

BAB V

PENUTUP

A. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan terhadap rancang bangun sistem manajemen beban adaptif untuk meningkatkan efisiensi energi dan umur baterai pada sistem *hybrid* angin dan surya, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Sistem manajemen beban adaptif berhasil dirancang dan dibangun dengan mengintegrasikan ESP32 DevKit v1 sebagai pengendali utama, sensor tegangan, sensor arus ACS712, modul *relay* 2 channel, LCD TFT 2,4 inci, dan aplikasi *Blynk* untuk monitoring jarak jauh. Sistem mampu memonitor parameter tegangan, arus, daya, dan *State of Charge* (SoC) baterai secara *real-time* serta mengendalikan beban secara otomatis berdasarkan kondisi SoC.
2. Hasil uji validasi ahli menunjukkan bahwa sistem yang dirancang dinyatakan sangat layak dengan nilai validasi keseluruhan sebesar 93,60%, yang terdiri dari aspek tampilan (90,67%), teknis (94,67%), dan material (95,00%). Hal ini mengkonfirmasi bahwa sistem memenuhi persyaratan untuk dilakukan pengujian lebih lanjut.
3. Hasil pengujian fungsional menunjukkan seluruh komponen dan fitur sistem bekerja dengan tingkat keberhasilan 100% (10 dari 10 komponen). ESP32, sensor, *relay*, LCD TFT, perhitungan daya/tegangan/arus/SoC, dan aplikasi *Blynk* berfungsi sesuai dengan rancangan.

4. Sistem yang dibangun mampu meningkatkan efisiensi energi sebesar 38,99%. Rata-rata penggunaan energi menurun dari 94,94 Wh menjadi 57,92 Wh, dengan peningkatan SoC minimum dari 5,81% menjadi 42,54% dan penurunan DoD dari 94,19% menjadi 57,46%.
5. Sistem yang dibangun mampu memperpanjang umur baterai dengan 204 siklus. Estimasi siklus baterai meningkat dari 319 siklus menjadi 522 siklus, dengan penurunan EFC dari 0,942 menjadi 0,575.

B. Keterbatasan Produk

Berdasarkan hasil pengujian dan evaluasi yang telah dilakukan, terdapat beberapa keterbatasan pada sistem manajemen beban adaptif yang telah dibangun, yaitu:

1. Ketergantungan pada koneksi *WiFi* untuk monitoring jarak jauh

Aplikasi *Blynk* sebagai media monitoring jarak jauh memerlukan koneksi internet yang stabil. Sistem tidak dapat mengirimkan data ke dashboard *Blynk* apabila koneksi *WiFi* terputus atau tidak tersedia, terutama pada lokasi pengujian di daerah dengan infrastruktur jaringan yang minim. Keterbatasan ini membatasi kemampuan monitoring *real-time* pada kondisi lapangan yang sebenarnya.

2. Kapasitas beban yang terbatas

Spesifikasi *relay* 2 channel dan inverter DC-AC 220W yang digunakan membatasi jumlah dan jenis beban yang dapat dikendalikan. Sistem hanya mampu menangani beban dengan daya maksimal 220W, sehingga tidak dapat diaplikasikan langsung pada beban rumah tangga

dengan daya lebih tinggi seperti pompa air, kulkas, atau peralatan bertenaga besar lainnya tanpa peningkatan spesifikasi komponen.

3. Skala prototype

Sistem yang dibangun diuji pada skala kecil dengan panel surya 50–200 Wp dan turbin angin 400 Watt. Hasil pengujian pada skala ini belum tentu merepresentasikan kinerja sistem pada aplikasi skala yang lebih besar, di mana dinamika pasokan dan kebutuhan energi menjadi lebih kompleks.

4. Tidak adanya fitur *data logging* lokal

Sistem belum dilengkapi dengan kemampuan penyimpanan data historis secara lokal. Data monitoring hanya tersedia secara *real-time* pada LCD TFT dan *Blynk*, namun tidak dapat diakses kembali untuk analisis tren jangka panjang apabila koneksi internet terputus atau sistem dimatikan.

5. Baterai timbal asam dengan densitas energi rendah

Penggunaan baterai aki 12V 220Wh memiliki densitas energi yang relatif rendah dan bobot yang besar dibandingkan teknologi baterai litium. Hal ini membatasi portabilitas sistem dan efisiensi penyimpanan energi secara keseluruhan.

