

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Trafo distribusi merupakan salah satu komponen kritis dalam sistem penyaluran tenaga listrik di Indonesia. Peran utamanya adalah menurunkan tegangan dari tingkat menengah menjadi tegangan rendah yang dapat digunakan oleh konsumen secara langsung. Menurut data Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, jumlah trafo distribusi yang beroperasi di seluruh Indonesia mencapai lebih dari 600.000 unit, dengan mayoritas tersebar di daerah perkotaan dan pedesaan [1]

Dalam operasionalnya, trafo distribusi, terutama trafo distribusi 1 fasa, seringkali mengalami permasalahan terkait monitoring beban. Masalah utama yang dihadapi oleh petugas lapangan adalah banyaknya trafo distribusi, khususnya trafo 1 fasa, yang tidak dilengkapi dengan Panel Hubung Bagi (PHB) atau perangkat monitoring terintegrasi [2]. Akibatnya, setiap kali melakukan inspeksi rutin atau pengambilan data beban, petugas harus naik ke atas tiang trafo, yang merupakan pekerjaan berisiko tinggi dan memakan waktu.

Permasalahan tersebut semakin dirasakan mengingat jumlah trafo distribusi dalam satu penyulang dapat mencapai puluhan hingga ratusan unit. Kegiatan inspeksi beban secara manual pada seluruh trafo dalam satu penyulang akan membutuhkan waktu yang sangat lama dan sumber daya manusia yang cukup besar. Selain itu, data beban yang diperoleh bersifat sesaat dan tidak mewakili kondisi pembebanan secara historis, sehingga sulit digunakan sebagai dasar analisis dan perencanaan manajemen beban yang optimal [3].

Perkembangan teknologi IoT (Internet of Things) dan komunikasi jarak jauh telah membuka peluang untuk merancang sistem monitoring yang lebih praktis dan efisien. Komunikasi LoRa (Long Range) adalah salah satu teknologi yang sangat potensial karena memiliki jangkauan yang jauh (hingga 10 km dalam *line-of-sight*), konsumsi daya yang rendah, dan *bandwidth* cukup untuk aplikasi

monitoring beban listrik. Teknologi ini telah banyak diterapkan dalam berbagai aplikasi IoT, mulai dari *smart city*, *smart agriculture*, hingga *smart grid* [4], [5].

Kombinasi antara sensor PZEM-004T, mikrokontroler ESP32, dan modul LoRa Ra-02 SX1278 merupakan solusi yang *cost-effective* dan terbukti handal untuk aplikasi monitoring listrik berbasis IoT. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa kombinasi komponen tersebut dapat menghasilkan sistem yang akurat dalam pengukuran parameter listrik dengan reliabilitas tinggi [6], [7].

Selain itu, integrasi dengan platform spreadsheet berbasis *cloud* (seperti Google Sheets) memungkinkan akses data secara *real-time* dan fleksibel, tanpa memerlukan infrastruktur server yang kompleks dan mahal. Autentikasi berbasis Google Service Account memungkinkan perangkat ESP32 mengirimkan data langsung ke Google Sheets API tanpa perlu men-deploy web app terpisah, sehingga proses integrasi menjadi lebih ringkas dan aman. Sistem notifikasi melalui Telegram juga memberikan kemudahan bagi operator untuk mendapatkan alert segera apabila terjadi kondisi abnormal pada trafo, baik berupa over-load, tegangan yang berada di bawah batas minimum (undervoltage), maupun tegangan yang melebihi batas maksimum (overvoltage), sehingga dapat dilakukan tindakan preventif dengan cepat. Selain notifikasi otomatis, operator juga dapat memeriksa data monitoring terkini kapan saja melalui perintah pada Bot Telegram [8].

