

## Sistem Pengumpulan Data Pelacakan Transportasi Umum Menggunakan Bluetooth Proximity Beacons

Muhammad Afifudin Arsyada<sup>1</sup>, Agung Setia Budi<sup>2</sup>, Achmad Basuki<sup>3</sup>

Program Studi Teknik Komputer, Fakultas Ilmu Komputer, Universitas Brawijaya  
Email: <sup>1</sup>udineze1907@student.ub.ac.id, <sup>2</sup>agungsetiabudi@ub.ac.id, <sup>3</sup>abazh@ub.ac.id

### Abstrak

Preferensi masyarakat Indonesia terhadap kendaraan pribadi dibandingkan transportasi umum disebabkan oleh masalah seperti layanan yang tidak andal, waktu tempuh yang tidak konsisten, dan kurangnya integrasi teknologi pada transportasi umum. Penelitian ini mengembangkan sistem pelacakan bus sekolah di Kota Malang tanpa menggunakan GPS, dengan memanfaatkan teknologi Bluetooth Low Energy (BLE) dan Internet of Things (IoT). Beacon BLE yang dipasang pada bus memancarkan sinyal yang dideteksi oleh Road Side Unit (RSU) berbasis Raspberry Pi 4 dan smartphone Android, kemudian data dikirimkan ke server cloud untuk memprediksi waktu kedatangan bus secara real-time menggunakan machine learning. Pengujian menunjukkan tingkat keberhasilan deteksi sinyal sebesar 70%-97% untuk Raspberry Pi 4 dan 80%-90% untuk perangkat Android, kecuali di beberapa lokasi dengan kendala tertentu. Akses perangkat secara jarak jauh menggunakan SSH dan AirDroid mencapai keberhasilan 80%-100%, sementara pengiriman data telemetry ke server berhasil dilakukan dengan rata-rata 76%-99%. Sistem ini menunjukkan keandalan yang baik meskipun terdapat tantangan lingkungan dan operasional, sehingga berpotensi meningkatkan layanan transportasi umum secara signifikan.

**Kata kunci:** *Bluetooth Low Energy, IoT, Transportasi Umum, Pelacakan Bus, Pemantauan Real-Time, Sistem Bus Sekolah.*

### Abstract

*The preference for private vehicles over public transportation in Indonesia is driven by issues such as unreliable services, inconsistent travel times, and lack of technological integration in public transport. To address these issues, this study explores a GPS-less tracking system for school buses in Malang City using Bluetooth Low Energy (BLE) beacons and Internet of Things (IoT). BLE beacons installed on buses emit signals detected by Road Side Units (RSU) equipped with Raspberry Pi 4 and Android smartphones. These units transmit data to a cloud server for real-time bus tracking and arrival prediction using machine learning. Testing revealed detection rates of 70%-97% for Raspberry Pi 4 and 80%-90% for Android devices, except in some challenging locations. Remote device access via SSH and AirDroid achieved an 80%-100% success rate, while telemetry data transmission to the server ranged from 76% to 99%. The system demonstrated overall reliability despite environmental and operational challenges, paving the way for improved public transport tracking.*

**Keywords:** *bluetooth low energy, IoT, public transportation, bus tracking, real-time Monitoring, school bus system.*

## 1. PENDAHULUAN

Teknologi IoT telah membuka peluang baru untuk meningkatkan efisiensi transportasi umum, salah satunya melalui penerapan Bluetooth Low Energy (BLE) beacon. BLE beacon memiliki keunggulan konsumsi daya rendah dan kemampuan untuk mengirimkan sinyal yang mendukung pemantauan real-time lokasi kendaraan. Sistem berbasis BLE ini menggunakan perangkat seperti Raspberry Pi 4

dan smartphone Android sebagai Road Side Units (RSU) untuk mendeteksi sinyal dari beacon yang dipasang pada kendaraan, seperti bus sekolah. Teknologi ini memungkinkan pemantauan lokasi secara langsung dengan akses jarak jauh, yang dapat diintegrasikan ke dalam sistem manajemen armada guna meningkatkan efisiensi operasional.

