

PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI SISTEM AUTOMATIC METER READING BERBASIS LoRa UNTUK MONITORING ENERGI LISTRIK JARAK JAUH BERBASIS THINGSPEAK

Yoyok Suntoro; Ir. Pratomo Budi Santosa, M.T
Teknik Elektro, Fakultas Teknik,
Universitas Muhammadiyah Surakarta

Abstrak

Di Indonesia, pencatatan angka kWh meter pada pelanggan rumah tangga umumnya masih dikerjakan secara manual oleh petugas lapangan, sehingga proses ini rawan salah catat, membutuhkan biaya operasional yang besar, dan tidak dapat memberikan informasi pemakaian listrik secara langsung (*real-time*). Untuk mengatasi persoalan tersebut, penelitian ini merancang serta membangun sebuah sistem *Automatic Meter Reading* (AMR) yang memanfaatkan modul LoRa SX1278 dengan ESP32 berperan sebagai pengendali pada node sensor maupun *gateway*. Parameter kelistrikan diukur menggunakan sensor PZEM-004T, sementara platform ThingSpeak berfungsi sebagai sarana pemantauan data secara daring dan *real-time*. Pendekatan *design and implementation research* diterapkan dalam penelitian ini, dimulai dari analisis kebutuhan, perancangan perangkat keras dan lunak, pembuatan prototipe, hingga pengujian serta evaluasi kinerja sistem. Uji akurasi sensor dilakukan dengan membandingkan pembacaan PZEM-004T terhadap KMRY Watt Meter pada lima jenis beban rumah tangga yang berbeda, sedangkan uji komunikasi LoRa dijalankan di kawasan permukiman yang terhalang oleh rumah warga, pepohonan, dan tembok, dengan jarak bervariasi antara 100 hingga 800 meter. Dari pengujian tersebut diperoleh rata-rata galat pengukuran sebesar 0,96% untuk tegangan, 2,38% untuk arus, 2,21% untuk daya aktif, dan 1,37% untuk faktor daya. Di sisi komunikasi, LoRa mampu mencapai *Packet Delivery Ratio* (PDR) 100% secara stabil hingga jarak 600 meter dengan nilai *Received Signal Strength Indicator* (RSSI) berada pada rentang -102 sampai -107 dBm, namun performanya mulai menurun pada jarak di atas 700 meter hingga PDR terendah hanya 30% pada jarak 800 meter dengan RSSI -109 dBm. Sistem yang dibangun juga terbukti dapat menampilkan delapan parameter kelistrikan secara *real-time* melalui dashboard ThingSpeak. Secara keseluruhan, temuan ini mengindikasikan bahwa sistem AMR berbasis LoRa yang dikembangkan berpotensi digunakan sebagai solusi pemantauan energi listrik jarak jauh dengan biaya penerapan yang relatif terjangkau, dengan jangkauan efektif hingga 600 meter pada kondisi lingkungan permukiman yang banyak halangan.

Kata Kunci: *Automatic Meter Reading*, ESP32, LoRa, PZEM-004T, ThingSpeak.

Abstract

In Indonesia, kWh meter reading for household customers is generally still done manually by field officers, making the process prone to recording errors, requiring substantial operational costs, and unable to provide real-time information on electricity usage. To address this issue, this study designed and built an *Automatic Meter Reading* (AMR) system utilizing a LoRa SX1278 module with ESP32 serving as the controller for both the sensor node and the gateway. Electrical parameters were measured using a PZEM-004T sensor, while the ThingSpeak platform functioned as an online, real-time data monitoring tool. A design and implementation research approach was applied in this study, starting

from needs analysis, hardware and software design, prototype development, through to system testing and performance evaluation. Sensor accuracy testing was conducted by comparing PZEM-004T readings against a KMRV Watt Meter across five different household load types, while LoRa communication testing was carried out in a residential area obstructed by houses, trees, and walls, with distances varying from 100 to 800 meters. The tests yielded average measurement errors of 0.96% for voltage, 2.38% for current, 2.21% for active power, and 1.37% for power factor. In terms of communication, LoRa achieved a stable Packet Delivery Ratio (PDR) of 100% up to a distance of 600 meters, with Received Signal Strength Indicator (RSSI) values ranging from -102 to -107 dBm, but performance began to decline beyond 700 meters, reaching a lowest PDR of only 30% at 800 meters with an RSSI of -109 dBm. The developed system was also proven capable of displaying eight electrical parameters in real time through the ThingSpeak dashboard. Overall, these findings indicate that the developed LoRa-based AMR system has the potential to serve as a relatively affordable long-range electrical energy monitoring solution, with an effective range of up to 600 meters in obstructed residential environments.

Keywords: Automatic Meter Reading, ESP32, LoRa, PZEM-004T, ThingSpeak.

1. PENDAHULUAN

Kebutuhan akan daya listrik bersifat krusial bagi sektor domestik, komersial, maupun fasilitas umum. Untuk menentukan besaran tagihan tiap bulan, pihak penyedia layanan mengukur konsumsi listrik tersebut melalui kWh meter di setiap pelanggan. Di Indonesia, pencatatan kWh meter pada pelanggan rumah tangga dan usaha kecil masih banyak dilakukan secara manual: petugas pencatat meter mendatangi lokasi pelanggan satu per satu, membaca angka stand meter secara visual, lalu menginputnya ke sistem billing. Cara ini membutuhkan tenaga kerja besar dan waktu lama, dan rawan salah baca akibat faktor manusia salah catat angka, sulit mengakses lokasi meter, atau terganggu cuaca saat pencatatan berlangsung..

Masalah ini makin terasa pada pelanggan yang tinggal di lokasi terpencil, kompleks industri yang luas, atau perumahan bertingkat dengan akses terbatas. Metode manual juga tidak memungkinkan pelanggan maupun penyedia layanan memantau konsumsi energi secara real-time, sehingga anomali pemakaian seperti lonjakan beban atau indikasi pencurian listrik baru terdeteksi pada pencatatan berikutnya biasanya sebulan kemudian. Dari sinilah muncul kebutuhan akan sistem pencatatan meter otomatis, atau Automatic Meter Reading (AMR), yang bisa membaca dan mengirimkan data konsumsi energi tanpa keterlibatan manusia secara langsung di titik pengukuran.

