

Rancang Bangun Purwarupa Sistem Pendeteksi Kepadatan Lalu Lintas dengan Memanfaatkan Komunikasi *Vehicle-To-Everything (V2x)* untuk Kendaraan Cerdas

I Putu Gde Raditya Wikadhyana¹, Ngurah Indra ER², Widyadi Setiawan³

^{1,2,3} Universitas Udayana

iputugderaditya@gmail.com¹

ABSTRACT

Increased traffic density can increase the risk of traffic accidents, congestion and traffic disruption. This is due to the very high increase in the number of vehicles every year. For this reason, we need a technology that is able to provide a solution to overcome traffic congestion. Vehicle-to-Everything (V2X) is a general term that refers to communication technology between a vehicle and any entity that can affect or may be affected by the vehicle. The use of this communication can reduce traffic jams, and also provide efficiency and safety in driving. Therefore, in this research, a low-cost Vehicle-to-Everything (V2X) communication system was designed using components such as ESP32, NRF24L01 Wireless Modules, Ublox Neo M8N GPS, and OLED display. Tests were also carried out to determine the level of accuracy of the device both in stationary and moving conditions by paying attention to the test parameters of the traffic density detection system, such as average vehicle speed, vehicle queue length, and vehicle travel time to the RSU. In this study, it was found that the level of accuracy of the device based on test parameters compared with direct measurements and manual calculations was stated to be of good accuracy. So it is hoped that in the future we will be able to carry out developments to produce better traffic density detection devices that are ready for use by motorists.

Keywords: *traffic density, Vehicle-to-Everything, Road-Side-Unit, On-Board-Unit*

ABSTRAK

Peningkatan kepadatan lalu lintas dapat meningkatkan risiko kecelakaan lalu lintas, kemacetan, dan gangguan lalu lintas. Hal tersebut disebabkan meningkatnya jumlah kendaraan yang sangat tinggi setiap tahunnya. Untuk itu, perlunya sebuah teknologi yang mampu memberikan sebuah solusi untuk mengatasi kepadatan lalu lintas. *Vehicle-to-Everything (V2X)* merupakan istilah umum yang mengacu pada teknologi komunikasi antara kendaraan dan entitas apa pun yang dapat mempengaruhi atau mungkin terpengaruhi oleh kendaraan. Penggunaan komunikasi ini, dapat mengurangi kemacetan, dan juga memberikan efisiensi serta keamanan dalam berkendara. Maka dari itu, dalam penelitian ini dilakukan sebuah perancangan sistem komunikasi *Vehicle-to-Everything (V2X)* yang bersifat *low-cost* dengan komponen-komponen yang digunakan seperti, ESP32, NRF24L01 *Wireless Modules*, GPS Ublox Neo M8N, dan OLED *display*. Serta dilakukan pengujian untuk mengetahui tingkat akurasi perangkat yang baik dalam kondisi diam maupun bergerak dengan memperhatikan parameter uji sistem pendeteksi kepadatan lalu lintas, seperti kecepatan rata-rata kendaraan, panjang antrian kendaraan, dan waktu tempuh kendaraan menuju RSU. Pada penelitian ini didapatkan bahwa tingkat akurasi perangkat berdasarkan parameter uji yang dibandingkan dengan pengukuran langsung maupun perhitungan manual dinyatakan dengan akurasi yang baik. Sehingga berikutnya diharapkan mampu melakukan pengembangan untuk menghasilkan perangkat pendeteksi kepadatan lalu lintas yang lebih baik serta siap digunakan oleh pengendara.

Kata Kunci: *kepadatan lalu lintas, Vehicle-to-Everything, Road-Side-Unit, On-Board-Unit*

PENDAHULUAN

Peningkatan kebutuhan mobilisasi yang terjadi seiring perkembangan teknologi menuntut adanya pembenahan besar dalam sektor transportasi. Ketika pertumbuhan mobilitas masyarakat tidak diimbangi dengan fasilitas dan kebijakan transportasi yang memadai, maka akan muncul permasalahan serius berupa kepadatan lalu lintas. Kepadatan ini muncul akibat meningkatnya kepemilikan kendaraan bermotor yang tidak sejalan dengan perkembangan sarana dan prasarana lalu lintas. Kondisi ini meningkatkan risiko terjadinya kecelakaan, kemacetan, serta gangguan arus lalu lintas. Data Badan Pusat Statistik (2023) menunjukkan bahwa pada tahun 2022 jumlah kendaraan bermotor yang beroperasi di Indonesia telah mencapai lebih dari 148 juta unit, meningkat pesat dari tahun 2018 hingga 2022 dengan kenaikan lebih dari 21 juta unit. Fakta ini memperlihatkan bahwa pertumbuhan kendaraan tidak diimbangi oleh perkembangan teknologi dan infrastruktur transportasi yang memadai. Untuk mengatasi permasalahan ini, diperlukan penguatan prasarana lalu lintas, termasuk jaringan komunikasi yang menghubungkan kendaraan dengan kendaraan lainnya maupun dengan lingkungannya, sehingga dapat menciptakan sistem yang mampu mendeteksi kepadatan lalu lintas serta mempermudah pertukaran informasi di jalan.

Merujuk pada konsep sistem kendaraan cerdas (*intelligent vehicle systems*), teknologi ini dikembangkan untuk mengatasi permasalahan lalu lintas melalui peningkatan keselamatan, efisiensi waktu tempuh, dan keamanan berkendara. Weber et al. (2021) menyatakan bahwa salah satu kemampuan penting dari kendaraan cerdas adalah kemampuannya untuk berkomunikasi dan bertukar informasi secara *real-time*. Dalam konteks ini, sistem Vehicle-to-Everything (V2X) hadir sebagai inovasi komunikasi nirkabel yang memungkinkan kendaraan saling berbagi informasi, mulai dari data lokasi, telemetri, hingga peringatan keamanan. Teknologi ini tidak hanya meningkatkan kenyamanan dan keselamatan pengemudi, tetapi juga memungkinkan pertukaran informasi penting dengan lingkungan sekitar.

Penelitian I Made Anggar D. et al. (2023) sebelumnya berhasil membangun prototipe On-Board Unit (OBU) dan Road-Side Unit (RSU) yang mampu mencapai komunikasi dua arah, bahkan dalam kondisi kendaraan bergerak. Capaian tersebut menjadi landasan penting dalam pengembangan Capstone Project ini, yang berfokus pada integrasi sistem komunikasi Vehicle-to-Everything (V2X) antara beberapa kendaraan yang telah dilengkapi dengan OBU serta RSU yang dipasang pada lokasi pengamatan tertentu. Dengan sistem ini, seluruh perangkat dapat saling berinteraksi, bertukar data, dan mengirimkan informasi untuk mendeteksi kepadatan lalu lintas secara lebih akurat dan efisien.

Purwarupa yang dikembangkan dalam penelitian ini bersifat *low-cost* namun memiliki performa setara dengan perangkat sejenis, menjadikannya solusi yang lebih terjangkau dan aplikatif. Selain pengembangan perangkat keras, penelitian ini juga mencakup penerapan algoritma untuk pertukaran data secara optimal, sehingga memungkinkan terbangunnya sistem komunikasi kendaraan yang lebih maju. Teknologi ini diharapkan dapat memberikan informasi yang bermanfaat kepada pengemudi secara *real-time* mengenai kondisi kepadatan lalu lintas, mendukung

pengambilan keputusan berkendara yang lebih aman dan efisien, serta menjadi pondasi bagi pengembangan sistem transportasi cerdas di masa mendatang.

Berdasarkan latar belakang di atas, penelitian ini bertujuan untuk: (1) Merancang dan membangun sistem pendeteksi kepadatan lalu lintas yang terintegrasi GPS. (2) Mengintegrasikan sistem komunikasi *Vehicle-to-Everything* (V2X) antara kendaraan-kendaraan yang dilengkapi dengan sebuah perangkat *On-Board-Unit* (OBU) dan *Road-Side-Unit* (RSU) yang terpasang pada lokasi yang memudahkan deteksi terhadap kepadatan lalu lintas. (3) Membangun dan mengimplementasikan algoritma pengolahan data yang dapat menghasilkan informasi tentang kepadatan lalu lintas di beberapa titik ruas jalan yang ditinjau. (4) Melakukan pengujian untuk mengevaluasi keberhasilan komunikasi data antara setiap *On-Board-Unit* (OBU) dan *Road-Side-Unit* (RSU), khususnya data yang dapat dianalisis untuk mengetahui kepadatan lalu lintas di sekitarnya. (5) Merancang bangun pengembangan sistem pendeteksi kepadatan lalu lintas yang bersifat *low-cost*.