Penelitian ini berfokus pada pengembangan sistem pelacakan transportasi yang

memanfaatkan teknologi Bluetooth Low Energy (BLE) berbasis Internet of Things (IoT) untuk armada bus sekolah di Kota Malang. Latar belakang dari studi kasus ini adalah adanya kebutuhan untuk memantau pergerakan bus sekolah guna memastikan kedatangan yang tepat waktu serta meningkatkan efisiensi operasional. Pelacakan bus yang efektif sangat penting, terutama di kawasan perkotaan seperti Malang, yang sering kali mengalami kemacetan dan keterlambatan akibat kondisi lalu lintas yang tidak menentu.

Berbagai penelitian sebelumnya menunjukkan potensi teknologi IoT dalam transportasi umum. Salah satunya adalah sistem pelacakan berbasis RFID dan GPS yang diajukan oleh Godge, P. (2019). Sistem ini menggunakan RFID untuk mendeteksi bus di halte dan GPS-GSM untuk mengirimkan data lokasi secara real-time melalui server. Sistem ini terbagi menjadi dua modul: admin untuk mengelola unit bus dan halte, serta stationmaster untuk memantau waktu kedatangan dan lokasi bus. Meski sistem ini menjanjikan, biaya perangkat keras yang tinggi dan keterbatasan akurasi di luar jangkauan GPS menjadi kendala. Sebagai alternatif yang lebih ekonomis, Elijah O. (2023) memperkenalkan sistem BLE beacon di Johor, Malaysia, di mana beacon dipasang pada bus dan Raspberry Pi Zero di halte untuk mendeteksi sinyal BLE. Data lokasi dikirimkan ke server untuk memperkirakan waktu kedatangan bus. Meskipun lebih terjangkau dibanding GPS, sistem ini menghadapi tantangan berupa gangguan sinyal radio dan jaringan.

Sistem lain yang menggunakan algoritma Greedy Forwarding (GFA) dikembangkan oleh Jimoh et al. (2020) dengan menggabungkan GPS dan GSM untuk pelacakan presisi tinggi. Sistem ini menyediakan estimasi waktu kedatangan yang akurat, tetapi biaya implementasinya cukup mahal, mencapai \$2.570 per terminal. Selain itu, Federated Learning (FL) mulai diterapkan dalam sistem transportasi pintar untuk memprediksi arus lalu lintas secara real-time. FL memungkinkan perangkat dalam jaringan, seperti kendaraan dan RSU, untuk melatih model pembelajaran mesin tanpa berbagi data mentah. Meski memberikan akurasi yang baik, FL menghadapi kendala konsumsi bandwidth dan latensi komunikasi yang tinggi.

Teknologi BLE juga digunakan dalam pelacakan dalam ruangan dengan memanfaatkan iBeacon. Dibandingkan teknologi WiFi atau GPS, iBeacon lebih hemat biaya dan energi, tetapi rentan terhadap interferensi sinyal akibat hambatan fisik di lingkungan. Penelitian lainnya menggunakan sistem telemetri berbasis Raspberry Pi dan panel surya untuk memantau parameter lingkungan seperti suhu dan kelembapan. Sistem ini ramah lingkungan dan cocok untuk lokasi terpencil, tetapi tantangan utama adalah kestabilan daya selama cuaca buruk.

Penelitian ini bertujuan mengevaluasi performa sistem BLE beacon dalam mendeteksi kendaraan, mengirimkan data secara real-time, dan mengidentifikasi tantangan dalam implementasi untuk meningkatkan efisiensi transportasi umum. Hasil evaluasi diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan sistem transportasi berbasis IoT yang lebih andal dan terjangkau.

Strategi penelitian ini dirancang untuk memastikan implementasi sistem pelacakan transportasi berbasis Bluetooth Low Energy (BLE) dapat berjalan efektif dan efisien. Penelitian dilakukan dengan memilih rute bus sekolah di Kota Malang berdasarkan tingkat kepadatan lalu lintas, distribusi halte, dan lokasi strategis untuk pemasangan Road Side Units (RSU). RSU dipasang pada tiang CCTV di sepanjang rute dengan mempertimbangkan jarak optimal antar-titik, akses listrik, dan minimnya hambatan fisik yang dapat mengganggu sinyal BLE.

