

Pengembangan Sistem Keamanan Berbasis IoT Menggunakan GPS dengan Notifikasi Jarak Aman Melalui SMS Pada Kendaraan Rental

Caesar Salsabil Ridho Hadmadi¹, Hastari Utama², Joko Dwi Santoso³,

^{1,3}Program Studi Teknik Komputer, Fakultas Ilmu Komputer, Universitas Amikom Yogyakarta

²Program Studi Teknik Informatika, Fakultas Ilmu Komputer, Universitas Amikom Yogyakarta

Jl. Ring Road Utara, Ngringin, Condongcatur, Kec. Depok, Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta 55281

Corresponding e-mail: lcsr.hadmadi@students.amikom.ac.id

Abstrak

Keamanan kendaraan rental masih menjadi tantangan besar akibat maraknya kasus pencurian yang sering kali dimungkinkan oleh keterbatasan sistem pelacakan konvensional yang hanya mengandalkan satu perangkat GPS. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sistem keamanan berbasis Internet of Things (IoT) yang menggunakan dua perangkat GPS yang saling terhubung untuk mendeteksi anomali pergerakan kendaraan. Sistem terdiri dari dua unit utama yang masing-masing dibangun dengan mikrokontroler ESP32, modul GPS Neo-6M, dan modul GSM SIM800L, dengan komunikasi data antar-unit menggunakan protokol ESP-NOW. Jarak antara kedua unit dihitung secara real-time menggunakan rumus Haversine. Jika jarak melebihi ambang batas 100 meter, sistem akan masuk ke kondisi trigger dan mengirimkan notifikasi SMS secara intensif setiap 20 detik kepada pemilik kendaraan. Hasil pengujian menunjukkan sistem beroperasi dengan akurasi rata-rata 4,04 meter, berhasil mengirimkan notifikasi dalam dua mode (setiap 15 menit pada kondisi normal dan setiap 20 detik pada kondisi trigger), serta menerapkan strategi keamanan berlapis melalui unit tersembunyi dan unit umpan. Sistem ini memberikan solusi keamanan yang proaktif, andal, dan tidak bergantung pada koneksi internet, sehingga berpotensi mengurangi risiko pencurian pada kendaraan rental.

Kata Kunci: GPS tracker, IoT, keamanan kendaraan, mikrokontroler, notifikasi SMS.

Abstract

The security of rental vehicles remains a major challenge due to the high incidence of theft, often enabled by the limitations of conventional tracking systems that rely on a single GPS device. This research aims to develop an Internet of Things (IoT)-based security system using two interconnected GPS devices to detect anomalous vehicle movement. The system consists of two main units, each built with an ESP32 microcontroller, a Neo-6M GPS module, and a SIM800L GSM module, with inter-unit data communication using the ESP-NOW protocol. The distance between the two units is calculated in real-time using the Haversine formula. If the distance exceeds a threshold of 100 meters, the system enters a trigger condition and sends intensive SMS notifications every 20 seconds to the vehicle owner. Testing results show that the system operates with an average accuracy of 4.04 meters, successfully delivers notifications in two modes (every 15 minutes under normal conditions and every 20 seconds under trigger conditions), and implements a layered security strategy through a hidden unit and a decoy unit. This system provides a proactive, reliable security solution that does not depend on internet connectivity, thereby potentially reducing the risk of theft for rental vehicles.

Keywords: GPS tracker, IoT, vehicle security, microcontroller, SMS notification.

1. Pendahuluan

Perkembangan jumlah kendaraan bermotor di Indonesia mengalami peningkatan signifikan setiap tahunnya. Data Badan Pusat Statistik (BPS) mencatat jumlah kendaraan bermotor mencapai lebih dari 18 juta unit pada tahun 2023, dengan kendaraan penumpang menyumbang 11,6% dari total tersebut (Badan Pusat Statistik Indonesia, 2024). Fenomena ini diiringi oleh tantangan keamanan yang serius, mengingat BPS juga mencatat terjadi 14.184 kasus pencurian kendaraan bermotor pada tahun 2022 (Pratiwi, 2024). Industri rental kendaraan menjadi salah satu sektor yang rentan terhadap risiko ini karena kemudahan akses penyewaan dan pola penggunaan kendaraan oleh pihak yang tidak dikenal. Oleh karena itu, dibutuhkan sistem pengamanan yang lebih canggih dan andal untuk melindungi aset bergerak tersebut dari tindak kriminal.