METODE PENELITIAN

Capstone Project ini dilakukan di Program Studi Teknik Elektro Universitas Udayana dengan lokasi pengujian di Kampus Sudirman selama enam bulan (September 2024–Februari 2025). Lokasi dipilih karena tersedianya fasilitas dan peralatan yang mendukung proses perancangan, pengujian, dan analisis sistem. Data yang digunakan terdiri dari data primer yang dikumpulkan langsung melalui observasi menggunakan perangkat komunikasi V2X berbasis ESP32, NRF24L01, dan GPS Module, serta data sekunder yang diperoleh dari studi literatur seperti jurnal, buku, skripsi, dan dokumen ilmiah lainnya. Pengumpulan data dilakukan dengan observasi untuk mengamati komunikasi kendaraan dan infrastruktur, serta dokumentasi untuk merekam desain sistem, spesifikasi alat, diagram alir, kode program, dan hasil pengujian.

Sistem terdiri dari perangkat keras dan perangkat lunak. Perangkat keras meliputi ESP32 sebagai mikrokontroler utama, NRF24L01 sebagai pemancar dan penerima data, GPS Ublox Neo 6M sebagai sensor lokasi, dan OLED sebagai tampilan informasi. Perangkat lunak meliputi Arduino IDE untuk pemrograman, EasyEDA untuk desain rangkaian, dan Microsoft Excel untuk visualisasi data. Sistem ini menghasilkan prototipe *On-Board Unit* (OBU) pada kendaraan dan *Road-Side Unit* (RSU) di infrastruktur jalan yang berkomunikasi menggunakan mode half-duplex, yaitu pertukaran data bergantian. OBU mengirimkan data lokasi ke RSU, lalu RSU mengolahnya menjadi informasi kepadatan lalu lintas dan mengirimkan kembali ke OBU.

Algoritma pada RSU berfungsi menghitung kecepatan rata-rata kendaraan, panjang antrian, dan estimasi waktu tempuh menuju RSU. Data diambil setiap 5 detik untuk memastikan informasi yang ditampilkan selalu diperbarui. OBU dipasang pada dashboard kendaraan, sedangkan RSU ditempatkan di titik strategis seperti rambu, persimpangan, dan area padat lalu lintas agar dapat memantau kondisi lalu lintas secara optimal.

Pengujian dilakukan dalam dua kondisi, yaitu steady state (diam) dan mobile state (bergerak). Dalam kondisi diam, perangkat diuji pada jarak hingga 100 meter untuk mensimulasikan lalu lintas padat. Dalam kondisi bergerak, dilakukan pengujian dengan kecepatan kendaraan 11–40 km/jam untuk mengukur kinerja sistem secara dinamis. Parameter uji meliputi kecepatan rata-rata, panjang antrian, dan estimasi waktu tempuh. Hasil pengujian dianalisis menggunakan Microsoft Excel dalam bentuk tabel dan grafik.

Tingkat akurasi sistem ditentukan melalui perbandingan data hasil transmisi perangkat V2X dengan hasil observasi manual. Analisis ini menunjukkan sejauh mana sistem mampu mendeteksi kepadatan lalu lintas secara real-time dan akurat. Dengan integrasi komunikasi V2X, proyek ini diharapkan dapat menjadi solusi efektif untuk membantu pengelolaan transportasi sesuai dengan kebutuhan masyarakat.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini membahas mengenai hasil perancangan purwarupa yang telah dibangun serta hasil dari pengujian perangkat yang telah dilakukan. Hasil perancangan purwarupa yang akan dibahas terdiri dari hasil integrasi komponen-komponen untuk membangun sebuah perangkat OBU dan RSU yang memanfaatkan komunikasi *Vehicle-to-Infrastruktur* (V2I) dan *Vehicle-to-Vehicle* (V2V). Sedangkan hasil pengujian yang akan dibahas terdiri dari pengujian *steady state* dan *mobile state*, dimana data-data yang diperoleh akan memperlihatkan bahwa purwarupa sistem pendeteksi kepadatan lalu lintas yang dibangun telah berjalan sesuai dengan rancangan serta tujuan *Capstone Project*. Dari data yang diperoleh, maka akan dilakukan analisis terhadap fungsi kerja serta akurasi dari purwarupa sistem pendeteksi kepadatan lalu lintas sehingga dapat digunakan untuk kesimpulan akhir.

Hasil Perancangan

Pada pembuatan purwarupa sistem pendeteksi kepadatan lalu lintas dengan memanfaatkan komunikasi *Vehicle-to-Everything* (V2X) untuk kendaraan cerdas, proses perancangannya dilakukan melalui dua mekanisme utama, yaitu perancangan perangkat keras OBU (On Board Unit) dan RSU (Road Side Unit), serta perancangan sistem komunikasi dan pengolahan data pada kedua perangkat tersebut.

Tahapan pertama dimulai dengan perancangan rangkaian elektronika yang melibatkan integrasi beberapa komponen, di antaranya ESP32 sebagai mikrokontroler utama, modul NRF24L01 sebagai media komunikasi nirkabel, OLED Display sebagai penampil informasi, serta GPS Module sebagai sumber data lokasi. Seluruh komponen ini diintegrasikan untuk membentuk sebuah sistem komunikasi half-duplex antara OBU dan RSU, sehingga perangkat dapat saling bertukar data dan membangun sistem pendeteksi kepadatan lalu lintas berbasis V2X.

Setelah integrasi perangkat keras selesai, tahap selanjutnya adalah proses pemrograman.

Hasil Perancangan perangkat keras (*hardware*) OBU dan RSU pada Sistem Komunikasi V2X

Perancangan perangkat keras sistem pendeteksi kepadatan lalu lintas berbasis komunikasi V2X dilakukan dengan memanfaatkan beberapa komponen elektronika utama, yaitu ESP32 sebagai mikrokontroler, modul komunikasi NRF24L01, OLED Display sebagai penampil informasi, serta GPS Module sebagai penerima data lokasi. Tahapan awal dalam proses pembangunan sistem ini dimulai dengan konfigurasi masing-masing komponen terhadap ESP32 untuk memastikan semua perangkat berfungsi dengan baik. Setelah dipastikan seluruh komponen bekerja sesuai fungsinya, langkah selanjutnya adalah menghubungkannya menjadi satu kesatuan perangkat OBU (On Board Unit) dan RSU (Road Side Unit) yang dapat mengirim serta menerima data lalu lintas.

Konfigurasi NRF24L01 pada ESP32 bertujuan untuk membangun sistem komunikasi dua arah antara OBU dan RSU. Modul ini berfungsi sebagai transmitter dan receiver sehingga mampu mengirim dan menerima data secara nirkabel. Proses konfigurasi dilakukan dengan menyambungkan pin-pin modul NRF24L01 ke pin ESP32, kemudian melakukan pemrograman melalui Arduino IDE. Dalam proses ini juga ditambahkan library pendukung agar modul dapat berfungsi optimal. Pengkodean meliputi inisialisasi pin CE dan CSN yang terhubung dengan pin digital 2 dan 15 pada ESP32. CE digunakan untuk mengaktifkan modul RF, sedangkan CSN berfungsi memilih perangkat dalam komunikasi SPI. Selain itu, pengaturan alamat node dan base station dilakukan melalui konstanta array bertipe byte untuk membedakan identitas pengirim dan penerima. NodeID juga digunakan untuk mengelompokkan data dari berbagai node, sehingga proses komunikasi menjadi lebih terstruktur dan mudah dikendalikan.

OLED Display digunakan untuk menampilkan informasi hasil pengolahan data yang dikirim melalui modul NRF24L01. Informasi yang ditampilkan meliputi jarak antara OBU dan RSU, waktu tempuh, kecepatan kendaraan, serta kecepatan rata-rata beberapa node kendaraan. Tahapan konfigurasi OLED dimulai dengan penyambungan pin OLED ke ESP32, kemudian pemrograman melalui Arduino IDE serta penambahan library tampilan. Dalam pemrograman, lebar layar didefinisikan sebesar 128 piksel dan tinggi layar 64 piksel, sesuai ukuran OLED yang digunakan. Setelah kode diunggah, data dari sistem komunikasi akan ditampilkan secara real-time di layar OLED.

