

RANCANGAN SISTEM *TRACKING* KENDARAAN *AIRSIDE* BERBASIS IoT DENGAN GPS-LoRa DAN FITUR PERINGATAN DINI DI UPBU KELAS III MAIMUN SALEH

Lulu Salsitiara¹, Muh Wildan², Johan Wahyudi³

¹²³ Program Studi Teknik Navigasi Udara, Politeknik Penerbangan Indonesia Curug, Jl. Raya PLP Curug, Desa Serdang Wetan, Kecamatan Legok, Kabupaten Tangerang, Banten 15820, Indonesia.

Keywords:

Internet of Things;

Airside;

ESP32;

GPS;

LoRa;

Geofencing;

Speed Alert;

Aviation Safety;

Correspondent Author

Email:

lulusalsitiara22@gmail.com



Copyright © [JITET](http://www.jitet.org) (Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan). This article is an open access article distributed under terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC)

Abstrak. Penelitian ini bertujuan merancang sistem monitoring pergerakan kendaraan sisi udara berbasis Internet of Things (IoT) di UPBU Maimun Saleh Sabang untuk mengatasi keterbatasan pengawasan manual yang berpotensi menimbulkan risiko keselamatan. Sistem yang dikembangkan menggunakan mikrokontroler ESP32, modul GPS, komunikasi LoRa, serta protokol MQTT untuk mengirimkan data posisi kendaraan secara *real-time* ke dashboard berbasis web. Selain itu, sistem dilengkapi dengan fitur peringatan dini berupa buzzer dan indikator visual untuk mendeteksi pelanggaran batas kecepatan dan area (geofencing). Penelitian ini menggunakan pendekatan *engineering design* dan *experimental research* yang meliputi proses perancangan, integrasi sistem, serta pengujian kinerja pada lingkungan simulasi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu menghasilkan akurasi posisi hingga $\pm 0,712$ meter dan komunikasi data yang stabil hingga jarak 5 km dengan nilai RSSI mencapai -101 dBm serta delay rata-rata sekitar 1,5 detik. Dengan demikian, sistem yang dirancang dinilai layak sebagai prototype untuk mendukung peningkatan keselamatan dan efisiensi monitoring kendaraan di lingkungan bandar udara.

Abstract. This study aims to design an Internet of Things (IoT)-based airside vehicle monitoring system at UPBU Maimun Saleh Sabang to address the limitations of manual supervision that may lead to safety risks. The system utilizes an ESP32 microcontroller, GPS module, LoRa communication, and MQTT protocol to transmit real-time vehicle position data to a web-based dashboard. In addition, an early warning system is implemented using a buzzer and visual indicators to detect speed limit violations and geofencing breaches. This research adopts an engineering design and experimental approach, including system design, integration, and performance evaluation under simulated operational conditions. The results show that the system achieves positioning accuracy of up to ± 0.712 meters and stable communication up to 5 km with an RSSI of -101 dBm and an average delay of approximately 1.5 seconds. Therefore, the proposed system is considered feasible as a prototype to enhance safety and monitoring efficiency in airport environments.

1. PENDAHULUAN

Pertumbuhan lalu lintas penerbangan menuntut pengelolaan operasi bandar udara yang semakin efisien dan berorientasi pada keselamatan. Salah satu area dengan tingkat risiko operasional yang tinggi adalah sisi udara (*airside*) [1], yang meliputi *runway*, *taxiway*,

apron, serta jalur pergerakan kendaraan operasional. Pada area ini beroperasi berbagai kendaraan dan *Ground Support Equipment* (GSE) untuk mendukung kegiatan penerbangan, sehingga diperlukan sistem pengelolaan dan pemantauan yang memadai guna menjamin keselamatan dan kelancaran

operasional. Keselamatan di sisi udara harus dijaga melalui pengendalian pergerakan kendaraan dan personel agar potensi insiden yang dapat mengganggu operasi pesawat dapat diminimalkan [2].

Secara konseptual, pengelolaan keselamatan di bandar udara mengacu pada penerapan *Safety Management System* (SMS), yang menekankan pentingnya identifikasi bahaya, penilaian risiko, serta pengendalian risiko secara sistematis [3], [4]. Dalam konteks ini, sistem pemantauan kendaraan operasional secara *real-time* menjadi salah satu komponen penting untuk mendukung pengawasan yang efektif. Pendekatan berbasis *Internet of Things* (IoT) melalui pemanfaatan teknologi *Global Positioning System* (GPS), komunikasi nirkabel seperti LoRa, serta mekanisme *geofencing* memungkinkan pengiriman data posisi kendaraan secara kontinu ke pusat kendali. Dengan demikian, pengawasan tidak hanya bersifat administratif, tetapi juga mampu mendukung deteksi dini terhadap potensi pelanggaran operasional dan kondisi tidak aman [5].

Beberapa penelitian sebelumnya telah mengkaji penerapan teknologi IoT untuk pelacakan kendaraan. Ramli *et al.* [6] mengembangkan sistem pelacakan kendaraan berbasis LoRa yang menunjukkan kemampuan komunikasi jarak jauh dengan konsumsi daya rendah, di mana sistem masih mampu beroperasi pada level sinyal sekitar -100 dBm hingga -120 dBm. Stabilitas ini disebabkan oleh karakteristik modulasi LoRa yang menggunakan teknik Chirp Spread Spectrum (CSS), sehingga lebih tahan terhadap interferensi dan pelemahan sinyal dibandingkan komunikasi konvensional. Namun, penelitian tersebut hanya berfokus pada pengiriman data posisi tanpa mengintegrasikan fitur keselamatan seperti peringatan dini atau pembatasan area operasional. Murillo *et al.* [7] melakukan evaluasi performa jaringan LoRa pada sistem transportasi cerdas dan menunjukkan bahwa komunikasi tetap stabil pada Received Signal Strength Indicator (RSSI) sekitar -101 dBm dengan tingkat keberhasilan pengiriman data yang tinggi. Kondisi ini dipengaruhi oleh penggunaan konfigurasi spreading factor yang tinggi, sehingga meningkatkan sensitivitas penerima, namun berdampak pada peningkatan latensi transmisi.

Penelitian ini menekankan aspek keandalan komunikasi, tetapi belum mengintegrasikan sistem monitoring berbasis keselamatan operasional secara langsung. Pratama [8] mengembangkan sistem pelacakan berbasis LoRa untuk pendaki gunung dengan hasil akurasi GPS mencapai $\pm 0,7$ meter pada kondisi ruang terbuka. Tingkat akurasi ini dipengaruhi oleh penggunaan modul GPS yang mendukung multi-konstelasi GNSS (GPS dan GLONASS), serta kondisi lingkungan yang minim hambatan (obstacle), sehingga kesalahan multipath dapat diminimalkan. Meskipun memiliki tingkat akurasi yang baik, penelitian ini belum mempertimbangkan dinamika lingkungan operasional terbatas seperti bandar udara yang memiliki interferensi sinyal dan pergerakan objek yang lebih kompleks. Sementara itu, penelitian oleh Fajaryasa [9] dan Wisnuardana [10] telah mengimplementasikan sistem monitoring kendaraan airside berbasis GPS dan LoRa dengan visualisasi *real-time*, tetapi masih terbatas pada fungsi pemantauan tanpa dilengkapi fitur peringatan dini maupun pembatasan area operasional.

