

SISTEM PEMANTAUAN PERGERAKAN GAJAH BERBASIS GEOFENCE MENGGUNAKAN TEKNOLOGI LORA

Furqon Andika¹⁾, Hamid Azwar²⁾, Wira Indani³⁾, dan Muhammad Diono⁴⁾

^{1, 2,3,4)} Jurusan Teknologi Industri, Politeknik Caltex Riau

Jl. Umban Sari No.1, Umban Sari, Kec. Rumbai, Kota Pekanbaru, Riau 28265

e-mail: furqon@pcr.ac.id¹⁾, hamid@pcr.ac.id²⁾, wira@pcr.ac.id³⁾, dan diono@pcr.ac.id⁴⁾

ABSTRACT

This research aims to develop an elephant movement monitoring system capable of transmitting data from a gateway to a server using the MQTT protocol and displaying information in real time via a web-based dashboard. This system is designed to support remote monitoring with low latency and a wide communication range. Test results show that the average data transmission time from the gateway to the server via the MQTT protocol is 1.44 ms, while the average notification delivery time to the user is 0.89 seconds. The system is capable of operating up to 1 km with an RSSI value of -105 dB, indicating stable communication at that distance. In addition, the developed dashboard was successfully deployed online, allowing users to monitor sensor data and device status in real time through an interactive and easy-to-use interface. The results of this study indicate that the developed system has efficient communication performance, low latency, and ease of monitoring, making it potentially applicable to various IoT applications based on remote monitoring.

Keywords: LoRa, Geofence, GPS, MQTT

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem pemantauan pergerakan gajah yang mampu mengirimkan data dari gateway ke server menggunakan protokol MQTT, serta menampilkan informasi secara real-time melalui dashboard berbasis web. Sistem ini dirancang untuk mendukung proses pemantauan jarak jauh dengan latensi rendah dan jangkauan komunikasi yang luas. Hasil pengujian menunjukkan bahwa rata-rata waktu pengiriman data dari gateway ke server melalui protokol MQTT adalah 1.44 ms, sedangkan rata-rata waktu pengiriman notifikasi ke pengguna adalah 0.89 detik. Sistem mampu beroperasi hingga 1 km dengan nilai RSSI sebesar -105 dB, yang menandakan komunikasi masih stabil pada jarak tersebut. Selain itu, dashboard yang dikembangkan berhasil dideploy secara online, memungkinkan pengguna untuk memantau data sensor dan status perangkat secara real-time melalui antarmuka yang interaktif dan mudah digunakan. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa sistem yang dikembangkan memiliki kinerja komunikasi yang efisien, latensi rendah, dan kemudahan pemantauan, sehingga berpotensi diterapkan pada berbagai aplikasi IoT berbasis pemantauan jarak jauh.

Kata Kunci: LoRa, Geofence, GPS, MQTT

I. PENDAHULUAN

PEMANTAUAN pergerakan gajah merupakan aspek fundamental dalam upaya konservasi dan manajemen konflik antara manusia dan satwa liar. Gajah adalah satwa dengan wilayah jelajah yang luas [1], [2] dan rentan terhadap ancaman perburuan serta kerusakan habitat alami [3] serta juga konflik antara manusia dengan gajah [4], [5]. Oleh karena itu, diperlukan sistem pemantauan yang efektif dan real-time untuk menjaga populasi serta kesejahteraan gajah di alam liar. Namun, sistem pelacakan gajah tradisional yang menggunakan GPS dan radio memiliki keterbatasan seperti cakupan sinyal yang terbatas, konsumsi energi tinggi, dan biaya operasional yang mahal sehingga kurang ideal untuk penerapan luas di habitat yang terpencil dan sulit dijangkau [6]. Selain itu, kemampuan daya tahan baterai perangkat yang rendah menyebabkan data pelacakan tidak konsisten dan berdampak pada ketepatan pengambilan keputusan dalam konservasi.

Penelitian terkait deteksi gajah sudah pernah dilakukan sebelumnya, seperti [7], [8] menggunakan sensor PIR dan komunikasi GSM untuk mendeteksi adanya gajah, namun sistem ini masih memiliki kelemahan di

bagian sensor dan juga pengiriman data. Karena modul GSM sangat rentan terhadap kontur geografis dan juga susah sinyal GSM apabila diterapkan di hutan ataupun habitat gajah.

Teknologi LoRa (Long Range) hadir sebagai solusi dengan kemampuan komunikasi jarak jauh dan konsumsi daya yang sangat rendah. Hal ini memungkinkan pengiriman data posisi gajah secara efisien melalui jaringan nirkabel bahkan di daerah terpencil yang memiliki keterbatasan sinyal seluler [9]. Kombinasi LoRa dengan modul GPS pun mampu meningkatkan akurasi pelacakan lokasi secara real-time dengan biaya yang lebih rendah dibandingkan metode tradisional [10]. Meski demikian, dalam penelitian terdahulu ditemukan penurunan efisiensi transmisi data di habitat yang sangat lebat seperti hutan hujan tropis, baik dari segi kualitas sinyal maupun ketahanan perangkat terhadap kondisi lingkungan ekstrem.

Teknologi LoRa juga telah diimplementasikan dalam berbagai studi terkait monitoring satwa dan hewan ternak dengan hasil yang menjanjikan. Sebagai contoh, penelitian untuk membangun sistem monitoring aktivitas gajah menggunakan LoRa dan sensor gyroscope untuk mendapatkan data pergerakan dan status aktivitas

gajah secara real-time. Sistem ini menampilkan koordinat posisi gajah di peta dan status aktivitas seperti berdiri atau berbaring, sehingga mendukung kajian perilaku satwa di habitat aslinya. Namun, penelitian ini masih lebih difokuskan pada monitoring aktivitas tanpa mengintegrasikan fitur geofence untuk peringatan dini potensi konflik [11].

