

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Pengelolaan energi pada bangunan modern menuntut pemantauan berkelanjutan terhadap parameter operasional guna menjamin efisiensi dan stabilitas sistem. Fluktuasi beban listrik, pengoperasian *Heating, Ventilation, and Air Conditioning* (HVAC) yang tidak optimal, serta kurangnya informasi mengenai kondisi lingkungan sering kali mengakibatkan inefisiensi konsumsi energi. *Building Energy Management System* (BEMS) hadir sebagai solusi untuk memantau dan mengendalikan penggunaan energi secara terpusat. Penelitian terdahulu mengindikasikan bahwa integrasi sensor lingkungan ke dalam BEMS dapat meningkatkan kenyamanan penghuni sekaligus mereduksi konsumsi energi melalui pengaturan HVAC yang lebih presisi [1].

Meskipun demikian, mayoritas sistem pemantauan saat ini masih bergantung pada komunikasi nirkabel seperti Wi-Fi, ZigBee, atau LoRa. Kendati menawarkan fleksibilitas, ketiga protokol tersebut memiliki keterbatasan signifikan terkait latensi, interferensi, dan stabilitas sinyal. ZigBee yang beroperasi pada frekuensi 2.4 GHz rentan terhadap interferensi, sedangkan LoRa memiliki *round-trip time* berkisar antara 570 hingga 600 ms di lingkungan gedung, sehingga kurang responsif untuk sistem pemantauan cepat [2, 3]. Di sisi lain, Wi-Fi menawarkan latensi rendah namun memakan daya yang tinggi dan stabilitasnya sering kali tidak konsisten pada lingkungan *indoor* [4]. Keterbatasan ini menjadikan protokol nirkabel kurang ideal untuk kebutuhan pemantauan energi yang mensyaratkan transmisi data berkala dengan waktu respons yang deterministik.

Guna mencapai komunikasi yang lebih stabil dan andal, pendekatan berbasis kabel (*wired*) seperti *Controller Area Network* (CANBus) menjadi alternatif yang tepat. CANBus dirancang khusus untuk lingkungan industri dan memiliki ketahanan tinggi terhadap gangguan elektromagnetik. Protokol ini mampu menghasilkan latensi yang sangat rendah dengan mekanisme arbitrasi prioritas pesan untuk mencegah tabrakan data (*data collision*) [5]. Namun, kelemahan utama protokol ini terletak pada keterbatasan jangkauan dan ketiadaan konektivitas langsung ke layanan *cloud*. Oleh karena itu, diperlukan arsitektur *hybrid* yang mampu menggabungkan keandalan CANBus dengan kapabilitas distribusi data

jarak jauh.

Message Queuing Telemetry Transport (MQTT) merupakan protokol telemetri ringan yang ideal untuk mengintegrasikan BEMS dengan *server* atau *dashboard*. MQTT mengadopsi model *publish-subscribe* dan dirancang untuk operasi berdaya rendah, latensi rendah, serta tangguh pada kondisi jaringan yang tidak stabil. Studi menunjukkan bahwa penerapan arsitektur berbasis *MQTT bridge* mampu memangkas latensi komunikasi hingga 34 persen [6]. Dengan demikian, kombinasi antara CANBus dan MQTT memungkinkan akuisisi data sensor yang stabil serta distribusi data ke *server* atau *dashboard* secara *real-time*.

Selain pemantauan langsung, data yang terhimpun dapat dimanfaatkan untuk analisis prediktif berbasis historis. Pola konsumsi energi yang terekam secara kontinu memungkinkan identifikasi tren penggunaan energi, variasi musiman, serta perubahan beban jangka panjang. Analisis ini berperan penting dalam perencanaan operasional, evaluasi performa sistem energi, serta penentuan strategi penghematan energi pada bangunan. Pendekatan berbasis data historis juga mendukung estimasi beban sistem seperti HVAC dan membantu mendeteksi penyimpangan konsumsi energi dari pola normal berdasarkan perbandingan temporal dan ambang batas operasional yang telah ditentukan [7, 8, 9].

Dengan mengintegrasikan sensor lingkungan, protokol CANBus, MQTT, dan dashboard pemantauan real-time, penelitian ini berfokus pada pengembangan sistem BEMS untuk meningkatkan efisiensi energi gedung. Sistem dirancang untuk menyediakan pemantauan yang stabil, pencatatan data historis, serta analisis tren konsumsi energi guna mendukung pengelolaan energi gedung berbasis data. Pendekatan ini bertujuan menghasilkan platform pemantauan yang andal dan adaptif terhadap kebutuhan operasional bangunan modern.

1.2 Rumusan Masalah

Sistem manajemen energi gedung masih menghadapi tantangan dalam memperoleh data lingkungan dan konsumsi daya secara stabil, akurat, dan berkelanjutan. Protokol nirkabel yang umum digunakan sering mengalami latensi, interferensi, dan ketidakstabilan sehingga kurang sesuai untuk kebutuhan pencatatan data energi yang konsisten. Di sisi lain, protokol kabel seperti CANBus memberikan keandalan tinggi tetapi tidak menyediakan integrasi langsung dengan layanan *cloud* atau *dashboard*. Berdasarkan kondisi ini, penelitian ini merumuskan beberapa pertanyaan sebagai berikut.