Di sisi lain, kondisi operasional di UPBU Kelas III Maimun Saleh menunjukkan bahwa sistem pemantauan kendaraan airside masih dilakukan secara manual melalui pengamatan visual dan pencatatan oleh petugas. Hal ini menyebabkan keterbatasan dalam memperoleh informasi posisi kendaraan secara *real-time* serta meningkatkan potensi keterlambatan dalam mendeteksi risiko keselamatan. Insiden penabrakan fasilitas *taxiway edge light* di belokan *taxiway* menuju *runway* 28 pada tanggal 5 Juni 2024, sebagaimana dilaporkan melalui Surat Kepala UPBU Kelas III Maimun Saleh kepada Kepala Balai Teknik Penerbangan Nomor AU.107/01/VII/MUS-2024 tanggal 2 Juli 2024 tentang kerusakan peralatan *Airfield Control and Operation System* (ACOS), *Runway and Taxiway Indicator Light* (RTIL), dan *Airfield Lighting Facilities* (AFL) menjadi salah satu indikasi nyata adanya potensi risiko operasional akibat keterbatasan sistem pengawasan.

Selain itu, peningkatan intensitas pergerakan kendaraan dan pesawat yang tercermin dari data kapasitas bandar udara (*Notice of Airport Capacity/NAC*) UPBU Maimun Saleh periode *Winter* 2024/2025 dan *Summer* 2025 menunjukkan bahwa tingkat

pemanfaatan *apron* pada jam-jam tertentu telah mendekati batas kapasitas yang ditetapkan. Kondisi ini menunjukkan adanya kesenjangan antara kondisi ideal yang direkomendasikan oleh regulasi dengan praktik operasional di lapangan.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Operasi Airside dan Pengendalian Kendaraan

Airside merupakan area terbatas bandar udara yang memiliki tingkat risiko keselamatan tinggi karena melibatkan pergerakan pesawat, personel, dan kendaraan operasional secara bersamaan [1], [4]. Oleh karena itu, pengendalian pergerakan kendaraan (*vehicle movement control*) menjadi bagian penting dalam menjaga keselamatan, termasuk pengaturan kecepatan, jalur pergerakan, serta pembatasan area operasional [11], [4]. Prinsip ini sejalan dengan *Safety Management System* (SMS) yang menekankan pengendalian risiko secara preventif [3].

2.2 Pengawasan Pergerakan di Permukaan Bandara

ICAO merekomendasikan *Advanced Surface Movement Guidance and Control System* (A-SMGCS) sebagai sistem utama untuk pengawasan, pemanduan, dan pengendalian pergerakan di permukaan bandar udara [12]. Namun, sistem ini bersifat *safety critical* dan membutuhkan infrastruktur kompleks. Oleh karena itu, pada penelitian ini digunakan pendekatan sistem monitoring berbasis IoT sebagai *supporting system* (non-safety critical) untuk meningkatkan *situational awareness* terhadap pergerakan kendaraan airside.

2.3 Internet of Things (IoT)

Internet of Things (IoT) merupakan konsep yang memungkinkan perangkat fisik saling terhubung melalui jaringan internet untuk mengumpulkan, mengirimkan, dan memproses data secara *real-time* guna mendukung sistem monitoring dan pengambilan keputusan secara otomatis [13]. IoT terdiri dari sensor, mikrokontroler, jaringan komunikasi, serta sistem informasi yang saling terintegrasi untuk mengumpulkan, mengirimkan, dan mengolah data secara *real-time*. Dalam penerapannya, IoT memungkinkan perangkat seperti kendaraan

berfungsi sebagai node yang dapat memonitor parameter operasional melalui sensor dan mentransmisikan data ke sistem pusat untuk analisis dan pengambilan keputusan [14].

2.4 Teknologi GPS

GPS merupakan sistem navigasi berbasis satelit yang digunakan untuk menentukan posisi objek secara akurat melalui metode triliterasi dengan memanfaatkan sinyal dari beberapa satelit GNSS. Penggunaan modul GPS yang mendukung multi-GNSS seperti GPS dan GLONASS dapat meningkatkan akurasi dan stabilitas posisi. Dalam penelitian ini, GPS berfungsi sebagai sumber data utama untuk memperoleh koordinat dan kecepatan kendaraan secara *real-time* [15].

2.5 Komunikasi LoRa

LoRa merupakan teknologi komunikasi nirkabel yang termasuk dalam kategori Low Power Wide Area Network (LPWAN) yang dirancang untuk mendukung transmisi data jarak jauh dengan konsumsi daya yang rendah, sehingga sangat sesuai untuk aplikasi Internet of Things (IoT) yang membutuhkan jangkauan luas dan efisiensi energi [16]. Di Indonesia, LoRa beroperasi pada pita ISM 920–923 MHz [17]. Pita frekuensi ini berbeda dengan frekuensi komunikasi penerbangan yang digunakan untuk layanan navigasi dan komunikasi Air Traffic Control (ATC), sehingga tidak menimbulkan interferensi terhadap sistem keselamatan penerbangan. Oleh karena itu, penggunaan LoRa dalam penelitian ini bersifat *non-safety critical* dan hanya digunakan sebagai *supporting system* untuk pengiriman data posisi kendaraan secara efisien.

2.6 Protokol MQTT

MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) merupakan protokol komunikasi berbasis publish/subscribe yang ringan dan efisien untuk sistem Internet of Things (IoT), karena memiliki overhead yang rendah serta mendukung komunikasi data secara cepat dan andal [18]. Selain itu, MQTT mampu mendukung pengiriman data secara *real-time* dengan latensi rendah dan penggunaan bandwidth yang minimal, sehingga sesuai untuk perangkat dengan keterbatasan sumber daya [19]. Dalam penelitian ini, MQTT digunakan

untuk mengirimkan data dari perangkat kendaraan ke server monitoring secara kontinu.

2.7 Sistem Informasi Monitoring

Sistem informasi merupakan kombinasi perangkat keras, perangkat lunak, data, dan prosedur yang digunakan untuk mengolah dan menyajikan informasi [20]. Dalam penelitian ini, sistem informasi digunakan untuk menampilkan data posisi kendaraan dalam bentuk dashboard berbasis web, serta menyimpan data historis pada basis data MySQL untuk keperluan analisis.

2.8 Sistem Peringatan Dini (Early Warning System)

Sistem peringatan dini (*Early Warning System*) merupakan mekanisme yang dirancang untuk memberikan notifikasi secara langsung terhadap potensi pelanggaran atau kondisi tidak aman berdasarkan data yang diterima secara *real-time*. Dalam sistem berbasis Internet of Things (IoT), peringatan dapat diimplementasikan melalui indikator visual maupun audio yang diaktifkan ketika parameter tertentu melebihi batas yang telah ditentukan. Pendekatan ini memungkinkan deteksi dini terhadap kondisi abnormal serta meningkatkan *situational awareness* pengguna dalam mengambil tindakan preventif. Penerapan sistem peringatan dini berbasis IoT telah banyak digunakan pada berbagai sistem monitoring modern untuk meningkatkan keselamatan dan efisiensi operasional [21], [20].

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan engineering design dan experimental research, yang berfokus pada proses perancangan sistem, integrasi perangkat keras dan perangkat lunak, serta pengujian kinerja sistem untuk mengevaluasi fungsi dan keandalan dalam kondisi operasional yang disimulasikan.

