhubung dengan generator sehingga menghasilkan energi listrik. Dengan demikian, sistem *Multi Pumped Hydro Storage* berfungsi sebagai media penyimpanan energi yang mampu menggantikan peran baterai dalam menyimpan kelebihan energi PLTS dan menyalurkannya kembali saat diperlukan[9].

Agar proses distribusi energi antara beban utama dan sistem penyimpanan dapat berlangsung secara optimal, diperlukan suatu sistem manajemen energi (*Energy Management System / EMS*) yang mampu mengambil keputusan secara otomatis berdasarkan kondisi daya yang tersedia. Pada penelitian ini, EMS dirancang menggunakan metode *rule-based* dengan memanfaatkan parameter listrik berupa tegangan, arus, dan daya yang diukur secara *real-time*. Sistem akan menentukan prioritas penggunaan energi berdasarkan aturan yang telah ditetapkan, yaitu memprioritaskan pemenuhan kebutuhan beban AC terlebih dahulu. Setelah kebutuhan beban utama terpenuhi, sistem akan mengaktifkan satu atau beberapa pompa DC sesuai dengan besarnya daya berlebih yang tersedia dari PLTS untuk melakukan proses penyimpanan energi[10]. Keputusan pengaktifan pompa dilakukan berdasarkan nilai surplus daya yang diperoleh dari selisih antara daya keluaran PLTS dan daya yang dikonsumsi oleh beban AC. Semakin besar nilai surplus daya yang tersedia, semakin banyak pompa yang dapat dioperasikan untuk meningkatkan laju pemompaan air ke reservoir atas. Sebaliknya, ketika surplus daya menurun atau tidak tersedia, sistem akan mengurangi jumlah pompa yang aktif atau menghentikan proses pemompaan guna memastikan pasokan energi untuk beban utama tetap terjaga. Dengan mekanisme tersebut, energi yang dihasilkan

PLTS dapat dimanfaatkan secara lebih optimal karena distribusi daya antara beban utama dan sistem penyimpanan dilakukan secara adaptif sesuai kondisi operasi yang berlangsung secara *real-time*.

Pendekatan *rule-based* dipilih karena memiliki struktur pengambilan keputusan yang sederhana, mudah diimplementasikan pada mikrokontroler, serta mampu memberikan respons yang cepat terhadap perubahan kondisi sistem. Dengan adanya sistem manajemen energi ini, pemanfaatan energi yang dihasilkan PLTS diharapkan menjadi lebih optimal karena energi berlebih dapat dimanfaatkan untuk proses penyimpanan energi melalui sistem *Multi Pumped Hydro Storage* daripada terbuang percuma. Selain itu, sistem ini juga diharapkan mampu meningkatkan keandalan pasokan energi, mengurangi ketergantungan terhadap baterai sebagai media penyimpanan energi, serta mendukung pengembangan sistem energi terbarukan yang lebih berkelanjutan. Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini diangkat dengan judul “Perancangan Sistem Manajemen Energi Berbasis Rule-Based untuk Integrasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya dan Multi Pumped Hydro Storage.”

1. 2 Rumusan Masalah

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

1. Bagaimana merancang sistem Energy Management System (EMS) berbasis *rule-based* untuk mengatur distribusi energi antara Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), beban AC, dan sistem Multi Pumped Hydro Storage?
2. Bagaimana metode pengukuran dan monitoring parameter listrik (tegangan, arus, dan daya) secara *real-time* untuk mendukung pengambilan keputusan pada sistem EMS?
3. Bagaimana mengimplementasikan sistem Energy Management System (EMS) berbasis mikrokontroler ESP32 untuk melakukan fungsi pengendalian dan monitoring selama sistem beroperasi?
4. Bagaimana menetapkan nilai ambang tegangan keluaran PLTS untuk aktivasi Pompa 1 dan Pompa 2 melalui pengujian eksperimental serta menerapkannya sebagai dasar pengaturan operasi sistem EMS berbasis *rule-based*?

1. 3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Merancang sistem Energy Management System (EMS) berbasis *rule-based* untuk mengatur distribusi energi antara PLTS, beban AC, dan sistem Multi Pumped Hydro Storage.
2. Mengembangkan sistem monitoring parameter listrik (tegangan, arus, dan daya) secara *real-time* sebagai dasar pengambilan keputusan dalam EMS.