Sistem pelacakan konvensional yang umum digunakan sering kali hanya mengandalkan satu perangkat Global Positioning System (GPS). Pendekatan ini memiliki kelemahan fatal karena pelaku pencurian dengan mudah dapat menonaktifkan atau melepas perangkat tunggal tersebut, sehingga menghilangkan jejak kendaraan secara keseluruhan. Akibatnya, pemilik kendaraan mengalami kerugian material yang signifikan dan proses pemulihan aset menjadi sangat sulit. Beberapa penelitian terdahulu telah mengembangkan sistem monitoring, seperti aplikasi berbasis Android yang mengandalkan koneksi internet untuk pelacakan (Hamedeko, Meidelfi, & Erianda, 2020). Namun, solusi semacam ini tetap bergantung pada ketersediaan sinyal internet yang tidak selalu stabil, khususnya di daerah terpencil.

Teknologi Internet of Things (IoT) menawarkan paradigma baru dalam pengembangan sistem keamanan yang lebih cerdas dan terintegrasi. IoT memungkinkan perangkat fisik untuk saling terhubung, berkomunikasi, dan bertukar data melalui jaringan, baik dengan atau tanpa kabel (Kusrini, 2019). Dalam konteks keamanan kendaraan, IoT dapat dimanfaatkan untuk membuat sistem yang tidak hanya memantau lokasi, tetapi juga mampu mendeteksi anomali secara otomatis. Penelitian sebelumnya telah mengimplementasikan IoT untuk keamanan sepeda motor dengan fitur mematikan mesin dan membunyikan klakson (Ramadhan, Bachri, & Abidin, 2020). Meski demikian, sistem tersebut masih bergantung pada konektivitas Wi-Fi, yang membatasi jangkauan dan keandalan operasionalnya di luar area hotspot.

Untuk mengatasi keterbatasan sistem sebelumnya, penelitian ini mengusulkan pengembangan sistem keamanan berbasis IoT yang memanfaatkan dua perangkat GPS yang saling terhubung dan berkomunikasi via protokol ESP-NOW. Konsep double-layer security ini dirancang dengan satu unit yang dipasang secara tersembunyi (hidden unit) dan satu unit lain sebagai umpan (decoy unit) yang dipasang di lokasi mudah terlihat. Mekanisme inti sistem adalah menghitung jarak antara kedua unit GPS secara real-time menggunakan rumus Haversine, yang akurat untuk menghitung jarak lengkung di permukaan Bumi (Cahyono, Mariza, & Wirawan, 2022). Jika jarak melebihi batas ambang yang ditetapkan, sistem akan menginterpretasikannya sebagai indikasi pencurian dan segera mengaktifkan mode siaga tinggi.

Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk merancang dan mengimplementasikan sistem keamanan proaktif yang dapat mendeteksi upaya pencurian kendaraan rental melalui pemantauan jarak antar-GPS dan memberikan notifikasi langsung kepada pemilik via Short Message Service (SMS). Dengan menggunakan modul GSM SIM800L, notifikasi dapat dikirimkan bahkan di daerah dengan sinyal internet terbatas, selama sinyal GSM tersedia (Sandika & Suryana, 2022). Diharapkan, sistem ini dapat memberikan lapisan keamanan tambahan yang lebih tangguh, meningkatkan rasa aman bagi penyewa, serta mengurangi potensi kerugian ekonomi bagi pemilik bisnis rental kendaraan.