Pendekatan *engineering design* digunakan untuk merancang dan mengembangkan prototype sistem tracking kendaraan airside berbasis Internet of Things (IoT). Proses ini meliputi identifikasi kebutuhan

sistem, perancangan arsitektur, implementasi perangkat keras dan perangkat lunak, serta integrasi sistem secara keseluruhan [22]

Selanjutnya, pendekatan *experimental research* digunakan untuk menguji performa sistem melalui serangkaian pengujian terstruktur guna memperoleh data empiris terkait kinerja sistem yang dikembangkan [23]. Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi parameter seperti akurasi GPS, keandalan komunikasi LoRa, latensi transmisi data, integritas data, serta respons sistem terhadap kondisi operasional seperti pelanggaran batas kecepatan dan area (geofencing).

Dengan kombinasi kedua pendekatan tersebut, penelitian ini tidak hanya menghasilkan prototype sistem, tetapi juga mampu mengevaluasi kinerja sistem secara objektif berdasarkan parameter pengujian yang telah ditentukan.

3.1 Identifikasi Kebutuhan Sistem

Tahap awal penelitian dilakukan dengan mengkaji kondisi operasional kendaraan airside di bandar udara, di mana berdasarkan hasil observasi belum tersedia sistem monitoring berbasis teknologi yang mampu menampilkan posisi kendaraan secara *real-time*. Kondisi ini berpotensi menimbulkan risiko keselamatan, seperti tabrakan antar kendaraan maupun dengan pesawat udara di area apron, sehingga diperlukan sistem monitoring yang dapat memberikan informasi posisi secara *real-time* serta dilengkapi fitur peringatan dini. Hasil identifikasi tersebut menjadi dasar dalam menentukan kebutuhan sistem, baik dari aspek perangkat keras, perangkat lunak, maupun fungsi operasional yang harus dipenuhi.

3.2 Studi Literatur dan Analisis Teknologi

Tahap pengumpulan studi literatur dilakukan untuk memperoleh landasan teoritis dan regulasi yang mendukung perancangan sistem. Kajian dilakukan terhadap konsep kebandarudaraan, khususnya karakteristik dan operasional sisi udara (*airside*), yang mencakup aktivitas kendaraan di *apron*, potensi risiko keselamatan, serta kebutuhan pemantauan posisi kendaraan secara *real-time* di lingkungan Bandar Udara.

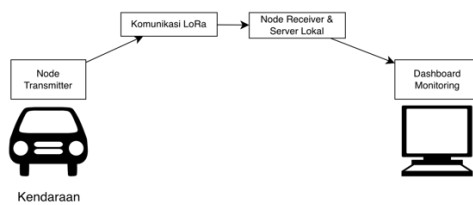
Analisis teknologi difokuskan pada konsep *Internet of Things* (IoT) sebagai dasar pengembangan sistem *monitoring*, meliputi

arsitektur sistem, mekanisme komunikasi data, serta integrasi perangkat keras dan perangkat lunak. Selain itu, dipelajari teknologi *Global Positioning System* (GPS) sebagai sumber data posisi kendaraan, teknologi LoRa sebagai media transmisi data jarak jauh dengan konsumsi daya rendah, serta *mikrokontroler* ESP32 sebagai unit pemrosesan data yang berfungsi mengolah dan mengirimkan informasi posisi ke sistem penerima.

Aspek regulasi dan standar keselamatan kebandar udara juga dikaji untuk memastikan kesesuaian rancangan sistem dengan ketentuan yang berlaku. Regulasi yang digunakan sebagai acuan antara lain ICAO Annex 14 terkait *aerodrome design and operations* serta SKEP/140/VI/1999 yang mengatur keselamatan dan operasional Bandar Udara. Regulasi tersebut menjadi dasar dalam penentuan batasan sistem, area pemantauan, dan kebutuhan operasional di *apron*.

Selain kajian teori dan regulasi, dilakukan telaah terhadap penelitian terdahulu yang berkaitan dengan sistem *monitoring* berbasis *mikrokontroler*, sistem pelacakan kendaraan, serta penerapan IoT di bidang transportasi dan kebandar udara. Hasil studi literatur digunakan untuk mengidentifikasi pendekatan yang telah diterapkan, teknologi yang digunakan, serta kelebihan dan keterbatasan sistem sebelumnya sebagai referensi dalam perancangan sistem.

3.3 Perancangan Sistem



Gambar 2. Skema Perancangan Desain Prototype sistem

Pada tahap perancangan desain Prototype sistem, sistem *tracking* kendaraan airside berbasis Internet of Things (IoT) dirancang dalam arsitektur terintegrasi yang terdiri dari node transmitter, komunikasi LoRa, node receiver, server lokal, dan dashboard monitoring. Node transmitter yang dipasang pada kendaraan menggunakan ESP32 dan

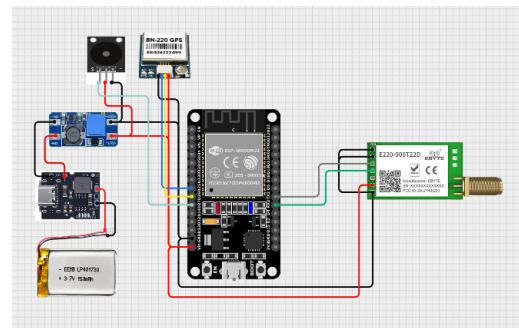
modul GPS BN-220 untuk memperoleh data posisi, kecepatan, dan waktu secara *real-time*, serta dilengkapi buzzer sebagai peringatan dini ketika terjadi pelanggaran batas kecepatan.

Data kemudian dikirim melalui komunikasi LoRa E220 ke node receiver yang menggunakan ESP32 untuk menerima dan meneruskan data ke server lokal melalui jaringan WiFi. Server berfungsi menyimpan data ke dalam basis data SQL sebagai log historis pergerakan kendaraan.

Selanjutnya, data divisualisasikan melalui dashboard monitoring berbasis web dalam bentuk peta yang menampilkan posisi kendaraan secara *real-time*, informasi kecepatan, serta riwayat pergerakan. Dengan desain ini, sistem mampu mendukung pemantauan kendaraan airside secara akurat, efisien, dan responsif

a. Perancangan Transmitter

Berikut adalah desain skematik koneksi *hardware* sisi *transmitter* yang menggunakan LoRa yang terhubung dengan modul GPS BN-220 terkoneksi ke ESP 32.



Gambar 3. Skema Koneksi Transmitter

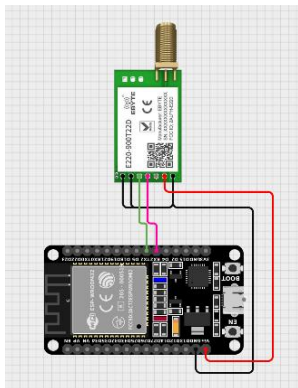
Komponen	PIN	PIN ESP32 DevKit V1
GPS BN220	VCC	VCC ESP32
	GND	GND ESP32
	TX	PIN 25 ESP32
	RX	PIN 26 ESP32
LoRa E220	VCC	VCC ESP32
	GND	GND ESP32
	TX	PIN 16 ESP32
	RX	PIN 17 ESP32

	M0	GND ESP32
	M1	GND ESP32
BUZZER	VCC	VCC ESP32
	GND	GND ESP32
	DATA	PIN 27 ESP32
STEP UP	INPUT +	BATERAI +
	INPUT -	BATERAI -
	OUTPUT +	ESP32 VIN
	OUTPUT -	ESP32 GND
Modul Charger	INPUT	USB type C charger

Konfigurasi pin menunjukkan bahwa GPS terhubung pada pin RX/TX (GPIO 25 dan 26), LoRa pada GPIO 16 dan 17, serta buzzer pada GPIO 27. Sistem catu daya menggunakan baterai yang dikombinasikan dengan modul step-up dan charger untuk memastikan kestabilan tegangan pada ESP32.

b. Perancangan *Receiver*

Perancangan perangkat keras penerima (*receiver*) dilakukan melalui interkoneksi antara board ESP32 dan modul LILYGO LoRa *Shield*, dengan skema koneksi yang dirincikan sebagai berikut.



