

Pemanfaatan Simulasi Jaringan Komunikasi Vehicle-to-Everything (V2X) untuk Sistem Transportasi Cerdas: *Literature Review*

Ni Putu Amanda Saraswati¹, Ngurah Indra ER², I Nyoman Satya Kumara³,

[Submission: 06-02-2025, Accepted: 30-05-2025]

Abstract— *The increasing number of vehicles has led to several complex challenges, such as traffic congestion, air pollution, and safety driving issues. These challenges also result in economic losses. Fortunately, with the advance in technologies today, we can utilize Intelligent Transportation Systems (ITS) to establish a system that is more efficient, safer, and environmentally friendly. Specifically, the concept of Vehicle-to-Everything (V2X) has emerged as a potential solution to address various road-related challenges. However, the real-world implementation of V2X still faces numerous obstacles, particularly in terms of cost and safety concerns. Deploying V2X on a large scale requires significant investments due to the need for communication infrastructure and hardware development. Therefore, simulation can serve as an initial solution to tackle these challenges. Simulations make it possible to set up different communication network protocols and architectures and to model different traffic conditions without the risks that come with testing in the real world. In this review paper, we aim to give a clearer insight into the trends, challenges, and opportunities of V2X simulations in various traffic environments.*

Keywords - V2X, Simulation, Intelligent Transportation Systems, Safety Driving

Intisari— Peningkatan jumlah kendaraan menimbulkan beberapa tantangan kompleks seperti kemacetan lalu lintas, polusi udara, dan isu keselamatan berkendara. Hal ini tentunya menimbulkan dampak kerugian juga dari sisi ekonomi. Di sisi lain, seiring pesatnya perkembangan teknologi saat ini, sistem transportasi cerdas dapat digunakan untuk menciptakan sistem transportasi yang lebih efisien, aman, dan ramah lingkungan. Secara khusus, konsep *Vehicle-to-Everything (V2X)* menjadi salah satu solusi potensial untuk mengatasi berbagai permasalahan di jalan raya. Namun, penerapan V2X masih mengalami banyak kendala, terutama terkait biaya dan faktor keselamatan. Penerapan V2X skala besar memerlukan biaya yang signifikan karena membutuhkan pembangunan infrastruktur komunikasi dan perangkat keras. Oleh karena itu, simulasi dapat menjadi solusi awal untuk mengatasi permasalahan tersebut. Simulasi memungkinkan pengaturan berbagai protokol dan arsitektur jaringan komunikasi, serta pemodelan berbagai kondisi lalu lintas

tanpa risiko uji coba langsung di lapangan. Dalam kajian pustaka ini, kami bermaksud memberikan gambaran yang lebih jelas terkait tren, tantangan, dan peluang pemanfaatan simulasi V2X pada lingkungan lalu lintas yang beragam.

Kata Kunci – V2X, Simulasi, Sistem Transportasi Cerdas, Keselamatan Berkendara

I. PENDAHULUAN

Transportasi adalah sektor penting dalam pembangunan kota modern [1]. Meningkatnya urbanisasi diiringi oleh peningkatan jumlah kendaraan di jalan raya yang menimbulkan beberapa tantangan kompleks, seperti kemacetan lalu lintas, polusi udara, dan keselamatan berkendara. Menurut data Badan Perencanaan Pembangunan Nasional (Bappenas) pada tahun 2019, tercatat bahwa kemacetan yang terjadi di daerah perkotaan mengakibatkan pemborosan bahan bakar sebesar 2,2 juta liter per hari dan kerugian ekonomi sebesar Rp71,4 triliun per tahun [2]. Berdasarkan permasalahan tersebut, perlu adanya teknologi yang mampu menjadi solusi cerdas untuk menciptakan sistem transportasi yang lebih efisien, aman, dan ramah lingkungan.

Di sisi lain, teknologi *Vehicle-to-Everything (V2X)* sedang berkembang untuk menciptakan lingkungan berkendara yang lebih nyaman dan efisien [3]. V2X merupakan suatu konsep komunikasi yang memungkinkan kendaraan untuk saling berinteraksi dengan berbagai entitas di sekitarnya, seperti kendaraan lain (*Vehicle-to-Vehicle/V2V*), infrastruktur jalan (*Vehicle-to-Infrastructure/V2I*), pejalan kaki (*Vehicle-to-Pedestrian/V2P*), dan jaringan tertentu (*Vehicle-to-Network/V2N*) [4] seperti ilustrasi pada Gambar 1. Kendaraan dilengkapi dengan perangkat nirkabel yang dapat mengumpulkan data terkait lingkungan lalu lintas, kemudian mengirimkan informasi tersebut ke entitas lain di sekitarnya [5].

Pengembangan teknologi V2X menjadi salah satu upaya untuk mencapai *Intelligent Transportation System (ITS)* yang merupakan sistem transportasi cerdas berbasis teknologi informasi dan komunikasi. Konsep ITS bertujuan untuk optimalisasi arus lalu lintas, meningkatkan keselamatan di jalan raya, dan mengurangi dampak negatif yang terjadi pada lingkungan [6]. Penerapan teknologi V2X juga mendukung pengembangan *smart city* yang merupakan konsep kota pintar

¹Mahasiswa, Program Studi Magister Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Udayana, Jln. P.B. Sudirman Denpasar, Bali 80234 (telp: +62 (361) 223797; fax: +62 (361) 701907; e-mail: amandasrwt09@gmail.com)

^{2,3}Dosen, Program Studi Magister Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Udayana, Jln. P.B. Sudirman Denpasar, Bali 80234 (telp: +62 (361) 223797; fax: +62 (361) 701907; e-mail: indra@unud.ac.id, satya.kumara@unud.ac.id).





Gambar 1: Ilustrasi Sistem Komunikasi Vehicle-to-Everything (V2X)

dengan teknologi digital untuk meningkatkan efisiensi pengelolaan kota dan pelayanan publik yang lebih baik. Integrasi V2X pada sistem transportasi membawa kontribusi besar untuk kualitas masyarakat perkotaan dengan menciptakan suatu ekosistem transportasi yang terhubung, adaptif, dan terotomatisasi [7].

Namun, implementasi teknologi V2X masih banyak mengalami kendala dalam hal biaya [8]. Penerapan V2X membutuhkan biaya yang cukup besar dalam pengembangan infrastruktur komunikasi, *hardware* pada masing-masing kendaraan, dan integrasi dengan konsep ITS maupun *smart city*. Faktor keandalan, keamanan, dan kompatibilitas teknologi V2X juga membutuhkan suatu penelitian dan pengujian yang mendalam sebelum dilakukan implementasi skala besar. Variabel penting yang perlu diperhatikan dalam sistem komunikasi V2X, yaitu kecepatan jaringan komunikasi, pengembangan *software* khusus, dan penerapan sensor atau teknologi pemrosesan data [9].

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, simulasi dapat menjadi solusi awal dalam merencanakan penerapan sistem V2X secara riil. Simulasi dengan *software* simulator komunikasi antar kendaraan dapat digunakan untuk memodelkan skenario komunikasi V2X dalam lingkungan yang terkendali, menguji berbagai protokol dan arsitektur jaringan, serta mengevaluasi performa sistem dalam berbagai kondisi lalu lintas [10]. Berbagai aspek seperti latensi jaringan, kualitas transmisi, dan keamanan komunikasi dapat diuji secara komprehensif tanpa biaya besar dan risiko uji coba lapangan [11]. Penggunaan *software* simulator juga memungkinkan untuk melakukan pengujian dalam berbagai kondisi yang sulit di replikasi pada dunia nyata, sehingga memberikan gambaran yang cukup jelas mengenai tantangan dan peluang pengembangan teknologi V2X.

Kajian pustaka ini menelaah tentang *software* simulator yang dapat digunakan untuk melakukan simulasi komunikasi V2X. Beberapa kombinasi *software* yang sering digunakan untuk simulasi V2X adalah Veins, SUMO, OMNeT++, NS-3, Eclipse MOSAIC, CARLA, dan OpenCDA. Masing-masing simulator memiliki keunggulan tersendiri dalam hal akurasi, kemudahan penggunaan, dan kemampuan untuk melakukan pemodelan lalu lintas kompleks. Dalam kajian pustaka ini akan dibahas penggunaan *software*, skenario pengujian, dan

teknologi V2X yang sering digunakan untuk simulasi sesuai dengan kebutuhan implementasi teknologi V2X dalam dunia nyata.

II. STUDI PUSTAKA

A. Intelligent Transportation System (ITS)

Intelligent Transportation System (ITS) merupakan sebuah konsep yang diterapkan untuk menciptakan efisiensi, keamanan, dan kenyamanan berkendara pada lalu lintas yang kompleks [12]. ITS telah dikembangkan dengan mempertimbangkan kebiasaan dan pengalaman seseorang dalam mengemudi untuk menjadikannya sebagai landasan perbaikan performa transportasi [13]. Inovasi ITS dilatarbelakangi oleh persoalan transportasi yang tidak dapat diatasi dengan cara biasa, namun memerlukan kerja sama atau kombinasi dari seluruh ranah teknologi yang tersedia di bidang informasi dan komunikasi [14]. Teknologi ini diterapkan dengan sistem *sensing*, analisis kontrol, dan komunikasi pada transportasi darat untuk meningkatkan keselamatan, mobilitas, dan efisiensi berkendara.

Implementasi ITS dapat berupa peringatan kemacetan, sistem pengereman otomatis (*automatic braking system*), dan peringatan kecelakaan di jalan raya [15]. ITS mampu mengintegrasikan berbagai teknologi seperti sensor, kamera, *software*, dan jaringan komunikasi yang mampu mengelola dan mengontrol transportasi secara efektif. Dalam penerapannya, ITS dapat membantu mengurangi kemacetan, meningkatkan keselamatan di jalan raya, dan mampu memberikan informasi secara *real-time* kepada pengguna jalan [16]. ITS melibatkan beberapa sensor untuk mengumpulkan data yang didistribusikan pada komunikasi antar *node* atau dalam hal ini disebut dengan OBU (*On-Board Unit*) dan RSU (*Road-Side Unit*).