2. Metode Penelitian

Bab Metode Penelitian memaparkan kerangka sistematis yang digunakan untuk mengembangkan dan menguji sistem keamanan berbasis IoT ini. Pendekatan penelitian yang

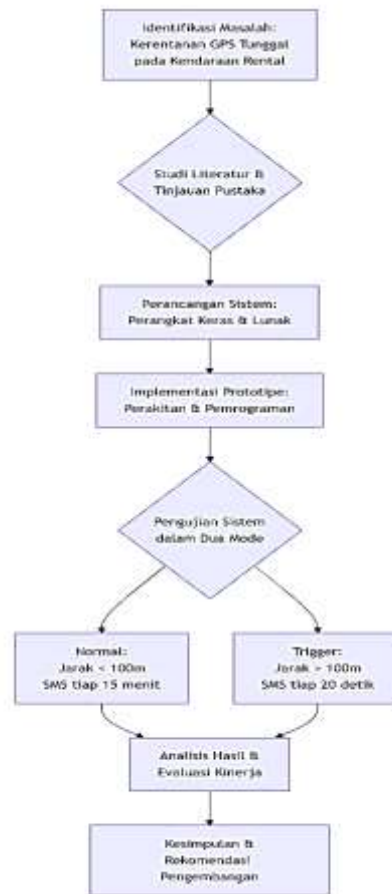
diterapkan adalah Research and Development (R&D) dengan fokus pada perancangan prototipe fungsional yang diuji secara eksperimental. Untuk memastikan alur kerja yang terstruktur, tahapan penelitian dimulai dari identifikasi masalah, studi literatur, perancangan perangkat keras dan lunak, hingga implementasi dan evaluasi sistem. Metode pengumpulan data dilakukan melalui eksperimen langsung dengan mengumpulkan data koordinat GPS, log pengiriman SMS, serta konsumsi daya selama pengujian dalam berbagai skenario. Seluruh proses ini dirancang untuk menjawab rumusan masalah dan memvalidasi apakah sistem yang dibangun dapat berfungsi sesuai dengan tujuan yang telah ditetapkan.

2.1 Alur Penelitian

Alur penelitian disusun secara berurutan untuk memandu proses pengembangan sistem secara komprehensif. Tahapan pertama adalah Identifikasi Masalah, yaitu menganalisis kelemahan sistem GPS konvensional dan kerentanan kendaraan rental terhadap pencurian. Tahap kedua adalah Studi Literatur, dengan melakukan tinjauan terhadap penelitian terdahulu yang relevan, seperti sistem monitoring berbasis Android (Hamedeko, Meidelfi, & Erianda, 2020) dan sistem keamanan sepeda motor berbasis IoT (Ramadhan, Bachri, & Abidin, 2020), untuk memperoleh landasan teori dan menghindari duplikasi. Selanjutnya, dilakukan perancangan perangkat keras dan lunak yang mencakup pemilihan komponen (ESP32, GPS Neo-6M, SIM800L) dan pembuatan algoritma pemrosesan data serta komunikasi. Tahap Implementasi dan Pengujian melibatkan perakitan prototipe, pemrograman, serta pengujian kinerja dalam dua skenario utama: kondisi normal dan kondisi trigger. Tahap kelima adalah Analisis Hasil dan Evaluasi, di mana data uji dianalisis untuk menilai akurasi, keandalan, dan efisiensi sistem. Tahap akhir adalah penarikan kesimpulan dan pemberian saran yang merangkum temuan penelitian dan rekomendasi pengembangan di masa depan. Alur tersebut dapat divisualisasikan dalam diagram pada Gambar 2.1.

2.2 Objek Penelitian

Objek penelitian ini adalah kendaraan roda empat, khususnya mobil rental, yang memiliki risiko tinggi terhadap pencurian dan penyalahgunaan. Fokus penelitian terletak pada pengembangan sistem pelacakan dan notifikasi ganda yang dapat bekerja secara mandiri tanpa ketergantungan pada infrastruktur internet. Sistem ini didesain dengan menerapkan konsep keamanan berlapis (*double-layer security*), di mana dua modul GPS dipasang pada satu kendaraan dengan strategi berbeda: satu unit dipasang secara tersembunyi (*hidden unit*) dan satu unit lain dipasang di lokasi yang mudah terlihat sebagai *decoy* atau umpan (Cahyono, Mariza, & Wirawan, 2022). Pendekatan ini diharapkan dapat mengelabui pelaku kejahatan dan memastikan bahwa setidaknya satu unit tetap berfungsi untuk mengirimkan notifikasi darurat.