Gambar 4. Skema Koneksi *Receiver*

Komponenten	PIN	PIN ESP32 DevKit V1
LoRa E220	VCC	VCC ESP32
	GND	GND ESP32
	TX	PIN 16 ESP32
	RX	PIN 17 ESP32

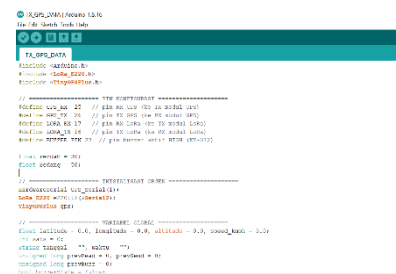
	M0	GND ESP32
	M1	GND ESP32

Konfigurasi pin pada receiver menunjukkan bahwa modul LoRa terhubung pada GPIO 16 dan 17, dengan pin kontrol M0 dan M1 dihubungkan ke ground untuk mode operasi normal. Desain ini memungkinkan proses penerimaan dan pengiriman data berjalan secara stabil dan berkelanjutan.

c. Perancangan *Software*

Perancangan perangkat lunak dilakukan untuk memastikan mikrokontroler mampu menjalankan fungsi utama sistem, yaitu akuisisi data GPS, komunikasi data melalui LoRa, penyimpanan ke database, serta visualisasi pada web dashboard.

Tahap awal dilakukan dengan instalasi Arduino IDE sebagai lingkungan pemrograman utama untuk ESP32. Konfigurasi board ESP32 dilakukan melalui penambahan URL *Additional Board Manager* dan instalasi board *ESP32 by Espressif Systems*. Selanjutnya, ditambahkan beberapa library pendukung seperti ArduinoJson, EByte LoRa, HTTPClient, Web Server, dan WiFi untuk menunjang proses komunikasi dan pengolahan data.



Gambar 5. Program *Transmitter* LoRa

Setelah konfigurasi board LILYGO LoRa pada Arduino IDE berhasil dilakukan di mana board ini berfungsi sebagai unit kontrol pusat (*transmitter*) pada sisi kendaraan, tahap selanjutnya adalah pembuatan kode program. Kode program ini bertujuan untuk mengatur *mikrokontroler* agar dapat melaksanakan fungsi pengiriman data GPS (meliputi parameter kecepatan dan ketinggian) menuju ESP32 A.



Gambar 6. Program Receiver LoRa

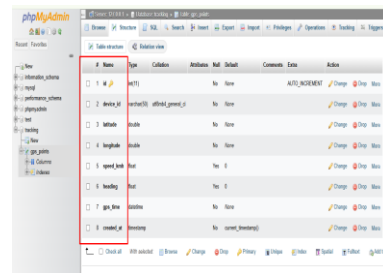
Pada sisi penerima (*receiver*), digunakan *board mikrokontroler* ESP32 B yang terintegrasi dengan modul LILYGO LoRa. *Board* ini dikonfigurasi dan dihubungkan ke Arduino IDE untuk menyusun kode program. Program tersebut berfungsi untuk menerima data GPS dari unit *transmitter* melalui jaringan LoRa. Data yang diterima kemudian diproses oleh ESP32 B dan selanjutnya dikirimkan menuju server SQL yang telah disiapkan. Data tersebut akan disimpan dalam basis data (*database*)

Program pengaturan (setup) koneksi WiFi dan alamat IP server perlu disusun. Program ini memiliki tujuan vital untuk membangun koneksi ke jaringan yang digunakan serta memperoleh alamat server yang tepat, sehingga memungkinkan transmisi data dapat dilakukan.



Gambar 7. Program Setup Wifi dan IP Server

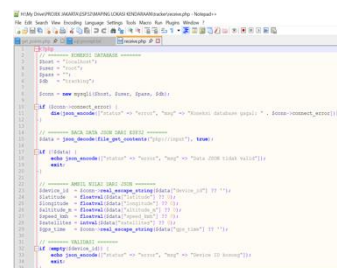
Selanjutnya, dilakukan instalasi **XAMPP** sebagai server lokal yang berfungsi untuk menjalankan layanan Apache dan MySQL. Database dibuat melalui phpMyAdmin dengan struktur Tabel ini tersusun atas beberapa field (kolom) data, yang meliputi: id, device_id (ID Perangkat), *latitude*, *longitude*, *speed* (kecepatan), *heading* (arah), *gps time* (waktu GPS), dan *create at* (waktu pembuatan).



Gambar 8. Tabel Database Tracking

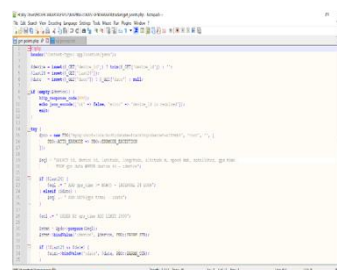
Untuk pengembangan antarmuka dan backend, digunakan **Notepad++** sebagai editor teks. Backend dikembangkan menggunakan bahasa PHP, yang terdiri dari dua fungsi utama, yaitu menerima data dari perangkat (*receive.php*) dan menyediakan data ke dashboard menggunakan metode Server-Sent Events (*get_point.php*).

Untuk mengirimkan data GPS dari *receiver* ke database, dibutuhkan *server backend* (PHP) untuk koneksi HTTP. Berkas PHP ini dikembangkan menggunakan Notepad++ dan disimpan sebagai *receive.php* di direktori C:\xampp\htdocs\tracker\.



Gambar 9. Kode Program PHP Receive

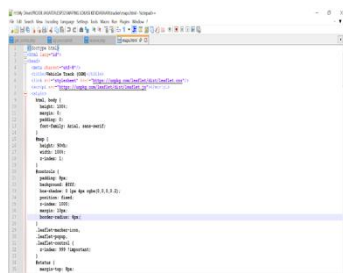
Untuk mentransfer data GPS yang tersimpan di basis data menuju web *dashboard* di mana data tersebut akan dikonversi menjadi representasi visual peta diperlukan server *backend* tambahan. Berkas PHP *Server-Sent Events* dengan *get_point.php* dibuat di lokasi direktori yang sama dengan berkas sebelumnya, yaitu C:\xampp\htdocs\tracker\.



Gambar 10. Kode Program Get_Point

Pada sisi perangkat, pemrograman dilakukan pada dua bagian, yaitu transmitter dan receiver. Transmitter (ESP32 dengan GPS) bertugas mengambil data posisi dan mengirimkannya melalui LoRa. Receiver (ESP32 gateway) menerima data tersebut, kemudian meneruskannya ke server melalui koneksi WiFi menggunakan protokol HTTP. Selain itu, dilakukan konfigurasi koneksi jaringan berupa pengaturan SSID WiFi dan alamat IP server agar sistem dapat terhubung secara optimal.