Selain itu LoRa juga sudah diintegrasikan dengan sistem Internet of Things (IoT) untuk memantau keberadaan dan keadaan hewan ternak dalam area tertentu (geofence). Teknologi ini memungkinkan monitoring real-time dan memberikan peringatan dini apabila hewan ternak keluar dari area yang ditentukan. Konsep dasar pagar virtual ini dapat diadaptasi untuk pengelolaan satwa liar seperti gajah guna mengurangi risiko konflik dengan manusia. Meskipun sistem ini cukup efektif di lingkungan ternak, tantangan utama diterapkan di habitat alami adalah keandalan perangkat dan cakupan sinyal yang harus memenuhi kebutuhan area hutan luas dan sulit dijangkau [12].

Konsep geofence, yaitu penetapan area virtual berbasis koordinat GPS, menjadi fitur penting dalam sistem pemantauan pergerakan gajah. Dengan adanya geofence, pergerakan gajah dapat dipantau secara ketat dalam batas wilayah konservasi atau area sensitif tertentu. Sistem ini mampu memberikan peringatan dini jika gajah keluar dari batas yang ditentukan, sehingga animasi mitigasi dapat segera diambil demi mencegah potensi konflik dengan manusia atau bahaya lain bagi satwa tersebut [2]. Namun, penelitian mengenai penerapan geofence masih menghadapi tantangan dalam menentukan batas wilayah yang optimal agar mengurangi kemungkinan alarm palsu dan mempercepat reaksi terhadap pergerakan gajah.

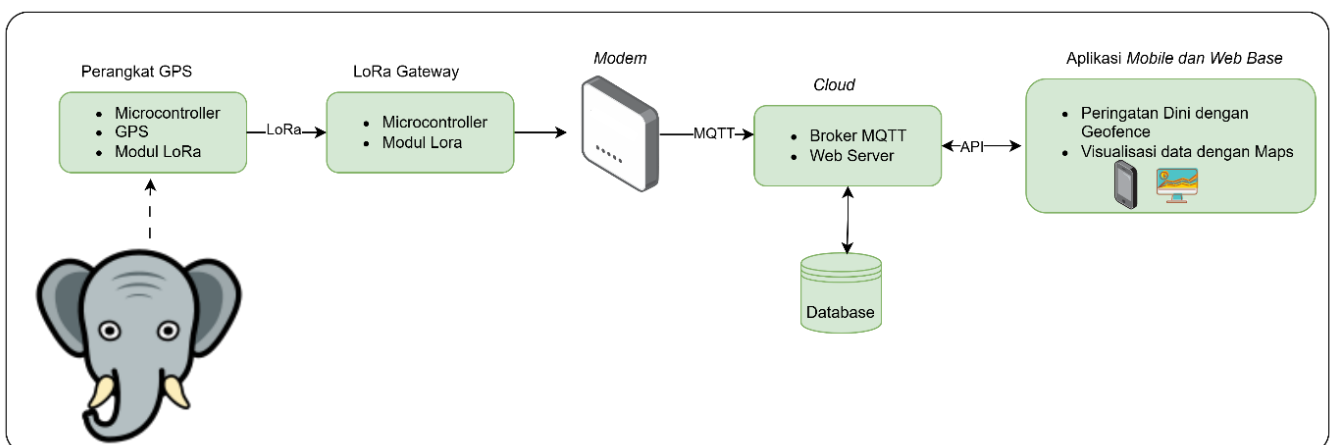
Penelitian lain memanfaatkan citra gambar untuk mendeteksi keberadaan gajah di habitatnya, yang meskipun efektif, memerlukan komputasi tinggi dan konsumsi daya yang besar sehingga kurang praktis diterapkan secara luas di area hutan yang minim sumber daya [10]. Selain itu, kemajuan kecerdasan buatan dan machine learning diaplikasikan untuk menganalisis data pergerakan gajah dari sensor LoRa dan GPS, guna mengenali pola pergerakan, memprediksi rute, dan mendeteksi ancaman lebih dini [13]. Namun, kecanggihan teknologi ini sangat bergantung pada kestabilan jaringan dalam pengiriman data ke server pusat, yang seringkali menjadi kendala di area terpencil.

Berdasarkan uraian tersebut, terdapat gap yang jelas dalam penelitian sebelumnya, yakni belum adanya sistem pemantauan gajah yang mengintegrasikan teknologi LoRa sebagai saluran komunikasi hemat daya bersama dengan konsep geofence sebagai sistem peringatan dini yang efektif dan real-time, khususnya untuk area konservasi yang luas dan terpencil. Sistem yang dikembangkan tidak hanya harus mampu memberikan data lokasi secara akurat dan efisien, tetapi juga harus dilengkapi mekanisme peringatan dini untuk mengantisipasi dan mengurangi potensi konflik manusia-gajah secara cepat dan tepat. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan mengisi gap tersebut dengan merancang sistem pemantauan berbasis LoRa dan geofence untuk peringatan dini, dengan harapan dapat meningkatkan efektivitas konservasi sekaligus mengurangi dampak negatif konflik satwa liar dengan manusia di lapangan.

II. METODE

A. Perancangan Sistem

Perancangan sistem ini meliputi perancangan secara menyeluruh. Berikut adalah blok diagram dari sistem pemantauan gajah secara umum pada Gambar 1.



Gambar 1. Blok Diagram Sistem Pemantauan Gajah

Perancangan sistem pemantauan gajah pada penelitian ini terdiri dari empat bagian utama, yakni yaitu perangkat GPS, gateway LoRa, server pusat, dan antarmuka

pengguna (user interface) yang saling terhubung membentuk satu kesatuan sistem pemantauan.

Pada bagian pertama, perangkat GPS terdiri dari mikrokontroler, modul GPS, dan modul LoRa. Mikrokontroler berfungsi sebagai pengendali utama yang membaca data koordinat dari modul GPS. Data posisi tersebut kemudian dikirimkan secara periodik melalui modul LoRa menuju gateway. Modul LoRa dipilih karena memiliki jangkauan komunikasi yang jauh dan konsumsi daya yang rendah, sehingga cocok untuk pemantauan di area luas seperti habitat gajah.