Gambar 1. Alur Penelitian

2.3 Metode Pengumpulan dan Analisis Data

Data yang dikumpulkan dalam penelitian ini terdiri dari data kuantitatif primer yang diperoleh melalui pengujian prototipe. Data utama meliputi: (1) koordinat *latitude* dan *longitude* dari kedua modul GPS Neo-6M yang diambil dalam format NMEA; (2) *timestamp* dan log keberhasilan pengiriman SMS via modul SIM800L; serta (3) pengukuran konsumsi daya sistem menggunakan multimeter digital. Pengumpulan data dilakukan dalam dua mode operasi, yaitu kondisi normal dengan interval pengiriman 15 menit dan kondisi trigger dengan interval 20 detik. Data koordinat kemudian diproses menggunakan rumus Haversine untuk menghitung jarak antartitik dengan memperhitungkan kelengkungan Bumi (Sandika & Suryana, 2022). Analisis data dilakukan secara deskriptif kuantitatif dengan menghitung rata-rata akurasi, latensi, dan konsumsi daya, serta membandingkan kinerja sistem dengan batasan dan tujuan yang telah ditetapkan. Alur penelitian ini dirancang secara sistematis menggunakan pendekatan Research and Development (R&D) yang terstruktur dalam enam tahapan utama.

Tahap pertama adalah Identifikasi Masalah, yang berfokus pada menganalisis kelemahan mendasar dari sistem keamanan konvensional pada kendaraan rental. Analisis ini mengungkap bahwa ketergantungan pada satu perangkat GPS tunggal menjadi titik kelemahan kritis, karena pelaku pencurian dapat dengan mudah menonaktifkannya sehingga menghilangkan seluruh kemampuan pelacakan. Data statistik dari Badan Pusat Statistik (BPS) tentang tingginya angka pencurian kendaraan (Pratiwi, 2024) memperkuat urgensi untuk mengembangkan solusi yang lebih tangguh.

Tahap kedua, Studi Literatur, dilakukan untuk membangun landasan teoretis dan menghindari duplikasi inovasi. Pada tahap ini, peneliti mengkaji berbagai penelitian terdahulu yang relevan, seperti sistem monitoring berbasis Android (Hamedeko, Meidelfi, & Erianda, 2020) dan sistem keamanan berbasis IoT untuk sepeda motor (Ramadhan, Bachri, & Abidin, 2020). Kajian ini tidak hanya memberikan pemahaman tentang state-of-the-art teknologi terkait, tetapi juga mengidentifikasi celah penelitian (research gap) — khususnya ketergantungan pada koneksi internet dan kurangnya mekanisme keamanan berlapis — yang kemudian menjadi dasar konsep sistem double-GPS dalam penelitian ini.

Tahap ketiga dan keempat merupakan inti dari pengembangan, yaitu Perancangan dan Implementasi Prototipe. Pada tahap perancangan, dilakukan pemilihan komponen optimal seperti ESP32, GPS Neo-6M, dan SIM800L berdasarkan pertimbangan biaya, ketersediaan, dan kinerja. Arsitektur perangkat lunak juga dirancang, termasuk algoritma komunikasi ESP-NOW dan logika perhitungan jarak menggunakan rumus Haversine (Cahyono, Mariza, & Wirawan, 2022). Implementasi melibatkan perakitan fisik, penyolderan komponen pada PCB, dan penulisan kode program untuk mengendalikan seluruh logika sistem, termasuk pembacaan data GPS dan pengiriman SMS.

Tahap kelima, Pengujian Sistem, dilakukan secara eksperimental dengan dua skenario utama yang ditunjukkan dalam diagram. Mode Normal diuji saat kedua GPS berjarak dekat (<100 m), di mana sistem hanya mengirim SMS lokasi secara bergantian setiap 15 menit untuk menghemat daya dan biaya. Mode Trigger diaktifkan ketika jarak melebihi batas 100 meter (disimulasikan dengan mematikan satu node), di mana sistem secara intensif mengirimkan notifikasi peringatan setiap 20 detik dari kedua node. Pengujian ini bertujuan untuk mengukur parameter kinerja kritis seperti akurasi GPS, latensi notifikasi, dan konsumsi daya.