Tahapan awal meliputi simulasi dan pengujian perangkat keras seperti Raspberry Pi dan perangkat lunak untuk memastikan sistem berjalan sesuai desain. Selanjutnya, data real-time dikumpulkan dengan memantau sinyal BLE beacon dari bus sekolah. Data ini, seperti waktu kedatangan, intensitas sinyal (RSSI), dan identitas beacon, dikirimkan ke server untuk dianalisis. Evaluasi terhadap interferensi lingkungan juga dilakukan untuk menguji kinerja sistem di berbagai kondisi, termasuk lalu lintas padat dan area dengan banyak sinyal BLE.

Data historis waktu kedatangan dan keberangkatan bus diolah menggunakan algoritma pembelajaran mesin untuk memprediksi waktu kedatangan yang lebih

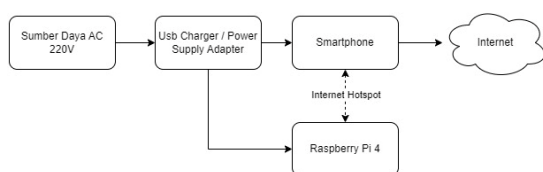
akurat. Sistem diuji keandalannya terhadap variasi jarak RSU, cuaca, dan stabilitas koneksi internet. Berdasarkan hasil evaluasi, perbaikan dilakukan pada algoritma filter, pemrosesan data, serta perlindungan perangkat dari gangguan lingkungan. Dengan strategi ini, penelitian diharapkan menghasilkan sistem pelacakan berbasis BLE yang andal dan efisien untuk mendukung pengelolaan transportasi umum secara nyata.

## 2. PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI



Gambar 1. Perancangan Sistem RSU

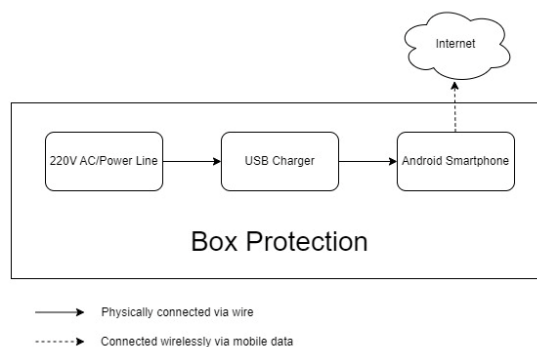
Pada Gambar 1, ditunjukkan desain sistem deteksi bus menggunakan Road Side Unit (RSU) yang memanfaatkan teknologi Bluetooth Low Energy (BLE). Setiap bus dilengkapi dengan Beacon Estimote yang memancarkan sinyal BLE dengan identitas unik. Beacon ini dipasang di dekat pintu masuk bus agar sinyalnya dapat dideteksi dengan lebih mudah oleh RSU yang ditempatkan di tiang jalan. RSU ini bertugas untuk menangkap sinyal BLE dan mengirimkan data ke server untuk menghitung estimasi waktu kedatangan bus di halte berikutnya.



Gambar 2. Diagram Blok RSU Raspi 4

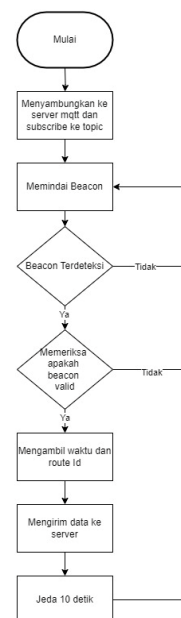
Gambar 2 menggambarkan desain alternatif RSU yang menggunakan Raspberry Pi 4 sebagai pusat pemrosesan data. Raspberry Pi 4 menerima data dari BLE beacon dan mengelola jaringan lokal melalui WiFi. Sumber daya berasal dari AC 220V, yang disalurkan melalui USB charger atau power supply adapter. Smartphone

digunakan sebagai hotspot untuk menghubungkan Raspberry Pi ke internet, memungkinkan pengiriman data ke server cloud.



Gambar 3. Diagram Blok RSU Raspi 4

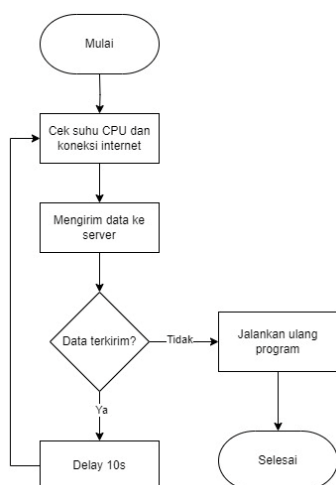
Gambar 3 menunjukkan penggunaan smartphone Android sebagai komponen inti dalam RSU. Smartphone ini dilindungi oleh Box Protection untuk melindungi perangkat dari kondisi lingkungan seperti panas, hujan, dan debu. Smartphone berfungsi untuk memproses dan mengirimkan data BLE beacon ke server cloud menggunakan koneksi internet. Sumber daya untuk smartphone juga berasal dari AC 220V melalui USB charger.



