BAB I
PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Krisis energi global dan perubahan iklim telah mendorong pergeseran paradigma fundamental dalam pengelolaan konsumsi listrik, khususnya pada sektor bangunan yang menyumbang porsi signifikan terhadap emisi karbon dunia. Di Indonesia, dinamika ketenagalistrikan menunjukkan tren pertumbuhan yang pesat. Berdasarkan data statistik PT PLN (Persero) tahun 2024, jumlah pelanggan listrik nasional telah mencapai 92.877.292 jiwa, yang berimplikasi langsung pada peningkatan beban puncak sistem interkoneksi nasional hingga menyentuh 61.287,80 MW.[1]

Sektor rumah tangga, bisnis, dan gedung publik merupakan pilar utama konsumsi energi di Indonesia. Penjualan tenaga listrik untuk kategori rumah tangga pada tahun 2024 mencapai 130.433,10 GWh (42,59% dari total penjualan), sementara sektor bisnis menyerap 58.771,14 GWh (19,19%), dan sektor publik menyumbang 24.819,50 GWh (8,11%) [1]. Tingginya angka konsumsi pada sektor non-industri ini sering kali disertai dengan inefisiensi akibat penggunaan peralatan listrik yang tidak terkendali. Sistem tata udara (HVAC/kipas angin) dan pencahayaan merupakan konsumen energi terbesar yang menyumbang hampir 60% dari total konsumsi energi pada bangunan komersial. Penelitian menunjukkan bahwa sekitar 30% dari energi tersebut terbuang sia-sia akibat peralatan listrik tetap aktif meskipun ruangan tidak dihuni atau kondisi lingkungan sudah mencukupi.

Pada sistem kontrol otomatisasi gedung konvensional, pemicuan aktuator umumnya hanya mengacu pada parameter lingkungan statis seperti suhu udara (DHT22) dan intensitas cahaya (LDR). Kelemahan mendasar dari sistem statis ini adalah ketidakmampuannya mendeteksi keberadaan manusia di dalam ruangan. Sebagai contoh, lampu dan kipas angin akan tetap menyala secara otomatis pada siang hari yang mendung atau panas sekalipun ruangan tersebut dalam kondisi kosong tanpa penghuni. Hal ini terjadi karena sistem tidak memiliki "mata" untuk melihat apakah ruangan tersebut benar-benar digunakan atau tidak.

Untuk mengatasi tantangan inefisiensi tersebut, penerapan *Building Energy Management System* (BEMS) yang didukung oleh teknologi penginderaan okupansi *(occupancy sensing)* menjadi instrumen teknologi yang sangat krusial. Sensor *Passive Infrared* (PIR) tipe HC-SR501 diintegrasikan ke dalam sistem sebagai sakelar gerbang utama *(primary gatekeeper).* Sensor ini bekerja dengan mendeteksi perubahan radiasi inframerah yang dipancarkan oleh tubuh manusia yang bergerak dalam area cakupannya. Namun, tantangan teknis dalam implementasi sensor PIR pada ruangan kerja atau ruang kelas adalah sifat gerakan manusia yang sering kali statis (seperti duduk diam saat membaca atau bekerja di depan komputer), sehingga sensor dapat keliru mengasumsikan ruangan telah kosong.[2]

Solusi yang ditawarkan dalam penelitian ini adalah merancang algoritma pengunci status okupansi dengan waktu tunggu *(timeout)* selama 10 menit (600 detik). Ketika gerakan pertama terdeteksi, sistem akan mengizinkan aktuator bekerja sesuai dengan pembacaan sensor DHT22 dan LDR. Sistem akan terus memantau pergerakan. Jika dalam kurun waktu 10 menit masih terdapat pergerakan, sistem akan meriset ulang *(reset)* penghitung waktu kembali ke 10 menit dan mempertahankan status aktif aktuator. Sebaliknya, jika selama 10 menit penuh tidak terdeteksi adanya gerakan, ruangan dikonfirmasi kosong *(unoccupied)* dan seluruh aktuator dipadamkan secara total untuk mencegah pemborosan energi [3].

Implementasi logika pewaktuan ini menuntut performa mikrokontroler yang responsif dan tidak boleh menghambat proses komunikasi data. Penggunaan fungsi tunda standar seperti *delay()* sangat dilarang karena bersifat *blocking*, yang akan menghentikan seluruh proses komputasi ESP32 dan menyebabkan terputusnya komunikasi TCP/IP dengan stasiun pengawas LabVIEW. Solusi teknis yang diterapkan adalah pemrograman *non-blocking timer* memanfaatkan fungsi *millis()* pada ESP32. (Zeqiri, N., Idrizi, F., & Idrizi, A. (2025). Management of the values of the command parameters of a control system, and determination of time delays between terminals [4].