B. Vehicle-to-Everything (V2X)

Mobilitas kendaraan terus mengalami peningkatan dan diprediksi mencapai 2,5 miliar kendaraan pada tahun 2050 [17]. *Organization for Economic Cooperation and Development (OECD)* di Paris menyatakan bahwa negara maju kehilangan miliar dolar Amerika dari bidang transportasi setiap tahunnya. [18]. Kerugian tersebut disebabkan oleh masifnya pengemudi yang tidak memiliki informasi terkait navigasi. V2X menerapkan konsep yang memungkinkan kendaraan untuk melakukan komunikasi dengan berbagai elemen di sekitarnya, seperti kendaraan lain, infrastruktur jalan, pejalan kaki, dan jaringan seluler [19]. Konsep komunikasi ini mampu membagikan informasi secara *real-time*, sehingga dapat meningkatkan keselamatan, efisiensi, dan kenyamanan berkendara [20]. V2X dapat diterapkan dengan berbagai teknologi komunikasi seperti Wi-Fi, *Bluetooth*, 5G, dan DSRC (*Dedicated Short-Range Communication*). Kendaraan atau elemen lain yang dilengkapi dengan perangkat V2X dapat saling mengirim dan menerima data secara *real-time*. Jenis komunikasi V2X dijelaskan sebagai berikut.

1. V2V

V2V adalah sebuah konsep komunikasi, yang mana kendaraan mampu berkomunikasi satu sama lain melalui gelombang radio. Informasi yang dapat ditransmisikan oleh kendaraan antara lain *emergency and warning message*, *routing and basic safety message*, *infotainment message*, dan *inter-personal message* [21].

2. V2I

V2I memungkinkan sebuah kendaraan untuk berkomunikasi secara langsung dengan infrastruktur jalan, seperti lampu lalu lintas, rambu-rambu lalu lintas, dan sensor jalan. Kendaraan berpotensi untuk menerima informasi terkait perubahan *traffic light* untuk menyesuaikan kecepatan, membaca rambu jalan untuk batas kecepatan dan peringatan bahaya, serta mendapatkan informasi tentang kondisi jalan seperti adanya lubang dan genangan air.

3. V2P

V2P merupakan jenis komunikasi dalam sistem V2X yang memungkinkan kendaraan untuk berkomunikasi dengan pejalan kaki. Dengan adanya teknologi V2P, maka kendaraan yang mendekat dapat mendeteksi keberadaan pejalan kaki untuk kemudian mengurangi kecepatan kendaraannya. Konsep V2P ini secara signifikan mampu mengurangi risiko kecelakaan antara kendaraan dan pejalan kaki [22].

4. V2N

V2N memungkinkan kendaraan untuk terhubung langsung dengan jaringan seluler. Dengan jenis komunikasi ini, kendaraan dapat mengakses internet untuk mendapatkan informasi *real-time* mengenai lalu lintas, kondisi kendaraan, dan informasi lainnya untuk mengoptimalkan rute perjalanan dan konsumsi bahan bakar [23].

C. Kerangka Kerja Simulasi V2X

Kerangka kerja simulasi V2X melibatkan integrasi komponen yang saling bekerja sama untuk mengembangkan simulasi yang realistis terkait interaksi kendaraan, infrastruktur, dan komunikasi dalam skenario lalu lintas. Komponen utama dalam simulasi dijelaskan pada sub berikut.

C.1 Simulasi Lalu Lintas (*Traffic Simulation*)

Pemodelan pergerakan kendaraan, pejalan kaki, pesepeda, dan entitas lainnya di jalan raya dilakukan dengan *traffic simulation*. Simulator mampu menciptakan skenario lalu lintas yang realistis dengan beberapa aspek, seperti rute kendaraan, interaksi antar kendaraan, dan infrastruktur jalan. *Software* yang dapat digunakan untuk pemodelan lalu lintas adalah SUMO (*Simulation of Urban Mobility*) dan CARLA (*Car Learning to Act*).

1. SUMO

SUMO adalah *platform open-source* untuk simulasi lalu lintas mikroskopis dan berkelanjutan [24]. *Software* ini dirancang untuk menangani jaringan jalan besar dengan memodelkan kendaraan jalan raya, angkutan umum, dan pejalan kaki [25]. SUMO menyediakan fitur untuk

melakukan kontrol dan akses data pada setiap kendaraan [26]. SUMO memiliki beberapa *tools* dengan fungsi yang berbeda-beda, antara lain *netgenerate.exe*, *netconvert.exe*, *randomTrips.py*, *duarouter.exe*, *sumo-gui.exe*, *sumo.exe*, *traceExporter.py* [27]. SUMO menyediakan *tools* untuk mendukung penanganan rute jalan, visualisasi, mengimpor jaringan, dan menghitung emisi [28]. Fitur utama yang terdapat pada SUMO, yaitu pergerakan kendaraan bebas tabrakan, perbedaan tipe kendaraan, dan multi jalur.

2. CARLA

CARLA adalah *software* simulator yang bersifat *open-source* untuk melakukan simulasi *autonomous vehicle*, khususnya di daerah perkotaan yang padat [29]. CARLA dikembangkan untuk simulasi, pembuatan prototipe, dan validasi model pengemudian otonom termasuk persepsi dan kontrol. Dalam simulasi CARLA dapat dilakukan beberapa pengaturan, seperti tata letak perkotaan, berbagai model kendaraan, bangunan, pejalan kaki, dan rambu-rambu atau infrastruktur jalan [30]. CARLA juga mendukung pengaturan rangkaian sensor yang fleksibel dan memberikan sinyal untuk melatih strategi mengemudi, seperti koordinat GPS, kecepatan, akselerasi, dan data terperinci tentang adanya peristiwa di jalan [31].

C.2 Simulasi Jaringan (*Network Simulation*)

Network simulation berfungsi untuk memodelkan komunikasi antara kendaraan dengan entitas lainnya yang mencakup pengaturan protokol komunikasi, karakteristik kanal, dan kinerja jaringan. *Software* yang dapat digunakan untuk *network simulation* adalah OMNeT++ (*Objective Modular Network Testbed in C++*) dan NS-3 (*Network Simulator 3*) yang dijabarkan detail sebagai berikut.

1. OMNeT++

OMNeT++ merupakan sebuah *framework* simulasi berbasis C++ yang digunakan untuk membangun simulasi jaringan *discrete-event* dengan tipe *object-oriented* [32]. Simulasi jaringan *discrete-event* dengan tipe *object-oriented* berarti simulator bertindak sesuai dengan kejadian yang berlangsung di dalamnya dan berhubungan dengan objek-objek tertentu. Fitur yang dimiliki oleh OMNeT++ adalah sebagai berikut [33].

- a. Model simulasi berbasis komponen yang memungkinkan model untuk dibangun dari beberapa komponen modular, sehingga mempermudah pembangunan dan perluasan model.
- b. Fleksibilitas desain proses simulasi yang memungkinkan pengguna untuk mendesain proses simulasi secara bebas, termasuk penerapan protokol jaringan dan transmisi paket. Dengan hal ini pengguna dapat melakukan desain struktur jaringan dan perilaku *node* sesuai dengan kondisi spesifik skenario jaringan pada penelitian.
- c. GUI (*Graphical User Interface*) yang memungkinkan pengguna untuk mengamati proses simulasi secara



visual. Hal ini bertujuan untuk memastikan proses yang dirancang dan diimplementasikan berjalan dengan baik.

2. NS-3

NS-3 adalah *platform* yang dikembangkan untuk simulasi jaringan *extensible* yang bersifat *open-source*. NS-3 menyediakan beberapa pemodelan, seperti bagaimana paket data suatu jaringan bekerja dan berjalan, serta *simulation engine* bagi pengguna untuk melakukan eksperimen simulasi. Pemodelan yang tersedia pada *platform* NS-3 berfokus pada bagaimana protokol internet dan jaringan bekerja, tetapi tidak terbatas pada sistem internet. NS-3 memiliki beberapa konsep sebagai elemen jaringan, yaitu *node*, aplikasi, *channel*, *net device*, dan *topology* [34].

Node merupakan abstraksi perangkat komputer dalam NS-3. *Node* menyediakan metode untuk mengelola representasi perangkat komputasi pada simulasi. Aplikasi merupakan abstraksi dasar yang digunakan oleh pengguna untuk menghasilkan beberapa kegiatan simulasi. Elemen aplikasi menyediakan metode untuk mengelola representasi NS-3 pada aplikasi level *user* dalam simulasi. *Channel* merupakan sebuah media pengiriman data dalam jaringan. *Net Device* merupakan *software driver* dan *hardware* simulasi yang menyediakan metode untuk mengatur koneksi ke objek *node* dan *channel*. *Topology helpers* merupakan elemen yang digunakan untuk mengatur simulasi jaringan dengan mudah. NS-3 menyediakan elemen ini untuk mengatur koneksi antar *node*, *net device*, dan *channel*.

C.3 V2X Communication Middleware

Penghubung antara *traffic simulation* dengan *network simulation* adalah *middleware*. *Middleware* berperan dalam sinkronisasi data seperti integrasi data dari simulator lalu lintas ke simulator jaringan, mengatur transmisi pesan V2X, dan memastikan keandalan simulator dalam pemodelan V2X. Contoh *software* yang bertindak sebagai *middleware* adalah Veins dan Eclipse MOSAIC yang dijabarkan detail sebagai berikut.

1. Veins

Veins merupakan *framework open-source* yang digunakan untuk mensimulasikan jaringan komunikasi antar kendaraan [35]. Veins dioperasikan dengan dua simulator lain, yaitu OMNeT++ dan SUMO. OMNeT++ berfungsi untuk mengatur jaringan komunikasi dan SUMO berfungsi untuk memberikan gambaran kondisi jalan. Veins memiliki beberapa fitur dengan fungsi sebagai berikut [36].

- Pergerakan kendaraan dalam simulator lalu lintas SUMO tercermin sebagai sebuah pergerakan simpul dalam simulasi. Simpul berinteraksi dengan simulasi lalu lintas jalan untuk meninjau pengaruh IVC (*Inter-Vehicle Communication*) pada lalu lintas jalan.
- OMNeT++ yang menggunakan kerangka kerja pemodelan MiXiM berfungsi untuk memodelkan efek

lapisan fisik yang akurat dalam distribusi daya pancar dari waktu ke waktu.

- Terdapat fitur ekstensi *plexo* yang berfungsi untuk simulasi realistis sistem *platooning* (mengikuti mobil secara otomatis).
- Terdapat fitur ekstensi *Prext* (*Privacy Extension for Veins*) yang berfungsi untuk mengukur privasi yang diperoleh dalam beberapa metrik populer seperti entropi, keterlacakan, dan statistik penggunaan nama samaran (khusus untuk skema privasi di VANET).