Gambar 4. Diagram Alir Scanner

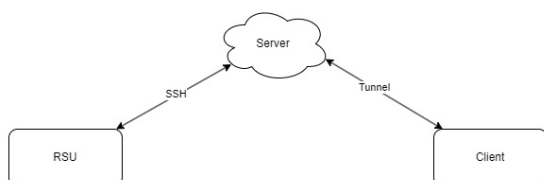
Pada Gambar 4, ditunjukkan diagram alur program untuk mendeteksi BLE beacon. Program ini pertama-tama melakukan koneksi ke server MQTT dan berlangganan ke topik tertentu. Setelah berhasil terkoneksi, program akan terus-menerus memindai lingkungan sekitar untuk mendeteksi beacon BLE yang terdaftar. Setelah data beacon terdeteksi dan

terverifikasi, informasi tersebut akan dikirimkan ke server untuk diproses, dan pemindaian akan diulang setiap 10 detik.



Gambar 5. Diagram Alir Telemetry

Gambar 5 menunjukkan diagram alur program telemetry yang memantau suhu CPU Raspberry Pi 4 dan koneksi internet. Program ini secara rutin mengirimkan data suhu ke server setelah memastikan koneksi internet tersedia. Setelah pembacaan suhu selesai, sistem menunggu selama 10 detik sebelum memulai pembacaan berikutnya untuk pemantauan suhu yang berkelanjutan.



Gambar 6. Diagram Blok Akses Jarak Jauh

Gambar 6 menggambarkan sistem akses jarak jauh yang memungkinkan pemantauan dan pengelolaan perangkat Raspberry Pi dan smartphone Android dari lokasi yang berbeda. Untuk Raspberry Pi, teknologi Bore digunakan untuk memungkinkan akses jarak jauh melalui tunneling dan protokol SSH. Aplikasi AirDroid digunakan untuk mengakses smartphone Android, yang terhubung langsung ke internet untuk pengelolaan perangkat. Server bertindak sebagai perantara utama dalam komunikasi dengan Raspberry Pi, sementara perangkat Android dapat diakses langsung melalui cloud.

Implementasi perangkat keras sistem pengumpulan data transportasi umum dilakukan dengan memerhatikan aspek keamanan, ketahanan, dan efisiensi operasional. Box

pelindung dipasang pada tiang CCTV yang telah dipilih berdasarkan analisis lokasi strategis sepanjang rute bus sekolah. Pemasangan dilakukan pada ketinggian 2-3 meter dari permukaan tanah untuk memastikan perangkat terlindungi dari potensi kerusakan akibat cuaca ekstrem atau aksi vandalisme, serta untuk mempertahankan kualitas penerimaan sinyal Bluetooth Low Energy (BLE) yang optimal. Box pelindung diposisikan menghadap ke arah jalan untuk memaksimalkan area deteksi BLE beacon dari bus yang melintas.

Tabel berikut menunjukkan lokasi-lokasi pemasangan perangkat RSU:

Tabel 1. Implementasi RSU

Lokasi	Gambar Implementasi
Tlogomas	
MT Haryono	
Suhat/MT Haryono Barat	



Lokasi	Gambar Implementasi
Ijen Utara	
Ijen	
Tugu	

Pada implementasi internal box, komponen-komponen seperti Raspberry Pi 4, power adapter, dan modem 4G ditempatkan dengan mempertimbangkan aspek thermal management (pengelolaan suhu) dan kemudahan maintenance. Power adapter LDNIO A4610C ditempatkan di sisi kanan box dengan jarak aman dari Raspberry Pi untuk menghindari interferensi elektromagnetik.