Beberapa pendekatan sistem AMR telah dikembangkan dengan memanfaatkan media komunikasi yang bervariasi, di antaranya jaringan seluler GPRS/GSM, jaringan WiFi, Power Line Communication (PLC), serta Low Power Wide Area Network (LPWAN). Pendekatan berbasis jaringan seluler maupun WiFi memiliki keterbatasan pada wilayah dengan infrastruktur sinyal yang minim, sekaligus menimbulkan biaya operasional tambahan berupa tarif data pada setiap node yang

terpasang. Teknologi LPWAN seperti Long Range (LoRa) menawarkan solusi komunikasi data dengan konsumsi daya rendah dan jangkauan transmisi yang jauh berkisar dari ratusan meter hingga beberapa kilometer tanpa bergantung pada infrastruktur jaringan seluler maupun internet pada sisi node pengirim. Hal ini menjadikan LoRa sangat ideal untuk diimplementasikan pada sistem AMR di wilayah dengan keterbatasan jaringan (Fragkopoulos et al., 2023; Obiri, 2023)

Berangkat dari masalah tersebut, penelitian ini merancang dan mengimplementasikan sistem AMR berbasis modul LoRa SX1278 (Ra-02) yang diintegrasikan dengan mikrokontroler ESP32 sebagai unit pengendali, baik pada node sensor maupun gateway. Pengukuran besaran listrik seperti tegangan, arus, daya aktif, akumulasi energi, frekuensi, hingga faktor daya dilakukan oleh node sensor menggunakan modul PZEM-004T yang dilengkapi current transformer (CT) 100 A pada jalur beban, lalu mengirim hasil pembacaan itu secara nirkabel melalui LoRa ke gateway. Selain dikirimkan ke gateway, data tersebut juga ditampilkan secara lokal di layar Liquid Crystal Display (LCD) 16x2 I2C yang terpasang pada node, sehingga parameter kelistrikan dapat dipantau langsung di lokasi pengukuran tanpa memerlukan koneksi internet. Gateway selanjutnya meneruskan data yang diterima ke internet memanfaatkan koneksi WiFi pada ESP32, menampilkan status penerimaan data pada LCD internal, sekaligus menyimpan dan memvisualisasikan data tersebut secara real-time pada platform ThingSpeak sehingga dapat dipantau dari jarak jauh.

Tujuan penelitian ini ada empat, yaitu merancang dan membangun perangkat keras node sensor energi listrik berbasis PZEM-004T dan LoRa SX1278 menggunakan ESP32 sebagai pengendali utama serta LCD 16x2 I2C sebagai penampil lokal, merancang gateway penerima data LoRa yang mampu meneruskan data ke platform ThingSpeak melalui jaringan internet sekaligus menampilkan status penerimaan data pada LCD, menguji performa transmisi sinyal LoRa berdasarkan variasi jarak hingga diperoleh jarak maksimum komunikasi yang dapat dicapai pada kondisi lingkungan permukiman, serta menguji presisi pengukuran sensor PZEM-004T dibandingkan watt meter acuan pada variasi beban rumah tangga.

Beberapa kajian teoritis yang melandasi penelitian ini mencakup konsep dasar Automatic Meter Reading, karakteristik modul komunikasi LoRa, prinsip kerja sensor energi PZEM-004T, peran ESP32 sebagai mikrokontroler Internet of Things (IoT), serta mekanisme integrasi perangkat IoT dengan platform ThingSpeak. LoRa merupakan teknik modulasi spread spectrum berbasis Chirp Spread Spectrum (CSS) yang memungkinkan komunikasi data dengan daya pancar rendah namun memiliki sensitivitas penerimaan tinggi, sehingga mampu menjangkau jarak yang jauh (Griva et al., 2023). Parameter konfigurasi LoRa seperti spreading factor, bandwidth, dan coding rate memengaruhi trade-off antara jarak tempuh sinyal, laju data (data rate), dan konsumsi daya. Pengaturan parameter ini kerap menyebabkan performa LoRa di lapangan bervariasi dari spesifikasi teoritisnya

(Fragkopoulos et al., 2023; Obiri, 2023). ESP32 dipilih sebagai mikrokontroler pada node maupun gateway karena telah dilengkapi dengan modul WiFi dan Bluetooth terintegrasi, memiliki pin GPIO yang melimpah, serta mendukung berbagai protokol komunikasi antarmuka seperti Serial Peripheral Interface (SPI), I2C, dan Universal Asynchronous Receiver-Transmitter (UART) secara bersamaan (Hercog et al., 2023).

Modul PZEM-004T merupakan modul pengukuran energi listrik AC berbasis chip khusus yang mengukur tegangan dan arus secara langsung serta mengomunikasikan datanya melalui protokol serial Modbus Remote Terminal Unit (RTU) ke mikrokontroler. Kombinasi sensor ini dengan modul LoRa telah banyak diaplikasikan pada penelitian infrastruktur meter pintar berbasis IoT untuk jaringan listrik skala rumah tangga (Gallardo & Ahmed, 2021; Yasa et al, 2023). Modul PZEM-004T tersedia dalam beberapa varian kapasitas current transformer, di mana pada penelitian ini digunakan varian 100 A yang sesuai dengan karakteristik beban rumah tangga maupun usaha kecil. Akurasi current transformer dipengaruhi oleh besaran arus yang mengalir relatif terhadap kapasitas maksimumnya, sehingga besaran galat (error) pengukuran cenderung bervariasi pada rentang beban yang berbeda (Tomczyk et al., 2025). ThingSpeak merupakan platform IoT berbasis cloud yang menyediakan layanan penyimpanan data time-series serta visualisasi grafik secara real-time melalui mekanisme channel dan field yang dapat diakses melalui Representational State Transfer Application Programming Interface (REST API) maupun Message Queuing Telemetry Transport (MQTT), dan telah banyak dipakai untuk berbagai aplikasi monitoring jarak jauh berbasis LoRa karena kemudahannya integrasinya dengan mikrokontroler berbasis WiFi (Alcalá-rodríguez et al., 2026). Sebagai komponen antarmuka lokal, LCD 16x2 berbasis I2C dipilih karena cma membutuhkan sepasang saluran komunikasi yaitu Serial Data (SDA) dan Serial Clock (SCL) sehingga mampu mengefisiensikan penggunaan pin mikrokontroler jika dibandingkan dengan LCD paralel konvensional.