2. Eclipse MOSAIC

Eclipse MOSAIC adalah *framework* simulasi yang bersifat *open-source* untuk mendukung simulasi multi-domain dan multi-skala [37]. Dalam implementasinya, eclipse MOSAIC menggabungkan beberapa simulator, seperti SUMO, OMNeT++, dan NS-3. Simulator ini mampu merepresentasikan berbagai jenis *co-simulation* dalam jangkauan yang luas dari berbagai *domain* seperti manajemen lalu lintas, pengembangan komunikasi, dan pengembangan aplikasi [38]. Dalam simulator ini dapat dilakukan beberapa jenis analisis, seperti evaluasi, *testing*, dan desain solusi inovatif untuk *smart mobility*.

Tujuan pengembangan simulator ini adalah untuk memberikan fleksibilitas kepada pengguna dalam melakukan berbagai simulasi V2X [39]. Proses integrasi simulator ke eclipse MOSAIC membutuhkan tiga elemen inti, yaitu manajemen federasi, manajemen waktu, dan manajemen interaksi. Manajemen federasi berperan sebagai penghubung setiap simulator, manajemen waktu berperan dalam koordinasi dan sinkronisasi simulasi, sedangkan manajemen interaksi berperan dalam pertukaran data di antara federasi. Simulasi menggunakan eclipse MOSAIC mampu memodelkan dan menguji strategi pengendalian lalu lintas secara efisien [40].

III. METODOLOGI

Kajian literatur ini meninjau tentang penerapan *software* simulasi untuk komunikasi V2X dari *paper* dalam kurun waktu 7 tahun terakhir. Metode yang digunakan bertujuan untuk memberikan gambaran tentang konsep komunikasi kendaraan dengan berbagai entitas di jalan raya, memperjelas konsep pengaplikasian model komunikasi, dan perkembangan V2X secara realistis. Kajian literatur menelaah data sekunder yang bersumber dari jurnal, prosiding, dan sumber informasi lainnya yang membahas tentang penggunaan *software* simulasi untuk pengujian komunikasi V2X. Data yang dikumpulkan berupa konsep komunikasi kendaraan, *software* simulasi V2X, skenario pengujian, dan perkembangan teknologi untuk pengujian skenario V2X. Pada tahap akhir dilakukan analisis statistik data untuk mendapatkan kesimpulan terkait jenis *software* yang banyak digunakan untuk simulasi V2X, variasi skenario pengujian, dan teknologi yang diterapkan. Kerangka pemikiran studi dijabarkan pada Gambar 2 berikut.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan kajian yang telah dilakukan, penerapan simulasi untuk komunikasi V2X telah banyak dibahas dalam literatur. Pembahasan general pada setiap literatur dijabarkan pada Tabel I dengan kajian detail yang ditelaah pada masing-masing sub bab.



Gambar 2: Diagram Kerangka Literature Review

TABEL I
RANGKUMAN PENELITIAN PADA REFERENSI PAPER

Topik & Peneliti	Metode & Lingkungan	Variabel & Jaringan
Pengembangan dan evaluasi simulator CARLA Dosovitskiy et al. (2017) [29]	Pendekatan pengemudian otonom dengan simulator CARLA. Pemodelan lalu lintas kota dan sensor.	Modular, imitasi, RL, dan kinerja sistem. Jaringan VANET.
Perbandingan performa komunikasi V2X berbasis ITS-G5 dan C-V2X Mannoni et al. (2019) [56]	Penggunaan OFDM dengan dan SC-FDMA dengan <i>turbo coding</i> . Simulasi performa <i>physical layer</i> .	PER, SNR, <i>throughput</i> , latensi, dan <i>range</i> komunikasi. ITS-G5 dan C-V2X.
Pengembangan komunikasi V2P Malik et al. (2020) [53]	Identifikasi arsitektur komunikasi V2P. Komunikasi <i>pedestrian</i> dan infrastruktur.	Posisi, latensi, keandalan jaringan. IEEE 802.11p, LTE, Wi-Fi, dan <i>cloud</i> .
Pengembangan simulator VANET Weber et al. (2021) [39]	Meninjau simulator Veins, NetSim, dan EstiNet. Simulasi teknologi modern dan standar keamanan.	Teknologi, komputasi, keamanan, <i>error</i> . Jaringan VANET.
Pengembangan kerangka simulasi dengan jaringan 5G Cislaghi et al. (2021) [45]	Integrasi simulator CARLA dan OMNeT++ untuk pengemudian otonom. Simulasi ekstensif untuk analisis kendaraan.	<i>Frame rate</i> , ukuran paket, latensi jaringan, kualitas kanal, konfigurasi. Jaringan 5G
Arsitektur pengemudian otonom Huelamo et al. (2021) [47]	Simulasi dengan CARLA dan ROS. Berbagai skenario berkendara.	Keandalan, efektivitas, ketahanan sistem, dan kondisi lalu lintas dinamis. Komunikasi berbasis ROS.
Pengembangan dan evaluasi standar 5G NR V2X Garcia et al. (2021) [57]	Pendekatan standar 3GPP Release 16. Simulasi kinerja dan efektivitas 5G NR V2X.	QoS, manajemen sumber daya, latensi, dan efisiensi komunikasi kendaraan. Jaringan 5G NR dan LTE V2X.
Simulator CARLA Malik et al. (2022) [31]	Algoritma kendaraan otonom. Lingkungan perkotaan.	Lingkungan, pemetaan, lokalisasi, dan kontrol kendaraan. Jaringan VANET.
Pengembangan SDDP pada kendaraan otonom	Penggunaan simulator CARLA dengan OpenSCENARIO.	Kecepatan, kondisi jalan, visibilitas, efektivitas AEB.

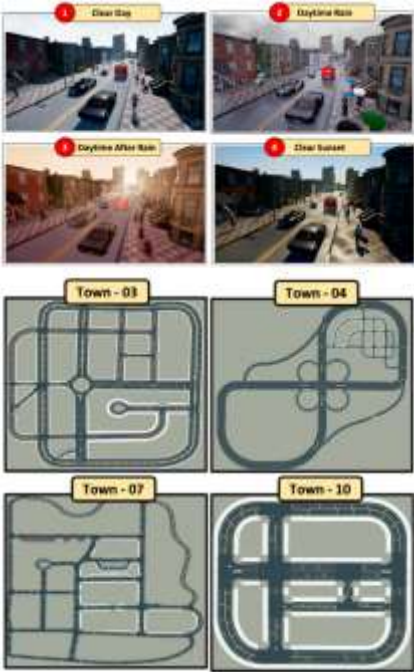


Won and Kim (2022) [42]	Kondisi ekstrem dengan standar Euro NCAP.	Jaringan VANET.
Implementasi modul persepsi objek untuk mobilitas kendaraan	Penggunaan struktur indeks spasial pada simulator SUMO dan Eclipse MOSAIC.	Jumlah kendaraan, kecepatan deteksi, dan jenis struktur spasial.
Protzmann et al. (2022) [38]	Lalu lintas perkotaan.	Jaringan VANET.
Solusi manajemen ITS dengan komunikasi V2X	Penggunaan <i>framework</i> simulasi Eclipse MOSAIC dan algoritma MTFC.	Jumlah VMS, efisiensi lalu lintas, dan tingkat penetrasi kendaraan.
Schrab et al. (2022) [40]	Lalu lintas jalan raya dan tol.	Komunikasi V2X dengan teknologi ITS-G5 dan LTE.
Simulasi VANET	Penggunaan Veins dan OMNeT++.	Pola antenna, <i>gain</i> , dan dekode pesan.
Sommer et al. (2022) [44]	Interaksi antar kendaraan dan infrastruktur.	Jaringan VANET.
Pengembangan DRL pada kendaraan otonom	Penggunaan simulator CARLA dan SUMO.	Jarak, kecepatan, dinamika kendaraan, dan tingkat keberhasilan skenario.
Moreno et al. (2022) [30]	Persimpangan lalu lintas.	Representasi MDP.
Kendaraan cerdas dengan teknologi 5G-V2X	<i>Deep Learning</i> (CNN).	Deteksi garis jalur, akurasi, dan kecepatan deteksi.
Xu et al. (2022) [52]	Lingkungan berkendara yang kompleks.	Teknologi 5G-V2X.
Implementasi komunikasi V2X dengan jaringan seluler 5G	Penggunaan modulasi spasial dan penerapan keamanan lapisan fisik.	Kapasitas keamanan, SNR, <i>fading</i> , latensi, dan keandalan.
Jang (2022) [54]	Komunikasi <i>downlink</i> seluler.	Jaringan seluler 5G.
Simulasi V2X pada kendaraan otonom dan manual	Integrasi simulator CARLA, SUMO, OMNeT++, dan NS-3.	Komunikasi, algoritma, dan skenario lalu lintas realistik.
Cui and Shen (2023) [37]	Lingkungan yang bervariasi.	Jaringan komunikasi V2X.
Algoritma E-AODV pada VANET	Algoritma E-AODV dengan simulasi NS 3.35, SUMO, dan <i>Open Street Map</i> .	<i>Routing</i> , latensi, <i>throughput</i> , jarak, SNR, kepadatan.
Mohammed et al. (2023) [46]	Simulasi dalam berbagai kepadatan kendaraan.	Komunikasi V2V, V2I, dan V2X dalam VANET.
Analisis teknologi 4G LTE dan 5G NR	Penggunaan simulator Simu5G.	SINR, latensi, <i>frame loss rate</i> , dan <i>jitter</i> .
Lazar and Caruntu (2023) [50]	Persimpangan perkotaan.	Jaringan 4G LTE dan 5G NR.
Peningkatan kinerja komunikasi V2N	Penggunaan IQN dalam memprediksi kualitas layanan dan <i>throughput</i> .	<i>Throughput</i> , jumlah data, dan tingkat kemacetan <i>base station</i> .
Hasegawa and Okamoto (2023) [55]	Simulasi numerik untuk mengevaluasi kinerja skema.	Jaringan C-V2X dengan teknologi 5G.
Simulasi <i>autonomous vehicle</i>	Pemodelan lalu lintas dengan SUMO dan CARLA.	Waktu, kepadatan lalu lintas, kemacetan, dan tingkat kecelakaan.
Niewerth et al. (2024) [41]	Lalu lintas perkotaan.	Jaringan VANET.
Pengembangan <i>framework</i> ms-van3t-CARLA pada kendaraan otonom	Integrasi simulator CARLA, NS-3, dan OpenCDA.	<i>Delay</i> , <i>packet loss</i> , efisiensi, performa aplikasi.
Carletti (2024) [43]	Lingkungan dan kendaraan kompleks.	IEEE 802.11p dan 5G.
Simulasi VANET skala besar	Penggunaan simulator Disolv dengan paradigma waktu diskrit.	Kompleksitas, kecepatan, akurasi, dan skalabilitas.