Bagian kedua adalah gateway LoRa, yang juga menggunakan mikrokontroler dan modul LoRa. Gateway berperan sebagai penerima data dari perangkat GPS. Setelah data diterima, mikrokontroler di gateway meneruskan data tersebut ke server pusat menggunakan jaringan internet, jaringan internet ini didapatkan dari perangkat Modem yang memiliki akses internet, pengiriman data dari ini menggunakan protokol MQTT (Message Queuing Telemetry Transport). Protokol ini digunakan karena ringan dan efisien untuk komunikasi data IoT yang bersifat periodik.

Selanjutnya, data yang dikirimkan oleh gateway diterima akan diterima oleh *cloud* atau server pusat. Di sisi ini terdapat broker MQTT yang bertugas menerima dan mendistribusikan data dari gateway ke aplikasi lain seperti web server dan database. Web server menyediakan layanan API (*Application Programming Interface*) yang memungkinkan data disimpan ke dalam database untuk keperluan pengolahan dan visualisasi lebih lanjut. Server pusat menjadi komponen inti yang mengelola seluruh data lokasi dan status pergerakan gajah secara terpusat.

Bagian terakhir adalah antarmuka pengguna (*user interface*) dalam bentuk aplikasi *mobile* atau aplikasi web yang berfungsi menampilkan hasil pemantauan secara visual dan memberikan peringatan dini. Melalui web server, pengguna dapat mengakses data posisi gajah yang ditampilkan pada peta digital (*maps*). Sistem ini juga dilengkapi dengan fitur geofence, yaitu batas wilayah virtual yang digunakan untuk memantau apakah gajah berada di dalam atau di luar area aman. Jika gajah melewati batas geofence, sistem akan memberikan peringatan dini kepada petugas atau pihak terkait.

B. Perancangan Elektronik

1) Perangkat GPS

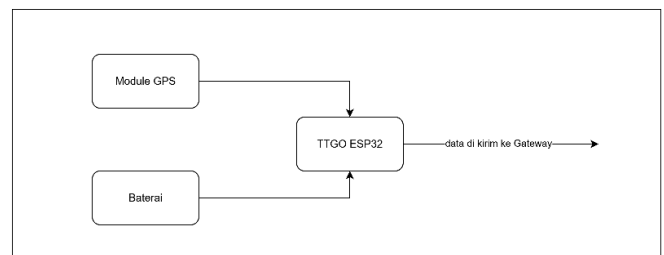
Sistem perangkat GPS pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 2 sebagai unit utama yang bertugas melakukan akuisisi data lokasi secara langsung di lapangan. Modul GPS berfungsi untuk menangkap sinyal dari beberapa satelit navigasi dan menghitung posisi geografis berdasarkan metode trilaterasi. Informasi yang diperoleh berupa koordinat lintang (*latitude*) dan bujur (*longitude*), serta dapat mencakup data tambahan seperti waktu universal (UTC), ketinggian, dan kecepatan pergerakan. Data ini umumnya dikirim dalam format standar NMEA melalui antarmuka komunikasi serial.

Data posisi yang diterima oleh modul GPS selanjutnya dikirimkan ke papan TTGO ESP32 menggunakan komunikasi serial (UART). Pada tahap ini, TTGO ESP32 berperan sebagai mikrokontroler utama yang melakukan proses pembacaan, parsing, dan validasi data GPS. Mikrokontroler akan menyeleksi informasi yang relevan, seperti koordinat dan waktu, kemudian mengolahnya ke dalam format data yang lebih ringkas dan siap untuk ditransmisikan. Proses ini penting untuk memastikan bahwa data yang dikirim memiliki struktur yang konsisten, akurat, dan efisien dalam penggunaan bandwidth.

Selain berfungsi sebagai pengendali utama sistem, TTGO ESP32 juga telah dilengkapi dengan modul komunikasi nirkabel LoRa (Long Range). Teknologi LoRa memungkinkan pengiriman data dalam jarak yang relatif jauh dengan konsumsi daya yang rendah, sehingga sangat sesuai untuk aplikasi Internet of Things (IoT) di area yang luas atau minim infrastruktur jaringan. Dengan karakteristik *low power wide area network* (LPWAN), LoRa mampu menjaga kestabilan komunikasi meskipun dalam kondisi lingkungan yang menantang. Data lokasi yang telah diproses oleh TTGO ESP32 kemudian dikirimkan melalui modul LoRa menuju perangkat gateway untuk diteruskan ke server pusat.

Dari sisi catu daya, seluruh rangkaian sistem ditopang oleh baterai sebagai sumber energi utama. Penggunaan baterai memungkinkan perangkat GPS ini beroperasi secara mandiri tanpa ketergantungan pada suplai listrik eksternal, sehingga sangat mendukung mobilitas dan fleksibilitas pemasangan di lapangan. Tipe baterai yang digunakan adalah baterai 18650, yang dikenal memiliki kapasitas penyimpanan energi yang cukup besar, ukuran yang kompak, serta mendukung pengisian ulang. Pemilihan baterai 18650 memberikan keseimbangan antara daya tahan operasional dan efisiensi ukuran perangkat, sehingga sistem dapat bekerja dalam jangka waktu yang lebih lama sebelum memerlukan proses pengisian ulang.

Secara keseluruhan, integrasi antara modul GPS, TTGO ESP32, komunikasi LoRa, dan baterai 18650 membentuk sebuah sistem perangkat GPS yang mandiri, hemat daya, dan mampu mengirimkan data lokasi secara andal untuk kebutuhan pemantauan berbasis IoT.