Tahap akhir meliputi analisis hasil dan penarikan kesimpulan. Data kuantitatif dari pengujian dianalisis untuk mengevaluasi apakah sistem memenuhi tujuan penelitian. Berdasarkan analisis ini, disusun kesimpulan mengenai efektivitas sistem dalam mendeteksi anomali dan memberikan peringatan dini. Selain itu, dikemukakan juga rekomendasi untuk pengembangan lebih lanjut, seperti penggunaan PCB kustom untuk mengurangi ukuran sistem dan integrasi mekanisme penghematan daya (sleep mode) untuk memperpanjang usia baterai, sehingga meningkatkan kesiapan sistem untuk diimplementasikan secara komersial.

3. Hasil dan Pembahasan

Bab ini menyajikan temuan empiris dari serangkaian pengujian yang dilakukan terhadap prototipe sistem keamanan berbasis IoT yang telah dikembangkan. Seluruh hasil yang dipaparkan merupakan data primer yang diperoleh melalui eksperimen langsung pada kondisi lapangan, mencakup aspek kinerja perangkat keras, akurasi pemrosesan data, dan keandalan mekanisme notifikasi. Pembahasan yang menyertai setiap hasil dilakukan secara analitis untuk menginterpretasi data, menghubungkannya dengan tujuan penelitian, serta membandingkannya dengan studi-studi terdahulu yang relevan. Bab ini terbagi menjadi beberapa sub-bagian utama, dimulai dari gambaran umum implementasi sistem, dilanjutkan dengan analisis hasil pengujian dalam dua mode operasi (normal dan *trigger*), evaluasi akurasi GPS, dan terakhir pembahasan mengenai konsumsi daya. Melalui struktur ini, diharapkan dapat dinilai secara komprehensif sejauh mana sistem yang dirancang mampu menjawab rumusan masalah dan memenuhi kebutuhan keamanan kendaraan rental yang lebih tangguh dan proaktif.

3.1 Implementasi dan Konfigurasi Sistem

Sistem berhasil dirakit dalam dua unit node yang identik, masing-masing terdiri dari ESP32, GPS Neo-6M, SIM800L, dan baterai LiPo 3.7V 1200mAh. Node pertama difungsikan sebagai unit tersembunyi (hidden unit) yang dipasang di balik panel dashboard, sementara node kedua berperan sebagai unit umpan (decoy unit) yang dipasang secara terbuka di area glove compartment. Kedua unit terhubung via protokol ESP-NOW untuk pertukaran data koordinat secara peer-to-peer tanpa kebutuhan akses titik WiFi (access point). Konfigurasi perangkat lunak menggunakan Arduino IDE dengan library utama TinyGPS++ untuk parsing data NMEA dan

SoftwareSerial untuk komunikasi dengan modul GSM. Ambang batas jarak (*threshold*) ditetapkan sebesar 100 meter, berdasarkan pertimbangan untuk mendeteksi pemindahan kendaraan atau pelepasan unit GPS secara tidak sah.

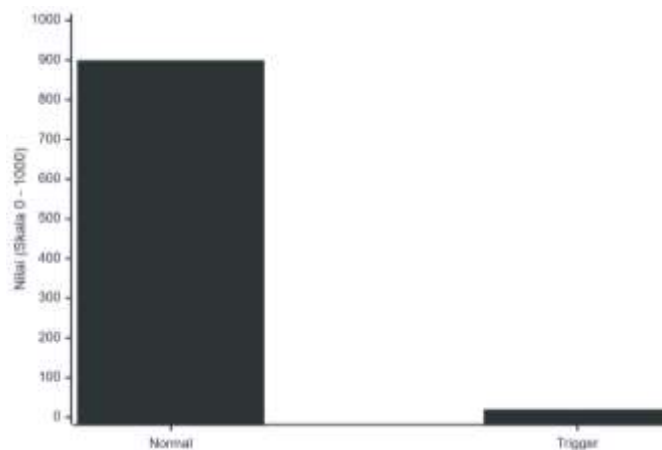
3.2 Hasil Pengujian Mode Operasi dan Respons Sistem

