

BAB V PENUTUP

5. 1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian sistem yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa penelitian mengenai implementasi *Energy Management System* (EMS) berbasis *rule-based* pada sistem *Multi Pumped Hydro Storage* (MPHS) berbasis *Photovoltaic* (PV) telah berhasil direalisasikan. Kesimpulan yang diperoleh dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Sistem *Energy Management System* (EMS) berbasis *rule-based* berhasil diimplementasikan pada prototipe MPHS menggunakan mikrokontroler ESP32 sebagai pengendali utama. Algoritma *rule-based* mampu mengatur distribusi energi keluaran PLTS berdasarkan nilai tegangan yang dihasilkan, sehingga prioritas utama sistem tetap diberikan kepada pemenuhan kebutuhan beban AC sebelum energi dimanfaatkan untuk proses penyimpanan energi.
2. Hasil pengujian menunjukkan bahwa penentuan nilai *threshold* tegangan sebesar 14 V untuk aktivasi Pompa 1 dan 15 V untuk aktivasi Pompa 2 mampu menghasilkan proses pengambilan keputusan yang sesuai dengan kondisi keluaran PLTS. Pada kondisi tegangan rendah kedua pompa tetap tidak aktif sehingga seluruh energi PLTS digunakan untuk memenuhi kebutuhan beban AC. Ketika tegangan mencapai nilai *threshold*, sistem secara otomatis mengaktifkan pompa sesuai aturan yang telah dirancang tanpa mengganggu kontinuitas suplai daya menuju beban utama.
3. Sistem *Multi Pumped Hydro Storage* (MPHS) berhasil melakukan proses penyimpanan energi melalui pemompaan air dari reservoir bawah menuju reservoir atas. Hasil pengujian menunjukkan bahwa laju pengisian reservoir meningkat secara signifikan ketika kedua pompa beroperasi secara bersamaan dibandingkan saat hanya satu pompa yang aktif. Reservoir atas berhasil diisi hingga sekitar 442 L atau 85% dari kapasitas operasi yang direncanakan, dengan energi potensial gravitasi maksimum yang tersimpan sebesar 8,67 kJ pada beda ketinggian sekitar 2 meter.
4. Hasil pengujian generator menunjukkan bahwa tiga generator tipe F50-12V yang dirangkai secara seri mampu mengonversi energi potensial air menjadi energi listrik dengan menghasilkan tegangan keluaran sebesar 10,1 VDC pada kondisi tanpa beban (*open circuit*). Tegangan tersebut juga mampu menyalakan lampu LED sebagai beban uji, sehingga membuktikan bahwa energi yang telah disimpan pada sistem MPHS dapat dimanfaatkan kembali dalam bentuk energi listrik.
5. Secara keseluruhan, integrasi antara sistem PLTS, EMS berbasis *rule-based*, MPHS, dan generator F50-12V telah bekerja sesuai dengan tujuan

penelitian. Sistem mampu melakukan pengelolaan energi mulai dari pembangkitan energi listrik oleh PLTS, pengambilan keputusan distribusi energi menggunakan algoritma *rule-based*, penyimpanan energi dalam bentuk energi potensial air, hingga pemanfaatan kembali energi tersebut melalui generator sebagai sumber energi listrik. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa metode *rule-based* mampu diterapkan sebagai strategi pengelolaan energi pada sistem MPHS skala prototipe dengan tetap mempertahankan prioritas pemenuhan beban utama.

5. 2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa saran yang dapat dijadikan sebagai bahan pengembangan pada penelitian selanjutnya, yaitu sebagai berikut.

1. Sistem PLTS pada penelitian ini masih menggunakan pengendalian berdasarkan tegangan keluaran panel surya. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan menggunakan Maximum Power Point Tracking (MPPT) agar panel surya dapat beroperasi pada titik daya maksimum sehingga energi yang dimanfaatkan untuk proses penyimpanan menjadi lebih optimal.
2. Pengukuran debit air pada penelitian ini diperoleh melalui perhitungan berdasarkan perubahan volume reservoir terhadap waktu pengisian. Untuk meningkatkan akurasi hasil pengukuran, penelitian selanjutnya disarankan menggunakan sensor debit air (*flow sensor*). Selain itu, sistem dapat dilengkapi dengan sensor level air atau *float switch* sehingga pompa dapat berhenti secara otomatis ketika reservoir atas mencapai kapasitas maksimum.
3. Evaluasi kinerja sistem pembangkitan masih terbatas pada pengukuran tegangan keluaran generator dan pengujian penyalan lampu LED sebagai beban sederhana. Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan instrumen pengukuran dengan resolusi yang lebih tinggi sehingga arus, daya, serta efisiensi keluaran generator dapat dianalisis secara lebih komprehensif.
4. Pengujian pada penelitian ini dilakukan pada skala prototipe dengan kapasitas reservoir dan beda ketinggian (*head*) yang terbatas. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya dapat mengembangkan sistem MPHS dengan kapasitas reservoir yang lebih besar, variasi beda ketinggian, serta beban listrik yang lebih beragam untuk mengevaluasi performa sistem pada kondisi operasi yang lebih mendekati aplikasi nyata.
5. Algoritma *Energy Management System* (EMS) yang diterapkan pada penelitian ini menggunakan metode *rule-based*. Penelitian selanjutnya dapat mengembangkan metode pengelolaan energi berbasis kecerdasan buatan, seperti Fuzzy Logic, Artificial Neural Network (ANN), atau Model

Predictive Control (MPC), sehingga proses pengambilan keputusan dapat menjadi lebih adaptif terhadap perubahan kondisi penyinaran matahari, variasi beban, maupun kondisi penyimpanan energi pada sistem MPHS.