Dengan ketiga komponen tersebut terintegrasi, penelitian ini diharapkan menghasilkan prototipe sistem AMR yang bisa diandalkan untuk skala rumah tangga maupun industri kecil, dengan biaya implementasi yang lebih rendah dibanding sistem AMR komersial berbasis jaringan seluler. Kalau berhasil, manfaatnya cukup banyak mengurangi kebutuhan tenaga pencatat meter manual, mempercepat deteksi anomali konsumsi energi, dan memberikan data konsumsi yang transparan serta real-time, baik bagi pelanggan maupun pengelola jaringan distribusi listrik.

2. METODE

Bagian Metode *design and implementation research* dipakai dalam penelitian ini untuk merancang serta mengembangkan sistem *Automatic Meter Reading* (AMR) berbasis LoRa. Tahapannya mencakup analisis kebutuhan sistem, perancangan perangkat keras dan perangkat lunak, pembuatan prototipe, hingga pengujian dan penilaian kinerja sistem. Penilaian kinerja dilaksanakan lewat dua

jenis pengujian, yaitu uji akurasi sensor PZEM-004T dan uji komunikasi LoRa. Uji akurasi dijalankan dengan membandingkan hasil pengukuran sensor terhadap alat ukur KMRV *Watt Meter*, sementara uji komunikasi didasarkan pada nilai *Received Signal Strength Indicator* (RSSI) dan *Packet Delivery Ratio* (PDR) pada beberapa variasi jarak. Seluruh data yang diperoleh kemudian diolah menggunakan statistik deskriptif guna menilai kinerja sistem secara keseluruhan.

2.1 Persiapan Alat dan Bahan

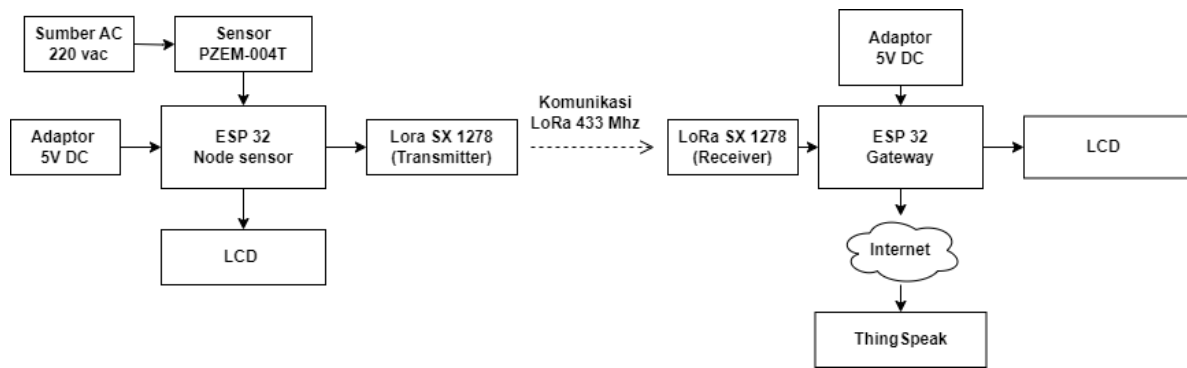
Langkah awal penelitian ini yaitu menyiapkan segala perangkat yang dibutuhkan, mencakup sisi perangkat keras maupun perangkat lunak. Tahap ini bertujuan memastikan setiap komponen berfungsi normal sebelum masuk ke tahap perancangan. Daftar alat dan bahan yang dipakai dalam pembuatan sistem disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Alat dan Bahan

Alat dan Bahan	Jumlah
ESP32	2
LoRa Ra-02 SX1278	2
PZEM-004T 100A	1
LCD 16x2 I2C	2
Antena 433 MHz	2
Adaptor 5V DC	2
Stop Kontak	1
Steker AC	1

2.2 Perancangan Sistem

Perancangan sistem dimaksudkan untuk merumuskan alur kerja menyeluruh, mulai dari tahap pengukuran sampai data tersaji pada platform ThingSpeak. Sistem ini tersusun atas dua bagian pokok yakni *node sensor* dan *gateway*. Bagian *node sensor* bertugas mengukur parameter kelistrikan tegangan, arus, daya aktif, energi, frekuensi, dan faktor daya menggunakan sensor PZEM-004T. Data hasil pengukuran ini dibaca ESP32 lewat komunikasi UART dan diperiksa validitas hasil pembacaannya, kemudian ditampilkan pada LCD sebagai informasi lokal, lalu dikirim ke *gateway* melalui modul LoRa SX1278. Pada sisi *gateway*, data yang diterima dari *node sensor* melalui LoRa kemudian diuraikan (*parsing*) dahulu dan kemudian diteruskan ke ThingSpeak lewat jaringan WiFi. LCD pada *gateway* sendiri berfungsi menampilkan status penerimaan data serta proses pengirimannya ke *server*. Perancangan diagram blok sistem disajikan pada Gambar 1.