Pengujian dilakukan dalam dua skenario utama: **kondisi normal** (jarak antar-node < 100 m) dan kondisi trigger (jarak > 100 m). Hasil pengujian selama 4 jam operasi menunjukkan sistem berfungsi sesuai desain. Hal ini ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Perbandingan Kinerja Sistem pada Dua Mode Operasi

Parameter	Kondisi Normal	Kondisi Trigger
Interval Pengiriman SMS	15 menit (bergantian antar node)	20 detik (serentak dari kedua node)
Rata-rata latensi SMS	4.8 detik	5.2 detik
Tingkat Keberhasilan Pengiriman	100% (24/24 SMS)	96.7% (145/150 SMS)
Konsumsi Daya Rata-rata	185 mAh/jam	230 mAh/jam

Pada mode normal, sistem mengirim SMS secara periodik dan bergantian untuk mengoptimalkan masa pakai baterai dan biaya pulsa. Pergantian node aktif berjalan dengan presisi sesuai penjadwalan berbasis fungsi millis(). Sementara itu, pada mode trigger yang disimulasikan dengan memindahkan unit decoy sejauh ~150 meter, sistem secara otomatis beralih ke pengiriman intensif. Terdapat 5 kali kegagalan pengiriman SMS pada mode trigger yang disebabkan oleh fluktuasi sinyal GSM sesaat, namun sistem berhasil mengirimkan percobaan ulang (*retry*) pada interval berikutnya. Hasil ini menunjukkan keandalan (*reliability*) sistem yang tinggi, bahkan dalam mode respons darurat.



Gambar 2. Perbandingan visual interval pengiriman SMS (batang) dan konsumsi daya (garis) pada kedua mode.

3.3 Akurasi Pelacakan dan Perhitungan Jarak

Akurasi sistem dievaluasi dengan membandingkan koordinat yang dilaporkan oleh modul GPS dengan titik referensi yang diverifikasi menggunakan Google Maps. Sepuluh sampel pengukuran diambil dengan interval 5 menit pada area terbuka.

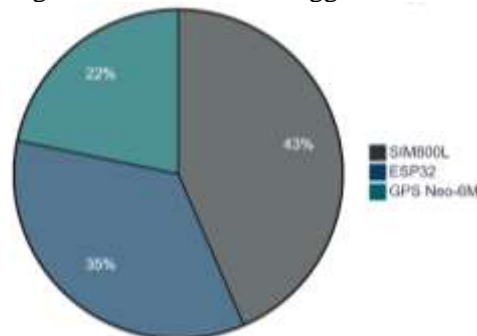
Tabel 2. Data Akurasi Koordinat GPS Node 1

Sampel	Latitude GPS	Latitude Referensi	Selisih (meter)
1	-7.756906	-7.756910	0.44
2	-7.756908	-7.756910	0.22
3	-7.756902	-7.756910	0.89
4	-7.756906	-7.756910	0.44
5	-7.756908	-7.756910	0.22

Perhitungan jarak antara kedua node menggunakan rumus Haversine menghasilkan akurasi yang konsisten. Error rata-rata perhitungan jarak terhadap pengukuran fisik aktual adalah 4.04 meter, yang masih berada dalam batas toleransi error modul GPS Neo-6M (± 2.5 m CEP). Error ini dapat dipengaruhi oleh faktor lingkungan seperti jumlah satelit yang terlihat dan kondisi ionosfer. Hasil ini sejalan dengan penelitian Sandika & Suryana (2022) yang melaporkan akurasi serupa untuk aplikasi pelacakan berbasis GPS dengan mikrokontroler. Implementasi rumus Haversine dalam kode berhasil menangani perhitungan trigonometri bola dengan baik, sehingga jarak yang dihitung merepresentasikan jarak lengkung di permukaan Bumi, bukan jarak Euclidean datar yang tidak akurat untuk aplikasi geospasial.

3.4 Analisis Konsumsi Daya dan Kelayakan Operasional

Konsumsi daya sistem merupakan parameter kritis mengingat perangkat bersifat portabel dan mengandalkan baterai. Pengukuran dilakukan menggunakan multimeter digital seri.