Gambar 1. Blok Diagram Perangkat GPS

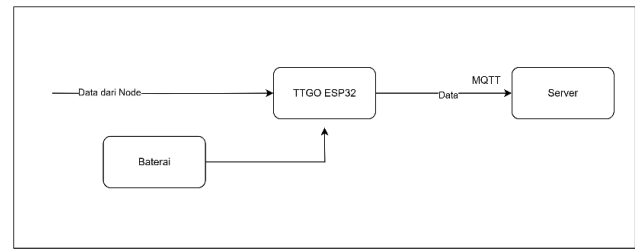
2) Perangkat Gateway LoRa

Perangkat LoRa pada sistem ini ditunjukkan pada Gambar 3 sebagai bagian utama dari arsitektur komunikasi nirkabel jarak jauh yang digunakan untuk mentransmisikan data lokasi. Sistem ini dirancang untuk mendukung pemantauan secara real-time dengan konsumsi daya yang rendah, sehingga cocok untuk implementasi di area yang minim infrastruktur jaringan. Modul GPS berfungsi untuk memperoleh data koordinat geografis berupa lintang (latitude) dan bujur (longitude), serta informasi pendukung lainnya seperti waktu dan kecepatan pergerakan. Data lokasi tersebut kemudian dikirimkan ke papan mikrokontroler TTGO ESP32 untuk diproses lebih lanjut.

TTGO ESP32 berperan sebagai pusat pengendali sistem (central controller) yang melakukan parsing data NMEA dari modul GPS, melakukan validasi data, serta mengemas informasi yang diperlukan ke dalam format yang sesuai untuk dikirimkan melalui jaringan. Pada sistem ini, komunikasi data menuju server dilakukan menggunakan protokol MQTT (Message Queuing Telemetry Transport). Protokol MQTT dipilih karena bersifat ringan (lightweight), memiliki overhead yang kecil, serta dirancang khusus untuk aplikasi Internet of Things (IoT) yang membutuhkan efisiensi bandwidth dan konsumsi daya rendah. Dengan mekanisme publish-subscribe, perangkat dapat mengirimkan data ke broker MQTT tanpa harus mempertahankan koneksi yang kompleks, sehingga komunikasi menjadi lebih stabil dan efisien.

Data yang telah diproses oleh TTGO ESP32 selanjutnya diteruskan ke server melalui jaringan yang tersedia. Di sisi server, data tersebut dapat disimpan dalam basis data dan ditampilkan pada antarmuka pemantauan untuk kebutuhan analisis maupun pelacakan pergerakan objek. Dengan integrasi ini, sistem mampu menyediakan informasi lokasi secara kontinu dan terpusat.

Dari sisi daya, sistem dirancang agar dapat beroperasi secara mandiri tanpa ketergantungan pada sumber listrik eksternal. Baik perangkat gateway LoRa maupun perangkat GPS menggunakan baterai tipe 18650 sebagai sumber energinya. Baterai 18650 dipilih karena memiliki kapasitas penyimpanan energi yang relatif besar, ukuran yang ringkas, serta mudah diperoleh di pasaran. Selain itu, baterai jenis ini mendukung pengisian ulang (rechargeable), sehingga lebih ekonomis dan ramah lingkungan untuk penggunaan jangka panjang. Dengan dukungan baterai 18650, perangkat dapat dioperasikan di lapangan dalam waktu yang cukup lama sebelum memerlukan pengisian ulang, sehingga meningkatkan fleksibilitas dan mobilitas sistem secara keseluruhan.



Gambar 2. Blok Diagram Perangkat Gateway LoRa

C. Perancangan Dashboard

1) Perancangan Backend

Backend merupakan bagian dari sistem yang berfungsi untuk menerima, mengolah, dan menyimpan data yang dikirim oleh perangkat gateway LoRa. Pada sistem ini, backend menjadi pusat pengelolaan data sehingga seluruh informasi lokasi yang diterima dari perangkat di lapangan dapat tersimpan dengan baik dan ditampilkan kembali melalui aplikasi pemantauan. Backend dikembangkan menggunakan bahasa pemrograman Python dengan framework Django. Python dipilih karena sintaksnya sederhana, mudah dipahami, dan memiliki banyak library pendukung yang memudahkan proses pengembangan. Selain itu, Python juga cukup fleksibel untuk diintegrasikan dengan berbagai layanan lain, termasuk komunikasi berbasis MQTT maupun pengolahan data berbentuk JSON.

Penggunaan Django membantu proses pengembangan menjadi lebih terstruktur. Framework ini memiliki konsep Model-View-Template (MVT) yang memisahkan bagian logika program, tampilan, dan pengelolaan data. Dengan struktur tersebut, kode program menjadi lebih rapi dan mudah dikembangkan kembali di kemudian hari. Pada bagian model, Django menyediakan fitur Object Relational Mapping (ORM) yang memudahkan pengembang dalam mengelola database tanpa harus menuliskan query SQL secara langsung.

Dari sisi keamanan, Django sudah menyediakan fitur bawaan seperti sistem autentikasi pengguna, pengaturan hak akses, serta perlindungan terhadap serangan umum pada aplikasi web. Hal ini penting untuk menjaga keamanan data lokasi yang tersimpan di database agar tidak mudah diakses oleh pihak yang tidak berwenang. Secara keseluruhan, penggunaan Python dan Django dalam perancangan backend memberikan kemudahan dalam pengembangan sistem, pengelolaan database yang lebih praktis, serta keamanan yang cukup baik untuk mendukung sistem pemantauan berbasis IoT.

2) Perancangan Frontend

Frontend merupakan bagian dari sistem yang berfungsi untuk menampilkan data hasil pemrosesan dari backend kepada pengguna dalam bentuk antarmuka yang mudah dipahami. Jika backend mengelola dan menyimpan data di server, maka frontend menjadi media bagi pengguna untuk memantau informasi secara langsung.

Pada sistem ini, frontend dikembangkan menggunakan framework React. Framework ini dipilih karena ringan, cepat, dan mampu menampilkan antarmuka yang dinamis serta responsif. Dengan konsep berbasis komponen, pengembangan tampilan menjadi lebih terstruktur dan mudah untuk dikembangkan kembali apabila sistem ingin ditambahkan fitur baru.

Melalui frontend, pengguna dapat melihat posisi gajah secara real-time berdasarkan data koordinat yang diterima dari backend. Informasi lokasi ditampilkan dalam bentuk peta sehingga pergerakan dapat dipantau dengan jelas. Selain itu, tersedia juga informasi pendukung seperti waktu pembaruan data terakhir dan status pergerakan.

