

BAB V

PENUTUP

A. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan pada Bab IV mengenai pengembangan sistem monitoring daya listrik secara *real-time* menggunakan ESP32 dengan sensor PZEM-004T, layar TFT ILI9341, modul relay 4 channel, dan platform Blynk IoT, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Sistem pemantauan daya listrik secara *real-time* berhasil dikembangkan dengan mengintegrasikan mikrokontroler ESP32, sensor PZEM-004T, layar TFT ILI9341 dengan *touch screen*, modul *relay 4 channel*, dan platform Blynk IoT. Sistem mampu menampilkan parameter kelistrikan tegangan, arus, daya, energi, frekuensi, dan *power factor* secara *real-time*, menghitung biaya listrik otomatis dalam satuan Rupiah, menyediakan pengaturan durasi pemantauan harian, mingguan, dan bulanan, serta mengimplementasikan proteksi otomatis *cut-off* melalui *relay* saat terjadi kondisi *overload* atau batas biaya yang telah ditetapkan terlampaui.
2. Berdasarkan hasil evaluasi, sistem monitoring daya listrik yang dikembangkan dinilai sangat layak untuk digunakan sebagai alat pemantauan dan proteksi konsumsi energi listrik. Hasil validasi ahli menunjukkan nilai kelayakan sebesar 92,8% dengan kriteria sangat layak, uji akurasi sensor PZEM-004T menunjukkan tingkat kesalahan rata-rata yang sangat kecil pada pengukuran tegangan (0,27%) dan stabil pada beban

besar, serta uji respon masyarakat terhadap 15 responden memperoleh nilai 93,6% dengan kriteria sangat sesuai, yang mengindikasikan sistem mudah digunakan, informatif, dan bermanfaat dalam membantu pengguna memahami serta mengontrol pola konsumsi listrik.

B. Keterbatasan Produk

Meskipun sistem yang dikembangkan telah berhasil diimplementasikan dan dinilai layak oleh para ahli serta masyarakat, terdapat beberapa keterbatasan yang perlu diakui, yaitu:

1. Sensor PZEM-004T tipe 100A memiliki *starting measure current* sebesar 0,02A, sehingga sensitivitas pembacaan pada arus di bawah 0,1A masih terbatas. Hal ini menyebabkan error pengukuran arus dan daya pada beban kecil di bawah 100W cukup signifikan, mencapai 14–67%. Beban seperti lampu LED 15W dan solder 60W menunjukkan selisih yang cukup besar dibandingkan alat ukur standar.
2. Sistem monitoring jarak jauh masih bergantung pada platform Blynk IoT yang merupakan layanan pihak ketiga. Ketergantungan ini memiliki risiko terkait keberlanjutan layanan, keterbatasan fitur pada versi gratis, serta ketergantungan pada konektivitas internet yang stabil.
3. Sistem belum dilengkapi dengan fitur notifikasi otomatis melalui aplikasi seperti Telegram atau WhatsApp saat terjadi kondisi abnormal seperti overload atau limit biaya tercapai. Pengguna harus secara aktif memantau aplikasi Blynk untuk mengetahui status sistem.

4. Box prototype yang digunakan masih berupa material standar yang belum tahan air dan belum memiliki ventilasi udara yang memadai. Hal ini berpotensi menyebabkan panas berlebih pada komponen elektronik jika digunakan dalam jangka waktu lama, terutama di lingkungan dengan suhu tinggi atau kelembaban tinggi.
5. Data history harian, mingguan, dan bulanan disimpan di memori internal ESP32 yang terbatas. Tidak adanya modul penyimpanan eksternal seperti SD card berpotensi menyebabkan kehilangan data jika terjadi *reset* atau gangguan daya pada mikrokontroler.
6. Mekanisme proteksi overload dan limit biaya memutus seluruh relay 4 channel secara bersamaan, bukan memutus relay pada beban yang bermasalah secara individu. Hal ini mengakibatkan seluruh beban terputus meskipun hanya satu beban yang menyebabkan kondisi abnormal.
7. Sistem belum menyediakan fitur ekspor data history ke format file seperti Excel atau CSV, sehingga pengguna tidak dapat melakukan analisis mendalam terhadap pola konsumsi listrik di luar platform yang tersedia.
8. Desain antarmuka layar TFT masih menggunakan teks dan menu berbasis halaman, belum sepenuhnya menggunakan ikon grafis yang lebih intuitif bagi pengguna awam.