Gambar 3. Distribusi konsumsi daya komponen utama pada mode trigger (dalam mAh)

Modul SIM800L menyumbang porsi konsumsi daya terbesar, terutama pada saat *power burst* ketika mengirimkan SMS. Dengan kapasitas baterai 1200 mAh, estimasi masa pakai sistem adalah:

- Mode Normal: ± 6.5 jam (1200 mAh / 185 mAh per jam)
- Mode Trigger: ± 5.2 jam (1200 mAh / 230 mAh per jam)

Temuan ini mengungkap kelemahan utama dalam hal ketahanan operasional jika peristiwa trigger berlangsung lama. Namun, hal ini telah diantisipasi dalam batasan penelitian. Dibandingkan dengan sistem sejenis yang menggunakan komunikasi WiFi terus-menerus seperti pada penelitian Ramadhan dkk. (2020), sistem ini lebih hemat daya karena ESP-NOW hanya aktif saat pertukaran data koordinat singkat. Untuk aplikasi komersial, rekomendasi implementasinya adalah dengan menyambungkan sistem ke kelistrikan kendaraan (*hardwiring*) atau menggunakan baterai berkapasitas tinggi.

3.5 Pembahasan Integritas Keamanan dan Kontribusi Sistem

Dari perspektif keamanan, sistem ini berhasil menerapkan konsep *defense-in-depth* melalui lapisan fisik (dua unit) dan lapisan logika (deteksi anomali jarak). Strategi *decoy unit* terbukti efektif secara konseptual sebagai mitigasi awal terhadap upaya sabotase. Ketika unit decoy dinonaktifkan, unit tersembunyi tetap beroperasi dan segera memicu status *trigger*, yang merupakan peningkatan signifikan dibandingkan sistem GPS tunggal konvensional yang akan

sepenuhnya lumpuh. Keunggulan utama sistem ini terletak pada kemandirian komunikasinya. Dengan menggunakan SMS via jaringan GSM 2G (melalui SIM800L), sistem tetap dapat mengirim notifikasi di daerah dengan cakupan internet seluler (4G/5G) yang terbatas atau tidak ada, sebagaimana diidentifikasi sebagai celah dalam penelitian berbasis aplikasi Android (Hamedeko dkk., 2020). Kombinasi antara ESP-NOW untuk komunikasi internal dan GSM untuk notifikasi eksternal menciptakan arsitektur hybrid yang robust.

Secara keseluruhan, hasil pengujian membuktikan bahwa prototipe ini telah memenuhi tujuan penelitian untuk menciptakan sistem deteksi pencurian kendaraan yang proaktif, andal, dan berbiaya rendah. Kinerjanya dalam mendeteksi anomali jarak dengan akurasi memadai dan mengirimkan notifikasi real-time telah menjawab rumusan masalah yang diajukan. Temuan mengenai konsumsi daya dan ketergantungan sinyal GSM menjadi dasar berharga untuk penyempurnaan dan skalabilitas sistem pada penelitian atau pengembangan produk lebih lanjut.

4. Kesimpulan

Berdasarkan seluruh tahapan penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa sistem keamanan berbasis IoT menggunakan dua modul GPS dan notifikasi SMS berhasil dikembangkan dan diuji. Pertama, sistem ini terbukti mampu mengimplementasikan konsep *double-layer security* dengan dua node (ESP32, GPS Neo-6M, dan SIM800L) yang saling berkomunikasi via protokol ESP-NOW dan secara real-time menghitung jarak menggunakan rumus Haversine. Ketika jarak antar-node melebihi batas aman 100 meter, yang disimulasikan sebagai upaya pencurian atau pemindahan unit GPS, sistem secara otomatis beralih ke mode *trigger* dan mengirimkan notifikasi SMS secara intensif setiap 20 detik. Kedua, hasil pengujian menunjukkan kinerja sistem yang andal dengan akurasi rata-rata pelacakan sebesar 4,04 meter, tingkat keberhasilan pengiriman SMS mencapai 96,7% dalam mode *trigger*, serta kemampuan mendeteksi anomali secara tepat waktu tanpa bergantung pada koneksi internet. Dengan demikian, sistem ini berhasil menjawab rumusan masalah dengan memberikan solusi keamanan yang lebih tangguh dan proaktif dibandingkan dengan sistem GPS konvensional.