3) Database

Database digunakan untuk menyimpan seluruh data hasil pemantauan, termasuk data koordinat lokasi, waktu pengiriman, serta identitas perangkat. Penyimpanan data ini penting agar riwayat pergerakan dapat dicatat dan dianalisis kembali jika diperlukan, misalnya untuk melihat pola pergerakan atau melakukan evaluasi sistem.

Pada sistem ini, database yang digunakan adalah PostgreSQL sebagai database utama. PostgreSQL dipilih karena memiliki performa yang stabil dalam menangani data dalam jumlah besar serta mendukung berbagai tipe data yang kompleks. Selain itu, PostgreSQL juga mendukung ekstensi spasial seperti PostGIS yang memungkinkan pengolahan data koordinat geografis secara lebih akurat, termasuk perhitungan jarak dan pengecekan area geofence.

Database ini terhubung langsung dengan backend yang dikembangkan menggunakan Django. Setiap data yang diterima dari gateway melalui protokol MQTT akan diproses terlebih dahulu oleh backend, kemudian disimpan ke dalam database. Dengan mekanisme ini, data dapat diakses kembali oleh frontend untuk ditampilkan secara real-time maupun dalam bentuk riwayat pergerakan.

Integrasi antara backend dan PostgreSQL membuat proses penyimpanan serta pengambilan data menjadi lebih terstruktur dan efisien. Dengan demikian, sistem tidak hanya mampu melakukan pemantauan secara langsung, tetapi juga menyediakan data historis yang dapat digunakan untuk analisis lebih lanjut.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Latensi MQTT

Latensi MQTT diukur untuk mengetahui seberapa lama waktu yang dibutuhkan data dari gateway hingga diterima oleh server melalui protokol MQTT. Pengukuran ini penting karena latensi berpengaruh langsung terhadap kecepatan sistem dalam menampilkan data lokasi secara real-time. Semakin kecil nilai latensi, maka semakin cepat pula sistem merespons perubahan posisi yang terjadi di lapangan.

4) Geofence

Geofence merupakan salah satu metode yang digunakan untuk menentukan apakah suatu titik koordinat (longitude dan latitude) berada di dalam atau di luar suatu wilayah tertentu. Pada sistem ini, metode geofence dimanfaatkan untuk membandingkan posisi yang dikirim oleh perangkat GPS dengan batas koordinat kawasan yang telah ditentukan sebelumnya. Dengan cara ini, sistem dapat secara otomatis mendeteksi apakah perangkat GPS—yang dipasang pada gajah—memasuki area pemukiman atau tidak.

Wilayah geofence biasanya direpresentasikan dalam bentuk batas koordinat tertentu, misalnya berupa poligon (beberapa titik koordinat yang membentuk area tertutup) atau batas minimum dan maksimum lintang serta bujur (bounding box). Setiap kali data lokasi baru diterima oleh backend, sistem akan melakukan proses pengecekan terhadap batas wilayah tersebut. Jika hasil perbandingan menunjukkan bahwa koordinat berada di dalam kawasan pemukiman, maka sistem akan mengaktifkan mekanisme peringatan dini.

Sebagai media notifikasi, sistem ini menggunakan platform Telegram. Telegram dipilih karena bersifat open source, memiliki dokumentasi API yang lengkap, serta mendukung pengiriman pesan secara otomatis melalui bot. Selain itu, Telegram juga banyak digunakan oleh masyarakat sehingga notifikasi dapat diterima dengan cepat dan mudah diakses melalui berbagai perangkat, baik smartphone maupun desktop.

Dengan adanya fitur geofence ini, sistem tidak hanya berfungsi sebagai alat pemantauan lokasi, tetapi juga sebagai sistem peringatan dini (early warning system). Ketika perangkat GPS terdeteksi berada di dalam kawasan yang telah ditetapkan sebagai zona rawan, backend akan secara otomatis mengirimkan pesan peringatan ke grup atau akun Telegram yang telah dikonfigurasi sebelumnya. Berikut adalah algoritma geofence yang digunakan.

```
Function check_geofence(lat1, lon1, lat2, lon2, radius_km):
  R ← 6371 // radius bumi dalam kilometer

  dlat ← radians(lat2 - lat1)
  dlon ← radians(lon2 - lon1)

  a ← sin(dlat / 2)^2 + cos(radians(lat1)) * cos(radians(lat2)) * sin(dlon / 2)^2
  c ← 2 * atan2( sqrt(a), sqrt(1 - a) )

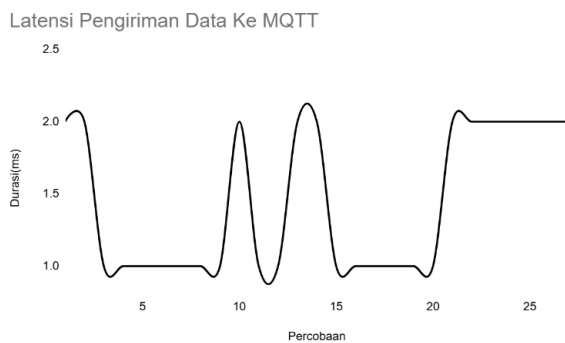
  distance ← R * c // hitung jarak antar titik

  IF distance ≤ radius_km THEN
    inside ← TRUE // titik berada di dalam geofence
    send notif
  ELSE
    inside ← FALSE // titik di luar geofence
  END IF

  RETURN (inside, distance)
END FUNCTION
```

Gambar 4 menunjukkan grafik latensi pengiriman data dari gateway ke server menggunakan protokol MQTT. Grafik tersebut memperlihatkan waktu tempuh data untuk setiap proses pengiriman yang dilakukan selama pengujian. Dari hasil pengukuran yang telah dilakukan, diperoleh rata-rata waktu pengiriman sebesar 1,44 ms. Nilai tersebut menunjukkan bahwa proses transmisi data berlangsung sangat cepat dan relatif stabil. Dengan latensi yang rendah, sistem mampu mengirim dan menerima data lokasi hampir tanpa jeda yang berarti. Hal ini penting terutama pada sistem pemantauan berbasis IoT yang membutuhkan pembaruan data secara berkala dan akurat.