C. Implikasi Hasil Penelitian

Hasil penelitian ini memiliki beberapa implikasi teoritis dan praktis yang signifikan, baik bagi pengembangan ilmu pengetahuan maupun penerapan di

lapangan. Secara praktis, sistem ini memberikan solusi monitoring energi yang terjangkau bagi rumah tangga dan usaha kecil melalui fitur perhitungan biaya real-time, proteksi otomatis, serta kontrol jarak jauh yang mampu menghemat pengeluaran listrik dan mencegah kerusakan peralatan; kemampuan kontrol 4 *channel* juga memudahkan pengelola kos-kosan maupun gedung dalam memantau penggunaan listrik per unit secara terpisah untuk alokasi biaya yang lebih efisien. Di sisi akademik, prototype dengan struktur modular ini dapat dijadikan media pembelajaran sistem embedded dan IoT di perguruan tinggi serta sekolah vokasi, sementara hasil validasi tinggi (92,8% dari ahli dan 93,6% dari masyarakat) menunjukkan potensi komersial yang menjanjikan untuk pengembangan produk massal. Secara sosial dan lingkungan, sistem ini diharapkan meningkatkan kesadaran pengguna akan penggunaan energi sehingga mendorong perilaku hemat energi dan pelestarian lingkungan, serta berkontribusi pada peningkatan keselamatan penggunaan listrik dengan mengurangi risiko kebakaran akibat short circuit atau kelebihan beban yang sering terjadi pada rumah tangga dan usaha kecil di Indonesia.

D. Saran

Berdasarkan hasil penelitian, keterbatasan yang diidentifikasi, dan implikasi yang dihasilkan, penulis memberikan beberapa saran untuk pengembangan lebih lanjut sebagai berikut:

1. Box prototype perlu diperbaiki dengan material yang lebih kuat, tahan air, dan dilengkapi dengan ventilasi udara yang memadai untuk mencegah panas berlebih pada komponen elektronik. Penambahan pelindung kabel dan

penataan kabel yang lebih rapi juga disarankan untuk menghindari interferensi sinyal dan kerusakan mekanis.

2. Disarankan untuk menambahkan fitur notifikasi otomatis melalui aplikasi Blynk, Telegram, WhatsApp, atau *notification* saat terjadi kondisi overload atau biaya melebihi batas. juga disarankan untuk memberikan buzzer atau indikator visual yang lebih jelas pada perangkat keras pada saat overload atau melebihi batas biaya yang di tentukan peringatan.
3. Sebagai alternatif dari ketergantungan pada platform Blynk, disarankan untuk mengembangkan aplikasi *mobile* atau web sendiri menggunakan *framework* atau *platform open-source* seperti *Home Assistant*. Hal ini akan memberikan kontrol penuh terhadap fitur, keamanan data, dan keberlanjutan layanan.
4. Disarankan untuk menyediakan fitur ekspor data *history* ke format Excel atau CSV agar pengguna dapat menganalisis pola konsumsi listrik dengan lebih mudah menggunakan perangkat lunak analisis data.
5. Untuk mengatasi keterbatasan memori internal ESP32, disarankan menambahkan modul SD card atau penyimpanan cloud eksternal untuk menyimpan data history dalam jangka waktu yang lebih panjang dan mencegah kehilangan data akibat *reset* perangkat.
6. Untuk aplikasi dengan beban daya besar, disarankan menambahkan kontaktor sebagai pengganti atau pelengkap relay agar tidak terjadi panas berlebih pada relay dan meningkatkan keandalan sistem dalam jangka panjang.

7. Disarankan untuk mengubah tampilan layar TFT menjadi ikon agar lebih menarik, intuitif, dan mudah dipahami oleh pengguna awam. Penggunaan layar monitor dengan ukuran yang lebih besar juga dapat dipertimbangkan untuk meningkatkan keterbacaan informasi.
8. Disarankan untuk mengembangkan mekanisme proteksi yang dapat memutus relay secara individu atau perchannel pada beban yang mengalami *overload*, bukan memutus seluruh beban secara bersamaan, sehingga beban lain yang normal tetap dapat beroperasi.