Gambar 7. Implementasi Arsitektur RSU

Gambar 7 menunjukkan hasil implementasi internal box, di mana Raspberry Pi 4

ditempatkan secara strategis agar memiliki akses mudah ke port utama seperti port USB dan power. Penempatan Raspberry Pi yang mudah dijangkau sangat penting untuk memudahkan pemeliharaan dan troubleshooting. Dengan penempatan seperti ini, peneliti dapat dengan cepat mengganti atau memperbaiki kabel yang terhubung tanpa perlu membongkar keseluruhan perangkat. Ini juga memungkinkan penanganan yang cepat apabila terjadi gangguan pada sistem, memastikan perangkat tetap berjalan tanpa downtime yang lama.

### 3. PENGUJIAN DAN ANALISIS

Pengujian pertama dilakukan untuk menguji kemampuan Raspberry Pi 4 dalam mendeteksi sinyal BLE beacon. Prosedur dimulai dengan memastikan Raspberry Pi 4 terpasang dengan baik, Bluetooth aktif, dan perangkat BLE beacon dalam keadaan aktif. Setelah menjalankan kode pemindaian sinyal BLE, data yang diterima, seperti BLE Address, UUID, Major, Minor, dan RSSI, ditampilkan di Command Line untuk dianalisis. Gambar 8 menunjukkan hasil deteksi sinyal BLE beacon yang diterima oleh Raspberry Pi 4.

```

0|ble_beac id: '45e23c2f6d8b',
0|ble_beac address: '45:e2:3c:2f:6d:8b',
0|ble_beac localName: 'GBeacon',
0|ble_beac txPowerLevel: 1,
0|ble_beac rssi: -73,
0|ble_beac beaconType: 'iBeacon',
0|ble_beac iBeacon: {
0|ble_beac   uuid: '47420000-217F-42C7-BFE5-07E4CD2B408C',
0|ble_beac   major: 12,
0|ble_beac   minor: 26195,
0|ble_beac   txPower: -59
0|ble_beac }
0|ble_beac }
Beacon detected, but not the Bus!

```

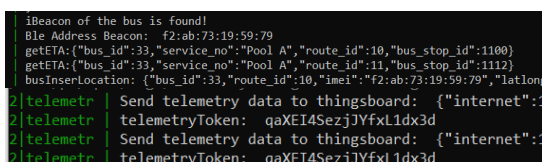
Gambar 8. Hasil Deteksi Beacon Pada Raspi 4

Selanjutnya, pengujian dilakukan untuk memastikan smartphone Android dapat mendeteksi sinyal BLE beacon melalui aplikasi beacon scanner. Aktivasi Bluetooth pada smartphone dan instalasi aplikasi scanner dilakukan, kemudian beacon didekatkan pada jarak tertentu. Aplikasi kemudian menampilkan informasi beacon seperti BLE Address, UUID, Major, Minor, dan RSSI. Gambar 9 memperlihatkan hasil deteksi BLE beacon menggunakan smartphone Android.



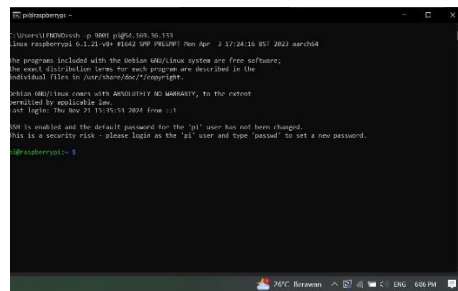
Gambar 9. Hasil Deteksi Beacon Pada Android

Pengujian berikutnya menguji kemampuan sistem dalam mengirim data beacon dan telemetry, termasuk suhu Raspberry Pi 4, ke server ThingsBoard melalui API. Setelah Raspberry Pi 4 mendeteksi beacon dan mengukur suhu, data tersebut dikirimkan secara berkala untuk dianalisis. Pengujian ini juga memverifikasi kestabilan pengiriman data serta kemampuan pemulihan otomatis jika terjadi kesalahan. Gambar 10 menunjukkan hasil pengiriman data ke server.



Gambar 10. Hasil Deteksi Beacon Pada Raspi 4

Selanjutnya, pengujian akses jarak jauh pada Raspberry Pi 4 dilakukan menggunakan SSH melalui Bore Client. Konfigurasi Bore Client dilakukan untuk memungkinkan akses jarak jauh ke Raspberry Pi 4 dari perangkat lain, memungkinkan pengguna untuk menjalankan perintah sistem secara remote. Gambar 11 menunjukkan tampilan akses jarak jauh yang berhasil dilakukan melalui Bore Client.