Rendahnya nilai latensi ini mengindikasikan bahwa komunikasi antara gateway dan server berjalan dengan efisien. Selain itu, hasil ini juga menunjukkan bahwa penggunaan protokol MQTT cukup tepat untuk sistem ini karena mampu memberikan respons waktu yang baik dengan overhead komunikasi yang kecil. Dengan demikian, sistem dapat mendukung kebutuhan pemantauan dan peringatan dini secara optimal.



Gambar 3. Latensi Pengiriman Data Dengan MQTT

B. Latensi Notifikasi

Latensi peringatan dini diukur untuk mengetahui total waktu yang dibutuhkan sistem sejak data lokasi diterima hingga notifikasi berhasil dikirim ke pengguna. Proses ini mencakup dua tahap utama, yaitu perhitungan menggunakan metode geofence untuk menentukan apakah posisi berada di dalam area tertentu, serta proses pengiriman pesan peringatan ke platform Telegram. Gambar 5 menunjukkan grafik latensi notifikasi berdasarkan beberapa kali percobaan. Sumbu horizontal menunjukkan jumlah percobaan, sedangkan sumbu vertikal menunjukkan waktu yang dibutuhkan dalam satuan detik. Dari grafik tersebut terlihat bahwa waktu pemrosesan relatif stabil, meskipun terdapat beberapa lonjakan kecil pada percobaan tertentu.

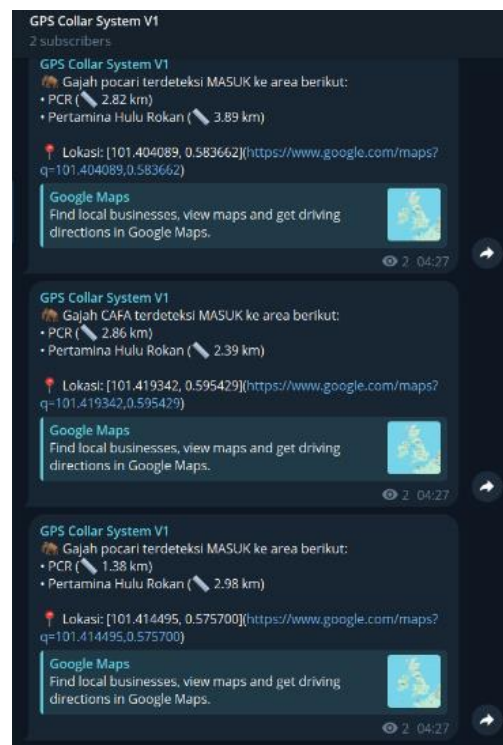
Berdasarkan hasil pengujian, sistem membutuhkan waktu rata-rata 0,89 detik untuk menyelesaikan proses perhitungan geofence sekaligus mengirimkan notifikasi peringatan dini ke Telegram. Nilai ini menunjukkan bahwa sistem mampu memberikan respons yang cukup cepat ketika gajah memasuki area yang telah ditentukan.

Dengan waktu respons kurang dari satu detik, sistem dapat dikategorikan memiliki performa yang baik untuk kebutuhan pemantauan dan peringatan dini. Hal ini penting agar informasi dapat segera diterima oleh pihak terkait sehingga tindakan antisipasi dapat dilakukan secepat mungkin.



Gambar 4. Latensi Pengiriman Peringatan ke Telegram

Gambar 6 menunjukkan tampilan fitur peringatan dini yang dikirimkan melalui platform Telegram. Notifikasi ini dikirim secara otomatis oleh sistem ketika perangkat GPS mendeteksi bahwa gajah telah memasuki area yang telah ditentukan dalam geofence. Pesan peringatan menampilkan beberapa informasi penting, yaitu nama gajah, keterangan bahwa gajah masuk ke area tertentu, serta daftar kawasan yang terdeteksi berada dalam radius terdekat. Selain itu, sistem juga menyertakan informasi jarak antara posisi gajah dengan lokasi referensi, sehingga pengguna dapat mengetahui seberapa dekat gajah dengan area tersebut.



Gambar 5. Tampilan Peringatan Melalui Telegram

Pada notifikasi juga dicantumkan koordinat lokasi dalam bentuk latitude dan longitude yang dilengkapi dengan tautan langsung ke peta digital. Dengan adanya

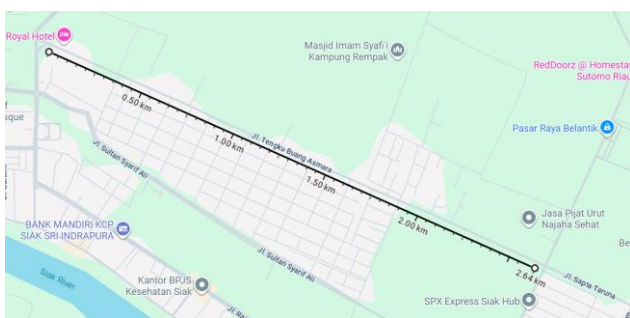
tautan ini, pengguna dapat segera membuka lokasi tersebut melalui aplikasi peta untuk melihat posisi secara lebih detail. Tampilan peringatan dini melalui Telegram ini memudahkan pengguna menerima informasi secara cepat tanpa harus membuka dashboard monitoring. Dengan demikian, ketika gajah melewati batas area tertentu, pihak terkait dapat segera mengambil langkah antisipasi berdasarkan informasi yang diterima secara real-time.

C. Jangkauan LoRa

Pengujian jangkauan LoRa dilakukan pada area yang relatif terbuka dan minim rintangan seperti gedung tinggi maupun pepohonan lebat. Pemilihan lokasi dengan kondisi tersebut bertujuan untuk memperoleh performa sinyal yang maksimal, sehingga hasil pengujian dapat menggambarkan kemampuan jangkauan LoRa dalam kondisi yang mendekati ideal (line of sight).