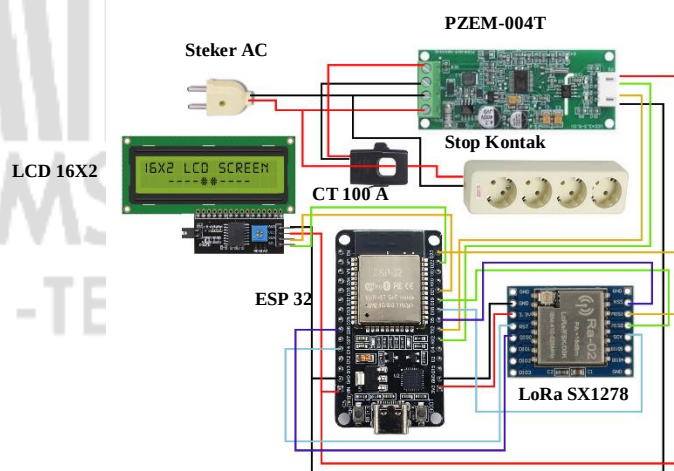
Gambar 1. Perancangan Diagram Blok Sistem

2.3 Perancangan Perangkat Keras

Pada tahap perancangan perangkat keras, tiap komponen dihubungkan sesuai fungsi dan kebutuhan masing-masing. Secara garis besar, sistem terbagi menjadi dua unit utama *node sensor* yang berperan sebagai alat ukur, dan *gateway* yang bertugas menerima data sekaligus penghubung ke jaringan internet.

2.3.1 Rangkaian Node Sensor

Node sensor bertanggung jawab mengukur parameter kelistrikan sekaligus mengirimkan hasilnya ke *gateway*. Susunan perangkat ini terdiri atas ESP32 sebagai unit kendali utama, PZEM-004T sebagai sensor pengukuran, modul LoRa SX1278 untuk komunikasi nirkabel, LCD I2C 16×2 sebagai layar tampilan lokal, dan adaptor 5 V DC untuk catu daya. *Wiring diagram node sensor* tersebut disajikan pada Gambar 2.



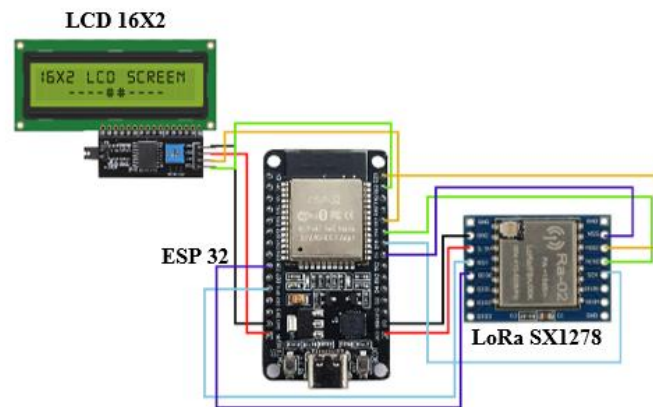
Gambar 2. Wiring Diagram Node Sensor

Sensor PZEM-004T dipasang pada jaringan listrik AC 220 V untuk mengukur tegangan, arus, daya aktif, energi, frekuensi, serta faktor daya. Data pengukuran tersebut disalurkan ke ESP32 melalui jalur UART, kemudian diolah agar dapat ditampilkan pada LCD. Data yang sama selanjutnya dikirim ESP32 ke *gateway* lewat modul LoRa SX1278 menggunakan komunikasi SPI. Melalui konfigurasi ini, *node sensor* dapat melakukan pengukuran sekaligus pengiriman data

secara berkala sesuai interval yang telah ditetapkan.

2.3.2 Rangkaian Gateway

Gateway berperan menerima data dari *node sensor* sekaligus menghubungkan jaringan LoRa dengan internet. Rangkaian ini disusun dari ESP32, modul LoRa SX1278, LCD I2C 16×2, dan adaptor 5 V DC sebagai sumber daya. Rangkaian *wiring diagram gateway* disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3. *Wiring Diagram Gateway*

Setiap data yang tiba melalui modul LoRa akan diproses ESP32 untuk memastikan paket diterima secara utuh sebelum diteruskan ke ThingSpeak lewat WiFi. Di luar fungsinya sebagai penghubung ke server, LCD pada *gateway* juga menampilkan jumlah paket yang diterima, nilai RSSI, dan status pengiriman data sehingga kondisi sistem bisa dipantau langsung secara visual.