Tangirala et al. (2024) [12]	Skenario ITS untuk kota besar.	Jaringan VANET.
Pengembangan simulasi aplikasi V2X	Pemodelan pada simulator OMNeT++, Veins, dan SUMO.	Kecepatan data, kepadatan cakupan RSU, dan parameter <i>error</i> .
Vladyko et al. (2024) [48]	Pergerakan kendaraan dan interaksi jaringan.	Jaringan V2X dan 5G.
Pengembangan ChatSUMO untuk otomatisasi simulasi lalu lintas	Penggunaan pemrosesan LLM.	Proporsi, emisi CO ₂ , daya listrik, kepadatan, dan waktu perjalanan.
Li et al. (2024) [49]	Lalu lintas dunia nyata.	Jaringan VANET.

A. Kerangka Kerja Simulasi V2X

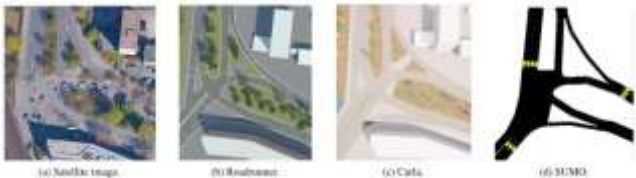
Beberapa penelitian membahas tentang penggunaan *software* simulasi untuk menguji coba komunikasi kendaraan dengan entitas di sekitarnya. Penelitian yang dilakukan oleh Malik *et al.* (2022) membahas tentang penggunaan *software* CARLA untuk melakukan simulasi *autonomous vehicle*. Penelitian ditujukan untuk mengeksplorasi fitur-fitur yang dimiliki oleh *software* CARLA untuk mengatasi permasalahan dan tantangan dalam pengujian kendaraan otonom. Hasil penelitian menyatakan bahwa CARLA mampu menyediakan sistem simulasi yang realistis dengan berbagai pengaturan kondisi, peta dan sensor seperti yang terlihat pada Gambar 3 untuk mendukung algoritma dan skenario pengujian lalu lintas pada kendaraan otonom [31].



Gambar 3: Pengaturan Cuaca dan Peta pada CARLA [31]

Simulasi berskala besar yang mengintegrasikan *autonomous vehicle* (AV) dilakukan oleh Niewerth *et al.* (2024). Penelitian membahas tentang eksplorasi simulasi skala

besar dalam model lalu lintas perkotaan. Penelitian berfokus pada pengembangan simulasi bersama yang menggabungkan simulator CARLA dan SUMO untuk memodelkan lingkungan lalu lintas dari peta lokasi tertentu seperti yang terlihat pada Gambar 4. Tujuan dari penelitian adalah mengevaluasi kinerja AV dalam kondisi lalu lintas yang beragam dan mengamati dampaknya terhadap pola lalu lintas. Metode penelitian dilakukan dengan pemodelan lalu lintas dan kendaraan yang kemudian dijalankan secara bersamaan. Simulasi yang dilakukan memungkinkan suatu pengujian AV pada lingkungan dinamis dengan kecepatan yang dapat diatur atau disesuaikan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa simulasi yang dilakukan mampu memberikan penilaian terhadap indikator kinerja AV yang meliputi waktu perjalanan, tingkat kecelakaan, serta kualitas lalu lintas seperti kepadatan dan kemacetan. Simulasi dengan CARLA dan SUMO memberikan hasil yang realistis dan fleksibel untuk menguji AV dalam skala besar [41].

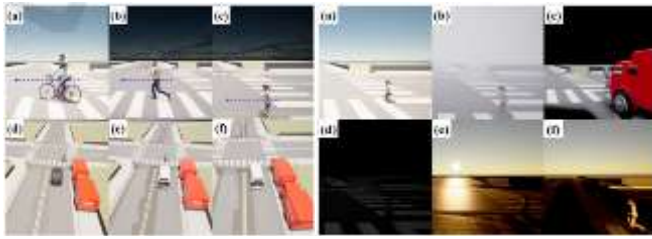


Gambar 4: Pemodelan Peta Lalu Lintas Skala Besar pada CARLA dan SUMO [41]

Pengembangan skenario uji untuk kendaraan otonom dilakukan oleh Won and Kim (2022). Penelitian membahas tentang proses pengembangan berbasis simulasi untuk kendaraan otonom menggunakan simulator CARLA. Penelitian bertujuan untuk membangun lingkungan simulasi yang memungkinkan verifikasi desain dan validasi performa melalui skenario uji yang praktis, seperti Euro NCAP sebagai AEB (*Autonomous Emergency Braking*). Metode yang digunakan adalah pengembangan skenario uji yang memungkinkan fleksibilitas dan otomatisasi. Pengujian dilakukan dalam berbagai kondisi, seperti jalan basah, cuaca buruk, dan variasi kecepatan kendaraan seperti Gambar 5 untuk mengevaluasi performa AEB. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem AEB mampu berfungsi dengan optimal pada kecepatan yang rendah dan tanpa penghalang. Namun, kinerja



menurun secara signifikan pada kondisi jalan yang basah dengan perhitungan tingkat tabrakan mencapai 35% dalam kondisi ekstrem [42].



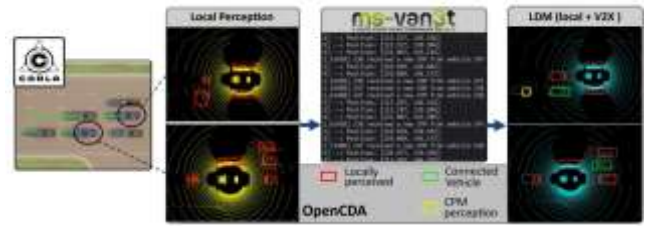
Gambar 5: Pemodelan Skenario Simulasi dan Kondisi Lingkungan pada CARLA [42]

Implementasi simulasi dengan persepsi berbasis objek dilakukan oleh Protzmann *et al.* (2022). Penelitian yang dilakukan membahas tentang pengembangan modul persepsi objek dalam simulasi skenario lalu lintas skala besar menggunakan *software* Eclipse MOSAIC. Dalam penelitian ini menggunakan metode struktur indeks spasial berbasis *grid* dan *quad-tree* untuk mencari objek dalam jangkauan pandang kendaraan. Modul diintegrasikan dengan simulator SUMO untuk melakukan pengujian pada skenario lalu lintas perkotaan besar Berlin. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pendekatan *grid* dan *quad-tree* bekerja dengan baik dalam mendeteksi objek di sekitar kendaraan dengan cepat tanpa membebani kinerja simulasi secara signifikan. Pengembangan lebih lanjut akan dilakukan untuk mencakup deteksi objek stasioner dan peningkatan model persepsi untuk keseluruhan lalu lintas [38].

Penelitian tentang solusi manajemen ITS untuk lalu lintas jalan raya campuran dilakukan oleh Schrab *et al.* (2022). Tujuan penelitian ini adalah mengembangkan dan menguji manajemen lalu lintas berbasis simulasi untuk menciptakan lalu lintas yang lebih efisien. Simulator yang digunakan adalah Eclipse MOSAIC yang memungkinkan integrasi simulator dari berbagai *domain*, seperti lalu lintas, komunikasi, dan aplikasi. Metode yang digunakan adalah mengumpulkan data nyata dari sebuah jalan tol, kemudian dilakukan skenario simulasi pada Eclipse MOSAIC terkait lalu lintas jalan raya dan algoritma pengontrol aliran lalu lintas seperti MTFC (*Mainstream Traffic Flow Control*). Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan algoritma pengontrolan lalu lintas dapat meningkatkan efisiensi lalu lintas pada infrastruktur yang lebih sederhana, seperti VMS (*Variable Message Signs*) dan V2X. Penggunaan simulator Eclipse MOSAIC terbukti mampu memodelkan dan menguji strategi pengendalian lalu lintas dengan tingkat efisiensi yang meningkat hingga 14% [40].

Penelitian oleh Carletti (2024) membahas tentang pengembangan *framework* simulator CARLA untuk mengevaluasi persepsi kooperatif pada kendaraan otonom. *Framework* ini menggabungkan simulasi mobilitas, sensor, dan komunikasi yang presisi. Penelitian bertujuan untuk mendukung model komunikasi nirkabel yang akurat pada komunikasi V2X. Penelitian ini menggunakan metode integrasi tiga simulator utama, yaitu CARLA, ns-3, dan OpenCDA dengan kerangka alur simulasi seperti Gambar 6. CARLA berfungsi untuk simulasi mobilitas dan sensor, ns-3 berfungsi untuk simulasi jaringan komunikasi, dan OpenCDA berfungsi untuk menyediakan modul persepsi kooperatif yang memungkinkan kendaraan berbagi informasi lingkungan. Hasil

penelitian menunjukkan bahwa CARLA dapat digunakan untuk simulasi skenario persepsi kooperatif dengan realistis dan memungkinkan analisis performa jaringan komunikasi dalam berbagai teknologi V2X. Penggunaan simulator CARLA juga memperlihatkan efisiensi dalam penyampaian informasi persepsi melalui CAMs (*Cooperative Awareness Messages*) dan CPMs (*Collective Perception Messages*) [43].