Berdasarkan pertimbangan tersebut, pada penelitian ini dirancang dan dibangun sebuah prototipe alat monitoring beban trafo distribusi yang memanfaatkan sensor PZEM-004T untuk mengukur parameter listrik berupa tegangan dan arus beban, mikrokontroler ESP32 sebagai unit pemrosesan utama, serta modul LoRa Ra-02 SX1278 sebagai media komunikasi nirkabel antara unit transmitter yang dipasang di sisi trafo dengan unit receiver yang dioperasikan oleh petugas. Data hasil monitoring kemudian dikirimkan ke platform Google Spreadsheet melalui Google Sheets API menggunakan autentikasi Service Account pada koneksi WiFi sisi receiver, sehingga dapat diakses kapan saja dan dari mana saja. Selain itu, sistem dilengkapi dengan mekanisme notifikasi otomatis melalui platform Telegram yang akan mengirimkan peringatan apabila beban trafo yang dimonitor telah melampaui 80% dari kapasitas totalnya, tegangan berada di bawah

198 V, atau tegangan melebihi 231 V, serta fitur perintah bagi operator untuk memeriksa data monitoring terkini secara langsung.

Dengan adanya sistem ini, diharapkan dapat meningkatkan efisiensi monitoring trafo, mengurangi beban kerja petugas lapangan, meningkatkan keselamatan kerja, serta memberikan data yang komprehensif untuk analisis beban distribusi dan perencanaan pengembangan jaringan lebih lanjut, sehingga mendukung peningkatan keandalan dan kualitas pelayanan sistem distribusi tenaga listrik.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang dan membangun prototipe alat monitoring beban trafo distribusi menggunakan sensor PZEM-004T, mikrokontroler ESP32, dan modul LoRa Ra-02 SX1278?
2. Bagaimana merancang sistem komunikasi LoRa dengan mekanisme polling (receiver meminta data ke transmitter)?
3. Bagaimana mengimplementasikan sistem data logging berbasis Google Spreadsheet melalui Google Sheets API dengan autentikasi Service Account untuk mencatat data beban trafo beserta informasi waktu pengambilan data menggunakan sinkronisasi NTP?
4. Bagaimana mengimplementasikan sistem notifikasi otomatis melalui Telegram untuk memberikan peringatan dini apabila beban trafo telah melebihi 80% dari kapasitas totalnya, atau apabila tegangan berada di luar rentang toleransi standar (undervoltage <198 V dan overvoltage >231 V), serta bagaimana menyediakan fitur perintah bagi operator untuk memeriksa data monitoring terkini secara langsung melalui Bot Telegram?
5. Bagaimana akurasi dan kinerja sistem monitoring beban trafo yang dirancang ditinjau dari keberhasilan pengiriman data LoRa, akurasi pembacaan sensor, dan kestabilan sistem secara keseluruhan?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah:

1. Merancang dan membangun prototipe alat monitoring beban trafo distribusi berbasis IoT dengan komunikasi LoRa, yang terdiri dari unit transmitter (pada lokasi trafo) dan unit receiver (*gateway*).
2. Mengintegrasikan dan mengoptimalkan sensor PZEM-004T, ESP32, dan modul LoRa Ra-02 SX1278 agar dapat melakukan pengukuran parameter listrik (tegangan, arus, faktor daya) serta pengiriman data secara *wireless* dari transmitter ke receiver.
3. Mengimplementasikan sistem *data logging* yang terintegrasi dengan Google Sheets melalui Google Sheets API dan autentikasi Service Account pada koneksi WiFi unit receiver, yang mencatat data tegangan, arus beban, nomor tiang trafo, serta waktu pengambilan data secara otomatis menggunakan sinkronisasi NTP.
4. Mengimplementasikan sistem notifikasi otomatis melalui Telegram yang memberikan peringatan apabila beban trafo melebihi ambang batas 80% dari kapasitas totalnya, atau apabila tegangan berada di luar rentang toleransi standar (undervoltage/overvoltage), serta menyediakan fitur perintah bagi operator untuk memeriksa data monitoring terkini kapan saja.
5. Menguji, menganalisa dan mengevaluasi kinerja sistem monitoring secara keseluruhan, meliputi akurasi pembacaan sensor, tingkat keberhasilan pengiriman data LoRa, dan kestabilan sistem dalam beroperasi selama periode pengujian (pengujian 24 jam *continuous*), serta kualitas sinyal LoRa pada berbagai jarak.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang didapatkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1.4.1 Manfaat Teoritis

1. Memberikan kontribusi pada pengembangan ilmu pengetahuan di bidang teknik elektro, khususnya dalam perancangan sistem monitoring jaringan distribusi berbasis IoT dan komunikasi LoRa.
2. Menjadi referensi akademis dalam implementasi sensor PZEM-004T terintegrasi dengan ESP32 dan modul LoRa untuk aplikasi monitoring beban

listrik, serta platform *data logging* berbasis Google Sheets API dengan autentikasi Service Account dalam satu sistem monitoring yang terintegrasi.