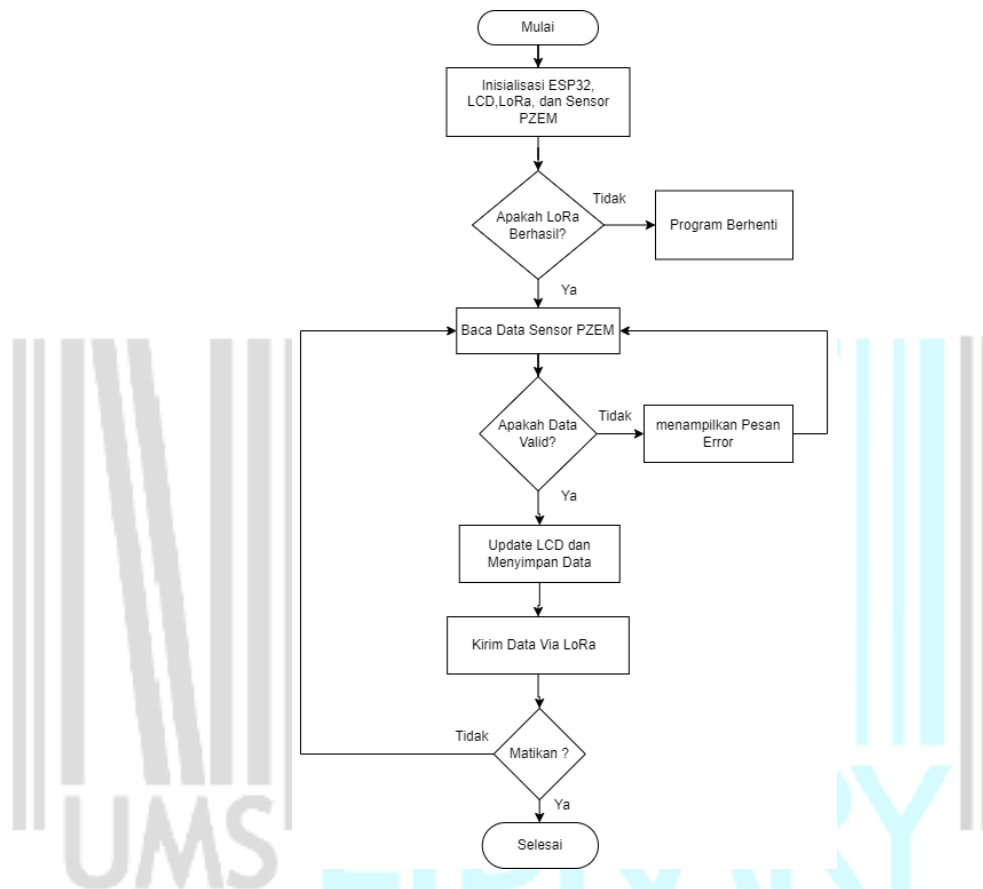
2.4 Perancangan Perangkat Lunak

Pengembangan perangkat lunak memakai Arduino IDE dengan bahasa C++, dan programnya dipecah menjadi dua bagian terpisah, yaitu program untuk *Node* dan program untuk *gateway*. Pemisahan ini diperlukan karena kedua perangkat menjalankan peran berbeda *Node* bertindak sebagai pengirim data, sedangkan *gateway* berperan ganda sebagai penerima sekaligus pengirim data ke ThingSpeak.

2.5 Diagram Alir Program *Node sensor*

Alur program pada *node sensor* diawali dengan inisialisasi ESP32, LCD, modul LoRa, dan sensor PZEM-004T. Begitu inisialisasi selesai, sistem memeriksa apakah modul LoRa sudah aktif dengan baik jika gagal, program akan berhenti. Sebaliknya, bila berhasil, ESP32 mulai mengambil data dari sensor PZEM, lalu memeriksa validitas nilainya. Ketika ditemukan kesalahan pembacaan, LCD akan menampilkan pesan *error* dan sistem mengulang pembacaan sensor. Jika data dinyatakan valid hasil pengukuran diperbarui, ditampilkan pada LCD dan disimpan sebagai data yang akan dikirim. Selanjutnya, data dikirimkan ke *gateway* melalui komunikasi LoRa sesuai dengan interval pengiriman yang telah ditentukan. Sistem ini akan berjalan terus-menerus hingga sistem dimatikan.

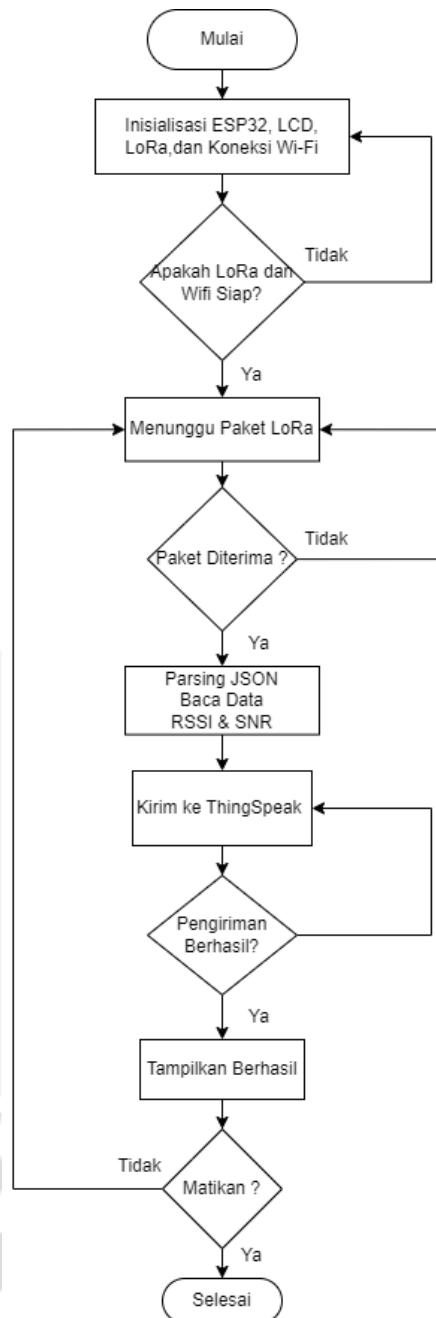
Diagram alir program *node sensor* disajikan pada Gambar 4.



Gambar 4. Diagram Alir program *Node Sensor*

2.6 Diagram Alir Program *Gateway*

Program diawali dengan proses inisialisasi ESP32, modul LoRa SX1278, LCD 16×2, dan koneksi WiFi. Setelah seluruh perangkat berhasil diinisialisasi, gateway masuk ke kondisi siaga untuk menerima data dari *node sensor* melalui komunikasi LoRa. Ketika paket data diterima, gateway melakukan proses *parsing* data berformat JSON untuk memperoleh nilai tegangan, arus, daya, energi, frekuensi, dan faktor daya. Selain itu, *gateway* juga membaca nilai RSSI dan SNR sebagai parameter kualitas sinyal LoRa. Data yang telah diterima selanjutnya ditampilkan pada LCD dan dikirim ke platform ThingSpeak melalui jaringan WiFi. Apabila proses pengiriman berhasil, sistem menampilkan notifikasi bahwa data telah berhasil dikirim. Sebaliknya, apabila pengiriman gagal, gateway akan mencoba mengirim ulang data secara otomatis setiap lima detik hingga berhasil. Program ini akan berjalan terus menerus sampai sistem dimatikan. Diagram alir program *gateway* disajikan pada Gambar 5.