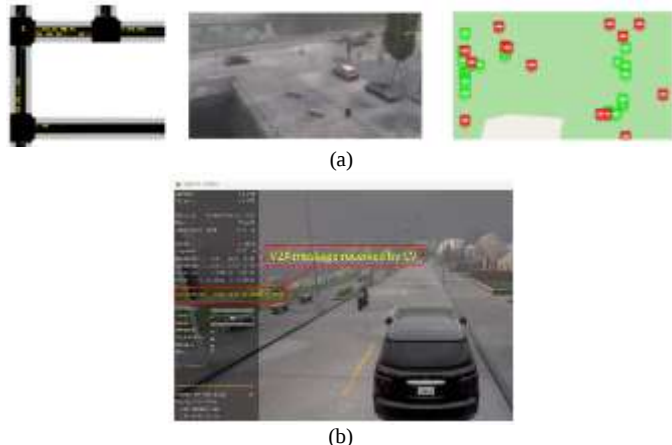
Gambar 6: Representasi LiDAR OpenCDA dan Persepsi CAM, CPM, atau Deteksi Lokal [43]

Eksplorasi pengaruh pola antenna terhadap kekuatan sinyal dan kemampuan decode pesan dikaji oleh Sommer *et al.* (2022). Penelitian ini menggunakan simulator Veins yang terintegrasi dengan OMNeT++ untuk mensimulasikan berbagai skenario komunikasi kendaraan. Penelitian bertujuan untuk mengembangkan model simulasi untuk menangkap dinamika komunikasi antar kendaraan dan infrastruktur, serta melakukan eksplorasi pengaruh antenna terhadap kekuatan sinyal yang ditransmisikan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa karakteristik antenna dan lokasi pemasangan dapat mempengaruhi komunikasi antar kendaraan. Pola antenna dapat mengurangi jumlah pesan yang diterima hingga 20%. Melalui simulator Veins, pola antenna dapat disesuaikan pada simulasi dan terbukti mampu menyediakan alat yang lebih baik untuk proses eksplorasi dan pengembangan aplikasi ITS dengan lebih efektif dan aman [44].

Penelitian yang dilakukan oleh Tangirala *et al.* (2024) membahas tentang metode simulasi jaringan antar kendaraan dalam sistem transportasi skala besar. Penelitian ini membahas simulator Disolv untuk menyederhanakan model mobilitas dan jaringan dengan memanfaatkan paradigma waktu diskrit untuk pertukaran pesan. Penelitian bertujuan untuk mengurangi kompleksitas komputasi dengan tetap menjaga akurasi simulasi, sehingga memungkinkan evaluasi skala besar terhadap aplikasi ITS. Disolv mampu menggantikan simulasi paket dengan pertukaran pesan berbasis metadata yang mengurangi jumlah entitas yang diproses selama simulasi. Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah membandingkan kinerja simulator Disolv dengan simulator lainnya seperti ns-3 dan Eclipse MOSAIC. Hasil penelitian menunjukkan bahwa simulator Disolv memberikan keuntungan yang signifikan dalam hal eksekusi tanpa kehilangan presisi yang berarti [12].

Proses evaluasi algoritma pengemudian otonom dan komunikasi V2X dilakukan pada penelitian Cui and Shen (2023). Penelitian ini bertujuan untuk mengintegrasikan simulator pengemudian otonom dengan kerangka simulasi V2X yang memungkinkan kendaraan untuk terhubung dalam berbagai skenario lalu lintas secara realistis. Metode yang digunakan adalah menggabungkan beberapa simulator seperti CARLA, SUMO, OMNeT++, dan ns-3 seperti yang terlihat pada Gambar 7 (a). CARLA digunakan untuk simulasi

pengemudian otonom, SUMO digunakan untuk simulasi lalu lintas, dan berbagai simulator jaringan *ad-hoc* seperti OMNeT++ dan ns-3. Hasil penelitian menunjukkan bahwa simulator yang digunakan mampu mendukung pengujian komunikasi V2X antara kendaraan otonom dan kendaraan yang dikemudikan langsung oleh manusia dengan pembuktian pengiriman pesan yang berhasil dilakukan seperti Gambar 7 (b). Sistem simulasi yang dikembangkan memberikan *platform* yang kuat untuk penelitian V2X [37].



Gambar 7: Demonstrasi Simulasi (a) SUMO, CARLA, NS-3 dan (b) Penerimaan Pesan Antar Kendaraan [37]

Penelitian yang dilakukan oleh Weber *et al.* (2021) membahas tentang tinjauan terbaru simulasi VANET untuk mengevaluasi performa dalam mendukung skenario dan teknologi baru. Tujuan dari penelitian ini adalah mengidentifikasi kekuatan dan kelemahan simulator dalam pemodelan teknologi jaringan terkini, seperti 5G, *edge computing*, dan keamanan. Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah tinjauan literatur melalui lebih dari 100 penelitian tentang simulator VANET. Hasil penelitian menunjukkan bahwa Veins merupakan simulator paling lengkap untuk mendukung teknologi terbaru, khususnya jaringan 5G dan protokol keamanan. Simulator Veins menggunakan OMNeT++ dan SUMO untuk memodelkan jaringan dan mobilitas. Sebagai pembandingan, dilakukan tinjauan pada simulator lain seperti Eclipse MOSEK dan EstiNet. Namun, kedua simulator tersebut kurang mendukung aspek keamanan secara penuh [39].

Simulasi teknologi pengemudian jarak jauh secara *real-time* dikaji pada penelitian Cislighi *et al.* (2021). Penelitian ini membahas tentang pengembangan kerangka simulasi yang canggih untuk ToD (*Tele-Operated Driving*) dalam berbagai konfigurasi jaringan dan aplikasi. Kerangka simulasi yang digunakan adalah CARLA dan OMNeT++. Penggabungan kedua simulator memungkinkan untuk dilakukan konfigurasi pada berbagai parameter jaringan dan aplikasi, seperti kualitas video dan kondisi lalu lintas. Simulasi dilakukan dengan membandingkan lintasan kendaraan yang dikendalikan dari jarak jauh dengan lintasan dasar yang dikendalikan oleh pengemudi secara langsung dalam simulasi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kerangka simulasi yang dikembangkan

mampu digunakan untuk mengeksplorasi berbagai konfigurasi jaringan dan aplikasi untuk ToD [45].

Pengembangan algoritma *routing* yang lebih efisien pada komunikasi antar kendaraan dikaji oleh Mohammed *et al.* (2023). Penelitian ini mengembangkan algoritma E-AODV (*Enhanced Ad-hoc On-demand Distance Vector*) dengan tujuan memastikan kualitas layanan komunikasi yang baik. Algoritma ini mampu mempertimbangkan beberapa parameter, seperti jarak ke tujuan dan SNR (*Signal to Noise Ratio*). Pengembangan algoritma E-AODV diharapkan mampu mengoptimalkan penemuan rute global, kepadatan rute, dan jumlah minimum persimpangan. Penelitian dilakukan dalam bentuk simulasi menggunakan NS-3 dan SUMO dengan parameter uji berupa rasio pengiriman paket, latensi paket *end-to-end*, dan *throughput*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa algoritma E-AODV mampu menghasilkan koneksi jaringan yang lebih baik untuk menghadapi kondisi lalu lintas yang padat. Sehingga simulasi yang diterapkan pada penelitian mampu memberikan kontribusi penting dalam pengembangan sistem komunikasi kendaraan yang lebih andal dan efisien [46].

Huelamo *et al.* (2021) melakukan penelitian tentang pengembangan dan validasi arsitektur pengemudian otonom yang sepenuhnya otomatis. Tujuan dari penelitian ini antara lain meningkatkan keandalan, efektivitas, dan ketahanan sistem pengemudian otonom. Penelitian menggunakan pendekatan berbasis simulasi dengan CARLA simulator. Arsitektur yang dibangun terdiri dari beberapa modul yang berfungsi secara asinkron dan berkomunikasi menggunakan ROS (*Robot Operating System*). Dalam penelitian juga menerapkan pemodelan perilaku pengemudian yang memungkinkan suatu pengelolaan keadaan dan transisi yang lebih kompleks menggunakan HIBPN (*Hierarchical Interpreted Binary Petri Nets*) untuk menerapkan skenario deteksi kendaraan dan *pedestrian crossing* seperti yang terlihat pada Gambar 8. Hasil penelitian menunjukkan arsitektur yang dibangun mampu menangani berbagai skenario berkendara. Simulasi yang dilakukan pada CARLA menunjukkan performa yang baik dalam mengelola suatu interaksi antar pengguna dan jalan dalam situasi lalu lintas dinamis [47].



Gambar 8: Proyeksi Skenario Deteksi Kendaraan dan *Pedestrian Crossing* pada CARLA [47]

Pemodelan simulasi pada lokasi persimpangan jalan dikaji oleh Moreno *et al.* (2022). Penelitiannya berfokus pada pengembangan algoritma *deep learning* untuk pengambilan keputusan yang lebih adaptif dan andal. Dalam penelitian ini dikembangkan metode berbasis *Deep Reinforcement Learning* (DRL) untuk menangani skenario persimpangan jalan yang kompleks. Metode dirancang untuk dapat mengambil keputusan aman dan efisien dengan memahami perilaku kendaraan lain di sekitarnya. Pelatihan dan pengujian dilakukan dengan simulator SUMO dan CARLA. SUMO digunakan untuk melatih model awal secara cepat, sedangkan CARLA digunakan untuk melatih model dalam kondisi yang lebih realistis dengan mempertimbangkan dinamika kendaraan. Hasil penelitian menyatakan bahwa metode RL yang digunakan menunjukkan performa yang sangat baik pada simulator SUMO dengan tingkat keberhasilan mencapai 100%, sedangkan adaptasi pada simulator CARLA memiliki tingkat keberhasilan 78% karena adanya tantangan berupa dinamika kendaraan [30].

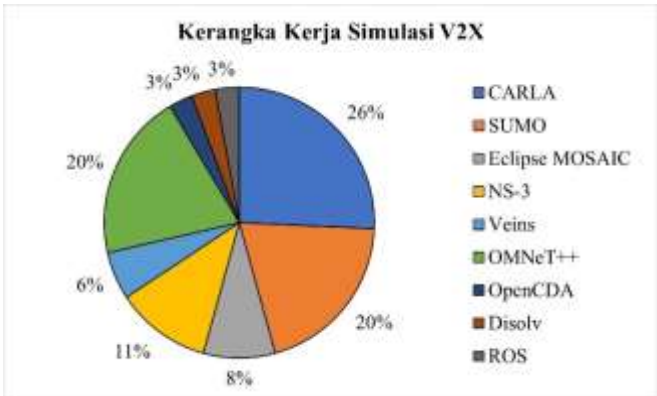
Pemodelan simulasi secara sistematis untuk interaksi OBU dan RSU dikaji oleh Vladyko *et al.* (2024). Penelitiannya membahas tentang penggunaan model matematis berupa *Python* dan *Godot Engine* untuk pengolahan data, prediksi parameter sistem, dan proses simulasi. Simulasi V2X dilakukan melalui data realistis dari *OpenStreetMap* (OSM). *Python* digunakan untuk pengolahan data dan analisis awal dalam pemanfaatan OSM. Sedangkan *Godot Engine* digunakan untuk mensimulasikan jaringan dan interaksi kendaraan dalam komunikasi V2X secara *real-time*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pendekatan yang digunakan mampu memberikan efisiensi sistem, mengurangi *packet loss*, meningkatkan fleksibilitas sistem, dan stabilitas sistem [48].