C. Implikasi Hasil Penelitian

Hasil rancang bangun sistem manajemen beban adaptif pada sistem *hybrid* angin dan surya memberikan berbagai implikasi yang dapat dikategorikan ke dalam aspek teoretis, praktis, dan akademis. Implikasi-implikasi tersebut diuraikan sebagai berikut :

1. Implikasi Teoritis

Secara teori, penelitian ini menunjukkan bahwa mengatur beban listrik berdasarkan sisa daya baterai (SoC) dengan bantuan ESP32 ternyata cukup efektif, meski caranya sederhana dan tidak pakai rumus-rumus yang terlalu rumit. Hasilnya juga membuktikan bahwa semakin dalam baterai dikosongkan (DoD) tinggi, umurnya semakin cepat pendek. Hal ini sudah sering dibahas di jurnal-jurnal ilmiah, tapi penelitian ini membuktikannya langsung pada sistem *hybrid* angin dan surya yang benar-benar dioperasikan. Selain itu, konsep mengatur pemakaian listrik sesuai ketersediaan daya ternyata bisa diterapkan tidak hanya pada pembangkit besar, tapi juga pada sistem kecil skala rumah tangga.

2. Implikasi Praktis

Dari sisi praktis, sistem ini bisa menghemat pengeluaran karena baterai jadi lebih awet, terhitung bisa tambah 204 kali pengisian sebelum rusak. Pengguna juga jadi lebih tenang karena tidak perlu khawatir baterai tiba-tiba habis total dan rusak, sebab sistem sudah otomatis mematikan beban saat daya tersisa mencapai batas aman. Untuk mengontrol dan memantau kondisi sistem, pengguna cukup lihat layar LCD atau buka aplikasi *Blynk* di HP, tanpa perlu jago elektronika. Yang menarik, komponen-komponen yang dipakai tidak sulit dicari di pasaran dan harganya masih terjangkau, jadi siapa saja yang punya sistem *hybrid* serupa bisa meniru rancangan ini.

3. Implikasi Akademis

Di dunia akademik, hasil penelitian ini bisa jadi bahan referensi bagi mahasiswa atau peneliti lain yang ingin mengembangkan sistem lebih canggih lagi, misalnya dengan memakai kecerdasan buatan untuk menebak pola pemakaian listrik. Selain itu, sistem ini juga cocok dijadikan contoh nyata pada perkuliahan yang membahas energi terbarukan atau sistem tertanam (*embedded system*), sehingga mahasiswa tidak hanya belajar teori di kelas tapi bisa melihat bagaimana konsep itu diterapkan pada alat yang benar-benar bekerja.

D. Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang diperoleh, disampaikan beberapa saran sebagai berikut:

1. Saran untuk perbaikan sistem yang telah dibangun
 - a. Penggantian baterai aki dengan baterai tipe 18650 untuk meningkatkan efisiensi penyimpanan energi, mengurangi bobot sistem, dan memperpanjang umur pakai baterai secara lebih signifikan.
 - b. Perbaikan tampilan antarmuka LCD TFT agar lebih menarik dan informatif, dengan penambahan elemen visual seperti grafik historis atau indikator warna untuk memudahkan interpretasi data.
 - c. Penambahan lampu indikator pada *box* sistem untuk mengetahui status nyala atau matinya inverter secara visual, sehingga memudahkan pengawasan kondisi sistem.

- d. Pengembangan fitur *data logging* untuk menyimpan riwayat penggunaan energi secara lokal di memori ESP32 atau kartu SD, sehingga memungkinkan analisis tren jangka panjang.

2. Saran untuk penelitian selanjutnya

- a. Pengujian sistem yang telah dibangun pada skala yang lebih besar dengan kapasitas baterai, panel surya, dan turbin angin yang lebih tinggi untuk menguji skalabilitas dan keandalan sistem.
- b. Penambahan sumber energi lain seperti *fuel cell* untuk meningkatkan keberagaman dan keandalan sistem *hybrid*.
- c. Penerapan algoritma kecerdasan buatan seperti *fuzzy logic* atau *neural network* untuk pengambilan keputusan manajemen beban yang lebih adaptif terhadap pola konsumsi pengguna.
- d. Pengujian *accelerated cycle life* pada baterai untuk validasi eksperimental terhadap estimasi umur siklus yang diperoleh dari model EFC.