Gambar 5. Diagram Alir program *gateway*

2.7 Pengujian Akurasi Sensor

Uji akurasi bertujuan mengetahui seberapa teliti sensor PZEM-004T V3.0 dalam mengukur besaran listrik. Pengujian ini melibatkan lima jenis beban rumah tangga lampu LED 10 W, kipas meja 25 W, lampu pijar 40 W, *rice cooker* 300 W, dan setrika listrik 300 W, yang masing-masing diuji sendiri-sendiri agar pengukuran satu beban tidak terganggu oleh beban lain. Nilai tegangan, arus, dan daya yang tercatat pada sensor kemudian dibandingkan dengan hasil *satt Meter* merk KMRY, dengan tujuan mendapat hasil pembacaan yang lebih dapat dipercaya. Besaran persentase galat dihitung dengan persamaan (1).

$$Galat (\%) = \frac{|X_{PZEM} - X_{Standar}|}{X_{Standar}} \times 100\% \quad (1)$$

2.8 Pengujian Komunikasi Lora

Pengujian komunikasi LoRa digunakan untuk mengukur kemampuan sistem mengirimkan data dari *node* ke *gateway* pada beberapa variasi jarak. Uji ini dilakukan di kawasan permukiman dalam kondisi *non-line-of-sight* (NLOS), yakni terhalang oleh rumah warga, pepohonan, tembok, maupun jalan berkelok, dengan tujuan mendekati kondisi pemakaian sistem yang sesungguhnya. Selama pengujian, posisi *node* dibuat tetap sementara *gateway* dipindah-pindahkan ke lima titik dengan jarak masing-masing 100, 200, 300, 400, dan 500 meter, yang diukur menggunakan aplikasi *Field Area Measure PRO*. Pada tiap titik, *Node* mengirim sepuluh paket data ke *gateway*, dan nilai RSSI dari setiap paket yang diterima dicatat lalu dirata-rata. Jumlah paket yang berhasil diterima dibandingkan dengan jumlah paket yang dikirim untuk mendapatkan nilai PDR, dihitung dengan persamaan (2).

$$PDR (\%) = \frac{\text{jumlah paket diterima}}{\text{jumlah paket dikirim}} \times 100\% \quad (2)$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Implementasi Hardware



(a)

(b)

Gambar 6. Implementasi hardware Automatic Meter Reading (AMR): (a) Node Sensor, (b) gateway.

Implementasi hardware AMR terdiri dari dua unit, *node sensor* dan *gateway*, ditampilkan pada Gambar 6. Unit *Node Sensor* pada Gambar 6(a) tersusun dari ESP32, modul LoRa SX1278 Ra-02, sensor PZEM-004T dengan CT 100 A, dan LCD I2C 16×2 yang berfungsi mengukur sekaligus menampilkan parameter kelistrikan. Adapun unit *gateway* pada Gambar 6(b) memanfaatkan ESP32, modul LoRa SX1278 Ra-02, dan LCD I2C 16×2 guna menerima data pengukuran yang dikirim

melalui komunikasi LoRa.

3.2 Akurasi Sensor PZEM-004T

Perbandingan hasil pembacaan PZEM-004T dengan alat ukur standar pada kelima beban uji dirangkum pada Tabel 2 dan Tabel 3.

Tabel 2. Perbandingan Pembacaan PZEM-004T dengan Alat Ukur Standar

Beban	Alat Ukur Standar				PZEM			
	V (Volt)	I(A)	P (Watt)	Cos Phi	V (Volt)	I(A)	P (Watt)	Cos Phi
Lampu LED 10W	237,3	0,065	7,9	0,49	239,4	0,072	8,2	0,49
Kipas Meja 25W	238,2	0,204	26,3	0,52	240,0	0,204	17,1	0,54
Lampu Pijar 40W	233,9	0,186	43,8	1	235,8	0,185	42,7	0,97
Ricecooker 300W	227,6	1,392	320,1	1	230,5	1,384	318,3	1
Setrika 300W	228,3	1,644	379,6	1	230,7	1,644	375,3	1

Tabel 3. Galat (%) PZEM-004T terhadap Alat Ukur Standar

Beban	Galat (%)			
	V (Volt)	I(A)	P (Watt)	Cos Phi
Lampu LED 10W	0,89	10,77	3,80	0,00
Kipas Meja 25W	0,76	0,00	3,04	3,85
Lampu Pijar 40W	0,81	0,54	2,51	3,00
Ricecooker 300W	1,27	0,57	0,56	0,00
Setrika 300W	1,05	0,00	1,13	0,00
Rata-rata	0,96	2,38	2,21	1,37

Dari data pengujian terlihat bahwa rata-rata galat tegangan (0,96%) dan faktor daya (1,37%) tergolong kecil, menandakan bahwa pengukuran yang dihasilkan cukup akurat dan masih memenuhi batas toleransi yang dimiliki sensor PZEM-004T. Adapun rata-rata galat arus (2,38%) dan daya (2,21%) tampak sedikit lebih besar dibanding dua parameter lainnya, yang terutama disebabkan oleh pengukuran pada beban lampu LED 10 W, dengan galat arus mencapai 10,77% dan daya 3,80%. Besarnya galat pada beban ini bukan berasal dari kerusakan sensor, melainkan karena arus yang mengalir hanya sekitar 0,065 A, jauh di bawah kapasitas *current transformer* 100 A yang dipakai, sehingga ketelitian pembacaannya menurun. Berbeda halnya pada beban dengan arus lebih besar seperti kipas angin, lampu pijar, *rice cooker*, dan setrika, di mana galat arusnya hanya berkisar 0–0,57%, menandakan sensor bekerja lebih presisi pada beban rumah tangga dengan arus normal. Pengukuran faktor daya pun menunjukkan hasil yang memuaskan, dengan galat yang muncul hanya pada beberapa beban bersifat *non-linier*, sedangkan pada beban resistif seperti *rice cooker* dan setrika, nilai faktor daya yang tercatat sama persis, yaitu 1,00, baik pada PZEM-004T maupun alat ukur pembanding. Secara umum, hasil ini mengonfirmasi bahwa sensor PZEM-004T memiliki akurasi pengukuran yang baik.