Mikrokontroler ESP32 dipilih sebagai *Remote Terminal Unit* (RTU) karena mengintegrasikan prosesor *dual-core Tensilica LX6* dengan modul Wi-Fi bawaan yang andal dan berbiaya rendah. Integrasi ESP32 dengan platform LabVIEW sebagai *Master Terminal Unit* (MTU) melalui protokol TCP/IP nirkabel diharapkan mampu mewujudkan

sistem "Mini SCADA" yang tangguh, responsif, dan ekonomis guna mendukung gerakan konservasi energi nasional.

1.2. Rumusan Masalah

1. Bagaimana merancang arsitektur sistem *Mini SCADA* berbasis mikrokontroler ESP32 dan perangkat lunak LabVIEW untuk menjamin integrasi yang stabil antara *node* sensor, unit aktuator, dan stasiun pusat pemantauan?
2. Bagaimana karakteristik respons sistem kontrol otomatis dalam menanggapi perubahan parameter suhu dan intensitas cahaya secara waktu nyata, serta seberapa besar tingkat akurasi pemicuan aktuator lampu dan kipas berdasarkan titik setel *(set-point)* yang ditetapkan?
3. Bagaimana pengaruh variabel latensi dan stabilitas komunikasi data pada jaringan nirkabel terhadap performa pemantauan parameter energi dan keandalan perintah kendali dari *Human-Machine Interface* (HMI) LabVIEW ke perangkat lapangan?
4. Bagaimana implementasi algoritma perhitungan parameter daya listrik serta akumulasi energi (kWh) yang terintegrasi dalam sistem untuk memvalidasi kemampuan pemrosesan data energi dan integritas logika perhitungan pada protokol komunikasi SCADA?
5. Bagaimana tingkat penghematan energi listrik antara mode pengoperasian manual dan mode otomatis berdasarkan data logging SCADA yang tervalidasi untuk membuktikan signifikansi efisiensi energi pada sistem bangunan?

1.3. Tujuan

Adapun tujuan yang ingin dicapai melalui pelaksanaan penelitian ini adalah:

1. Merancang dan mengimplementasikan arsitektur Mini SCADA yang mengintegrasikan ESP32 sebagai RTU dengan stasiun pusat LabVIEW serta sensor PIR HC-SR501, LDR, dan DHT22 melalui protokol komunikasi TCP/IP nirkabel.
2. Mengembangkan program *firmware* berbasis *non-blocking timer millis()* pada ESP32 untuk mengelola waktu tunggu okupansi 10 menit secara presisi.

3. Menganalisis waktu respon dan karakteristik kendali otomatis terhadap fluktuasi suhu dan cahaya untuk memastikan sistem bekerja sesuai dengan parameter kenyamanan ruangan yang diinginkan.
4. Mengevaluasi perbandingan konsumsi energi listrik (kWh) antara mode manual, otomatis statis, dan otomatis dinamis berbasis sensor PIR melalui database Citadel untuk mendapatkan persentase efisiensi energi yang akurat.
5. Mengevaluasi stabilitas dan kinerja jaringan komunikasi nirkabel dalam mendukung transmisi data sensor dan perintah kontrol secara kontinu tanpa kehilangan informasi penting *(packet loss).*

1.4. Manfaat

Penelitian mengenai perancangan *Mini SCADA* pada *Building Energy Management System* (BEMS) ini diharapkan dapat memberikan manfaat, baik secara teoritis maupun praktis, sebagai berikut:

1.4.1. Manfaat Teoritis

1. Menambah khazanah keilmuan dalam bidang sistem kontrol, *Internet of Things* (IoT), dan manajemen energi bangunan, khususnya terkait integrasi perangkat keras mikrokontroler dengan perangkat lunak industri.
2. Menjadi referensi dan pustaka bagi peneliti selanjutnya yang ingin mengkaji pengembangan sistem *Supervisory Control* dan *Data Acquisition* (SCADA) berbasis *open-source* serta aplikasi praktis manajemen energi menggunakan platform LabVIEW.

1.4.2. Manfaat Praktis

1. Menyediakan alternatif sistem manajemen energi yang ekonomis dan mudah diimplementasikan untuk mengurangi biaya operasional listrik melalui otomatisasi cerdas berbasis sensor lingkungan.
2. Mendukung gerakan konservasi energi nasional dengan meminimalisir pemborosan pemakaian listrik, yang pada akhirnya berkontribusi dalam pengurangan emisi gas rumah kaca dari sektor pembangkitan energi fosil.