Tahap akhir adalah pembuatan web dashboard berbasis HTML yang menampilkan visualisasi data dalam bentuk peta menggunakan OpenStreetMap. Data ditampilkan secara *real-time* dalam bentuk marker sesuai koordinat GPS yang diterima dari database melalui backend server.



Gambar 11. Program HTML Web Dashboard

Dengan integrasi tersebut, sistem perangkat lunak mampu mendukung proses monitoring kendaraan airside secara *real-time* berbasis IoT.

3.1 Pengujian Eksperimental Sistem

Tahap uji coba Prototype sistem merupakan bagian dari metode *Research and Development* (R&D) yang bertujuan untuk mengevaluasi kinerja, fungsionalitas, dan efektivitas prototype sistem monitoring kendaraan sisi udara (airside) yang telah dirancang. Pengujian dilakukan untuk memastikan sistem mampu beroperasi sesuai dengan fungsi yang diharapkan serta mendukung kebutuhan pengawasan pergerakan kendaraan operasional di area airside bandar udara.

Prototype sistem dikembangkan dalam skala laboratorium dan diuji pada lingkungan laboratorium serta lingkungan simulasi. Pengujian pada lingkungan simulasi dilakukan untuk merepresentasikan kondisi operasional

secara terbatas tanpa melibatkan aktivitas nyata di area airside, sehingga tetap menjaga aspek keselamatan serta memungkinkan pengendalian variabel pengujian. Proses pengujian mengacu pada ketentuan operasional kendaraan sisi udara sesuai regulasi yang berlaku, serta mempertimbangkan karakteristik teknologi IoT, standar kualitas sistem informasi ISO/IEC 25010, dan spesifikasi teknis perangkat yang digunakan.

Pengujian dilakukan terhadap aspek perangkat keras dan perangkat lunak secara terintegrasi. Pada sisi perangkat keras, pengujian bertujuan memastikan seluruh komponen seperti modul GPS, LoRa, ESP32, serta sistem peringatan dapat berfungsi dengan baik dan stabil. Pada sisi perangkat lunak, pengujian difokuskan pada kemampuan sistem dalam menerima, mengolah, dan menampilkan data secara *real-time* melalui web dashboard, sesuai dengan aspek kualitas functional suitability, reliability, performance efficiency, dan usability.

Selain itu, dilakukan pengujian kinerja sistem pada lingkungan simulasi untuk menilai kemampuan sistem secara menyeluruh. Pengujian akurasi GPS menunjukkan bahwa sistem mampu memberikan posisi dengan tingkat ketelitian yang masih berada dalam batas toleransi kebutuhan monitoring kendaraan. Pengujian komunikasi LoRa dilakukan untuk memastikan jangkauan, keandalan pengiriman data, serta waktu tunda transmisi berada pada kondisi yang mendukung operasional sistem.

Pengujian sistem peringatan dini berbasis kecepatan dilakukan untuk memastikan sistem mampu memberikan respon secara cepat ketika terjadi pelanggaran batas kecepatan, sehingga dapat mendukung aspek keselamatan operasional. Selain itu, pengujian geofencing dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam mendeteksi pelanggaran area operasional secara tepat waktu dengan tingkat keberhasilan yang tinggi.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengujian lapangan dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sistem monitoring kendaraan airside berbasis Internet of Things (IoT) pada kondisi simulasi operasional. Pengujian difokuskan pada empat aspek utama, yaitu akurasi posisi GPS, jangkauan dan

keandalan komunikasi LoRa, kinerja fitur geofencing, serta sistem peringatan dini berbasis kecepatan pada lingkungan simulasi.

4.1 Akurasi Posisi GPS

Uji coba dilakukan untuk menilai tingkat keakuratan pembacaan posisi koordinat dengan membandingkan data *latitude* dan *longitude* yang diperoleh melalui modul GPS pada alat dengan data GPS dari perangkat lain, yaitu GPS pada telepon pintar. Pengujian ini dilaksanakan dengan mengambil sampel data koordinat *latitude* dan *longitude* pada beberapa titik lokasi di sekitar Politeknik Statistika. Perbandingan antara nilai koordinat yang diperoleh dari GPS pada alat dan nilai koordinat dari perangkat pembanding dilakukan dengan mempertimbangkan bahwa nilai koordinat peta bumi pada wilayah Indonesia, atau daerah yang dilalui garis khatulistiwa, memiliki konversi sekitar 111,322 km untuk setiap satu derajat *latitude* maupun *longitude*. Selisih koordinat dari kedua perangkat tersebut dapat dihitung menggunakan persamaan (1):

$$z = \sqrt{(B - A)^2 + (D - C)^2} \quad (1)$$

Keterangan:

- Z = nilai selisih koordinat
- A = nilai *latitude* perangkat lain
- B = nilai *latitude* modul GPS alat
- C = nilai *longitude* perangkat lain
- D = nilai *longitude* modul GPS alat
- 1 derajat koordinat peta di khatulistiwa = 111,322 Km
- Selisih jarak koordinat = $Z \times 111,322 \text{ Km}$

Dalam pengujian ini, seluruh data koordinat yang diperoleh dari setiap *device* dihitung selisih jaraknya dengan menggunakan persamaan yang telah disajikan sebelumnya. Sebagai contoh, selisih jarak pada sampel data pertama dihitung berdasarkan pembacaan koordinat pada satu titik lokasi simulasi, sehingga dapat diketahui perbedaan nilai koordinat antara GPS pada alat dan GPS pada *smartphone* sebagai berikut.

Diketahui:

Koordinat GPS Alat = -6.230952, 106.8662

Koordinat GPS Smartphone = -6.230952, 106.866280

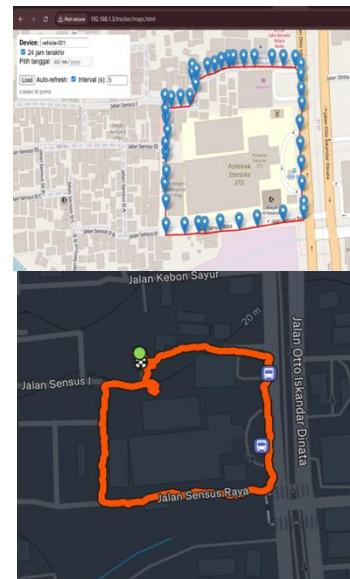
Selisih jarak antar titik koordinat adalah :

$$Z = \sqrt{(B - A)^2 + (D - C)^2}$$

$$Z = \sqrt{(-6.230952 - (-6.230952))^2 + (106.8662 - 106.866280)^2}$$

Selisih Jarak = $z = 6.4 \times 10^{-9} \times 111322000$
meter = 0.712 meter

Hasil perhitungan tersebut menunjukkan bahwa selisih jarak koordinat yang didapat antara modul GPS Alat dan GPS Garmin adalah berkisar di angka 0,0000000064 derajat atau 0.712 meter.