3.3 Pengujian Jangkauan LoRa SX1278

Pengujian dilakukan di lingkungan permukiman pada lima titik jarak. Nilai RSSI dan PDR terhadap Jarak disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. RSSI dan PDR terhadap Jarak

Jarak (m)	RSSI (dBm)	Pkt Kirim	Pkt Terima	PDR (%)
100	-102	10	10	100
200	-106	10	10	100
300	-107	10	10	100
400	-107	10	10	100
500	-107	10	10	100
600	-107	10	10	100
700	-107	10	8	80
750	-108	10	6	60
800	-109	10	3	10

Dari data pengujian pada Tabel 4 dapat dilihat nilai RSSI mengalami penurunan dari –102 dBm pada jarak 100 meter menjadi –106 dBm di jarak 200 meter, kemudian stabil di angka –107 dBm sampai jarak 600 meter, dan menurun lagi menjadi –108 dBm pada jarak 750 meter dan –109 dBm

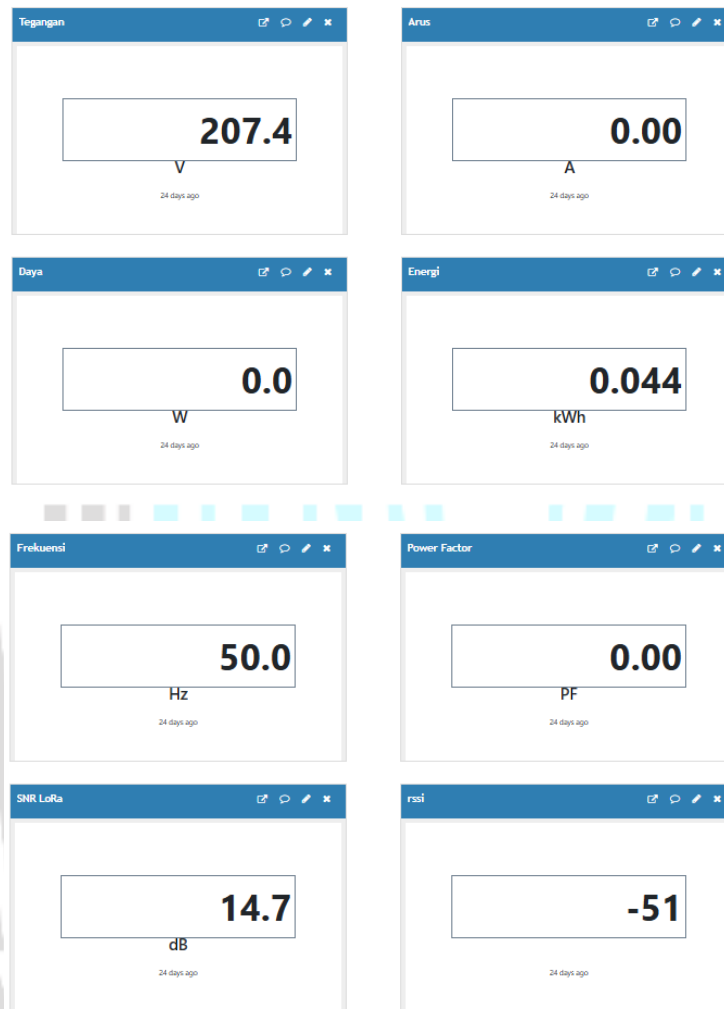
pada jarak 800 meter, ini menunjukkan sinyal LoRa masih cukup baik diterima sampai jarak menengah namun mulai melemah ketika jaraknya semakin jauh. Ini kemungkinan disebabkan oleh kondisi lingkungan permukiman yang membuat sinyal masih bisa diterima baik secara langsung maupun melalui pantulan dari bangunan sekitar, sedangkan pada jarak di atas 700 meter redaman akibat jarak dan halangan sudah lebih dominan sehingga sinyal semakin lemah. Untuk nilai PDR juga tercatat 100% secara stabil dari jarak 100 sampai 600 meter yang menunjukkan seluruh paket berhasil diterima tanpa ada yang hilang, namun mulai menurun menjadi 80% di jarak 700 meter, 60% di jarak 750 meter, dan hanya 30% di jarak 800 meter, terlihat jelas bahwa melemahnya RSSI maka kemungkinan paket data gagal diterima dengan baik. Dari hasil ini dapat disimpulkan bahwa sistem AMR berbasis LoRa mampu berkomunikasi dengan baik hingga jarak 600 meter, tetapi performanya menurun cukup signifikan pada jarak di atas 700 meter, sehingga jarak 600 meter dapat dijadikan sebagai batas jangkauan optimal sistem ini, sedangkan untuk penggunaan pada jarak yang lebih jauh masih diperlukan perbaikan lebih lanjut seperti penggunaan antena dengan gain lebih tinggi dan penempatan posisi yang lebih *line-of-sight*.

3.4 Tampilan Dashboard ThingSpeak

Dashboard ThingSpeak digunakan untuk memantau hasil pengukuran yang dikirimkan oleh *node sensor* secara *real-time*. *Dashboard* ini menampilkan delapan parameter, yaitu tegangan, arus, daya aktif, energi kumulatif, frekuensi, faktor daya, RSSI, dan SNR. Setiap parameter disajikan dalam bentuk grafik *time-series* untuk menunjukkan perubahan nilai terhadap waktu, serta dilengkapi dengan tampilan nilai pengukuran terkini (*numeric display*). Data pada *dashboard* diperbarui secara otomatis setiap 25 detik sesuai dengan interval pengiriman data oleh *node sensor*. Tampilan *dashboard* ThingSpeak grafik *time-series* disajikan pada Gambar 7. Dan Tampilan nilai pengukuran *real-time* sistem AMR pada Gambar 8.



Gambar 7. Tampilan *dashboard* ThingSpeak grafik *time-series*



Gambar 8. Tampilan nilai pengukuran *real-time* sistem AMR.

3.5 Tampilan LCD Node Sensor dan Gateway



Gambar 9. Tampilan LCD sistem AMR: (a) LCD *Node Sensor*, (b) LCD *gateway*.