1. Bagaimana merancang sistem pemantauan lingkungan dan energi yang mampu mengumpulkan data sensor dan *power meter* secara *real-time* dan terintegrasi dalam arsitektur BEMS?
2. Bagaimana memanfaatkan CANBus sebagai protokol akuisisi data yang deterministik dan stabil untuk menghubungkan beberapa sensor lingkungan di tingkat lokal?
3. Bagaimana mengintegrasikan data yang diperoleh dari CANBus dengan protokol MQTT agar data dapat diteruskan ke *cloud*, basis data, dan *dashboard* secara efisien?

1.3 Batasan Permasalahan

Penelitian ini dibatasi pada pengembangan sistem pemantauan lingkungan dan energi berbasis arsitektur *hybrid* CANBus dan MQTT yang terintegrasi dengan alur kerja BEMS. Batasan yang ditetapkan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Penelitian hanya mencakup pemantauan parameter lingkungan dari sensor yang digunakan, yaitu BH1750 (intensitas cahaya), DHT11 (suhu dan kelembapan), MQ-2 (gas), KY-037 (kebisingan), MPU6050 (getaran), dan GUVA-S12SD (UV).
2. Sistem komunikasi lokal dibatasi pada penggunaan CANBus sebagai protokol akuisisi data antara Arduino Mega dan ESP32, sementara pengiriman data ke *cloud*, basis data, dan *dashboard* dibatasi pada penggunaan protokol MQTT.
3. Data yang dikirim ke *dashboard* bersifat data agregat setiap dua detik yang telah diolah pada mikrokontroler untuk mengurangi beban jaringan dan memastikan kestabilan pembaruan data *real-time*.
4. Pemanfaatan data dibatasi pada pencatatan, visualisasi, dan analisis tren konsumsi energi serta kondisi lingkungan, tanpa mencakup sistem prediksi lanjutan atau pengendalian otomatis berbasis analitik.
5. Implementasi sistem dilakukan dalam bentuk *prototype* skala laboratorium untuk memvalidasi keandalan arsitektur komunikasi hibrida (CANBus-MQTT). Istilah "Gedung" pada judul merujuk pada domain penerapan

(*use case*) sistem, sedangkan pengujian difokuskan pada analisis stabilitas transmisi data, latensi, dan integrasi protokol, bukan pada pengujian fisik instalasi kabel jarak jauh dalam gedung nyata.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini dirumuskan berdasarkan permasalahan yang telah dikemukakan sebelumnya. Secara khusus, penelitian ini bertujuan untuk menjawab pertanyaan penelitian melalui pencapaian sasaran-sasaran berikut:

1. Merancang dan mengembangkan sistem pemantauan lingkungan dan keselamatan secara *real-time* menggunakan jaringan sensor lokal yang terhubung melalui CANBus dan ditampilkan pada *dashboard* berbasis *cloud*.
2. Menerapkan komunikasi deterministik berbasis CANBus untuk akuisisi data dari beberapa sensor lingkungan dan keselamatan sehingga diperoleh data yang stabil dan rendah latensi.
3. Mengintegrasikan data sensor dari jaringan CANBus ke *gateway IoT* (ESP32) untuk dipublikasikan ke *broker MQTT* dan disimpan ke basis data sebagai bagian dari sistem BEMS.
4. Menyediakan mekanisme pencatatan data historis dan visualisasi tren konsumsi energi serta kondisi lingkungan guna mendukung evaluasi dan pengelolaan energi gedung.
5. Mengevaluasi performa sistem *hybrid* CANBus dan MQTT berdasarkan parameter latensi pengiriman data, keandalan komunikasi, dan kestabilan pembaruan data pada *dashboard*.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini mencakup kontribusi praktis terhadap sistem pemantauan gedung serta kontribusi teoretis dalam pengembangan arsitektur komunikasi *hybrid*. Secara rinci, manfaat penelitian ini dapat dijabarkan sebagai berikut:

1. Menyediakan arsitektur komunikasi *hybrid* CANBus dan MQTT yang dapat menjadi alternatif bagi sistem BEMS untuk memperoleh data sensor yang

stabil, deterministik, dan mudah diintegrasikan dengan layanan berbasis *cloud*.

2. Menghasilkan sistem pemantauan *real-time* yang mampu menampilkan parameter lingkungan seperti suhu, kelembapan, cahaya, dan gas, serta parameter keselamatan seperti suara dan getaran melalui *dashboard* interaktif.
3. Menyediakan mekanisme pencatatan dan analisis data historis konsumsi energi yang dapat dimanfaatkan untuk evaluasi efisiensi energi gedung.
4. Meningkatkan *situational awareness* penghuni atau pengelola gedung melalui penyajian data yang akurat serta pemantauan perubahan kondisi lingkungan dan pola konsumsi energi secara berkelanjutan.
5. Menjadi referensi bagi penelitian lanjutan terkait integrasi sistem pemantauan berbasis komunikasi kabel berlatensi rendah dengan teknologi IoT untuk aplikasi BEMS yang lebih terstruktur dan andal.