Gambar 12. Perbandingan *Tracking* Perjalanan

Pengujian akurasi GPS dilakukan dengan membandingkan koordinat yang diperoleh dari modul GPS pada perangkat dengan GPS pada *smartphone* sebagai pembanding. Hasil pengujian menunjukkan bahwa selisih posisi berada pada kisaran $\pm 0,712$ meter. Nilai ini menunjukkan bahwa sistem memiliki tingkat akurasi yang sangat baik dan masih berada dalam batas toleransi ≤ 5 meter untuk kebutuhan monitoring kendaraan di area *airside*. Perbedaan tampilan jalur yang dihasilkan disebabkan oleh perbedaan frekuensi pembaruan data dan dukungan teknologi A-GPS pada perangkat pembanding, namun secara keseluruhan pola rute yang dihasilkan tetap konsisten.

4.2 Jangkauan dan Keandalan Komunikasi LoRa

Jarak Tx-Rx	Kondisi Lingkungan	RSSI (dBm)	Status Penerimaan Data
10 meter	LOS (Line of Sight)	-23	Berhasil
100 meter	LOS (Line of Sight)	-45	Berhasil
500 meter	LOS (Line of Sight)	-72	Berhasil
3 Km	LOS (Line of Sight)	-89	Berhasil
5 Km	N-LOS	-101	Berhasil



Gambar 13. Pengujian Jangkauan LoRa

Berdasarkan gambar 13 hasil pengujian jangkauan dan performa transmisi LoRa, diperoleh gambaran mengenai kemampuan sistem dalam menerima dan mengirimkan data GPS pada berbagai kondisi kekuatan sinyal.

Pada pengujian 10 meter, nilai RSSI yang tercatat sebesar -23 dBm menunjukkan kondisi sinyal yang sangat kuat. Pada tingkat ini, data GPS dapat diterima secara stabil dan akurat, mencakup informasi koordinat *latitude* dan *longitude*, ketinggian, kecepatan, serta jumlah satelit yang terhubung. Hasil ini mengindikasikan bahwa komunikasi LoRa bekerja secara optimal ketika jarak antara *transmitter* dan *receiver* berada dalam rentang dekat.

Pada pengujian jarak 5 Km, sistem masih mampu beroperasi meskipun nilai RSSI menurun hingga -101 dBm. Nilai tersebut mendekati ambang sensitivitas penerimaan modul LoRa, namun data masih dapat diterima dan diproses oleh *mikrokontroler* dengan baik. Keberhasilan ini ditunjukkan melalui pengiriman data dalam format JSON ke server dengan status berhasil (*success*), yang menandakan bahwa proses transmisi tetap berjalan meskipun kondisi sinyal berada pada tingkat lemah.

Dari sisi validitas dan integritas data, hasil pengujian menunjukkan bahwa data yang

dikirimkan dari perangkat *transmitter* dapat diterima secara konsisten hingga tersimpan di basis data. Data GPS dikirimkan dalam format JSON yang memuat informasi seperti *device_id*, *latitude*, *longitude*, kecepatan, dan jumlah satelit. Seluruh data tersebut berhasil dicatat pada tabel *gps_data* di MySQL secara berurutan berdasarkan ID, termasuk parameter tambahan seperti ketinggian dan kecepatan kendaraan. Selain itu, terdapat kesesuaian antara waktu pembacaan GPS (*gps_time*) dan waktu penerimaan data pada server (*created_at*), yang menunjukkan sinkronisasi waktu yang baik dalam sistem.

Keberhasilan pengujian jangkauan LoRa juga ditunjukkan melalui visualisasi data pada *web dashboard*. Sistem mampu menampilkan puluhan titik koordinat dalam satu sesi pelacakan, dengan jumlah titik berkisar antara 71 hingga 102 titik. Titik-titik tersebut divisualisasikan dalam bentuk *marker* pada peta OpenStreetMap dan membentuk jalur pergerakan kendaraan di lingkungan simulasi. Jalur yang dihasilkan menunjukkan bahwa perangkat tetap terhubung selama proses pergerakan berlangsung. Selain itu, perbandingan hasil pelacakan dengan perangkat *smartphone* menunjukkan kesesuaian rute yang dilalui, sehingga mengonfirmasi bahwa sistem GPS yang dirancang memiliki tingkat akurasi yang memadai.

Secara keseluruhan, hasil pengujian jangkauan menunjukkan bahwa sistem LoRa memiliki sensitivitas penerimaan yang baik, mampu beroperasi pada rentang kekuatan sinyal dari -23 dBm hingga -101 dBm. Seluruh data GPS berhasil dikirimkan secara *real-time*, tersimpan dengan baik pada basis data, serta divisualisasikan secara akurat dalam bentuk jalur perjalanan pada peta, sehingga sistem dinilai telah memenuhi kriteria performa yang ditetapkan dalam penelitian ini.

4.3 Kinerja Fitur Geofencing

Pengujian fitur *geofencing* dilakukan untuk memvalidasi kemampuan sistem dalam membatasi pergerakan kendaraan operasional agar tetap berada di dalam area kerja yang telah ditentukan, khususnya pada zona *apron*. Evaluasi dilakukan berdasarkan data yang terekam pada *serial monitor*, tampilan *web dashboard*, serta indikator keberhasilan yang telah ditetapkan sebelumnya. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu menetapkan batas area operasional berbasis koordinat geografis dan melakukan

deteksi pelanggaran secara otomatis ketika kendaraan keluar dari batas yang diizinkan.

```

12:25:21.633 -> ===== Data GPS =====
12:25:21.633 -> Lokasi : -6.229564, 106.866417
12:25:21.633 -> Ketinggian : 38.40 m
12:25:21.633 -> Kecepatan : 1.54 km/h
12:25:21.633 -> Satelit : 12
12:25:21.633 -> Tanggal : 23/01/2026
12:25:21.633 -> Waktu : 22:25:21 WIB
12:25:21.633 -> =====
12:25:21.633 ->
12:25:22.657 -> 📶 Jarak dari pusat: 11.1 m
12:25:24.614 -> ===== Data GPS =====
12:25:24.614 -> Lokasi : -6.229553, 106.866409
12:25:24.614 -> Ketinggian : 39.20 m
12:25:24.614 -> Kecepatan : 0.74 km/h
12:25:24.614 -> Satelit : 12
12:25:24.614 -> Tanggal : 23/01/2026
12:25:24.614 -> Waktu : 22:25:24 WIB
12:25:24.614 -> =====
12:25:24.614 ->
12:25:26.661 -> 📶 Data terkirim via LoRa!
12:25:26.661 -> 📶 STATUS: MELAKUKAN DARI GEOFENCING
12:25:27.636 -> ===== Data GPS =====
12:25:27.636 -> Lokasi : -6.229553, 106.866409
12:25:27.636 -> Ketinggian : 39.90 m
12:25:27.636 -> Kecepatan : 1.17 km/h
12:25:27.636 -> Satelit : 12
12:25:27.636 -> Tanggal : 23/01/2026
12:25:27.636 -> Waktu : 22:25:27 WIB
12:25:27.636 -> =====
12:25:27.636 ->

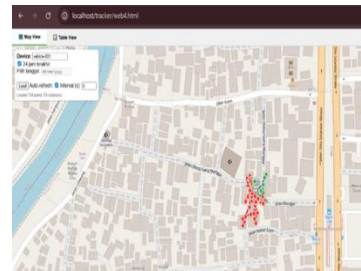
```

Gambar 14. Hasil Pengujian Geofencing Pada Serial Monitor

Gambar 15. Tabel View Geofencing

Keberhasilan deteksi pelanggaran geofencing dibuktikan melalui log pada serial monitor yang menampilkan hasil perhitungan jarak kendaraan terhadap titik koordinat pusat area. Ketika jarak kendaraan melampaui 3 meter, sistem secara *real-time* menampilkan status peringatan yang menandakan bahwa kendaraan berada di luar area geofencing. Hal ini menunjukkan bahwa algoritma perhitungan jarak antara posisi GPS kendaraan dan titik referensi pusat telah berjalan dengan akurat dan responsif.