GPS Module memiliki peran penting dalam memberikan informasi posisi geografis kendaraan. Awalnya, GPS Ublox Neo 6M digunakan, namun karena akurasi kurang stabil, kemudian diganti dengan GPS Ublox Neo M8N yang memiliki kemampuan penerimaan sinyal satelit lebih baik serta akurasi tinggi. Modul GPS dikonfigurasi dengan menghubungkan pin VCC ke sumber daya 3,3V dan pin komunikasi TX-RX ke GPIO 16 dan 17 pada ESP32. Setelah itu dilakukan pemrograman pada Arduino IDE dengan menambahkan library GPS, kemudian dilakukan proses uploading kode. Komunikasi antara GPS dan ESP32 dilakukan menggunakan Serial2, di mana data lokasi dikirim dalam format NMEA yang berisi

informasi koordinat geografis, kecepatan, dan waktu. RX berfungsi menerima data dari GPS, sedangkan TX digunakan untuk mengirim data jika diperlukan.

Seluruh proses konfigurasi ini membentuk sebuah sistem perangkat keras yang saling terhubung dan berfungsi sebagai fondasi utama dalam membangun sistem komunikasi V2X. Integrasi ESP32, NRF24L01, OLED Display, dan GPS Module memungkinkan perangkat OBU dan RSU untuk bertukar data posisi dan kecepatan kendaraan, menampilkannya secara real-time, dan menjadi dasar dalam mendeteksi tingkat kepadatan lalu lintas dengan lebih akurat dan efisien.

Hasil Perancangan Sistem Komunikasi Serta Pengolahan Data Pada Perangkat OBU dan RSU untuk Komunikasi V2X

Perancangan perangkat OBU (On Board Unit) dan RSU (Road Side Unit) pada sistem pendeteksi kepadatan lalu lintas ini berfokus pada pembangunan komunikasi half-duplex serta pengolahan data sensor menjadi parameter uji yang dapat dianalisis. OBU ditempatkan pada setiap kendaraan dan berperan sebagai node (node 1, node 2, dan node 3), sedangkan RSU berperan sebagai base yang menerima data dari OBU untuk kemudian diolah. Masing-masing OBU mengirimkan data kecepatan serta ID perangkat, dan RSU mengolah data tersebut untuk mendapatkan kecepatan rata-rata seluruh node yang aktif. Setelah diolah, RSU mengirimkan kembali data kecepatan rata-rata, koordinat longitude dan latitude, serta jumlah node aktif ke masing-masing OBU untuk ditampilkan melalui OLED Display. Perhitungan jarak antara OBU dan RSU dilakukan menggunakan fungsi haversine yang mengubah data koordinat menjadi jarak dalam satuan meter, sehingga memungkinkan pengamatan panjang antrian kendaraan secara akurat.

Dalam implementasinya, digunakan dua jenis komunikasi, yaitu Vehicle-to-Infrastructure (V2I) dan Vehicle-to-Vehicle (V2V). Komunikasi dilakukan menggunakan mode half-duplex, di mana pengiriman dan penerimaan data dilakukan secara bergantian. Sistem dirancang dalam dua skenario script coding, yaitu untuk komunikasi antara OBU dan RSU (V2I) serta antara OBU master dan OBU lainnya (V2V).

Pada perancangan OBU untuk komunikasi V2I, dilakukan konfigurasi komponen dan pemrograman pada Arduino IDE. OBU dikodekan untuk memiliki alamat `nodeAddress`, di mana alamat tertentu digunakan untuk mengirim data dan alamat lain untuk menerima data dari RSU. Proses pengiriman dilakukan dengan menghentikan mode penerimaan (`radio.stopListening`) agar perangkat fokus mengirim data. OLED akan menampilkan status pengiriman data, dan jika terjadi kegagalan akan muncul notifikasi error. Dalam proses penerimaan, mode diubah menjadi `radio.startListening` agar OBU dapat menerima data dari RSU. Data yang diterima meliputi kecepatan rata-rata, lokasi terakhir (latitude dan longitude), serta jumlah node aktif. OLED kemudian menampilkan parameter jarak, waktu tempuh, kecepatan, dan jumlah node. Untuk perhitungan jarak digunakan fungsi haversine, dan jika kecepatan melebihi batas 80 km/jam, OLED memberikan peringatan dengan kedipan tampilan.

Perangkat RSU untuk komunikasi V2I dirancang untuk diletakkan di titik jalan tertentu sebagai pusat penerimaan dan pengolahan data. RSU menggunakan alamat utama untuk menerima data dari OBU dan mengirimkan data kembali. Setelah menerima data dari beberapa node, RSU menyimpannya dalam array, menghitung rata-rata kecepatan setiap empat detik, dan mengirimkan kembali data ke node. Jika pengiriman berhasil, muncul notifikasi "Data berhasil dikirim ke node", sedangkan jika gagal muncul pesan error. Seluruh proses ini juga disertai pembacaan data GPS untuk memastikan koordinat valid dan pembaruan jumlah node aktif.

Pada perancangan komunikasi V2V, sistem dirancang agar node dapat bertukar data kecepatan. Karena modul komunikasi yang digunakan belum mendukung pertukaran langsung antar tiga node, maka digunakan node 1 sebagai master. Node 2 dan node 3 mengirim data kecepatan ke node 1, kemudian node 1 meneruskan data tersebut ke node lainnya. Dengan cara ini, seluruh node dapat mengetahui kecepatan node lain meskipun komunikasi hanya berjalan melalui satu jalur utama. Proses komunikasi ini dikendalikan dengan mode `radio.stopListening` untuk pengiriman dan `radio.startListening` untuk penerimaan. Timeout pengiriman data diatur selama 200 ms dan delay komunikasi antar node diatur 1000 ms agar tidak terjadi pengiriman data bersamaan.

Sistem ini menunjukkan bahwa mode komunikasi half-duplex dapat diimplementasikan secara efektif pada komunikasi V2I dan V2V dengan arsitektur master-node. Penggunaan fungsi `haversine` memungkinkan perhitungan jarak yang akurat, sedangkan pengaturan waktu komunikasi mencegah tabrakan sinyal antar node. Integrasi OBU dan RSU dalam sistem ini membentuk pondasi awal pengembangan sistem deteksi kepadatan lalu lintas berbasis V2X yang terstruktur dan efisien.

Hasil Pengujian



Gambar 1. Lokasi Pengujian Purwarupa

Hasil pengujian menunjukkan kemampuan perangkat RSU dan OBU dalam melakukan pertukaran data, baik pengiriman maupun penerimaan, pada dua kondisi lalu lintas yang berbeda. Pengujian steady state merepresentasikan kondisi padat, sedangkan mobile state menggambarkan kondisi lalu lintas lancar. Uji coba dilakukan

secara terkontrol di Kampus Sudirman Universitas Udayana dengan tiga kendaraan sesuai jumlah OBU. Pengujian ini mencakup kinerja komunikasi OBU ke RSU dan antar OBU, serta kemampuan RSU dalam menerima dan mengirim data kembali ke perangkat OBU.

Hasil Pengujian *Steady State*

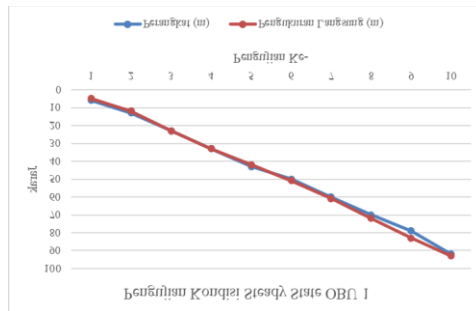


Gambar 2. Skenario Pengujian Kondisi *Steady State*

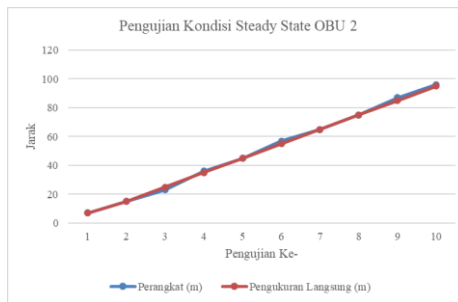
Pada pengujian *steady state* ini dilakukan pada jarak 100 meter dalam jangkauan RSU dengan cara meletakkan perangkat OBU dalam jarak tersebut. Dalam pengujian ini dilakukan dengan membagi jarak tersebut kedalam beberapa tipe jarak untuk menempatkan serta menguji OBU 1, OBU 2, dan OBU 3 pada berbagai tipe jarak. Dalam jarak tersebut data yang diamati adalah data jarak perangkat OBU menuju perangkat RSU yang di mana hasil pengukurannya akan terlihat pada *OLED Display*. Untuk melakukan kalibrasi perbandingan hasil pengukuran yang terdapat pada masing-masing OBU, maka dilakukanlah pengukuran dengan menggunakan *walking distance* meter. Berikut merupakan hasil pengujian dari kondisi *steady state*.