Gambar 11. Hasil Akses Bore Pada Raspi 4

Terakhir, pengujian akses jarak jauh pada smartphone Android dilakukan menggunakan aplikasi AirDroid. Aplikasi ini memungkinkan pengelolaan perangkat Android dari jarak jauh, termasuk akses ke file dan pengaturan perangkat. Gambar 12 menunjukkan tampilan pengelolaan perangkat Android melalui aplikasi AirDroid pada perangkat lain.



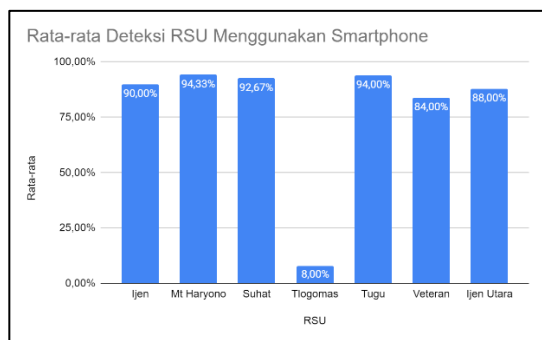
Gambar 12. Hasil Akses Pada Android

Pengujian sebelumnya bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas smartphone Android dan Raspberry Pi 4 dalam mendeteksi sinyal BLE dari perangkat Estimote BLE beacon yang dipasang pada bus sekolah. Pengujian sebelumnya juga akan dilakukan berulang kali dan dilakukan analisis yang berfokus pada persentase keberhasilan setiap pengujian yang dilakukan.

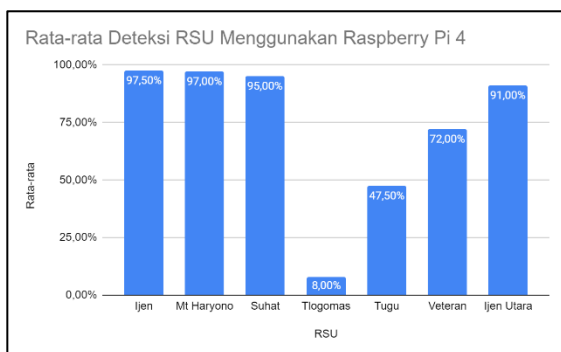
$$Presentase = \frac{\text{deteksi setiap RSU}}{\text{jumlah deteksi yang diharapkan}} \times 100\% \quad (1)$$

Pada rumus di atas memberikan perhitungan keberhasilan deteksi *BLE beacon* terhadap *RSU*.

Gambar berikut menunjukkan persentase pencapaian deteksi beacon oleh smartphone Android pada berbagai lokasi RSU selama periode 30 September - 31 Oktober 2024.



Gambar 13. Grafik Presentase Keberhasilan Scanning Android



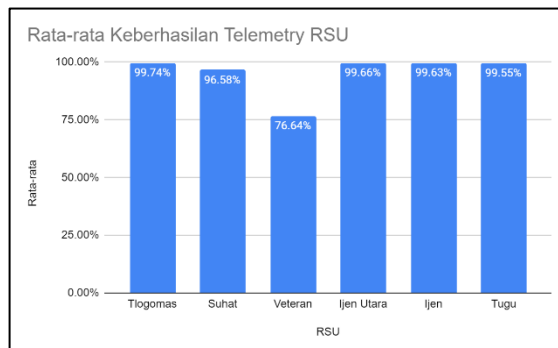
Gambar 14. Grafik Presentase Keberhasilan Scanning Raspberry Pi 4

Berdasarkan Gambar 13 dan 14 di atas dapat disimpulkan bahwa RSU pada Sistem Pengumpulan Data Pelacakan Transportasi Umum Menggunakan *Bluetooth Proximity Beacons* sudah dapat mendeteksi *BLE beacon* yang terletak pada bus sekolah malang dengan baik dan memiliki akurasi deteksi yang tinggi. Namun masih ada beberapa penempatan RSU yang masih dapat ditingkatkan dengan beberapa cara seperti menambahkan komponen yang memperluas area deteksi BLE beacon atau dengan memindahkan RSU ke tempat yang lebih strategis untuk menjangkau BLE beacon.