Fitur geofencing ini juga terintegrasi dengan sistem peringatan audio dan visual. Pada saat kendaraan terdeteksi keluar dari area yang diizinkan, buzzer akan aktif secara otomatis sebagai peringatan dini bagi pengemudi. Buzzer akan kembali nonaktif ketika kendaraan masuk kembali ke dalam area yang diperbolehkan. Selain itu, pada web dashboard ditampilkan visualisasi status kendaraan secara jelas. Pada tampilan Map View, posisi kendaraan di dalam area ditandai dengan marker berwarna hijau, sedangkan posisi di luar area ditandai dengan marker berwarna merah. Sinkronisasi status ini juga ditampilkan pada Table View, di mana data pelanggaran diberi label “Keluar Area” dengan penanda warna merah, sementara kondisi normal ditandai sebagai “Aman” dengan warna hijau. Seperti ditunjukkan gambar IV.50 dan IV.51.



Gambar 16. Maps View Geofencing

Hasil pengujian juga menunjukkan bahwa aktivasi fitur geofencing tidak mengganggu kestabilan sistem secara keseluruhan. Meskipun buzzer aktif akibat pelanggaran area, proses pengiriman data GPS melalui LoRa tetap berjalan dengan baik dan tercatat berhasil. Seluruh parameter GPS, seperti waktu pencatatan, koordinat posisi, ketinggian, dan kecepatan, tetap tersimpan secara konsisten di basis data. Hal ini membuktikan bahwa mikrokontroler mampu menangani proses peringatan geofencing sekaligus mempertahankan kestabilan akuisisi dan transmisi data. Seperti ditunjukkan gambar IV.52 dibawah.



Gambar 17. Pengujian Buzzer Geofencing

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa fitur geofencing pada sistem pelacakan kendaraan *airside* telah berfungsi sesuai dengan perancangan. Sistem mampu mendeteksi pelanggaran area secara akurat, memberikan peringatan audio dan visual secara *real-time*, serta menjaga integritas dan stabilitas data selama pengujian berlangsung. Dengan demikian, fitur ini dinilai efektif dalam mendukung pengawasan dan keselamatan operasional kendaraan di area terbatas.

Parameter Uji	Hasil Pengamatan	Status
Penetapan Koordinat	Titik pusat dan radius area berhasil didefinisikan dalam program.	Berhasil
Deteksi Jarak	Sistem mencatat jarak (misal: 11.1 m) dan mendeteksi posisi luar area.	Berhasil
Indikator Visual	<i>Marker</i> merah muncul pada peta dan status "KELUAR AREA" pada tabel.	Berhasil
Indikator Audio	<i>Buzzer</i> aktif saat keluar area dan mati saat masuk kembali.	Berhasil
Stabilitas Transmisi	Data tetap terkirim via LoRa meskipun alarm aktif.	Berhasil

4.4 Sistem Buzzer



Gambar 18. Pengujian Buzzer

Gambar IV.48 pengujian *buzzer* dilakukan untuk memvalidasi fungsi *Early Warning System* (EWS) yang dirancang sebagai sistem peringatan keselamatan kendaraan pada area operasional terbatas. Mekanisme peringatan ini dikendalikan oleh *mikrokontroler* ESP32 berdasarkan data kecepatan kendaraan yang diperoleh secara *real-time* dari modul GPS. Sistem menerapkan logika peringatan bertahap, di mana *buzzer* mulai aktif ketika kecepatan kendaraan mencapai 25 km/jam dan intensitas bunyi meningkat seiring bertambahnya kecepatan hingga mencapai tingkat maksimum pada

kecepatan 30 km/jam atau lebih. Peningkatan intensitas bunyi ini dimaksudkan untuk memberikan peringatan yang jelas kepada pengemudi agar segera menurunkan kecepatan kendaraan.

Berdasarkan data tabel di IV.5 keberhasilan fungsi *buzzer* divalidasi melalui pencatatan data pada *serial monitor*, basis data, dan *web dashboard*. Pada kondisi kecepatan tinggi, log *serial monitor* menunjukkan nilai kecepatan sebesar 29,5 km/jam hingga 32,7 km/jam, yang menandakan kendaraan telah melampaui batas aman. Pada kondisi tersebut, sistem berhasil mengaktifkan *buzzer* dengan intensitas maksimum sesuai dengan logika yang dirancang. Sebaliknya, pada kondisi kecepatan rendah yang tercatat pada basis data dan *dashboard*, seperti 1,0 km/jam hingga 2,0 km/jam, *buzzer* tetap berada dalam kondisi tidak aktif. Hal ini menunjukkan bahwa sistem mampu membedakan secara akurat antara kondisi normal dan kondisi peringatan.

GPS Time	Latitude/Longitude	Altitude (m)	Speed km/h	Buzzer
04/01/2026 11:16	-6229654/106866829	25	5.30	Mati
04/01/2026 11:16	-6229665/106867035	32	5.40	Mati
04/01/2026 11:16	-6229335/106867058	34	20.90	Mati
04/01/2026 11:16	-6228837/106867058	33	23.30	Mati
04/01/2026 11:19	-6226578/106867249	29	33.60	Hidup
04/01/2026 11:19	-6227282/106867310	24	30.70	Hidup

Berdasarkan data pada Tabel IV.5, sistem terbukti mampu membedakan kondisi kecepatan secara akurat. Pada kecepatan rendah (1,0 km/jam hingga 23,30 km/jam), *buzzer* tetap mati. Namun, saat kendaraan melaju pada kecepatan 25,50 km/jam hingga 36,40 km/jam, sistem secara responsif mengaktifkan *buzzer*. Pengujian juga menunjukkan bahwa aktivasi *buzzer* tidak mengganggu stabilitas perangkat maupun kinerja komunikasi. Transmisi data dalam format JSON tetap berstatus berhasil (*success*), membuktikan bahwa pemrosesan audio oleh mikrokontroler tidak mengganggu pengiriman data LoRa maupun proses penyimpanan pada basis data MySQL.

Secara keseluruhan, fungsi *buzzer* sebagai sistem peringatan dini telah bekerja sesuai perancangan. Sistem tidak hanya mampu melacak posisi kendaraan, tetapi juga memberikan peringatan audio secara responsif dan akurat. Dengan demikian, perangkat ini telah memenuhi kriteria sebagai sistem pengawasan aktif yang mendukung peningkatan keselamatan dan kepatuhan batas kecepatan di area operasional secara efektif.

Hasil pengujian lapangan ini diperoleh melalui pengamatan langsung terhadap performa sistem pada kondisi operasional simulasi, dengan membandingkan data keluaran sistem terhadap perangkat pembanding serta standar yang telah ditetapkan. Adapun aspek yang diuji secara komprehensif meliputi akuisisi dan keandalan posisi GPS, transmisi dan jangkauan komunikasi LoRa, integritas serta latensi data, kinerja sistem peringatan kecepatan dan *geofencing*, visualisasi data, hingga kontinuitas operasional sistem secara keseluruhan.