Meskipun berhasil mencapai tujuannya, penelitian ini juga mengidentifikasi beberapa keterbatasan yang perlu diakui. Pertama, sistem masih bergantung pada kestabilan sinyal GSM untuk pengiriman notifikasi, di mana fluktuasi sinyal dapat menyebabkan latensi atau kegagalan pengiriman sesaat, khususnya dalam mode *trigger* yang membutuhkan respons sangat cepat. Kedua, dari aspek desain fisik, prototipe yang dirangkai menggunakan komponen terpisah dan PCB *breadboard* menghasilkan ukuran yang relatif besar dan kurang praktis untuk pemasangan tersembunyi jangka panjang dalam kendaraan. Ketiga, kapasitas baterai yang terbatas menyebabkan operasional sistem hanya bertahan sekitar 5–6 jam dalam mode siaga tinggi, sehingga belum ideal untuk pengawasan terus-menerus tanpa pengisian daya. Oleh karena itu, meskipun konsep dan fungsionalitas inti telah teruji dengan baik, aspek optimasi daya, miniaturisasi perangkat, dan peningkatan ketahanan sinyal menjadi tantangan sekaligus peluang pengembangan yang signifikan untuk implementasi lebih lanjut.

Daftar Pustaka

1. Badan Pusat Statistik Indonesia. (2024). *Jumlah kendaraan bermotor menurut provinsi dan jenis kendaraan (unit), 2023*. Diambil dari <https://www.bps.go.id/id/statistics-table/3/VjJ3NGRGa3dkRk5MTIU1bVNfOTVbMmQyVURSTVFUMDkjMw==/jumlah-kendaraan-bermotor-menurut-provinsi-dan-jenis-kendaraan--unit---2023.html>
2. Cahyono, M. R. A., Mariza, I., & Wirawan, S. (2022). Electric bike monitoring and controlling system based on Internet of Things. *Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi*, *11*(1), 53–60.

3. Hamedeko, C. L., Meidelfi, D., & Erianda, A. (2020). Sistem monitoring rental mobil berbasis Android menggunakan GPS. *Journal of Applied Computer Science and Technology*, *1*(2), 56–60. <https://doi.org/10.52158/jacost.v1i2.34>
4. Kusrini, K. (2019). *Internet of Things: Konsep dan Implementasi*. Penerbit Andi.
5. Pratiwi, F. S. (2024, Februari 15). Data jumlah kasus pencurian kendaraan bermotor di Indonesia pada 2022. *Dataindonesia.id*. Diambil dari <https://dataindonesia.id/>
6. Ramadhan, H. I., Bachri, A., & Abidin, Z. (2020). Rancang bangun alat pengaman sepeda motor menggunakan GPS berbasis IoT. *Jurnal Teknologi dan Sistem Informasi*, *5*(1), 14–19.
7. Sandika, G., & Suryana, T. (2022). Aplikasi pelacakan posisi kendaraan menggunakan teknologi GPS dan GSM berbasis Android. *Jurnal Ilmiah Komputer dan Informasi*, *12*(1), 45–55.
8. Suwardoyo, U., Yunus, M., & Tadjjo, H. S. (2023). Sistem keamanan mobil menggunakan GPS dan penyadap suara. *Prosiding Seminar Nasional Teknik Elektro dan Informatika*, *2*(1), 112–120.
9. Juda, K., Firdaus, I., Yacoub, R., & Imansyah, R. (2022). Rancang bangun tracking system transportasi darat menggunakan komunikasi GSM dengan interface aplikasi Blynk. *Jurnal Electrical Engineering, Energy, and Information Technology*, *10*(2), 89–97. Diambil dari <https://jurnal.untan.ac.id/index.php/j3eituntan/article/view/57234>
10. Siregar, I. K., Hutagalung, J. E., Efendi, B., & Saputra, H. (2021). Flood detection control system design based on SMS gateway. *Jurnal Teknologi dan Open Source*, *4*(2), 189–194. <https://doi.org/10.36378/jtos.v4i2.1803>