3. Memberikan solusi sistem monitoring energi berbiaya rendah *(low-cost)* yang dapat diadopsi pada skala menengah, menjembatani kesenjangan antara sistem hobi sederhana dan sistem industri yang mahal.

1.5. Ruang Lingkup Masalah

Untuk menjaga fokus penelitian, batasan-batasan dalam proyek ini ditetapkan sebagai berikut:

1. Sistem Kontrol dan Monitoring: Sistem dibatasi pada pemantauan dan pengendalian dua jenis beban utama, yaitu sistem pencahayaan (lampu) dan sistem pendingin ruangan sederhana (kipas angin).
2. Perangkat Keras: Menggunakan mikrokontroler ESP32 sebagai unit pengolah utama di lapangan. Sensor yang digunakan meliputi DHT22 untuk suhu, LDR untuk intensitas cahaya, dan PIR HC-SR501 untuk deteksi keberadaan manusia.
3. Perangkat Lunak: LabVIEW digunakan sebagai pusat kendali *supervisor* (SCADA/HMI). Pemrograman mikrokontroler menggunakan bahasa pemrograman melalui Arduino IDE.
4. Komunikasi Data: Menggunakan protokol Verifikasi Komunikasi TCP/IP Socket melalui jaringan lokal *Wi-Fi*.
5. Kondisi Lingkungan: Logika otomatisasi lampu didasarkan pada standar SNI untuk pencahayaan ruang kerja *(set-point Lux),* dan kipas angin didasarkan pada standar kenyamanan termal ruangan, dan prioritas utama dikendalikan oleh sensor PIR.
6. Lokasi Pengujian: Pengujian dilakukan pada lingkungan ruangan tertutup di ruang Laboratorium Sistem Kontrol, Institut Teknologi PLN, Jakarta.

1.6. Kebaharuan

Penelitian ini menawarkan kebaharuan melalui integrasi platform ESP32 dengan LabVIEW yang jarang dieksplorasi dalam skala riset mahasiswa dibandingkan dengan penggunaan aplikasi *mobile* sederhana. Penggunaan LabVIEW memungkinkan penerapan fitur SCADA profesional seperti *multi-level alarm, advanced trend analysis,* dan *automated reporting* yang tidak tersedia pada dashboard IoT umum. Selain itu,

Penelitian ini menawarkan kebaharuan melalui implementasi kontrol multi-variabel dinamis yang menggabungkan deteksi kehadiran fisik dengan parameter termal dan visual, yang diawasi langsung oleh sistem SCADA berbasis LabVIEW DSC. Sebagian besar penelitian BEMS skala kecil mengoperasikan sensor PIR secara instan tanpa adanya pengunci waktu (*delay tolerance*) atau menggunakan fungsi tunda *delay()* yang dapat mengganggu komunikasi data. Dengan menerapkan algoritma state machine non-blocking 10 menit menggunakan *millis()*, ESP32 mampu mempertahankan stabilitas jaringan komunikasi Modbus TCP dan mencegah kehilangan paket data (*packet loss*) pada HMI LabVIEW. Fokus penelitian pada analisis perbandingan mode manual dan otomatis berdasarkan data logging yang kontinu juga memberikan kontribusi data empiris mengenai efektivitas BEMS di lingkungan tropis dengan parameter kenyamanan berbasis standar SNI Indonesia.

Tabel 1. 1 Matriks Perbandingan Teknologi Monitoring Energi

Fitur	Smart Plug Komersial	IoT Dashboards (Blynk/ThingsBoard)	Mini SCADA (ESP32 + LabVIEW)
Biaya Perangkat	Rendah	Sedang	Rendah
Akses Data Mentah	Terkunci	Terbatas	Terbuka Penuh
Logika Kontrol	Penjadwalan Sederhana	Otomatisasi Statis (LDR/DHT)	Otomatisasi Dinamis Berbasis Okupansi PIR (Waktu Tunggu 10 Menit)
Kustomisasi HMI	Tidak Ada	Terbatas	Sangat Tinggi
Analisis Teknik	Dasar	Menengah	Tinggi (Signal Processing)
Protokol Industri	Cloud Proprietary	MQTT/HTTP	Verifikasi Komunikasi TCP/IP Socket/MQTT/Modbus TCP
Kepatuhan Standar	Umum	Tergantung Pengembang	Sesuai SNI/ISO

Analisis perbandingan menunjukkan posisi *Mini SCADA* sebagai jembatan antara kepraktisan IoT dan kedalaman analisis sistem SCADA industri.