3. Memberikan analisis empiris mengenai kinerja dan reliabilitas teknologi LoRa pada aplikasi monitoring infrastruktur listrik di area urban dan semi-urban.

1.4.2 Manfaat Praktis

1. Menghasilkan prototipe alat monitoring beban trafo distribusi yang dapat memudahkan petugas dalam memantau kondisi pembebanan trafo tanpa harus mendatangi lokasi trafo secara langsung dan meningkatkan efisiensi waktu dan sumber daya dalam kegiatan inspeksi rutin monitoring beban trafo distribusi.
2. Mengurangi risiko keselamatan kerja petugas lapangan dengan menghilangkan kebutuhan naik ke tiang secara berulang-ulang hanya untuk pengambilan data beban.
3. Menyediakan data *real-time* dan historis beban trafo yang dapat digunakan untuk analisis lebih lanjut, perencanaan pengembangan jaringan, dan optimalisasi alokasi beban antar trafo.
4. Membantu operator jaringan distribusi dalam deteksi dini kondisi *over-load* maupun kondisi tegangan abnormal (undervoltage/overvoltage) pada trafo melalui sistem notifikasi Telegram, serta memungkinkan operator memeriksa data monitoring terkini kapan saja melalui fitur perintah pada Bot Telegram, sehingga dapat dilakukan tindakan preventif dengan cepat.
5. Memberikan solusi *cost-effective* untuk sistem monitoring beban trafo distribusi dengan teknologi open-source dan komponen *off-the-shelf* yang mudah didapatkan, sehingga berpotensi untuk diimplementasikan secara masif pada jaringan distribusi.
6. Membuka peluang penelitian dan pengembangan lebih lanjut mengenai sistem monitoring multi-trafo, integrasi dengan predictive maintenance berbasis machine learning, serta optimalisasi beban distribusi.

1.5 Batasan Masalah

Agar penelitian ini tetap terarah dan sesuai dengan tujuan yang ditetapkan, maka batasan masalah yang digunakan adalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini difokuskan pada perancangan dan pengujian prototipe sistem monitoring untuk trafo distribusi pada skala laboratorium, dengan menggunakan trafo kecil sebagai pengganti trafo distribusi sesungguhnya.
2. Sistem transmitter yang dibangun pada penelitian ini menggunakan konfigurasi 1 fasa, sesuai dengan trafo distribusi 1 fasa sebagai objek utama penelitian.
3. Pengujian sistem dilakukan dengan satu unit transmitter dan satu unit receiver, dengan arsitektur komunikasi LoRa menggunakan mekanisme *polling* di mana receiver yang meminta data kepada transmitter.
4. Parameter listrik yang diukur dan dimonitor dibatasi pada tegangan (V) dan arus beban (A) sebagai parameter utama. Nilai daya (W), dan faktor daya pada sensor PZEM-004T dapat dicatat sebagai parameter pendukung namun tidak menjadi fokus utama analisis. Tidak termasuk pengukuran parameter mekanis atau termal pada trafo.
5. Jangkauan komunikasi LoRa diuji pada area terbatas (radius <1 km dari receiver dalam *line-of-sight*), sehingga performa pada area *non-line-of-sight* dan jarak lebih jauh belum sepenuhnya dikaji.
6. Interval waktu pengambilan data dapat diatur melalui konfigurasi pada kode program dan tidak diatur melalui antarmuka pengguna secara fisik.
7. Data waktu pengambilan sampel menggunakan sinkronisasi NTP (Network Time Protocol) melalui koneksi internet pada sisi receiver, sehingga sistem memerlukan koneksi internet yang aktif pada sisi receiver untuk berfungsi optimal.
8. Sistem *data logging* terbatas pada platform Google Sheets (melalui Google Sheets API dengan autentikasi Service Account) dan Telegram API, tanpa penambahan *database backend* yang lebih rumit atau sistem SCADA terintegrasi
9. Pengiriman data ke Google Spreadsheet dilakukan melalui koneksi WiFi pada sisi receiver. Konektivitas jaringan GSM/GPRS tidak termasuk dalam lingkup penelitian ini.
10. Ambang batas notifikasi Telegram (overload >80%, undervoltage <198 V, dan overvoltage >231 V) ditetapkan bersifat tetap (fixed) berdasarkan standar SPLN

