

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian sistem monitoring energi listrik tiga fasa berbasis *Internet of Things* (IoT) menggunakan mikrokontroler ESP32 dan sensor PZEM-004T, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut.

1. Telah berhasil dirancang dan diimplementasikan sistem monitoring energi listrik tiga fasa berbasis *Internet of Things* (IoT) menggunakan ESP32 dan sensor PZEM-004T yang mampu mengukur tegangan, arus, daya aktif, daya reaktif, daya semu, faktor daya, energi listrik (kWh), dan estimasi biaya listrik secara *real time* melalui LCD 16×2 dan aplikasi Blynk. Sistem juga mampu melakukan pengendalian beban dari jarak jauh menggunakan relay melalui jaringan internet.
2. Hasil pengujian dan kalibrasi menunjukkan bahwa penerapan faktor koreksi mampu meningkatkan akurasi pembacaan sensor PZEM-004T. Nilai error pengukuran tegangan yang sebelum kalibrasi berada pada kisaran 0,7% hingga 3,4% berhasil diturunkan menjadi sekitar 0,05% pada setiap fasa setelah proses kalibrasi. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem memiliki tingkat akurasi yang sangat baik dalam mengukur tegangan sehingga menghasilkan nilai pengukuran yang sangat mendekati hasil pengukuran multimeter sebagai alat ukur referensi.
3. Hasil analisis ketidakseimbangan tegangan menunjukkan bahwa sistem mampu mendeteksi kondisi ketidakseimbangan tegangan tiga fasa dengan nilai *Voltage Unbalance Rate* (VUR) sebesar 0,45%. Nilai tersebut menunjukkan bahwa sumber tegangan yang digunakan masih berada pada kondisi yang relatif seimbang sehingga layak digunakan sebagai sumber tegangan pada proses pengujian sistem.
4. Pada pengujian beban seimbang menggunakan tiga lampu LED 18 W dan beban tidak seimbang menggunakan kipas angin 20 W, *hairdryer* 400 W, serta catokan rambut 42 W, sistem mampu mengukur parameter kelistrikan pada setiap fasa dengan baik. Perbedaan nilai faktor daya, daya aktif, daya reaktif, dan daya semu menunjukkan bahwa sistem mampu mengidentifikasi karakteristik masing-masing beban yang digunakan. Sistem mampu melakukan monitoring kondisi pembebanan tiga fasa, baik pada beban seimbang maupun tidak seimbang, serta menampilkan perubahan parameter kelistrikan setiap fasa secara *real time*.

5. Pengujian energi listrik menunjukkan bahwa sistem mampu menghitung akumulasi energi listrik secara kontinu berdasarkan daya aktif terhadap waktu. Hasil perhitungan sistem memiliki selisih yang sangat kecil dibandingkan dengan hasil perhitungan manual, sehingga menunjukkan bahwa metode perhitungan energi listrik yang diterapkan pada sistem telah bekerja dengan baik.
6. Pengujian estimasi biaya listrik menunjukkan bahwa sistem mampu menghitung biaya pemakaian listrik secara otomatis berdasarkan energi listrik yang terukur dan tarif dasar listrik yang digunakan pada program. Nilai estimasi biaya meningkat seiring bertambahnya konsumsi energi listrik selama proses pengujian.
7. Hasil pengujian waktu respons menunjukkan bahwa sistem mampu merespons perintah pengendalian relay secara *real time*. Rata-rata waktu respons menggunakan jaringan Wi-Fi Universitas Andalas sebesar 0,158 detik, sedangkan menggunakan jaringan *tethering* sebesar 0,355 detik.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa saran yang dapat dipertimbangkan untuk pengembangan penelitian selanjutnya, yaitu sebagai berikut.

1. Pengujian dapat diperluas pada variasi jenis beban dan kapasitas daya yang lebih besar, khususnya beban industri, sehingga kinerja sistem dapat dievaluasi pada kondisi operasi yang lebih beragam.
2. Sistem dapat dikembangkan dengan menambahkan fitur penyimpanan data (*data logging*) menggunakan basis data atau layanan *cloud* sehingga riwayat penggunaan energi listrik dapat dianalisis dalam jangka waktu yang lebih panjang.
3. Sistem dapat dilengkapi dengan fitur notifikasi atau peringatan otomatis apabila terjadi kondisi abnormal, seperti tegangan tidak seimbang, arus berlebih, faktor daya rendah, atau konsumsi energi yang melebihi batas tertentu, sehingga pengguna dapat melakukan tindakan lebih cepat.
4. Estimasi biaya listrik dapat dikembangkan dengan menerapkan skema tarif listrik PLN yang dinamis sesuai golongan pelanggan dan waktu pemakaian sehingga hasil perhitungan biaya menjadi lebih akurat.