Tabel 1. Hasil Pengujian *Steady State*

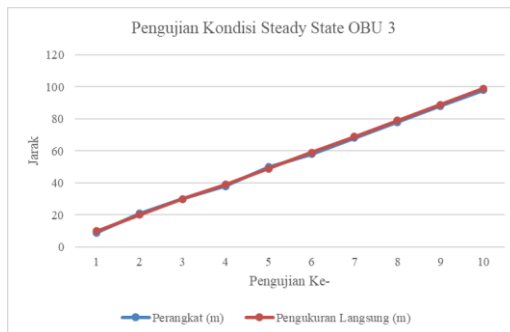
No	Tipe jarak (m)	OBU 1		OBU 2		OBU 3	
		OLED	Pengukuran Langsung	OLED	Pengukuran Langsung	OLED	Pengukuran Langsung
1.	0 - 10 m	6 m	5 m	7 m	7 m	9 m	10 m
2.	10 - 20 m	13 m	12 m	15 m	15 m	21 m	20 m
3.	20 - 30 m	23 m	23 m	23 m	25 m	30 m	30 m
4.	30 - 40 m	33 m	33 m	36 m	35 m	38 m	39 m
5.	40 - 50 m	43 m	42 m	45 m	45 m	50 m	49 m
6.	50 - 60 m	50 m	51 m	57 m	55 m	58 m	59 m
7.	60 - 70 m	60 m	61 m	65 m	65 m	68 m	69 m
8.	70 - 80 m	70 m	72 m	75 m	75 m	78 m	79 m
9.	80 - 90 m	79 m	83 m	87 m	85 m	88 m	89 m
10.	90 - 100 m	92 m	93 m	96 m	95 m	98 m	99 m
Rata-rata Akurasi		96%		98%		96%	



Gambar 3. Hasil Pengujian Kondisi *Steady State* OBU 1



Gambar 4. Hasil Pengujian Kondisi *Steady State* OBU 2



Gambar 4. Hasil Pengujian Kondisi *Steady State* OBU 3

Hasil pengujian steady state menunjukkan bahwa perangkat OBU dan RSU memiliki tingkat akurasi tinggi dalam mengukur jarak antara kendaraan dan titik RSU. Pengujian dilakukan pada jarak 0–10 meter, dengan posisi OBU masing-masing di 5, 7, dan 10 meter, sedangkan RSU ditempatkan di titik acuan 0 meter. Perbandingan antara hasil pengukuran menggunakan walking distance meter dan hasil pembacaan pada OLED menunjukkan selisih kecil, hanya sekitar 1–2 meter. Hal ini disebabkan oleh kondisi uji coba di ruang terbuka yang memungkinkan GPS Module menerima sinyal satelit secara optimal, serta penempatan perangkat dalam kondisi Line of Sight tanpa halangan. Akurasi pengukuran jarak tercatat sebesar 96% pada OBU 1, 98% pada OBU 2, dan 96% pada OBU 3, dengan rata-rata akurasi 96,7%. Hasil ini membuktikan bahwa sistem mampu bekerja dengan baik dan andal dalam kondisi lalu lintas padat (*steady state*), terutama dalam mengukur panjang antrian kendaraan secara presisi.

Hasil Pengujian *Mobile State*

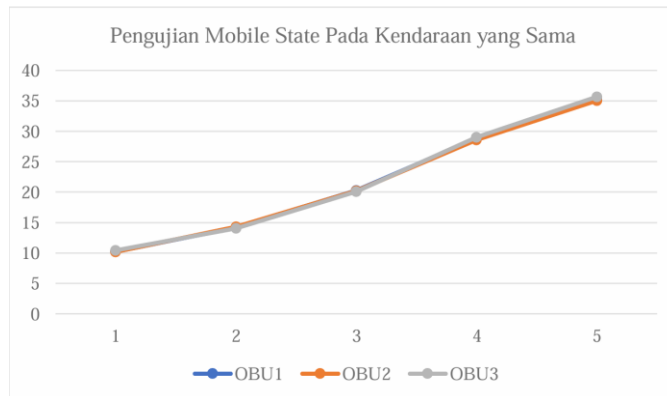


Gambar 5. Skenario Pengujian Kondisi *Mobile State*

Pengujian *mobile state* merupakan pengujian yang dilakukan dalam kondisi bergerak mendekati RSU. Dimana pada pengujian ini dilakukan dengan panjang lintasan pengujiannya sejauh 100 meter. Pengujian ini dilakukan untuk menguji akurasi kecepatan dari sensor pada perangkat OBU. Kecepatan yang dibandingkan adalah kecepatan pada *speedometer* kendaraan sepeda motor dengan kecepatan yang ditampilkan layar OLED pada perangkat. Pengujian dilakukan dengan dua tahapan yang berbeda, dimana pada tahapan pertama akan menguji tingkat akurasi ketiga OBU dengan tiga kendaraan yang sejenis. Kemudian pada tahapan kedua dilakukan dengan menggunakan ketiga perangkat OBU dan tiga kendaraan yang berbeda jenis pada kecepatan tertentu. Berikut merupakan hasil pengujian *mobile state*.

Tabel 2. Hasil Pengujian *Mobile State* Kendaraan Sama

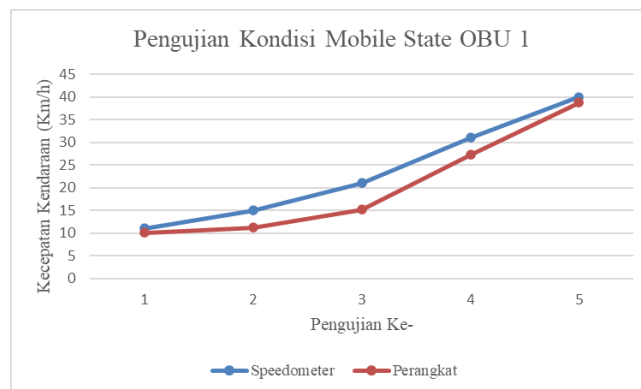
No	Kecepatan	OBU 1		OBU 2		OBU 3	
		OLED	<i>Speedometer</i>	OLED	<i>Speedometer</i>	OLED	<i>Speedometer</i>
1	11 Km/h	10,22 Km/h	11 Km/h	10,18 Km/h	11 Km/h	10,42 Km/h	11 Km/h
2	15 Km/h	14,15 Km/h	15 Km/h	14,30 Km/h	15 Km/h	14,03 Km/h	15 Km/h
3	21 Km/h	20,28 Km/h	21 Km/h	20,19 Km/h	21 Km/h	20,11 Km/h	21 Km/h
4	31 Km/h	28,83 Km/h	31 Km/h	28,59 Km/h	31 Km/h	29,01 Km/h	31 Km/h
5	40 Km/h	35,15 Km/h	40 Km/h	35,04 Km/h	40 Km/h	35,66 Km/h	40 Km/h
Rata-rata Akurasi		92,86%		92,74%		93,3%	



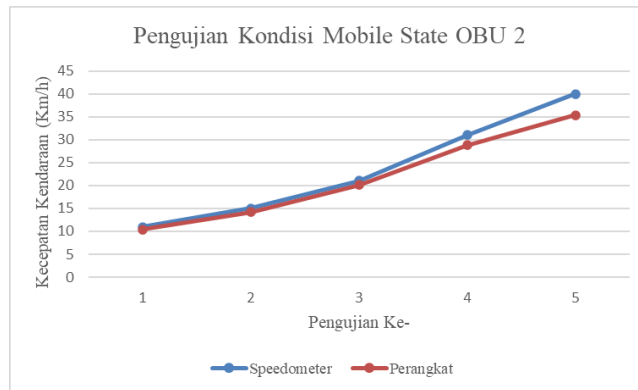
Gambar 6. Hasil Penguian Kondisi *Mobile State* Pada OBU 1, 2, 3 Kendaraan Sama

Tabel 3. Hasil Penguian *Mobile State* Kendaraan Berbeda

No	Kecepatan	OBU 1		OBU 2		OBU 3	
		OLED	Speedometer	OLED	Speedometer	OLED	Speedometer
1	11 Km/h	10,04 Km/h	11 Km/h	10,39 Km/h	11 Km/h	9,63 Km/h	11 Km/h
2	15 Km/h	11,22 Km/h	15 Km/h	14,24 Km/h	15 Km/h	14,08 Km/h	15 Km/h
3	21 Km/h	15,13 Km/h	21 Km/h	20,13 Km/h	21 Km/h	15,11 Km/h	21 Km/h
4	31 Km/h	27,22 Km/h	31 Km/h	28,78 Km/h	31 Km/h	28,22 Km/h	31 Km/h
5	40 Km/h	38,76 Km/h	40 Km/h	35,35 Km/h	40 Km/h	32,58 Km/h	40 Km/h
Rata-rata Akurasi		84,54%		93,24%		85,12%	