Pembuatan skenario lalu lintas dalam simulasi mobilitas perkotaan diteliti oleh Li *et al.* (2024). Dalam penelitiannya membahas tentang penggunaan simulator SUMO untuk merancang dan mengotomatiskan skenario lalu lintas dengan LLM (*Large Language Model*) melalui ChatSUMO. ChatSUMO memungkinkan *user* untuk memodifikasi dan menganalisis skenario lalu lintas secara *real-time* dengan kemampuan pemrosesan secara alami. Pengujian dilakukan untuk mengevaluasi simulator dalam mengatur jenis kendaraan, deteksi emisi CO₂, dan konsumsi energi listrik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa ChatSUMO memiliki *interface* yang intuitif, sehingga dapat meningkatkan pengalaman pengguna dalam simulasi dan mampu menghasilkan simulasi lalu lintas yang kompleks [49].

Perbandingan teknologi komunikasi 4G LTE dan 5G NR dalam konteks V2X dibahas oleh Lazar and Caruntu (2023) menggunakan simulator Simu5G yang berbasis OMNeT++. Kendaraan disimulasikan pada lingkungan perkotaan untuk mengevaluasi kinerja 4G LTE dan 5G NR. Penelitian tersebut menguji beberapa parameter seperti SINR, latensi, *frame loss rate*, dan *jitter*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa teknologi 5G NR lebih baik dibandingkan dengan 4G LTE dalam mendukung komunikasi V2X dengan kecepatan tinggi, latensi lebih rendah, dan keandalan yang lebih baik [50].

Dosovitskiy *et al.* (2017) melakukan pengujian komunikasi V2X pada lingkungan perkotaan dengan berbagai objek sekitar, seperti bangunan, pejalan kaki, infrastruktur jalan, dan rambu lalu lintas menggunakan CARLA simulator. Pengujian penelitian dilakukan dengan tiga metode, yaitu MP (*Modular Pipeline*), IL (*Imitation Learning*), dan RL (*Reinforcement Learning*). Kendaraan otonom diujikan pada lingkungan perkotaan dengan kondisi cuaca dan mengemudi yang beragam. Hasil pengujian menunjukkan kendaraan otonom memiliki tantangan pada adaptasi dengan kondisi yang bervariasi dan kompleks. Pada lingkungan perkotaan yang padat, dua metode terbaik yaitu MP dan IL hanya mampu mencapai tingkat keberhasilan di angka 45% [29]. Pengujian dengan simulator CARLA menunjukkan performa yang baik untuk sistem pengemudian otonom. Beberapa hal yang menjadi keunggulan CARLA dalam penelitian tersebut antara lain fleksibilitas dan realisme, sifat *open-source*, pengujian berbasis skenario, dan dukungan untuk berbagai pendekatan.

Berdasarkan hasil tinjauan literatur, masing-masing penelitian menggunakan kerangka kerja simulasi V2X yang berbeda-beda seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9. Dalam golongan kerangka kerja simulasi lalu lintas, CARLA menjadi perangkat lunak yang paling banyak digunakan dibandingkan SUMO dan Disolv. CARLA memiliki persentase penggunaan sebesar 26%, SUMO memiliki persentase sebesar 20%, dan Disolv memiliki persentase sebesar 3%. Hasil analisis terhadap *paper* yang ditinjau menunjukkan kelebihan dan kekurangan masing-masing perangkat lunak simulasi lalu lintas, sebagaimana dirangkum pada Tabel II.



Gambar 9: Kerangka Kerja Simulasi V2X

TABEL II
KELEBIHAN DAN KEKURANGAN PERANGKAT LUNAK SIMULASI LALU LINTAS

Traffic Simulation	Kelebihan	Kekurangan	Rekomendasi Penggunaan
CARLA	Simulasi realistis dan integrasi berbagai sensor.	Penurunan performa dalam simulasi skala besar.	Simulasi kendaraan otonom berbasis sensor.
SUMO	Skalabilitas tinggi dan integrasi lintas domain.	Visualisasi terbatas dan kurang realistis.	Simulasi lalu lintas skala besar.
Disolv	Efisiensi tinggi dan	Visualisasi tidak optimal.	Pengujian algoritma

	fokus interaksi kendaraan.		kendaraan otonom skala besar.
--	----------------------------	--	-------------------------------

Dalam kerangka kerja simulasi jaringan, OMNeT++ menjadi perangkat lunak yang lebih banyak digunakan dibandingkan NS-3. Persentase penggunaan OMNeT++ adalah 20%, sedangkan NS-3 adalah 11%. Berdasarkan hasil analisis dari *paper* yang ditinjau, Tabel III menyajikan kelebihan dan kekurangan dari setiap perangkat lunak simulasi jaringan yang digunakan.

TABEL III
KELEBIHAN DAN KEKURANGAN PERANGKAT LUNAK SIMULASI JARINGAN

Network Simulation	Kelebihan	Kekurangan	Rekomendasi Penggunaan
OMNeT++	Modular dan fleksibel.	Kurang efisien untuk simulasi skala besar.	Simulasi seluruh kerangka kerja.
NS-3	Efisiensi dan performa tinggi.	Proses integrasi lebih kompleks.	Simulasi jaringan skala besar.

Berikutnya terdapat simulator Eclipse MOSAIC sebagai V2X *communication middleware* yang lebih banyak digunakan dibandingkan dengan Veins, OpenCDA, dan ROS. Persentase penggunaan Eclipse MOSAIC adalah 8%, Veins sebesar 6%, OpenCDA dan ROS sebesar 3%. Tabel IV merangkum kelebihan dan kekurangan V2X *communication middleware* berdasarkan hasil analisis *paper* yang ditinjau.

TABEL IV
KELEBIHAN DAN KEKURANGAN V2X COMMUNICATION MIDDLEWARE

Middleware	Kelebihan	Kekurangan	Rekomendasi Penggunaan
Eclipse MOSAIC	Integrasi kerangka kerja dan fleksibilitas tinggi.	Kompleksitas tinggi.	Skenario kerangka kerja kompleks.
Veins	Fleksibilitas tinggi dan integrasi kuat.	Bergantung dengan simulator eksternal.	Simulasi V2X berbasis jaringan dan lalu lintas.
OpenCDA	Fleksibilitas dan skalabilitas tinggi.	Keterbatasan integrasi.	Pengembangan algoritma kendaraan otonom.
ROS	Ekosistem luas untuk sistem <i>real-time</i> .	Tidak dirancang khusus untuk V2X.	Pengembangan sistem <i>real-time</i> dan simulasi otonom berbasis sensor

B. Teknologi Komunikasi V2X

V2X memungkinkan kendaraan untuk berkomunikasi dengan kendaraan lainnya dan infrastruktur di jalan. Konsep ini mampu menyediakan informasi secara *real-time* tentang kondisi lalu lintas dan potensi berbahaya di jalan. Terdapat dua jenis komunikasi pada konsep V2X, yaitu *short-range* dan *long range* [51]. Pada komunikasi *short-range*, pertukaran informasi dilakukan secara langsung antara node V2X dalam spektrum yang dialokasikan. Protokol komunikasi yang digunakan adalah IEEE 802.11p dan C-V2X *Sidelink* dengan jangkauan beberapa ratus meter. Teknologi ini bekerja pada pita frekuensi ITS 5,9 Ghz yang menyediakan komunikasi dengan latensi rendah.

Komunikasi *long-range* menggunakan jaringan seluler seperti 4G dan 5G untuk melakukan komunikasi antara kendaraan dan infrastruktur dalam jarak yang lebih jauh. V2X *long-range* dirancang untuk menyediakan layanan yang lebih luas, seperti transfer dan *streaming* data dengan kecepatan tinggi, hiburan, navigasi, dan manajemen kendaraan jarak jauh. Komunikasi V2X *long-range* mampu memberikan informasi lalu lintas secara *real-time* seperti kondisi kemacetan dan penutupan jalan pada area yang lebih luas dari komunikasi *short-range*. Implementasi komunikasi *long-range* membutuhkan jaringan seluler yang andal dan kuat.

Penelitian yang dilakukan oleh Xu *et al.* (2022) membahas tentang penggunaan teknologi 5G-V2X untuk mengembangkan sistem persepsi jalan yang kompleks dan *real-time*. Penelitian ini menggabungkan konsep CNN (*Convolutional Neural Network*) dan teknologi 5G untuk meningkatkan kecepatan deteksi dan akurasi garis jalur. Konsep CNN digunakan untuk mendeteksi dan mengekstrak titik fitur dari gambar jalan. Kemudian, titik fitur dikelompokkan menggunakan metode klustering untuk mengurangi gangguan antara garis jalur yang berbeda. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode yang digunakan mampu mengatasi kesalahan deteksi pada lingkungan berkendara yang kompleks dan secara efektif dapat mengidentifikasi informasi garis jalur dalam berbagai kondisi. Integrasi 5G-V2X pada penelitian ini dianggap mampu mendukung pengembangan sistem transportasi yang lebih aman dan efisien [52].

Penggunaan teknologi komunikasi *short-range* dan *long-range* pada komunikasi V2P dibahas pada penelitian Malik *et al.* (2020). Penelitian ini mengkaji tentang arsitektur dan aplikasi komunikasi V2P. Dalam V2P terdapat beberapa elemen komunikasi, yaitu OBU, perangkat pejalan kaki, RSU, dan manajemen lalu lintas. Perangkat yang digunakan pada masing-masing elemen komunikasi menggunakan teknologi komunikasi seperti jaringan seluler, WiFi, WiMAX, dan *bluetooth*. Kombinasi teknologi komunikasi ini bertujuan untuk meningkatkan keselamatan dan efisiensi lalu lintas melalui pertukaran informasi yang dilakukan secara *real-time* antara kendaraan dan pejalan kaki [53].