Analisis selanjutnya adalah mengukur efektivitas pengiriman data telemetry dari RSU ke server. Persentase keberhasilan dihitung berdasarkan jumlah data yang berhasil dikirimkan dibandingkan dengan jumlah data yang diharapkan. Hasil menunjukkan tingkat keberhasilan pengiriman data yang sangat tinggi, meskipun ada gangguan koneksi internet dan kesalahan autentikasi API yang memengaruhi beberapa pengiriman. Rumus perhitungan adalah:

$$\text{Presentase} = \frac{\text{Jumlah data telemetry}}{\text{Jumlah data yang diharapkan}} \times 100\% \quad (2)$$

Gambar berikut menyajikan persentase keberhasilan pengiriman data dari masing-masing RSU selama periode 30 September - 31 Oktober 2024.



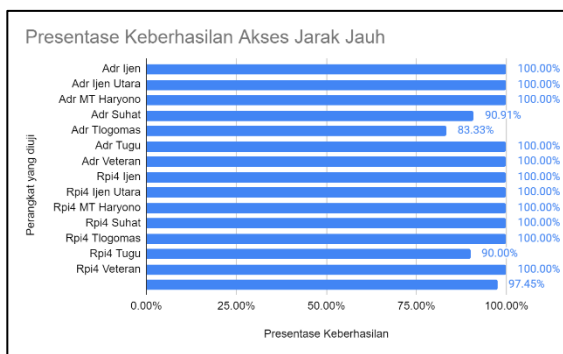
Gambar 15. Grafik Presentase Keberhasilan Telemetry Tiap RSU

Gambar 15 memperlihatkan data presentase keberhasilan terhadap telemetry yang dikirimkan dari tiap-tiap RSU ke server. Data tersebut memperlihatkan bahwa presentase kesuksesan hampir semua RSU mencapai lebih dari 96%. Namun pada RSU Veteran masih terdapat beberapa kendala yang menyebabkan keberhasilan telemetry hanya mencapai 76,6%. Kendala itu kemungkinan adalah putusnya internet dari smartphone android sehingga menyebabkan raspberry pi tidak dapat mengirimkan telemetry ke server.

Analisis selanjutnya adalah akses jarak jauh menggunakan Bore Client (untuk Raspberry Pi 4) dan AirDroid (untuk smartphone Android) bertujuan untuk mengevaluasi stabilitas koneksi dan keandalan pengelolaan RSU dari jarak jauh. Persentase keberhasilan akses jarak jauh dihitung dengan menggunakan rumus berikut:

$$\text{Presentase} = \frac{\text{jumlah upaya berhasil}}{\text{jumlah upaya yang dilakukan}} \times 100\% \quad (3)$$

Hasil pengujian menunjukkan tingkat keberhasilan yang sangat tinggi, dengan sebagian besar upaya akses berhasil meskipun terdapat gangguan pada jaringan internet sesekali. Berikut ini adalah gambar yang menunjukkan persentase keberhasilan akses jarak jauh dari masing-masing RSU selama periode 30 September - 31 Oktober 2024.



Gambar 16. Grafik Presentase Keberhasilan Akses Jarak Jauh

Berdasarkan gambar 16, hasil pengujian menunjukkan bahwa tingkat keberhasilan akses jarak jauh sangat tinggi pada sebagian besar perangkat yang diuji. Perangkat seperti Android Ijen, Android Ijen Utara, Android MT Haryono, Android Tugu, Android Veteran, serta hampir semua perangkat Raspberry Pi 4 (Rpi4) mencapai keberhasilan akses 100%. Namun, ada beberapa pengecualian, seperti Android Tlogomas (83,33%), Android Suhat (90,91%), dan Rpi4 Tlogomas (90%), yang menunjukkan tingkat keberhasilan sedikit lebih rendah.

#### 4. KESIMPULAN SARAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa Raspberry Pi 4 berhasil mendeteksi beacon dengan tingkat keberhasilan yang sangat baik di berbagai lokasi RSU, sesuai dengan target yang diharapkan, dan mampu mengirimkan data ke server pusat dengan efektif. Smartphone Android, meskipun memiliki tingkat deteksi beacon sebesar 81,90%, tetap memberikan kontribusi penting dalam meningkatkan keandalan deteksi beacon, meskipun ada penurunan pada lokasi RSU Tlogomas akibat perubahan rute bus. Pengujian juga menunjukkan bahwa akses perangkat RSU melalui SSH dan AirDroid mencapai tingkat keberhasilan 97,5%, yang memastikan pengelolaan perangkat dapat dilakukan secara efektif dari jarak jauh. Selain itu, pengiriman data telemetry berhasil dengan rata-rata 95,30%, meskipun beberapa periode menunjukkan kegagalan pengiriman, sistem berhasil melakukan pemulihan dan melanjutkan pengiriman data.