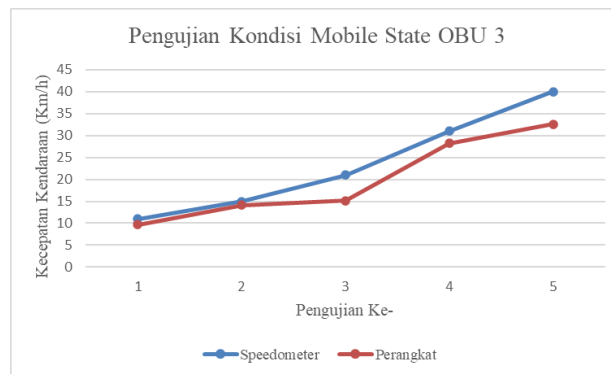


Gambar 7. Hasil Penguian Kondisi *Mobile State* OBU 1



Gambar 8. Hasil Pengujian Kondisi *Mobile State* OBU 2

Gambar 9. Hasil Pengujian Kondisi *Mobile State* OBU 3



Hasil pengujian mobile state menunjukkan bahwa perangkat OBU mampu mengukur kecepatan kendaraan dengan baik, baik pada kendaraan sejenis maupun berbeda. Untuk kendaraan sejenis (motor PCX), akurasi rata-rata OBU mencapai sekitar 92,7%–93,3% pada lima kecepatan berbeda (11–40 km/jam), dengan pembacaan kecepatan yang hampir seragam antar perangkat.

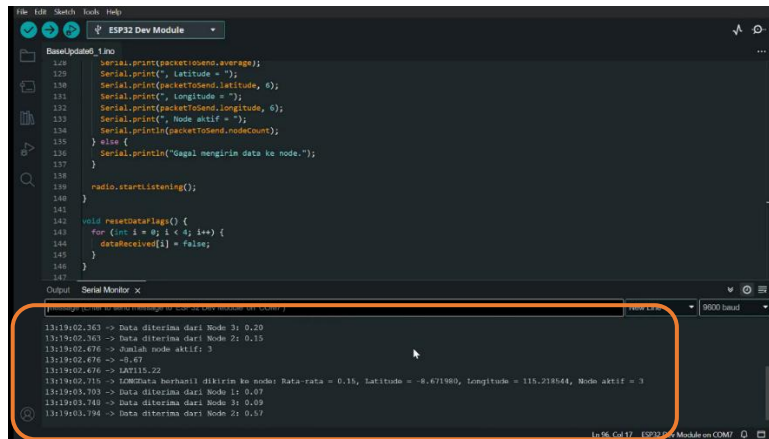
Pada kendaraan berbeda, akurasi sedikit menurun, yakni 84,54% hingga 93,24%, disebabkan oleh variasi kapasitas mesin, stabilitas sinyal GPS, dan perbedaan sistem pengukuran kecepatan antara GPS dan speedometer kendaraan. Faktor lingkungan seperti cuaca berawan, gedung, pepohonan, dan efek multipath juga memengaruhi akurasi sensor GPS Ublox Neo M8N.

Speedometer kendaraan biasanya menunjukkan kecepatan lebih tinggi dari kenyataan, karena pengukurannya berbasis putaran roda dan dirancang untuk keselamatan sesuai standar UNECE No.39 yang memperbolehkan deviasi hingga 110% + 4 km/jam.

Secara keseluruhan, perangkat OBU memiliki akurasi yang baik (84,54%–93,3%) dalam mengukur kecepatan kendaraan bergerak, sehingga layak digunakan untuk memantau kondisi lalu lintas berdasarkan kecepatan rata-rata kendaraan.

Pengujian Pada Parameter Uji

- Pengujian Parameter Kecepatan Rata-rata



Gambar 10. Hasil Pengujian Parameter Kecepatan Rata-Rata Pada Serial Monitor

Pada pengujian parameter kecepatan rata-rata ini dilakukan dengan memperhatikan serial monitor pada laptop yang dihubungkan dengan perangkat RSU. Pengujian ini menguji rata-rata kendaraan yang terpasang perangkat OBU dari tiga kendaraan dengan membandingkannya dengan perhitungan manual. Untuk menguji hal tersebut, dilakukan pada 5 *sample* yang diambil dari serial monitor hasil dari perangkat RSU. Pada pengujian ini juga dilakukan dalam kondisi dimana terdapat 1 maupun 2 perangkat OBU yang berada dalam jangkauan RSU.

Tabel 4. Hasil Pengujian Parameter Kecepatan Rata-Rata

No	Kecepatan			Node Aktif	Kecepatan Rata-rata	
	Node 1	Node 2	Node 3		Perangkat	Perhitungan manual
1	0,33	-	-	1	0,33	0,33
2	-	0,43	14,37	2	7,40	7,4
3	7,43	11,74	0,09	3	6,42	6,42
4	0,30	0,30	1,02	3	0,54	0,54
5	36,26	20,58	1,33	3	19,39	19,39

Hasil pengujian pada tabel 4.7 menunjukkan pengukuran kecepatan rata-rata dari tiga kendaraan dalam jangkauan RSU pada berbagai kondisi jumlah node aktif (node 1, 2, dan 3). Pada pengujian dengan 1 node aktif, kecepatan yang terukur pada OBU 1 adalah 0,33, sama dengan hasil perhitungan manual. Hal serupa juga terjadi pada pengujian dengan 2 dan 3 node aktif, di mana hasil perangkat sesuai dengan perhitungan manual.

Kesimpulannya, pengolahan data kecepatan rata-rata di RSU sudah akurat dan sesuai dengan perhitungan, dengan sistem mampu membagi dan menghitung kecepatan rata-rata berdasarkan jumlah OBU yang ada dalam jangkauan RSU.

- b. Pengujian Parameter Panjang Antrian Kendaraan
- c. Pengujian panjang antrian kendaraan dilakukan pada kondisi mobile state dengan kecepatan 5 km/jam, 15 km/jam, dan 40 km/jam untuk

merepresentasikan kondisi lalu lintas padat, cukup padat, dan lancar. Panjang antrian diukur sebagai jarak kendaraan menuju RSU, diambil bersamaan dengan data kecepatan rata-rata saat kendaraan bergerak. Hasil menunjukkan bahwa semakin lambat kecepatan kendaraan, jarak menuju RSU (panjang antrian) semakin panjang, sedangkan kecepatan tinggi atau sedang menyebabkan jarak menuju RSU terlihat lebih dekat pada layar OLED perangkat.

Tabel 5. Hasil Pengujian Panjang Antrian

Kecepatan Kendaraan	Jarak Menuju Perangkat RSU		
	OBU 1	OBU 2	OBU 3
5 Km/h	92 m	88 m	76 m
15 Km/h	67 m	59 m	60 m
40 Km/h	13 m	17 m	19 m

Tabel 5 menunjukkan hasil pengujian panjang antrian kendaraan menuju RSU pada kecepatan 5 km/jam, 15 km/jam, dan 40 km/jam. Pada kecepatan 5 km/jam (lalu lintas padat), panjang antrian tercatat 92 m (OBU 1), 88 m (OBU 2), dan 76 m (OBU 3). Pada kecepatan 15 km/jam (lalu lintas cukup padat), panjang antrian masing-masing 67 m, 59 m, dan 17 m. Sedangkan pada kecepatan 40 km/jam (lalu lintas lancar), panjang antrian tercatat 13 m, 17 m, dan 19 m. Dari hasil pengujian steady state, rata-rata akurasi pengukuran panjang antrian ketiga OBU dibandingkan dengan pengukuran langsung mencapai 96,7%, menunjukkan perangkat mampu mengukur panjang antrian kendaraan dengan akurat dan andal.

d. Pengujian Parameter Waktu Tempuh Menuju RSU

Pengujian parameter waktu tempuh dilakukan dengan membandingkan hasil pengolahan waktu tempuh pada perangkat OBU dengan perhitungan manual. Pengujian dilakukan pada tiga kecepatan yang mewakili kondisi lalu lintas berbeda, yaitu padat (5 km/jam), cukup padat (15 km/jam), dan lancar (40 km/jam), untuk memastikan akurasi perangkat dalam mengukur waktu tempuh sesuai kondisi nyata lalu lintas.