Gambar 9. menunjukkan tampilan LCD pada *Node Sensor* dan *gateway*. Pada Gambar 7(a), LCD 16×2 pada *Node Sensor* menampilkan hasil pengukuran secara *real-time* dalam satu tampilan tetap. Baris pertama menampilkan nilai tegangan (V) dan daya aktif (W), sedangkan baris kedua menampilkan energi kumulatif (kWh) dan arus (A). Tampilan LCD diperbarui setiap kali *Node Sensor* memperoleh data baru dari sensor PZEM-004T. Selain itu, setelah data berhasil dikirim melalui LoRa, LCD akan menampilkan notifikasi "Ter kirim!" selama sekitar 1,5 detik sebelum

kembali ke tampilan utama. Sementara itu, Gambar 7(b) menunjukkan tampilan LCD pada *gateway* yang menampilkan status koneksi WiFi, status komunikasi LoRa, jumlah paket yang diterima, serta nilai RSSI terakhir sebagai informasi kondisi komunikasi antara *node sensor* dan *gateway*.

4. PENUTUP

Sistem Dari hasil perancangan dan pengujian yang sudah dilakukan, sistem AMR berbasis ESP32, PZEM-004T, dan LoRa SX1278 ini bisa berjalan sesuai yang direncanakan. Node sensor berhasil mengukur enam parameter kelistrikan, menampilkannya di LCD, dan mengirim datanya ke *gateway* lewat LoRa secara berkala, sedangkan *gateway* berhasil menerima data tersebut dan meneruskannya ke ThingSpeak lewat WiFi sambil menampilkan status pengiriman di LCD. Pengujian akurasi menunjukkan sensor PZEM-004T punya galat rata-rata di bawah 2,5% dibanding alat ukur standar, dengan galat yang agak besar hanya muncul pada beban dengan arus kecil karena keterbatasan current transformer 100 A yang dipakai. Sementara itu, pengujian jarak menunjukkan sistem masih bisa mengirim data dengan andal PDR 100% sampai jarak 600 meter, tapi performanya menurun cukup jauh setelah 700 meter, sehingga jarak 600 meter bisa dijadikan batas jangkauan yang aman untuk sistem ini. Dengan hasil tersebut, semua tujuan penelitian ini sudah tercapai dan sistem AMR yang dibuat terbukti bisa jadi alternatif pencatatan meter listrik yang lebih murah dan tidak bergantung pada jaringan seluler dibanding sistem AMR komersial yang sudah ada.

Untuk pengembangan selanjutnya, ada beberapa hal yang bisa diperbaiki. *Gateway* sebaiknya ditambahkan sistem antrean data supaya data yang gagal terkirim tidak langsung hilang begitu saja saat ada data baru masuk. Dan supaya jangkauannya lebih jauh, bisa dicoba pakai antena dengan gain lebih tinggi atau posisi *gateway* yang lebih tinggi dan minim halangan. Terakhir, sistem ini juga masih perlu diuji dengan beberapa *node sensor* sekaligus (*multi-node*) supaya lebih mendekati kondisi pemakaian yang sebenarnya di lapangan.

PERSANTUNAN

Puji dan syukur mendalam penulis persembahkan ke hadirat Allah SWT atas segala limpahan kemudahan dan petunjuk-Nya, sehingga karya tulis skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik. Penulis menyadari sepenuhnya bahwa penyusunan tugas akhir ini berhasil dirampungkan berkat doa, dorongan, serta bantuan dari berbagai pihak. Rasa terima kasih yang tulus penulis haturkan kepada kedua orang tua beserta keluarga besar atas doa tiada henti, motivasi, serta pengorbanan moril maupun materiil yang menjadi pendorong utama selama masa studi. Ungkapan terima kasih yang sebesar-besarnya juga disampaikan kepada Bapak Ir. Pratomo Budi Santosa, M.T. selaku dosen pembimbing, yang telah berkehendak meluangkan waktu, memberikan bimbingan berharga, serta mengarahkan penulis dengan penuh kesabaran sejak awal riset hingga penyusunan laporan ini usai. Ucapan apresiasi turut penulis sampaikan kepada seluruh staf pengajar di Program Studi Teknik Elektro Universitas

Muhammadiyah Surakarta atas penyaluran ilmu dan pengalaman berharga selama masa perkuliahan. Terakhir, penghargaan tulus diberikan kepada rekan-rekan seperjuangan yang telah banyak memberikan pertolongan, motivasi, serta masukan konstruktif sepanjang proses penyelesaian tugas akhir ini.



DAFTAR PUSTAKA

- Alcalá-rodríguez, U. E., Guerrero-osuna, H. A., García-vázquez, F., Nava-pintor, J. A., & Martínez-blanco, M. R. (2026). *Design and Validation of a Solar-Powered LoRa Weather Station for Environmental Monitoring and Agricultural Decision Support*. 1–27.
- Fragkopoulos, M., Panagiotakis, S., Kostakis, M., & Markakis, E. K. (2023). *Experimental Assessment of Common Crucial Factors That Affect LoRaWAN Performance on Suburban and Rural Area Deployments*.
- Gallardo, J. L., & Ahmed, M. A. (2021). *LoRa IoT-Based Architecture for Advanced Metering Infrastructure in Residential Smart Grid*. 124295–124312. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3110873>
- Hercog, D., Lerher, T., & Truntiř, M. (2023). *Design and Implementation of ESP32-Based IoT Devices*. 1.
- Obiri, N. M. (2023). *Long-Range Wide Area Network (LoRa-WAN) Connectivity and Range Long-Range Wide Area Network (LoRa-WAN) Connectivity and Range Evaluation in a Rural Setting*. April. <https://doi.org/10.5120/ijca2023922699>
- Scenarios, U., Griva, A. I., Boursianis, A. D., Wan, S., & Sarigiannidis, P. (2023). *LoRa-Based IoT Network Assessment in Rural and Urban Scenarios*. 1–14.
- Tomczyk, K., Sieja, M., Ostrowska, K., & Owczarek, D. (2025). *Review of Accuracy Assessment Methods for Current Transformers : Errors , Uncertainties , and Dynamic Performance*. 1–37.
- Yasa, K. A., Purbhawa, I. M., Yasa, I. M. S., Teresna, I. W., Nugroho, A., & Winardi, S. (2023). *IoT-based electrical power recording using ESP32 and PZEM-004T microcontrollers*. *Journal of Computer Science and Technology Studies*, 5(4), 62-68.