3. Menentukan dan menerapkan aturan (*rule-based control*) berdasarkan tegangan keluaran PLTS untuk memprioritaskan penyuplai beban AC serta mengaktifkan sistem Multi Pumped Hydro Storage ketika energi PLTS mencukupi.
4. Mengimplementasikan sistem EMS menggunakan mikrokontroler ESP32 untuk melakukan pengendalian dan monitoring selama operasi sistem.
5. Menganalisis kinerja sistem EMS dalam meningkatkan efisiensi pemanfaatan energi PLTS dan keandalan sistem penyimpanan energi berbasis Multi Pumped Hydro Storage.

1. 4 Manfaat Penelitian

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

1. Memberikan kontribusi dalam pengembangan ilmu pengetahuan di bidang sistem tenaga listrik, khususnya terkait Energy Management System (EMS) berbasis *rule-based* pada integrasi energi terbarukan dan sistem penyimpanan energi.
2. Menghasilkan solusi untuk pengelolaan dan distribusi energi dari Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) agar lebih optimal, dengan memprioritaskan beban utama (AC) serta memanfaatkan kelebihan daya untuk sistem penyimpanan energi.
3. Menjadi dasar implementasi sistem pengendalian dan monitoring berbasis mikrokontroler ESP32 yang dapat bekerja selama operasi sistem secara real-time.
4. Meningkatkan pemahaman dan keterampilan dalam perancangan, integrasi, serta analisis kinerja sistem EMS berbasis *rule-based* yang menggabungkan perangkat keras dan perangkat lunak.

1. 5 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini sebagai berikut:

1. Sistem yang dirancang hanya menggunakan sumber energi dari Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) sebagai sumber utama tanpa mempertimbangkan sumber energi lain.
2. Sistem Energy Management System (EMS) yang digunakan berbasis *rule-based* dengan aturan logika program dan tidak menggunakan metode kecerdasan buatan atau optimasi lanjutan.
3. Parameter yang dimonitor dalam sistem terbatas pada tegangan, arus, dan daya pada beban AC dan beban DC.
4. Beban yang digunakan dalam sistem dibatasi pada beban AC sebagai beban utama dan beban DC berupa sistem multi pompa pada Multi Pumped Hydro Storage.

5. Sistem penyimpanan energi yang digunakan hanya berupa Multi Pumped Hydro Storage, tanpa membahas jenis penyimpanan energi lain seperti baterai.
6. Pengendalian dan monitoring sistem dilakukan menggunakan mikrokontroler ESP32 yang terintegrasi dengan sistem Internet of Things (IoT) untuk pemantauan data secara real-time.
7. Platform IoT yang digunakan terbatas pada satu platform Blynk dan hanya digunakan untuk monitoring data, bukan untuk pengambilan keputusan kontrol utama.
8. Pengujian sistem dilakukan dalam skala prototipe/laboratorium dan tidak mencakup implementasi pada sistem skala besar (real grid), serta uji coba generator turbin hanya dibatasi pada kemampuan menghasilkan energi listrik.
9. Parameter yang digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan pada sistem EMS adalah tegangan keluaran PLTS yang dibaca oleh sensor PZEM-017. Parameter arus, daya, dan energi digunakan sebagai data monitoring dan evaluasi performa sistem.
10. Penelitian ini difokuskan pada perancangan dan implementasi *Energy Management System* (EMS) berbasis *rule-based* untuk mengatur distribusi energi PLTS menuju beban AC dan sistem MPHS. Pengendalian level air reservoir, termasuk mekanisme penghentian pompa secara otomatis ketika reservoir mencapai kapasitas maksimum, tidak menjadi bagian dari penelitian ini.

1. 6 Sistematika Penulisan

Proposal Penelitian ini disusun dengan sistematika penulisan sebagai berikut :

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini terdiri dari latar belakang, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, Batasan masalah, dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi tentang teori pendukung yang melandasi tugas akhir ini.

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini terdiri dari tahapan penelitian dan langkah-langkah yang diperlukan dalam penelitian.

BAB IV HASIL DAN ANALISA Bab ini menyajikan temuan penelitian yang diperoleh serta analisis mendalam terhadap data yang dikumpulkan, dengan mengacu pada teori yang telah dibahas dalam tinjauan Pustaka untuk memperkuat argument.

BAB V PENUTUP Pada bab ini membahas tentang simpulan dan saran terhadap penelitian yang dilakukan.

DAFTAR PUSTAKA