Tabel 6. Hasil Pengujian Parameter Waktu Tempuh Node 1

No	Kecepatan	Kecepatan Pada OBU	Jarak	Waktu Pada OLED	Waktu
1	5 Km/h	4,13 Km/h	92 m	1 Menit 20 detik	80,19 detik
2	15 Km/h	13,54 Km/h	67 m	17 detik	17,81 detik
3	40 Km/h	37,72 Km/h	13 m	1 detik	1,24 detik

Tabel 7. Hasil Pengujian Parameter Waktu Tempuh Node 2

No	Kecepatan	Kecepatan Pada OBU	Jarak	Waktu Pada OLED	Waktu
1	5 Km/h	4,05 Km/h	88 m	1 Menit 18 detik	78,22 detik
2	15 Km/h	12,29 Km/h	59 m	17 detik	17,3 detik
3	40 Km/h	36,88 Km/h	17 m	1 detik	1,66 detik

Tabel 8. Hasil Pengujian Parameter Waktu Tempuh Node 3

No	Kecepatan	Kecepatan Pada OBU	Jarak	Waktu Pada OLED	Waktu
1	5 Km/h	4,35 Km/h	76 m	1 Menit 2 detik	62,81 detik
2	15 Km/h	13,89 Km/h	60 m	15 detik	15,58 detik
3	40 Km/h	36,12 Km/h	19 m	1 detik	1,89 detik

Waktu tempuh merupakan waktu kendaraan untuk sampai pada perangkat RSU. Perhitungan waktu tempuh didasarkan pada perhitungan manual yakni dengan membagi jarak dengan kecepatan. Secara matematis dirumuskan sebagai berikut.

$$t = s/v$$

keterangan : t : waktu

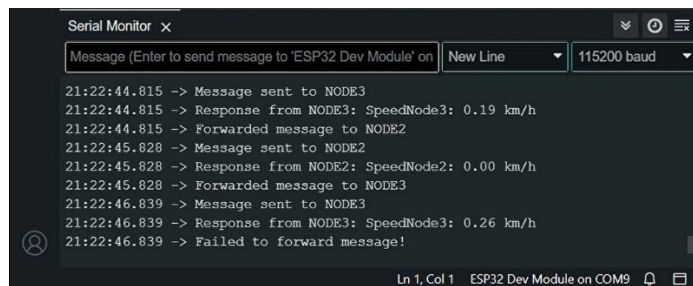
s : Jarak

v : Kecepatan

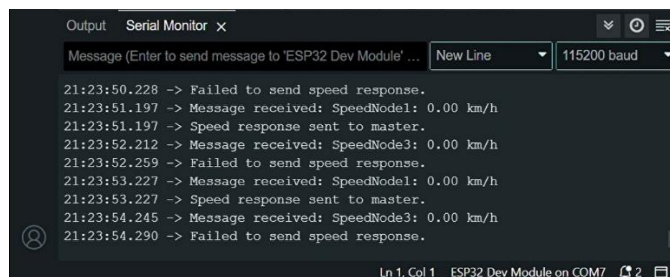
Perhitungan secara manual dilakukan pengambilan data kecepatan yang terlihat pada layar OLED. Dari hasil pengujian yang diperoleh, didapatkan sebagian besar data pada OLED menunjukkan hasil 0 menit. Hal tersebut disebabkan pada tampilan layar dirancang dalam satuan menit, sedangkan jika dihitung secara manual hasil perhitungan didominasi di bawah 60 detik. Pada kecepatan awal yakni kecepatan yang mendekati 5 Km/h memiliki waktu tempuh di atas 60 detik, sehingga pada OLED muncul 1 menit. Sehingga, akurasi waktu tempuh dari perangkat sudah dapat dikatakan akurat, dikarenakan sudah sesuai dengan perhitungan secara manual.

Hasil Pengujian Perangkat OBU Untuk Komunikasi *Vehicle-To-Vehicle* (V2V)

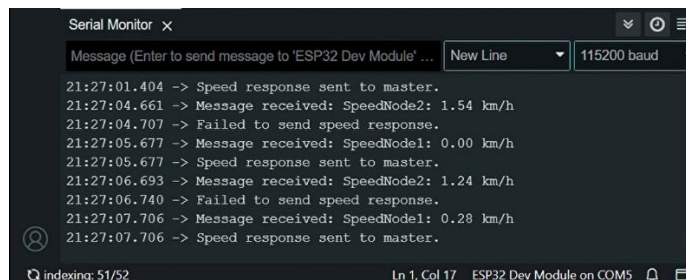
Pada pengujian antar perangkat OBU, yang dilakukan adalah memastikan bahwa masing-masing perangkat OBU mampu mengirim dan menerima data kepada perangkat OBU lainnya. Data yang dikirim dan diterima merupakan data kecepatan dari masing-masing perangkat OBU. Berikut merupakan hasil pengujian komunikasi antar perangkat OBU.



Gambar 11. Hasil Komunikasi V2V Pada Serial Monitor Untuk OBU 1



Gambar 12. Hasil Komunikasi V2V Pada Serial Monitor Untuk OBU 2



Gambar 13. Hasil Komunikasi V2V Pada Serial Monitor Untuk OBU 3

Pengujian komunikasi antar perangkat OBU (node) menunjukkan bahwa masing-masing OBU dapat menerima data kecepatan dari OBU lainnya, yang ditampilkan pada serial monitor. OBU 1 menerima data dari OBU 2 dan 3, OBU 2 dari OBU 1 dan 3, serta OBU 3 dari OBU 1 dan 2. Namun, terjadi beberapa kegagalan pengiriman data akibat tabrakan paket (collision) ketika beberapa node mengirim data secara bersamaan pada kanal komunikasi yang sama. Contohnya, pada OBU 3 terjadi kegagalan pengiriman data ke OBU 1 karena tabrakan data di saluran "NODE3" yang digunakan bersama oleh OBU 1 dan 3, menyebabkan data gagal terkirim.

Implementasi Parameter Uji Dalam Menentukan Kepadatan Lalu Lintas

Kepadatan lalu lintas atau kemacetan terjadi akibat penumpukan kendaraan di ruas jalan tertentu, biasanya karena banyaknya kendaraan yang menuju area tertentu. Sistem pendeteksi kepadatan lalu lintas yang dirancang memanfaatkan dua jenis komunikasi utama, yaitu Vehicle-to-Infrastructure (V2I) dan Vehicle-to-Vehicle (V2V). Pada komunikasi V2I, pertukaran data dilakukan antara perangkat OBU yang terpasang di kendaraan dengan perangkat RSU yang ditempatkan di titik tertentu. Dalam pengujian, digunakan tiga parameter utama yaitu rata-rata kecepatan, waktu

tempuh, dan panjang antrian kendaraan. Rata-rata kecepatan yang rendah menjadi indikator adanya kepadatan lalu lintas, sementara waktu tempuh yang semakin lama menunjukkan bahwa kendaraan membutuhkan waktu lebih banyak untuk mencapai titik RSU, yang juga mengindikasikan kepadatan. Selain itu, panjang antrian yang diukur dari jarak kendaraan menuju RSU semakin panjang menandakan kondisi lalu lintas yang padat. Informasi jumlah perangkat OBU yang terdeteksi oleh RSU juga menjadi indikator penting karena semakin banyak OBU yang terdeteksi berarti jumlah kendaraan di area tersebut banyak. Dengan menggabungkan ketiga parameter tersebut dan informasi jumlah kendaraan, komunikasi V2I dapat digunakan untuk mendeteksi kepadatan lalu lintas secara efektif.

Sementara itu, komunikasi V2V terjadi antar perangkat OBU yang terpasang di kendaraan berbeda. Dalam pengujian, perangkat OBU saling bertukar data kecepatan kendaraan masing-masing. Data kecepatan ini penting untuk memperkirakan kepadatan terutama saat terjadi antrian kendaraan yang panjang di luar jangkauan RSU. Jika kecepatan kendaraan di sekitar rendah, maka hal ini menjadi indikasi adanya kepadatan lalu lintas, sehingga komunikasi V2V juga memegang peranan penting dalam deteksi kemacetan.

Ketika komunikasi V2I dan V2V digabungkan, maka terbentuklah sistem komunikasi terpadu yang dikenal sebagai Vehicle-to-Everything (V2X). Sistem V2X ini mampu memberikan gambaran yang lebih akurat dan menyeluruh dalam mendeteksi kepadatan lalu lintas. Hasil pengujian menunjukkan bahwa baik V2I maupun V2V dapat diaplikasikan secara efektif untuk tujuan ini. Di masa depan, diharapkan prototipe sistem ini dapat dikembangkan menjadi lebih canggih dan sesuai dengan kebutuhan masyarakat. Dengan demikian, sistem pendeteksi kepadatan lalu lintas yang memanfaatkan komunikasi V2I dan V2V melalui parameter kecepatan rata-rata, waktu tempuh, panjang antrian, serta jumlah kendaraan di area dapat memberikan informasi yang akurat dan membantu dalam pengelolaan kondisi lalu lintas yang padat.