1:1978 dan SPLN 50:1997, serta belum dapat diubah secara dinamis melalui antarmuka pengguna maupun perintah Bot Telegram.

11. Catu daya sistem menggunakan modul switching power supply (PSU) siap pakai (M-510) dengan keluaran tetap 5V/2A, tanpa perancangan rangkaian switching regulator secara mandiri.
12. Waktu operasi pengujian keandalan sistem adalah minimal 24 jam *continuous operation*. Pengujian untuk durasi operasi lebih panjang (minggu atau bulan) belum termasuk dalam lingkup penelitian ini.
13. Penelitian ini tidak mencakup aspek pengujian keamanan jaringan pada sistem komunikasi data yang dirancang.
14. Tegangan keluaran simulator ditentukan berdasarkan terminal keluaran transformator yang tersedia, yaitu 110 V, 220 V, dan 240 V. Nilai tegangan aktual dapat berbeda dari nilai nominal akibat variasi tegangan sumber, regulasi transformator, dan pembebanan.

1.6 Sistematika Tugas Akhir

Sistematika penulisan pada laporan ini disusun untuk memberikan beberapa gambaran umum tentang kegiatan yang dilakukan. Sistematika laporan ini adalah sebagai berikut:

BAB I : PENDAHULUAN

Bab ini berisi uraian mengenai latar belakang masalah, rumusan masalah, tujuan penelitian, manfaat penelitian, batasan masalah, serta sistematika penulisan tugas akhir yang berkaitan dengan perancangan sistem monitoring beban transformator distribusi berbasis LoRa.

BAB II : LANDASAN TEORI

Bab ini berisi tinjauan pustaka terhadap penelitian-penelitian terdahulu yang relevan, serta dasar teori yang menjadi landasan dalam perancangan sistem, meliputi teori trafo distribusi, sensor PZEM-004T, mikrokontroler ESP32, teknologi LoRa, NTP, Google Spreadsheet, Bot Telegram, LCD, dan konsep IoT.

BAB III : PERANCANGAN TUGAS AKHIR

Bab ini membahas perancangan perangkat keras dan perangkat lunak sistem, meliputi diagram blok, desain konstruksi tiga dimensi, diagram skematik dan wiring unit transmitter serta receiver, rangkaian simulasi variasi tegangan, dan flowchart sistem.

BAB IV : PEMBUATAN ALAT

Bab ini membahas proses pembuatan perangkat keras dan perangkat lunak, meliputi pembuatan PCB, pemasangan komponen, pembuatan perangkat mekanik transmitter, receiver, dan unit simulasi variasi tegangan, serta implementasi program pada ESP32.

BAB V : PENGUJIAN DAN ANALISA ALAT

berisi pembahasan hasil pengujian akurasi sensor, kinerja komunikasi LoRa, pengujian data logging, pengujian notifikasi Telegram, pengujian skenario failure, dan evaluasi kinerja sistem secara keseluruhan beserta analisis terhadap hasil yang diperoleh, termasuk analisis komparatif antara sistem yang dirancang dengan metode inspeksi manual konvensional.

BAB VI : PENUTUP

Bab ini berisi kesimpulan dari hasil penelitian yang telah dilakukan serta saran untuk pengembangan sistem di masa mendatang agar lebih optimal dan aplikatif.