Pengujian ini dilaksanakan di Jalan Tengku Buang Asmara, yang berada di wilayah Siak Sri Indrapura, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 7. Lokasi ini dipilih karena memiliki ruas jalan yang cukup panjang dan terbuka, sehingga memungkinkan pengukuran jarak komunikasi secara bertahap dengan variasi jarak tertentu dari gateway. Dalam proses pengujian, perangkat GPS dengan modul LoRa dibawa menjauh dari gateway sambil tetap memantau kestabilan pengiriman data. Jarak tempuh diukur berdasarkan posisi pada peta digital, kemudian dibandingkan dengan keberhasilan penerimaan data di sisi gateway. Dengan metode ini, dapat diketahui sejauh mana komunikasi LoRa tetap stabil sebelum terjadi penurunan kualitas sinyal atau kehilangan paket data.

Hasil pengujian jangkauan ini menjadi dasar untuk mengevaluasi efektivitas penggunaan LoRa pada sistem, terutama dalam penerapan di area lapangan yang luas seperti kawasan hutan atau wilayah penyangga pemukiman.



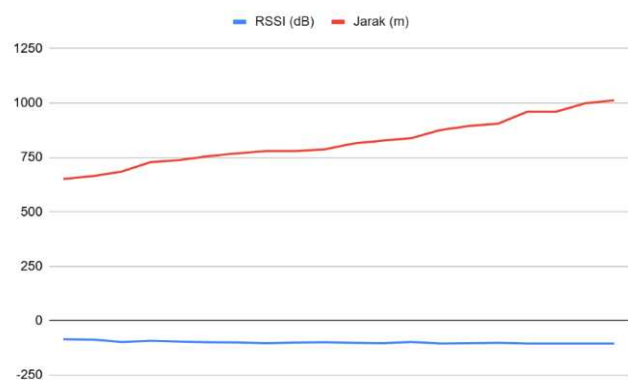
Gambar 6. Lokasi Pengujian Jarak

Pengujian ini juga dilakukan untuk mendapatkan nilai Received Signal Strength Indicator (RSSI) pada setiap jarak yang diukur. Berikut adalah Tabel 1 dan Gambar 8 yang merupakan tabel dan grafik perbandingan antara jarak dan sinyal RSSI yang didapatkan.

TABEL I
PERBANDINGAN RSSI DAN JARAK

No	RSSI (dB)	Jarak
1	-85	651.6959158
2	-87	663.9998496
3	-98	684.7130142
4	-93	728.3596503
5	-96	737.6932745
6	-99	756.3553546
7	-100	769.0450684
8	-104	779.3507352
9	-101	779.5920528
10	-99	786.8929714
11	-102	814.3060838
12	-104	827.1336534
13	-98	838.4887197
14	-105	875.7266
15	-104	894.5758438
16	-102	905.6944512
17	-105	960.0497581
18	-105	960.504103
29	-105	999.0445176
20	-105	1012.3887

Berdasarkan pengujian yang dilakukan jarak terjauh yang di dapatkan adalah 1012 m atau sekitar 1 km dengan nilai RSSI sebesar -105 dB. Kedua nilai ini akan berbanding terbalik, semakin kecil nilai jarak yang diperoleh maka akan semakin besar nilai RSSI, begitu juga sebaliknya. Hal ini menunjukkan kemampuan LoRa yang mumpuni untuk melakukan pengiriman data secara langsung (peer to peer).



Gambar 7. Kurva RSSI dan Jarak

D. Tampilan Dashboard

1) Tampilan Visualisasi Maps

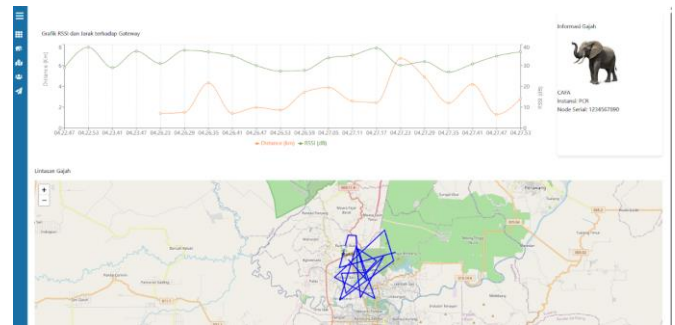
Fitur ini memungkinkan pengguna untuk melihat posisi gajah secara langsung pada peta digital, sehingga memudahkan dalam mengetahui lokasi terkini secara

visual. Dengan adanya tampilan peta, informasi koordinat yang sebelumnya berupa angka lintang dan bujur dapat dipahami dengan lebih mudah karena ditampilkan dalam bentuk titik lokasi pada area geografis yang sesuai.

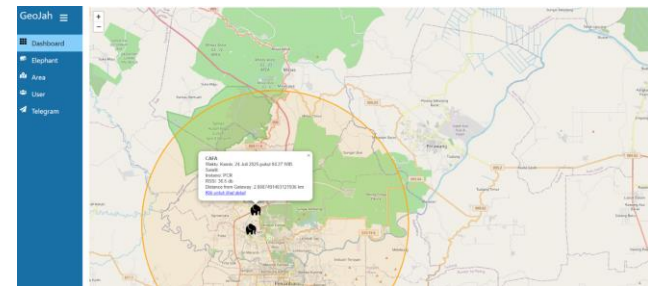
Pada halaman monitoring, posisi gajah ditandai dengan marker pada peta. Ketika marker tersebut dipilih, sistem akan menampilkan informasi tambahan seperti waktu pembaruan terakhir dan detail koordinat. Selain itu, area geofence juga divisualisasikan dalam bentuk lingkaran atau batas wilayah tertentu sehingga pengguna dapat melihat apakah posisi gajah berada di dalam atau di luar kawasan yang telah ditentukan.