Algoritma sistem pendeteksi kepadatan lalu lintas dibangun berdasarkan beberapa asumsi, seperti kondisi pengujian yang terkontrol, kendaraan bergerak beriringan dalam satu jalur, dan panjang antrian diasumsikan sebagai jarak OBU menuju RSU. Pada tahap awal, perangkat OBU menerima data kecepatan, longitude, dan latitude dari sensor GPS. Data kecepatan ini kemudian dikirimkan ke RSU, yang mengolahnya menjadi kecepatan rata-rata untuk mendeteksi kepadatan lalu lintas. RSU juga menerima data koordinat dan mengirimkan kembali kecepatan rata-rata beserta data longitude dan latitude kepada setiap OBU. OBU menggunakan data koordinat tersebut untuk menghitung panjang antrian kendaraan dengan fungsi haversine, yang mengukur jarak antara dua titik koordinat. Berdasarkan kecepatan kendaraan dan panjang antrian yang telah dihitung, OBU kemudian menentukan parameter waktu tempuh menuju RSU. Dengan menggabungkan ketiga parameter—kecepatan rata-rata, panjang antrian, dan waktu tempuh—pengendara dapat menilai tingkat kepadatan lalu lintas secara real-time melalui perangkat OBU di kendaraannya.

Akurasi Penentuan Kepadatan Lalu Lintas Berdasarkan Parameter Uji

Untuk menentukan akurasi kepadatan lalu lintas, pengujian dilakukan berdasarkan tiga parameter utama. Pertama, kecepatan rata-rata kendaraan menjadi indikator penting; kecepatan rendah antara 0 hingga 30 km/jam, khususnya sekitar 11 km/jam dengan jumlah kendaraan sekitar tiga unit, menunjukkan kondisi kepadatan. Kedua, panjang antrian kendaraan diukur dengan memanfaatkan komunikasi Vehicle-to-Infrastructure (V2I), di mana jarak kendaraan dari RSU pengamat digunakan sebagai indikator kepadatan. Pengujian menunjukkan jarak antrian antara 70 hingga 100 meter dari RSU menggambarkan kondisi kepadatan jika disertai kecepatan rata-rata yang rendah dan jumlah kendaraan banyak. Ketiga, waktu tempuh kendaraan untuk mencapai RSU pengamat juga menjadi parameter penting; waktu tempuh lebih dari 60 detik dengan kecepatan rendah dan jarak jauh menandakan lalu lintas padat.

Secara keseluruhan, ketiga parameter ini—kecepatan rata-rata 10-15 km/jam dari tiga kendaraan, jarak menuju RSU sekitar 70-100 meter, dan waktu tempuh lebih dari 60 detik—sudah mampu menentukan kondisi kepadatan lalu lintas secara akurat. Berdasarkan standar Indeks Tingkat Pelayanan (ITP), kecepatan kendaraan sekitar 11 km/jam atau kurang mengindikasikan kondisi lalu lintas padat (kategori ITP E dan ITP F), sedangkan kecepatan antara 11 hingga 31 km/jam menandakan lalu lintas ramai tapi masih stabil (kategori ITP B, C, dan D). Kecepatan di atas 31 km/jam menggambarkan kondisi lalu lintas lancar (kategori ITP A). Dengan demikian, perangkat yang dikembangkan sesuai dengan kondisi nyata dan dapat diandalkan untuk menentukan tingkat kepadatan lalu lintas berdasarkan parameter uji tersebut.

Analisa Deteksi Kepadatan lalu Lintas

Capstone Project ini bertujuan mendeteksi kepadatan lalu lintas dengan memanfaatkan komunikasi V2X melalui parameter kecepatan rata-rata kendaraan, panjang antrian, dan waktu tempuh menuju RSU pengamat. Pengujian dilakukan pada kondisi steady state dan mobile state untuk menguji akurasi dan memastikan pengolahan data yang baik pada perangkat, sehingga pengemudi dapat dengan mudah menentukan tingkat kepadatan lalu lintas berdasarkan parameter tersebut.

Fokus pada sub bab ini adalah analisis deteksi kepadatan lalu lintas menggunakan parameter kecepatan rata-rata kendaraan dalam kondisi mobile state. Algoritma yang digunakan dibangun berdasarkan asumsi kendaraan bergerak dalam satu jalur arah RSU, kendaraan beriringan dengan kecepatan tertentu, dan jumlah node dalam jangkauan RSU mewakili jumlah kendaraan per satuan waktu.

Flowchart algoritma dimulai dengan menerima input jumlah node aktif dan kecepatan dari masing-masing node di jangkauan RSU. Data kecepatan tersebut kemudian diolah menjadi kecepatan rata-rata dalam km/jam, yang selanjutnya dikonversi ke m/s untuk penyesuaian dengan kondisi pengujian terkontrol. Selanjutnya, data jumlah node aktif per detik dibagi dengan kecepatan rata-rata (m/s) untuk menghasilkan nilai kepadatan lalu lintas. Nilai kepadatan yang diperoleh

kemudian ditampilkan di serial monitor perangkat RSU sebagai output pengolahan data.

```
18:43:13.521 -> Data diterima dari Node 1: 0.20 Km/h
18:43:13.555 -> Data diterima dari Node 2: 0.00 Km/h
18:43:13.555 -> Data diterima dari Node 3: 0.00 Km/h
18:43:13.589 -> Jumlah node aktif: 3
18:43:13.622 -> LAT: -8.71
18:43:13.622 -> LONG: 115.21
18:43:13.660 -> Kecepatan rata-rata : 0.02 m/s
18:43:13.695 -> Kepadatan: 159.04 kendaraan/m
18:43:13.741 -> Data berhasil dikirim ke node: Rata-rata = 0.07, Latitude = -8.708621, Longitude = 115.214478, Node aktif = 3, Kepadatan = 159.04 kendaraan.
```

Gambar 12. Hasil Kepadatan Pada Serial Monitor RSU

Kepadatan lalu lintas adalah ukuran kendaraan yang melewati jalan di daerah tertentu dengan arus kendaraan yang bervariasi di saat jam-jam tertentu di nyatakan dalam per jam per kilometer (Heni Y., 2017). Sehingga dari pengertian tersebut didapatkan rumus untuk menghitung kepadatan lalu lintas sebagai berikut (Iis N, dkk, 2012).

$$D = V/Us$$

Di mana:

D = Kepadatan lalu lintas (kendaraan/km)

V = Jumlah kendaraan (kendaraan/jam)

Us = Kecepatan rata-rata kendaraan (km/jam)

Di mana dari rumus diatas, dapat menentukan deteksi kepadatan lalu lintas. Pada pembahasan ini dilakukan dalam kondisi yang terkontrol pada jarak yang ditentukan yaitu 100 m pada pengujian *mobile state* dengan kecepatan tertentu. Dengan hasil pengujian pada kondisi yang terkontrol, sehingga dalam perhitungan deteksi kepadatan lalu lintas ini menggunakan tiga kendaraan yang melintas dalam satu detik. Oleh karena itu, perhitungan kepadatan lalu lintas nantinya akan dihitung dalam satuan kendaraan/meter yang disebabkan oleh pengujian pada kondisi bergerak yang terkontrol dengan tiga kendaraan yang terpasang perangkat OBU. Sehingga deteksi kepadatan lalu lintas dari keadaan tersebut didapatkan sebagai berikut.

Tabel 9. Analisa Deteksi Kepadatan Lalu Lintas

No	OBU 1 (km/jam)	OBU 2 (km/jam)	OBU 3 (km/jam)	Kecepatan rata-rata (m/s)	Jumlah kendaraan (kendaraan/s)	Kepadatan lalu lintas (kendaraan/m)
1	10,22	10,18	10,42	2,86	3	1,0489
2	14,15	14,3	14,03	3,93	3	0,7633
3	20,28	20,19	20,11	5,61	3	0,5347
4	28,83	28,59	29,01	8	3	0,375
5	35,15	35,04	35,66	9,81	3	0,3058

Tabel 9 menunjukkan hasil perhitungan deteksi kepadatan lalu lintas dalam kondisi terkontrol dengan tiga kendaraan per detik dan menggunakan kecepatan rata-rata dari pengujian *mobile state*. Pengujian ini menggunakan satuan yang lebih kecil (m/s) karena kondisi bergerak terkontrol. Hasil menunjukkan kepadatan lalu

lintas berdasarkan kecepatan rata-rata kendaraan, yaitu: pada 11 km/jam kepadatan 1,0489 kendaraan/meter, 15 km/jam sebesar 0,7633 kendaraan/meter, 21 km/jam sebesar 0,5347 kendaraan/meter, 31 km/jam sebesar 0,375 kendaraan/meter, dan 40 km/jam sebesar 0,3058 kendaraan/meter.