Penelitian oleh Jang (2022) membahas tentang implementasi komunikasi V2X dengan jaringan seluler 5G. Penelitian berfokus pada analisis jaringan 5G untuk menciptakan latensi yang lebih rendah dan kecepatan yang



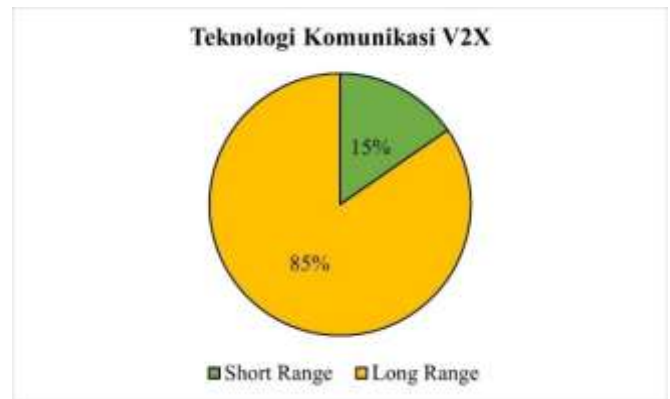
lebih tinggi dibandingkan dengan teknologi sebelumnya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa implementasi komunikasi V2X dengan jaringan seluler menawarkan latensi yang sangat rendah dan lebih andal. Hal tersebut memungkinkan untuk penerapan pada berbagai aplikasi, seperti komunikasi antar kendaraan (V2V), kendaraan dengan infrastruktur (V2I), dan kendaraan dengan pejalan kaki (V2P) [54].

Penerapan komunikasi V2X dengan teknologi komunikasi seluler juga dikaji oleh Hasegawa and Okamoto (2023). Penelitiannya berfokus pada pembahasan pentingnya pemberitahuan *Quality of Service* (QoS) untuk optimalisasi pengiriman data pada kendaraan otonom. C-V2X (*Cellular Vehicle-to-Everything*) yang merupakan bagian dari teknologi 5G memberikan keunggulan dalam hal keandalan dan latensi rendah untuk aplikasi kendaraan otonom. Dalam penelitian ini juga dibahas tentang penggunaan *In-Advance Quality of Service Notification* (IQN) yang memungkinkan suatu stasiun basis untuk memprediksi kualitas layanan dan memberikan informasi tersebut kepada kendaraan [55].

Mannoni *et al.* (2019) meneliti perbandingan dua standar komunikasi V2X, yaitu ITS-G5 yang berbasis IEEE 802.11p dan C-V2X (*Cellular Vehicle-to-Everything*) yang berbasis 3GPP. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan kinerja kedua standar komunikasi dalam hal efisiensi *physical layer* dan kinerja *MAC layer*. *Physical layer* berperan dalam pengukuran *packet error rate*, *throughput*, dan jangkauan. Sedangkan *MAC layer* berperan dalam mengukur kemampuan pengendalian kemacetan, latensi, dan kinerja kondisi jaringan padat. Hasil penelitian menunjukkan bahwa C-V2X memiliki tingkat fleksibilitas yang lebih tinggi dalam kondisi kepadatan yang rendah. Sedangkan ITS-G5 memiliki performa yang lebih stabil dalam kondisi jaringan yang padat dan memiliki latensi lebih rendah pada jarak pendek [56].

Garcia *et al.* (2021) meneliti tentang penggunaan standar 5G NR (*New Radio*) pada komunikasi V2X dalam berbagai mode komunikasi. Penelitian bertujuan untuk mengkaji teknologi 5G dalam pemenuhan peningkatan fungsionalitas dan efisiensi komunikasi kendaraan. Standar yang dirancang diharapkan mampu melengkapi kemampuan LTE V2X dalam mendukung berbagai pengembangan dan penggunaan yang lebih *advance* untuk kendaraan otonom. Hasil penelitian menunjukkan bahwa teknologi 5G NR V2X dapat memberikan peningkatan signifikan dalam komunikasi antar kendaraan, mengurangi latensi, dan meningkatkan keandalan sistem [57].

Berdasarkan tinjauan *literature*, hasil *mapping* penggunaan teknologi komunikasi V2X dapat diperhatikan pada Gambar 10 dan Tabel V berikut.



Gambar 10: Penggunaan Teknologi Komunikasi V2X

TABEL V
PENERAPAN TEKNOLOGI KOMUNIKASI V2X

Jenis Teknologi Komunikasi	Penelitian
Short Range (IEEE 802.11p)	[53], [56]
Long Range (4G dan 5G)	[34], [29], [43], [45], [48], [52], [53], [52], [55], [56], [57],

Dari hasil *mapping* penggunaan teknologi komunikasi V2X pada Gambar 10 dan Tabel V, dapat diperhatikan bahwa teknologi komunikasi yang lebih banyak digunakan adalah *long range* (5G). Sejumlah 85% dari keseluruhan *paper* membahas tentang penggunaan teknologi komunikasi *long range*, sedangkan 15% membahas teknologi *short range*. Penggunaan teknologi 5G untuk komunikasi V2X memberikan beberapa keunggulan sebagai berikut.

1. Latensi Rendah

Latensi komunikasi dengan teknologi 5G tergolong rendah hingga 1 ms. Hal ini signifikan untuk proses komunikasi *real-time* seperti proses pengereman otomatis dan deteksi kemacetan lalu lintas. Dengan adanya latensi yang rendah, maka kendaraan mampu merespons situasi darurat dengan cepat untuk meningkatkan keselamatan di jalan raya.

2. Data Rate Tinggi

Kecepatan pengiriman data pada teknologi 5G yang mencapai 10 Gbps dapat digunakan untuk proses transmisi data dengan kapasitas yang besar seperti peta navigasi, *streaming* video, dan pertukaran informasi sensor.

3. Kapasitas Jaringan yang Besar

Teknologi 5G memiliki kapasitas jaringan yang besar, sehingga dapat digunakan oleh banyak kendaraan untuk melakukan proses komunikasi dan pertukaran data sensor.

C. Skenario Pengujian

Pengujian bertujuan untuk memastikan suatu simulasi berjalan sesuai dengan skenario yang diinginkan. Dalam konsep V2X, skenario pengujian berhubungan dengan pemodelan lingkungan dan kendaraan yang digunakan. Hasil *mapping* variasi pemodelan lingkungan simulasi dalam skenario pengujian komunikasi V2X pada masing-masing *paper* dapat diperhatikan pada Tabel VI berikut.

TABEL VI
VARIASI PEMODELAN SKENARIO PENGUJIAN

Skenario Pengujian	Penelitian
Lingkungan Perkotaan	[49], [50], [31], [38], [12], [29], [45]
Persimpangan	[50], [30]

Lingkungan Dinamis	[41], [44], [40], [39], [38]
Pengemudian Otonom	[37], [43], [48], [47], [46], [42]
Variasi Kondisi Jalan	[42]

Berdasarkan hasil tinjauan literatur, pengujian komunikasi V2X mayoritas dilakukan pada lingkungan perkotaan sesuai Gambar 11. Lalu lintas padat pada lingkungan perkotaan memungkinkan untuk memastikan kinerja simulator dalam menguji coba kondisi kepadatan lalu lintas secara realistis. Pengujian kendaraan pada kondisi lingkungan padat yang menggambarkan sebuah kondisi kemacetan dapat memberikan gambaran yang cukup jelas mengenai tantangan dan peluang diterapkan teknologi komunikasi V2X untuk mengatasi permasalahan tersebut pada jalan raya. Selain itu, performa pengiriman informasi dari sistem komunikasi yang diterapkan juga dapat diujikan dengan akurat dan jelas untuk dapat menerapkan sistem informasi *real-time*.



Gambar 11: Variasi Skenario Pengujian

D. Pertukaran Informasi V2X

V2X memungkinkan kendaraan untuk berkomunikasi dengan elemen lain di sekitarnya, seperti kendaraan lain (V2V), infrastruktur jalan (V2I), pejalan kaki (V2P), dan jaringan (V2N). V2V memungkinkan kendaraan untuk saling berkomunikasi satu sama lain secara *real-time* tentang lalu lintas, cuaca, dan kondisi lainnya [58]. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Ameen *et al.* (2019), informasi yang dapat ditransmisikan antar kendaraan adalah lokasi, arah, kecepatan, dimensi kendaraan, jenis kendaraan, dan akselerasi kendaraan [59]. Informasi yang saling ditransmisikan oleh kendaraan mampu mengurangi kemacetan, meningkatkan keselamatan di jalan raya, dan optimalisasi rute perjalanan.

V2I memungkinkan kendaraan untuk berkomunikasi dengan infrastruktur jalan, seperti marka jalur, rambu jalan, dan lampu lalu lintas [60]. Berdasarkan kajian Gupta *et al.* (2020), V2I memungkinkan sebuah RSU untuk mengirimkan informasi tentang ketinggian jembatan, penggabungan lalu lintas, peringatan zona kerja, dan deteksi bahaya di jalan untuk kendaraan yang melintas [61]. Pertukaran informasi yang dilakukan antara kendaraan dan infrastruktur jalan memberikan banyak manfaat, seperti keamanan, efisiensi, dan lingkungan. Dalam hal keamanan V2I berperan untuk memberikan

peringatan dini tentang potensi bahaya di jalan, sehingga peristiwa kecelakaan dapat dicegah dan dihindari.

V2P memungkinkan kendaraan untuk berkomunikasi dengan pejalan kaki. Terdapat dua jenis komunikasi yang dapat dilakukan oleh kendaraan dan pejalan kaki, yaitu *directly communication* menggunakan teknologi komunikasi *ad-hoc* seperti IEEE 802.11p dan *indirectly communication* menggunakan infrastruktur komunikasi seperti teknologi seluler [53]. Sistem V2P dapat melakukan proses deteksi posisi pejalan kaki, pelacakan dan prediksi lintasan, serta pergerakan dan perilaku pejalan kaki. Berdasarkan kajian oleh Merdrignac *et al.* (2016), komunikasi V2P dapat melakukan pertukaran data terkait posisi, kecepatan, dan arah kendaraan [62]. Informasi tersebut dapat mengurangi risiko kecelakaan antara kendaraan dan pejalan kaki, meningkatkan kewaspadaan bagi pejalan kaki, serta memberikan bantuan kepada pejalan kaki yang memiliki keterbatasan penglihatan atau pendengaran.