5. KESIMPULAN

- a. Sistem yang dirancang berhasil mengintegrasikan modul GPS untuk akuisisi posisi kendaraan secara *real-time* dan LoRa untuk transmisi data nirkabel. Seluruh aspek perancangan, mulai dari akuisisi GPS, keandalan sinyal, jangkauan komunikasi, hingga integritas dan kontinuitas data, telah diuji secara lapangan. Hasil uji menunjukkan bahwa sistem mampu merekam posisi kendaraan dengan akurasi tinggi (0,712 meter), mendeteksi rata-rata 12 satelit, dan mengirimkan data GPS secara stabil hingga jarak 5 kilometer dengan nilai RSSI -101 dBm. Hal ini menunjukkan bahwa desain sistem pelacakan berbasis IoT yang memanfaatkan GPS dan LoRa layak diterapkan di lingkungan *airside* bandara kecil.
- b. Sistem terbukti efektif meningkatkan pengawasan kendaraan dan keselamatan di area *apron*. Aktivasi peringatan kecepatan melalui *buzzer* berhasil mendeteksi kendaraan yang melampaui batas aman (≥ 25 km/jam) tanpa mengganggu aliran data GPS. Selain itu, *geofencing* area operasional mampu mendeteksi pelanggaran area dengan deviasi ≤ 3 meter dan memberikan

respon peringatan dalam waktu ≤ 3 detik. Visualisasi data ditampilkan dalam tampilan peta (*Map View*) dan tampilan tabel (*Table View*) menunjukkan sinkronisasi 100% dengan pembaruan data ≤ 10 detik, sedangkan kontinuitas *monitoring* mampu merekam 71–102 titik koordinat per menit, melebihi standar minimal 60 titik/menit.

- c. Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan, di antaranya sistem yang dikembangkan masih diuji pada lingkungan simulasi dan belum diimplementasikan pada kondisi operasional *airside* yang sesungguhnya. Selain itu, aspek interferensi sinyal, hambatan lingkungan, serta skalabilitas sistem belum dianalisis secara komprehensif. Kondisi ini dapat mempengaruhi performa sistem ketika diterapkan pada lingkungan nyata yang memiliki dinamika operasional lebih kompleks.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak terkait yang telah memberi dukungan terhadap penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. Riska and A. D. Maulana, "Analisis risiko bahaya penerbangan di sisi *airside* sebagai upaya meminimalisir risiko kecelakaan dengan metode HIRA di Bandara Udara Sultan Muhammad Salahuddin Bima," *Ocean Engineering: Jurnal Ilmu Teknik dan Teknologi Maritim*, vol. 2, no. 4, pp. 37–52, Oct. 2023, doi: 10.58192/ocean.v2i4.1482.
- [2] R. E. M. Bhoka and S. Sutarwati, "Pengawasan dan ketersediaan peralatan kerja unit *apron movement control* di area *airside* Bandar Udara H. Hasan Aroeboesman Ende," *Jurnal Ilmiah dan Karya Mahasiswa*, vol. 2, no. 2, pp. 127–138, Feb. 2024, doi: 10.54066/jikma.v2i2.1640.
- [3] Republik Indonesia, *Undang-Undang Nomor 1 Tahun 2009 tentang Penerbangan*. Jakarta, Indonesia: Sekretariat Negara, 2009.
- [4] International Civil Aviation Organization, *Annex 19 to the Convention on International Civil Aviation: Safety Management*, 2nd ed. Montreal, Canada, 2016.
- [5] B. J. Hubbard and S. M. Hubbard, "Tracking and monitoring technologies to support airport construction safety," *IOP Conference Series*:

- Materials Science and Engineering*, vol. 1218, no. 1, p. 012015, Jan. 2022, doi: 10.1088/1757-899X/1218/1/012015.
- [6] N. Ramli, M. M. Zabidi, A. Ahmad, and I. A. Musliman, "An open source LoRa based vehicle tracking system," *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Informatics*, vol. 7, no. 2, pp. 221–228, Jun. 2019, doi: 10.11591/ijeei.v7i2.1174.
- [7] F. J. Murillo *et al.*, "Experimental evaluation of LoRa in transit vehicle tracking service based on intelligent transportation systems and IoT," *Electronics*, vol. 9, no. 11, pp. 1–22, Nov. 2020, doi: 10.3390/electronics9111950.
- [8] A. Rizky *et al.*, "Implementasi sistem LoRa untuk deteksi dan pelacakan pendaki gunung," *Jurnal Media Akademik (JMA)*, vol. 3, no. 7, 2025, doi: 10.62281.
- [9] I. M. Fajaryasa, "Rancangan pengirim data lokasi kendaraan di apron berbasis mikrokontroler," 2022.
- [10] R. Wisnuardana, "Prototipe sistem tracking ground movement airside berbasis GPS dan LoRa dengan integrasi web dashboard," 2025.
- [11] International Civil Aviation Organization, *Aerodrome Design Manual, Part 4: Visual Aids*, 5th ed. Montreal, Canada, 2021.
- [12] International Civil Aviation Organization, *Advanced Surface Movement Guidance and Control Systems (A-SMGCS) Manual (Doc 9830)*. Montreal, Canada. [Online]. Available: <http://www.icao.int>
- [13] A. Mulia *et al.*, "Aquamonitor: Sistem pemantauan kualitas air berbasis Internet of Things (IoT) menggunakan NodeMCU V3 ESP8266," *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, vol. 14, no. 1, Jan. 2026, doi: 10.23960/jitet.v14i1.8373.
- [14] V. Iordache *et al.*, "Integrating connected vehicles into IoT ecosystems: A comparative study of low-power, long-range communication technologies," *Sensors*, vol. 24, no. 23, Dec. 2024, doi: 10.3390/s24237607.
- [15] P. D. Groves, *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems*, 2nd ed. Norwood, MA, USA: Artech House, 2013.
- [16] A. Khalifeh *et al.*, "Low power wide area network (LPWAN) protocols: Enablers for future wireless networks," *Results in Engineering*, vol. 27, Sep. 2025, doi: 10.1016/j.rineng.2025.105866.
- [17] Republik Indonesia, *Peraturan Menteri Komunikasi dan Digital Republik Indonesia Nomor 2 Tahun 2025*.
- [18] G. Patti, L. Leonardi, G. Testa, and L. Lo Bello, "PrioMQTT: A prioritized version of the MQTT protocol," *Computer Communications*, vol. 220, pp. 43–51, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.comcom.2024.03.018.
- [19] N. Saha, P. Paul, K. Ji, and R. Harik, "Performance evaluation framework of MQTT client libraries for IoT applications in manufacturing," 2024. [Online]. Available: www.sciencedirect.com
- [20] A. Al-Fuqaha *et al.*, "Internet of Things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 4, pp. 2347–2376, Oct. 2015, doi: 10.1109/COMST.2015.2444095.
- [21] S. D. D. Satria and R. P. Astutik, "Perancangan sistem monitoring ketahanan jembatan berbasis IoT (Internet of Things)," *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, vol. 13, no. 1, Jan. 2025, doi: 10.23960/jitet.v13i1.6034.
- [22] K. T. Ulrich and S. D. Eppinger, *Product Design and Development*, 6th ed. New York: McGraw-Hill, 2016.
- [23] J. W. Creswell, *Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches*, 4th ed. California: SAGE Publications, 2014.