Pada gambar 4.65, hasil kepadatan pada serial monitor RSU memperlihatkan data kecepatan dari 3 kendaraan dan nilai kepadatannya, yakni 159,04 kendaraan/meter. Nilai ini diperoleh dengan membagi jumlah kendaraan (3 kendaraan/s) dengan kecepatan rata-rata yang dikonversi ke 0,02 m/s ($3/0,02 = 159,04$ kendaraan/meter). Angka kepadatan ini sangat tinggi karena pengujian dilakukan dalam kondisi terkontrol dengan jumlah kendaraan dan kecepatan yang sudah dikonversi ke satuan m/s.

Menurut rumus kepadatan lalu lintas standar (Iis N, dkk., 2012), kepadatan dihitung dari jumlah kendaraan per jam dibagi kecepatan rata-rata kendaraan. Dalam kondisi lapangan sebenarnya, jumlah kendaraan dihitung berdasarkan kendaraan yang melewati titik pengamatan. Sebagai contoh, jika terdapat 14 kendaraan per jam dengan kecepatan rata-rata 0,07 km/jam, maka kepadatannya adalah 200 kendaraan/km ($14/0,07$).

Kepadatan 200 kendaraan/km dengan kendaraan beriringan dan asumsi panjang serta jarak antar kendaraan 5 meter menggambarkan kondisi lalu lintas yang sangat padat di sepanjang 1000 meter. Namun, pada project ini pengujian dilakukan dalam kondisi terkontrol dengan jumlah kendaraan, panjang lintasan, dan kecepatan yang sudah ditetapkan. Dalam implementasi nyata, jumlah kendaraan dihitung berdasarkan kendaraan yang melewati ruas jalan dalam jangkauan RSU untuk menentukan kepadatan lalu lintas secara akurat.

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil perancangan, pengujian, dan analisis pada Capstone Project ini, sistem pendeteksi kepadatan lalu lintas berbasis komunikasi Vehicle-to-Everything (V2X) berhasil dikembangkan menjadi purwarupa yang bersifat low-cost dan berfungsi baik. Sistem ini menggabungkan ESP32, modul NRF24L01, GPS Ublox Neo M8N, dan OLED Display pada perangkat OBU (On Board Unit) di kendaraan serta RSU (Road Side Unit) pada infrastruktur jalan. Integrasi ini memungkinkan pertukaran data kecepatan, posisi, dan jumlah kendaraan secara real time.

Pada tahap pengujian komunikasi, mode komunikasi half-duplex terbukti dapat diterapkan dengan baik. Dalam komunikasi V2I (Vehicle-to-Infrastructure), perangkat OBU mengirimkan data kecepatan ke RSU, kemudian RSU mengolah data tersebut dan mengirimkan kembali informasi kecepatan rata-rata, koordinat lokasi (longitude dan latitude), serta jumlah node aktif di sekitar. Sementara itu, pada komunikasi V2V (Vehicle-to-Vehicle), meskipun tiga OBU dapat berkomunikasi, pertukaran data hanya dapat dilakukan melalui satu perangkat OBU sebagai Master yang menjadi perantara pengiriman data ke dua OBU lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa sistem V2V sudah berfungsi tetapi masih terbatas pada satu jalur komunikasi utama.

Sistem ini juga dilengkapi dengan algoritma penentuan kepadatan lalu lintas yang dirancang di RSU berdasarkan data lokasi dari OBU. Algoritma ini bekerja dengan asumsi kendaraan bergerak dalam satu jalur dan kondisi pengujian terkontrol, di mana panjang antrian kendaraan diasumsikan sebagai jarak antara OBU dan RSU. Data kecepatan rata-rata, panjang antrian, serta waktu tempuh diolah untuk menentukan tingkat kepadatan lalu lintas secara kuantitatif.

Pengujian akurasi menunjukkan hasil yang cukup tinggi. Pada kondisi steady state, akurasi pengukuran panjang antrian kendaraan mencapai 96% untuk OBU 1, 98% untuk OBU 2, dan 96% untuk OBU 3, dengan rata-rata 96,7%. Pada kondisi mobile state, akurasi berkisar 92,7–93,3%, sedangkan pada pengujian dengan kendaraan berbeda, akurasi berada pada kisaran 84,5–93,2%. Selain itu, hasil pengukuran kecepatan rata-rata, jarak, dan waktu tempuh dari perangkat juga konsisten dengan perhitungan manual, yang membuktikan keandalan sistem ini.

Untuk pengembangan selanjutnya, disarankan agar sistem dilengkapi sensor tambahan guna mendeteksi kondisi lalu lintas secara lebih menyeluruh. Penggunaan modul komunikasi dengan kapasitas pertukaran data lebih besar juga perlu dipertimbangkan untuk mendukung jumlah node yang lebih banyak. Integrasi skrip V2I dan V2V menjadi langkah penting agar sistem V2X dapat beroperasi lebih efisien. Penelitian ke depan diharapkan dapat memperluas skenario pengujian, termasuk kondisi lalu lintas kompleks seperti kecelakaan atau hambatan jalan, serta mengintegrasikan sistem dengan teknologi IoT yang lebih canggih. Pengembangan menuju Vehicle-to-Pedestrian (V2P) dan Vehicle-to-Network (V2N) juga menjadi potensi penting untuk meningkatkan cakupan sistem. Selain aspek teknis, penyesuaian terhadap standar dan regulasi transportasi serta penerapan multiple access pada komunikasi data skala besar perlu dilakukan agar sistem dapat diterapkan secara luas dan efektif.

DAFTAR PUSTAKA

- Cristianto, Wahyu. (2021). Implementasi Wireless Sensor Network untuk Sistem Akuisisi Data Faktor Pembangkitan Panel Surya Menggunakan Metode Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance (CSMA/CA): Universitas Tidar.
- I Made Anggar Dwi Adnyana, N. P. A. S. K. N. A. W. (2024). Rancang Bangun Purwarupa Sistem Komunikasi Nirkabel Sebagai Solusi Pertukaran Informasi Antarkendaraan, Universitas Udayana.
- Iis N., Eri Susanto H., Rulhendri. (2012). Hubungan Antara Volume, Kecepatan dan Kepadatan Lalu Lintas dengan Menggunakan Metode Linier. *Jurnal Rekayasa Sipil*, 1(1), pp.57-72.
- Mohammad A, M. S. J. R. A. J. R. A. (2018). Impact of Vehicle-to-Vehicle Communication Reliability on Safety Applications: An Experimental Study, Washington D.C: Transportation Research Board.
- Pandu Maulana, U. D. N. D. (2020). Road Guides and Special Location Monitoring for Blind People Using Ultrasonic Sensors and Microcontroller-Based GPS Modules. *Jurnal Mantik*, 3(4), 444-450.

- Praavalika, R. P. (2019). Internet Of Things Based Home Monitoring and Device Control Using ESP32. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 8(1S4), 58-62.
- R, K. H. & P. (2019). Penerapan Trainer Interfacing Mikrokontroler dan Internet of Things Berbasis ESP32 pada Mata Kuliah Interfacing. *Jurnal CERITA*, 5(2), 120-134.
- Rafi Sidqi, B. R. R. S. H. R. F. (2018). Arduino Based Weather Monitoring Telemetry System Using NRF24L01+. Surabaya, Universitas Negeri Surabaya.
- Robinson, C. (1985). Highway Capacity Manual. 209th ed. National Research Council.
- S, J. (2014). Summary Of Progress. 1st ed. National Cooperative Highway Research Program.
- Sihotang, F. M. F. (2006). Hubungan Antara Panjang Antrian Kendaraan. *Jurnal Teknik Sipil*, 3(1), 53-57.
- Statistik, B. P. (2023). Statistik Jumlah Kendaraan di Indonesia. BPS.
- Suryana, T. (2021). Antarmuka Ublox NEO-6M GPS Module dengan NodeMCU ESP8266. Bandung, Universitas Komputer Indonesia Bandung.
- Syed Adnan Yusuf, A. K. R. S. (2006). Vehicle-to-everything (V2X) in the autonomous vehicles domain – A technical reveiw of communication sensor, and AI technologies for road user safety. Riyadh: Research departement.
- Thrun S, d. (2006). Stanley: The Robot that won the DARPA Grand Challenge. *Journal Of Field Robotics*, 23(9), 661-692.
- Wildan, A. (2021). Pemanfaatan Modul NRF24L01 Pada Alat Bantu Gerak Salat Jemaah Penyandang Tuli. Universitas Islam Agung Semarang.