Berdasarkan hasil pengujian, disarankan untuk melakukan penyesuaian skenario

pemindaian beacon di lokasi dengan perubahan rute bus, seperti Tlogomas, dengan memperbarui area pemindaian beacon dan mengoptimalkan algoritma untuk meningkatkan akurasi deteksi. Untuk mengatasi gangguan dalam pengiriman data telemetry, disarankan untuk menambahkan mekanisme pemulihan otomatis atau notifikasi kegagalan pengiriman agar masalah dapat segera ditangani tanpa mengganggu kinerja sistem. Selain itu, untuk meningkatkan keamanan dan stabilitas akses jarak jauh, sistem autentikasi dan enkripsi komunikasi perlu diperkuat, seperti dengan menggunakan VPN atau autentikasi dua faktor. Pemeliharaan dan pemantauan sistem secara rutin juga sangat penting untuk menjaga stabilitas sistem, sementara penerapan sistem pelaporan otomatis terkait status perangkat dan deteksi beacon akan mempermudah pengelolaan dan meningkatkan keandalan sistem dalam jangka panjang.

#### 5. DAFTAR PUSTAKA

- Chong, Y. W., Yau, K. L. A., Ibrahim, N. F., Rahim, S. K. A., Keoh, S. L., & Basuki, A. (2024). Federated Learning for Intelligent Transportation Systems: Use Cases, Open Challenges, and Opportunities. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*. <https://doi.org/10.1109/MITS.2024.3451479>
- Elijah, O., Keoh, S. L., bin Abdul Rahim, S. K., Seow, C. K., Cao, Q., bin Sarijari, M. A., Ibrahim, N. F., & Basuki, A. (2023). Transforming urban mobility with internet of things: public bus fleet tracking using proximity-based bluetooth beacons. *Frontiers in the Internet of Things*, 2. <https://doi.org/10.3389/friot.2023.1255995>
- Godge, P., Gore, K., Gore, A., Jadhav, A., & Nawathe, A. (2019). Smart Bus Management and Tracking System. [www.ijlesjournal.org](http://www.ijlesjournal.org)
- Jimoh, O. D., Ajao, L. A., Adeleke, O. O., & Kolo, S. S. (2020). A Vehicle Tracking System Using Greedy Forwarding Algorithms for Public Transportation in Urban Arterial. *IEEE Access*, 8, 191706–191725. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3031488>



- Kassim, M., Salleh, A. S., Shahbudin, S., Yusoff, M., & Kamaluddin, N. A. (2022). IoT Bus Tracking System Localization via GPS-RFID. 2022 IEEE International Conference in Power Engineering Application, ICPEA 2022 - Proceedings.  
<https://doi.org/10.1109/ICPEA53519.2022.9744710>
- Moneer, M., Aljawarneh, M. M., Das Dhomeja, L., Laghari, G., & Memon, B. R. (2020). An Indoor Tracking System using iBeacon and Android. 4(2).
- Mutiawati, C. (2019). Kinerja Pelayanan Angkutan Umum Jalan Raya.
- Sadhu, P. K., Yanambaka, V. P., & Abdelgawad, A. (2022). Internet of Things: Security and Solutions Survey. In Sensors (Vol. 22, Issue 19). MDPI.  
<https://doi.org/10.3390/s22197433>
- Vargas, A. P., Valdez-Martinez, J. S., Beltran-Escobar, A. M., Villanueva-Tavira, J., Lopez-Vega, L. J., Alcala-Barojas, I., Calderon, E. C., & Arias, H. M. B. (2021). Design and Development of a sustainable telemetry system for environmental parameters. Proceedings - 2021 International Conference on Mechatronics, Electronics and Automotive Engineering, ICMEAE 2021, 262–267.  
<https://doi.org/10.1109/ICMEAE55138.2021.00049>