

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah diuraikan, dapat ditarik beberapa kesimpulan utama sebagai berikut:

1. Rancangan arsitektur sistem manajemen energi cerdas yang mengintegrasikan perangkat IoT (ESP32-C3 dengan sensor PZEM-004T & DHT11), server backend (FastAPI), database *time-series* (InfluxDB), model prediksi konsumsi energi berbasis LSTM, layanan interpretasi menggunakan LLM (GPT-4 Turbo), dan antarmuka pengguna (Vue.js) berhasil diimplementasikan secara fungsional. Seluruh komponen dapat berinteraksi dan menjalankan perannya masing-masing dalam alur data *end-to-end*, mulai dari akuisisi data sensor hingga penyajian informasi dan rekomendasi kepada pengguna.
2. Kinerja komunikasi data *real-time* menggunakan protokol WebSocket antara perangkat IoT (ESP32-C3) dan server backend FastAPI menunjukkan efektivitas yang baik untuk aplikasi monitoring energi. Hal ini dibuktikan dengan latensi rata-rata pengiriman data sebesar 66.9 ms, yang tergolong rendah dan mendukung kebutuhan sistem akan pembaruan data secara cepat dan responsif.
3. Model prediksi konsumsi energi berbasis LSTM menunjukkan kemampuan yang memadai dalam memprediksi konsumsi energi berdasarkan data historis. Pada data uji dari dataset *REFIT Electrical Load Measurements: Cleaned (House_1)*, model mencapai *Mean Absolute Error (MAE)* sebesar 15,90 Watt. Meskipun terdapat tantangan akurasi pada data IoT real-time, terutama pada beban rendah, dengan MAE sebesar 22,21 Watt, model secara umum mampu mengikuti tren konsumsi energi, khususnya pada periode beban tinggi.
4. Integrasi Large Language Model (GPT-4 Turbo) terbukti efektif dalam memberikan interpretasi data konsumsi energi dan menghasilkan

rekomendasi yang relevan secara kontekstual. Evaluasi menggunakan *Cosine Similarity* menunjukkan kemiripan semantik yang baik antara output LLM dan *expected output*, dengan skor rata-rata 0.75. LLM berhasil menjembatani data teknis menjadi informasi yang lebih mudah dipahami oleh pengguna.

5.2 Saran

Berdasarkan pengalaman dan hasil penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa saran yang dapat dipertimbangkan untuk pengembangan sistem atau penelitian serupa di masa mendatang:

1. Peningkatan Akurasi Model Prediksi LSTM:

- Melakukan eksplorasi lebih lanjut terhadap arsitektur model LSTM, termasuk *tuning hyperparameter* yang lebih ekstensif.
- Mengintegrasikan fitur-fitur kontekstual tambahan ke dalam model prediksi, seperti data cuaca, jumlah penghuni, atau jadwal aktivitas pengguna, untuk meningkatkan akurasi prediksi, terutama pada kondisi beban rendah atau fluktuatif.
- Mempertimbangkan penggunaan teknik *ensemble learning* atau model *hybrid* untuk meningkatkan robustitas prediksi.

2. Optimasi dan Evaluasi Lebih Lanjut Integrasi LLM:

- Melakukan *prompt engineering* yang lebih iteratif dan mendalam untuk meningkatkan konsistensi, akurasi faktual (terutama nilai numerik), dan *actionability* dari output LLM.
- Mengeksplorasi penggunaan model LLM yang lebih kecil atau *fine-tune* khusus untuk domain energi guna mengurangi ketergantungan pada API berbayar dan potensi latensi.
- Melakukan evaluasi kualitatif yang lebih komprehensif terhadap output LLM dengan melibatkan pengguna akhir untuk mendapatkan *feedback* langsung mengenai kegunaan dan kejelasan rekomendasi.

3. Pengembangan Aspek Komunikasi dan Arsitektur:

- Melakukan analisis kinerja komunikasi yang lebih granular per-hop antar komponen untuk mengidentifikasi dan mengoptimalkan potensi *bottleneck* secara lebih presisi.
- Mempertimbangkan implementasi mekanisme *caching* untuk respons LLM atau prediksi LSTM yang sering diakses guna mengurangi latensi dan beban komputasi.
- Mengeksplorasi integrasi dengan mekanisme kontrol atau otomatisasi perangkat berdasarkan rekomendasi dari sistem.

4. Pengembangan dan Validasi Data:

- Memperbanyak volume dan variasi data *real-time* dari perangkat IoT yang terpasang untuk pelatihan model yang lebih representatif terhadap kondisi penggunaan nyata.
- Melakukan pengujian sistem dalam jangka waktu yang lebih panjang dan pada lingkungan yang lebih beragam (misalnya, beberapa rumah tangga atau tipe bangunan berbeda) untuk validasi yang lebih komprehensif.

5. Peningkatan Antarmuka Pengguna:

Melakukan studi *usability* untuk mendapatkan masukan terkait desain antarmuka pengguna agar lebih intuitif dan informatif bagi berbagai kalangan pengguna.