Gambar 9 merupakan visualisasi posisi gajah menggunakan layanan peta digital berbasis OpenStreetMap. Integrasi peta ini dilakukan pada frontend berbasis React, sehingga pembaruan posisi dapat ditampilkan secara dinamis mengikuti data yang diterima dari backend. Dengan fitur ini, proses pemantauan menjadi lebih intuitif, interaktif, dan mudah dipahami oleh pengguna.

gateway serta peta jalur pergerakan. Kombinasi grafik dan peta ini membuat proses analisis menjadi lebih informatif, karena pengguna dapat memahami hubungan antara posisi geografis dan jarak komunikasi dalam satu tampilan yang terintegrasi.



Gambar 9. Visualisasi Pergerakan Gajah



Gambar 8. Visualisasi Posisi Gajah Dengan Maps

2) Tampilan Pergerakan Gajah

Fitur ini memungkinkan pengguna untuk melihat histori pergerakan gajah dalam rentang waktu tertentu, misalnya 24 jam terakhir. Dengan adanya fitur ini, pengguna tidak hanya mengetahui posisi terkini, tetapi juga dapat menganalisis pola pergerakan berdasarkan data yang telah tersimpan di database.

Pada halaman histori, sistem menampilkan dua bentuk visualisasi utama. Pertama, grafik yang menunjukkan jarak antara gajah dan gateway dalam periode waktu tertentu. Grafik ini membantu pengguna melihat perubahan jarak secara berkala, sehingga dapat diketahui kapan gajah bergerak mendekati atau menjauhi gateway. Informasi ini berguna untuk evaluasi jangkauan komunikasi LoRa maupun analisis aktivitas pergerakan.

Kedua, sistem menampilkan jalur pergerakan gajah pada peta digital berbasis OpenStreetMap. Jalur tersebut digambarkan dalam bentuk garis yang menghubungkan titik-titik koordinat berdasarkan urutan waktu. Dengan tampilan ini, pengguna dapat melihat arah dan pola pergerakan gajah secara lebih jelas dalam periode yang dipilih.

Gambar 10 merupakan visualisasi histori pergerakan gajah yang dilengkapi dengan grafik jarak terhadap

IV. KESIMPULAN

Hasil pengujian menunjukkan bahwa rata-rata waktu pengiriman data dari gateway ke server melalui protokol MQTT adalah 1.44 ms, menandakan proses transmisi data berjalan cepat dan efisien. Waktu pengiriman notifikasi ke pengguna rata-rata 0.89 detik, masih tergolong baik untuk sistem IoT berbasis internet. Sistem juga mampu beroperasi hingga jarak 1 km dengan nilai RSSI -105 dB, yang menunjukkan komunikasi masih stabil pada jarak tersebut. Selain itu, dashboard berbasis web berhasil dideploy dan dapat digunakan untuk memantau data posisi gajah dan juga pergerakan gajah secara real-time dengan tampilan yang mudah dipahami

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Politeknik Caltex Riau (PCR) yang telah memberikan dukungan pendanaan dan fasilitas penelitian sehingga kegiatan ini dapat terlaksana dengan baik. Dukungan tersebut sangat membantu dalam proses pengembangan, pengujian, dan implementasi sistem yang menjadi fokus penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. D. Rahayani, A. Gunawan, dan A. U. Ariwibowo, "Implementation of Radio Frequency as Elephant Presence Detector for the Human Elephant Conflict Prevention," 2014.
- [2] F. Zhao *dkk.*, "Monitoring of human activities around the Asian elephant reserve based on NPP-VIIRS night light remote sensing images: A case study in Xishuangbanna, China," *Front. Ecol. Evol.*, vol. 11, hal. 1088722, Apr. 2023, doi: 10.3389/fevo.2023.1088722.
- [3] L. Brickson, L. Zhang, F. Vollrath, I. Douglas-Hamilton, dan A. J. Titus, "Elephants and algorithms: a review of the current and future role of AI in elephant monitoring," *J. R. Soc. Interface*, vol. 20, no. 208, hal. 20230367, Nov. 2023, doi: 10.1098/rsif.2023.0367.
- [4] Surbhi Gupta, "Deep Vision Based Surveillance System to Prevent Train-Elephant Collisions," Apr. 2021, doi: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-192950/v1>.

- [5] N. Suganthi dan N. Rajathi, "Elephant Intrusion Detection and Repulsive System," vol. 7, no. 4, 2018.
- [6] S. Bhavani, D. Aathish, S. Iswarya, A. Kathiravan, dan P. Kavin, "Lora Based Elephant Detection System Near Railroads," *Proceeding Int. Conf. Sci. Eng.*, vol. 11, no. 1, hal. 1257–1267, Feb. 2023, doi: 10.52783/cien-ceng.v11i1.272.
- [7] R. Rathnayaka, N. Batuwangala, M. Fernando, dan W. Fernando, "Elephant Intrusion Detection, Deterrence and Warning System ('Tusker Alert')."
- [8] K. Dhanush, "An Intelligent Elephant Intrusion Prevention System Using High- Frequency Sound and Smart Alerts," vol. 12, no. 07, 2025.
- [9] D. K. Vidyavathi, N. S. Elakkiya, dan S. Abinaya, "Elephant Safety through Cutting-Edge Monitoring Technology," vol. 14, no. 4, 2025.
- [10] M. Zeppelzauer dan A. S. Stoeger, "Establishing the fundamentals for an elephant early warning and monitoring system," *BMC Res. Notes*, vol. 8, no. 1, hal. 409, Dec. 2015, doi: 10.1186/s13104-015-1370-y.
- [11] N. Tegar Rezha, "SYSTEM MONITORING AKTIVITAS GAJAH MENGGUNAKAN LONG RANGE (LORA)," 2023.
- [12] I. K. C. Arta, "Animal Tracking Berbasis IoT," Sep. 2022.
- [13] Elizabeth J. Golebi, "Elephants' olfactory communication and implications for conservation monitoring", doi: <https://conbio.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/cobi.13850>.