

BAB 5

SIMPULAN DAN SARAN

5.1 Simpulan

Berdasarkan hasil perancangan, implementasi, dan pengujian sistem monitoring lingkungan gedung berbasis arsitektur *hybrid* CANBus dan MQTT, maka dapat ditarik simpulan yang selaras dengan tujuan penelitian sebagai berikut:

1. Telah berhasil dirancang dan dikembangkan prototipe sistem pemantauan lingkungan secara *real-time* yang mengintegrasikan jaringan sensor lokal dengan *dashboard* berbasis *cloud*. Sistem ini terbukti fungsional dalam menjembatani area fisik gedung menggunakan arsitektur *hybrid*, menggabungkan ketahanan fisik jaringan kabel CANBus dengan aksesibilitas global jaringan internet.
2. Penerapan komunikasi deterministik berbasis CANBus berhasil menjamin stabilitas akuisisi data dari node sensor. Berdasarkan pengujian durabilitas selama 60 menit dengan beban transmisi kontinu, sistem mencatatkan tingkat keberhasilan penerimaan paket (*Packet Delivery Ratio*) sebesar 100% pada sisi *gateway* (total 10.800 *frame* diterima utuh tanpa *loss*), membuktikan keandalan protokol ini untuk lingkungan sensor lokal.
3. Integrasi data sensor ke ekosistem IoT telah terealisasi melalui *gateway* ESP32 yang menerapkan mekanisme *Unified Payload Aggregation*. Data dari jaringan CANBus berhasil dikemas menjadi satu paket JSON tunggal, dipublikasikan melalui protokol MQTT ke *broker*, dan disimpan ke basis data MongoDB secara terstruktur dengan frekuensi pembaruan 1 Hz yang efisien.
4. Mekanisme pencatatan data historis dan visualisasi tren telah tersedia melalui antarmuka *dashboard* berbasis Next.js. Implementasi teknik komunikasi *hybrid* (*WebSocket* untuk data langsung dan API untuk data historis) memungkinkan pengguna memantau tren kondisi lingkungan serta mengevaluasi riwayat konsumsi energi secara responsif tanpa degradasi performa *rendering*.
5. Evaluasi performa sistem *hybrid* menunjukkan kinerja yang sangat responsif dengan rata-rata latensi *end-to-end* tercatat sebesar 29,04 ms. Analisis

distribusi waktu menunjukkan bahwa proses akuisisi data pada bus CAN memakan waktu rata-rata 25,4 ms, sedangkan proses pengolahan di *gateway* dan transmisi MQTT sangat cepat (< 4 ms), yang memvalidasi kestabilan sistem dalam menyajikan pembaruan data pada *dashboard*.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil analisis dan keterbatasan yang ditemukan selama penelitian, terdapat beberapa aspek yang dapat dikembangkan lebih lanjut untuk meningkatkan kinerja, efisiensi, dan keandalan sistem. Beberapa saran untuk penelitian masa depan meliputi:

1. Integrasi Machine Learning untuk Efisiensi Energi:

Sistem saat ini dapat dikembangkan dengan menambahkan sensor daya (*power meter*) yang terintegrasi. Data historis yang tersimpan di database dapat digunakan sebagai *dataset* untuk melatih model *Machine Learning*. Model ini bertujuan memprediksi pola konsumsi energi dan memberikan rekomendasi otomatisasi (misalnya mematikan perangkat saat tidak ada aktivitas) guna meningkatkan efisiensi penggunaan listrik secara cerdas.

2. Pengujian Batas Skalabilitas Fisik (Real-World Scalability):

Penelitian ini telah menghitung kapasitas node secara teoretis. Penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan uji coba empiris dengan jumlah node yang masif (di atas 50 node) pada bentangan kabel yang panjang. Hal ini diperlukan untuk menganalisis dampak nyata dari penurunan tegangan (*voltage drop*), refleksi sinyal, dan impedansi kabel terhadap reliabilitas komunikasi CANBus di lapangan.

3. Optimasi Strategi Pembagian Frame CANBus:

Diperlukan kajian lebih mendalam mengenai metode segmentasi data (*frame splitting*) yang paling optimal. Penelitian selanjutnya dapat membandingkan efisiensi antara metode pengiriman *burst* (multi-ID) dengan metode kompresi data (*bit-packing*) dalam satu *frame*. Tujuannya adalah meminimalkan *overhead* protokol dan memaksimalkan *throughput* data sensor yang dapat dikirim per detik.

4. Mekanisme Manajemen Buffer Lanjutan:

Untuk mengatasi keterbatasan *transmit buffer* pada kontroler CAN tanpa

menggunakan fungsi penunda waktu (*delay*) yang bersifat *blocking*, disarankan untuk mengembangkan algoritma manajemen *buffer* berbasis *interrupt* atau *circular buffer*. Pendekatan ini diharapkan dapat meningkatkan efisiensi penggunaan prosesor mikrokontroler sekaligus mencegah terjadinya kehilangan paket data (*packet loss*) pada kondisi beban lalu lintas data yang padat.

5. Analisis Implementasi QoS Level 1 dan 2:

Sistem saat ini menggunakan MQTT Quality of Service (QoS) Level 0. Penelitian selanjutnya disarankan untuk menguji dampak penerapan QoS Level 1 (*at least once*) dan Level 2 (*exactly once*) terhadap latensi sistem dan konsumsi *bandwidth*. Analisis ini penting untuk menentukan konfigurasi QoS yang paling tepat pada berbagai kondisi jaringan yang tidak stabil, seperti koneksi seluler (4G/5G) di area dengan sinyal lemah.