V2N adalah teknologi yang memungkinkan kendaraan untuk terhubung secara langsung ke jaringan internet. Melalui koneksi dengan internet, kendaraan dapat mengirim dan menerima data secara *real-time*. V2N dapat diimplementasikan dengan jaringan seluler atau teknologi nirkabel lainnya untuk terhubung ke internet [63]. Implementasi V2N menggunakan teknologi 5G NR dapat mengurangi latensi dan menciptakan sistem yang lebih andal [54]. Informasi yang ditransmisikan berupa lokasi, kecepatan, arah, status kendaraan, data sensor, dan data pengemudi. Berbagai informasi yang ditukarkan pada komunikasi V2N memberikan proses navigasi yang lebih cerdas, meningkatkan keamanan, dan efisiensi dalam berkendara.

E. Pemodelan Kendaraan

Dalam simulasi komunikasi V2X, kendaraan dapat melakukan interaksi dengan berbagai elemen sekitar dalam mode otonom atau manual. Penggunaan kendaraan dalam mode otonom dapat memberikan kemudahan dalam proses simulasi, karena kendaraan sudah terintegrasi dengan berbagai sensor untuk mendeteksi berbagai objek dan mengambil keputusan. Hasil tinjauan literatur menunjukkan bahwa pemodelan kendaraan pada komunikasi V2X melibatkan penggunaan beberapa sensor seperti LIDAR, kamera RGB, GNSS, radar, dan IMU.

LIDAR memanfaatkan peta 3D yang presisi untuk mendeteksi objek seperti kendaraan, pejalan kaki, dan rintangan untuk menghindari tabrakan. Kamera RGB memungkinkan identifikasi visual seperti membaca rambu lalu lintas, marka jalan, lampu lalu lintas, dan mendukung analisis berbasis algoritma visi komputer. Radar mendeteksi objek dan kecepatan dengan andal, terutama dalam kondisi cuaca buruk atau visibilitas rendah, sehingga memastikan komunikasi dan keselamatan kendaraan lebih efektif. GNSS (*Global Navigation Satellite System*) memberikan data lokasi dan waktu secara akurat, mendukung navigasi rute, sinkronisasi waktu, dan komunikasi berbasis lokasi seperti *cooperative awareness* dalam V2X. Selain itu, IMU (*Inertial Measurement Unit*)



memberikan data tentang percepatan, kecepatan sudut, dan orientasi kendaraan. Kombinasi beberapa sensor tersebut dapat memberikan hasil simulasi V2X yang lebih realistis, aman, dan relevan dalam pengembangan ITS.

F. Perkembangan Penelitian

Berdasarkan hasil tinjauan literatur, dari perjalanan waktu penelitian menunjukkan adanya urutan perkembangan topik dan kompleksitas pembahasan seperti yang terlihat pada Gambar 12. Pertama dimulai dengan pengenalan beberapa *software* simulasi *open-source* yang dapat digunakan untuk melakukan simulasi V2X. Kemudian, kedua dilanjutkan dengan analisis tantangan dan perkembangan algoritma dalam komunikasi V2X untuk memberikan variasi hasil simulasi pada berbagai skenario lalu lintas. Ketiga, dilanjutkan dengan adanya pembaharuan yang signifikan dalam kolaborasi *software* simulasi dan pengujian berupa parameter yang relevan untuk menunjang keberhasilan komunikasi V2X. Keempat, dilakukan penelitian tentang kemajuan integrasi teknologi beserta perkembangan *framework* simulasi yang mampu menciptakan lingkungan simulasi lebih realistis dan kompleks. Kelima, terdapat perkembangan penelitian ke arah metode simulasi skala besar untuk mendukung ITS dan AV (*Autonomous Vehicle*).



Gambar 12: Perkembangan Topik Penelitian dari Tahun 2017 – 2024

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil tinjauan literatur, masing-masing penelitian menggunakan kerangka kerja simulasi V2X yang berbeda sesuai dengan skenario pengujian yang diinginkan. *Traffic simulation* yang paling banyak digunakan adalah CARLA. CARLA memiliki kelebihan pada visualisasi realistis dan dukungan sensor yang lengkap. Namun, membutuhkan *hardware* dengan spesifikasi tinggi untuk menjalankan simulasi dengan performa optimal, sehingga CARLA tidak cocok digunakan untuk simulasi dalam skenario skala besar. Di sisi lain, SUMO memiliki skalabilitas yang lebih tinggi dan mudah diintegrasikan sebagai simulasi lalu lintas komunikasi V2X. SUMO tidak memerlukan *hardware* dengan spesifikasi yang tinggi karena simulasi berbasis 2D, sehingga ideal untuk simulasi skala besar yang melibatkan banyak kendaraan. Namun, keterbatasan dukungan sensor menjadi kekurangan SUMO untuk pengembangan algoritma kendaraan otonom.

Dalam kerangka kerja *network simulation*, OMNeT++ menjadi simulator jaringan yang paling banyak digunakan.

OMNeT++ mudah diintegrasikan dengan *framework* lain, sehingga memungkinkan pengembangan, pengujian, dan simulasi skenario kompleks secara fleksibel. Namun, OMNeT++ kurang efisien dalam simulasi skala besar dengan jumlah *node* yang sangat banyak. Sebagai penghubung antara *traffic simulation* dengan *network simulation (middleware)*, Eclipse MOSAIC menjadi simulator yang paling banyak digunakan karena memiliki fleksibilitas yang tinggi. Simulator ini dapat digunakan untuk skenario multi-domain yang besar. Namun, simulator ini memiliki kompleksitas yang tinggi dan bergantung pada simulator eksternal yang menambah kerumitan konfigurasi.

Berdasarkan hasil tinjauan literatur, 5G merupakan teknologi yang paling dominan digunakan dalam simulasi komunikasi V2X. Penggunaan teknologi 5G dilatarbelakangi oleh penyesuaian dengan perkembangan teknologi saat ini dan kebutuhan skenario pengujian. Mayoritas penelitian melakukan simulasi kendaraan otonom dalam lingkungan lalu lintas perkotaan yang realistis, sehingga memerlukan dukungan komunikasi dalam jaringan kompleks menggunakan teknologi 5G. Skenario simulasi pada masing-masing penelitian lebih banyak menggunakan lingkungan perkotaan karena berbagai permasalahan lalu lintas, seperti kemacetan dan kecelakaan lalu lintas sering terjadi pada daerah perkotaan dengan lalu lintas padat. Sebagai kesimpulan akhir, telaah kami memperlihatkan peluang pemanfaatan simulasi V2X yang besar untuk memberikan gambaran awal penerapan berbagai skenario pada lingkungan lalu lintas yang beragam.

REFERENSI

- [1] N. Raju and H. Farah, 'Evolution of Traffic Microsimulation and Its Use for Modeling Connected and Automated Vehicles', *J Adv Transp*, vol. 2021, pp. 1–29, Sep. 2021, doi: [10.1155/2021/2444363](https://doi.org/10.1155/2021/2444363).
- [2] A. Rahman H, 'Pemborosan BBM Dampak Macet di Indonesia Capai 2,2 Juta Liter per Hari', Feb. 2023.
- [3] M. M. Saad, M. T. R. Khan, S. H. A. Shah, and D. Kim, 'Advancements in Vehicular Communication Technologies: C-V2X and NR-V2X Comparison', *IEEE Communications Magazine*, vol. 59, no. 8, pp. 107–113, Aug. 2021, doi: [10.1109/MCOM.101.2100119](https://doi.org/10.1109/MCOM.101.2100119).
- [4] K. C. Dey, A. Rayamajhi, M. Chowdhury, P. Bhavsar, and J. Martin, 'Vehicle-to-Vehicle (V2V) and Vehicle-to-Infrastructure (V2I) Communication in a Heterogeneous Wireless Network-Performance Evaluation', *Transp Res Part C Emerg Technol*, vol. 68, pp. 168–184, Jul. 2016, doi: [10.1016/j.trc.2016.03.00](https://doi.org/10.1016/j.trc.2016.03.00).
- [5] N. I. Er, K. D. Singh, C. Couturier, and J. M. Bonnin, 'Towards a simple and efficient vehicular delay tolerant networks routing protocol for data collection in smart cities', *Telkomnika (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, vol. 22, no. 1, pp. 65–75, 2024, doi: [10.12928/telkomnika.v22i1.24801](https://doi.org/10.12928/telkomnika.v22i1.24801).
- [6] N. H. Hussein, C. T. Yaw, S. P. Koh, S. K. Tiong, and K. H. Chong, 'A Comprehensive Survey on Vehicular Networking: Communications, Applications, Challenges, and Upcoming Research Directions', *IEEE Access*, vol. 10, pp. 86127–86180, Aug. 2022, doi: [10.1109/ACCESS.2022.3198656](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3198656).
- [7] S. Küfeoğlu, *Emerging Technologies Value Creation for Sustainable Development*. Springer, 2022. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-031-07127-0>.
- [8] T. Huang et al., 'V2X Cooperative Perception for Autonomous Driving: Recent Advances and Challenges', Oct. 2023, [Online]. Available: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2310.03525>.
- [9] A. Alnasser, H. Sun, and J. Jiang, 'Cyber Security Challenges and Solutions for V2X Communications: A Survey', vol. 151, pp. 52–67, Jan. 2019, doi: [10.1016/j.comnet.2018.12.018](https://doi.org/10.1016/j.comnet.2018.12.018).

- [10] G. Liu *et al.*, 'Towards Collaborative Autonomous Driving: Simulation Platform and End-to-End System', pp. 1–22, Apr. 2024, [Online]. Available: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2404.09496>.
- [11] T. Ormándi, 'Practical Manual of SUMO/MATLAB/VEINS/INET/OMNET++ Programming and Interfacing for V2X Simulation with Standard Protocols', Saint Raphael, Sep. 2021. Accessed: Dec. 19, 2024. [Online]. Available: <https://kjit.bme.hu>
- [12] N. T. Tangirala, C. Sommer, and A. Knoll, 'Simulating Data Flows of Very Large Scale Intelligent Transportation Systems', in *ACM International Conference Proceeding Series*, Association for Computing Machinery, Jun. 2024, pp. 98–107. doi: [10.1145/3615979.3656062](https://doi.org/10.1145/3615979.3656062).
- [13] D. Naudts *et al.*, 'Vehicular Communication Management Framework: A Flexible Hybrid Connectivity Platform for CCAM Services', *Future Internet*, vol. 13, no. 81, pp. 1–17, Mar. 2021, doi: [10.3390/fi13030081](https://doi.org/10.3390/fi13030081).
- [14] S. Subiyanto, N. A. Salim, S. K. Rachmat, and M. F. Ekaputra, 'Optimization of Electric Bus Scheduling Using Genetic Algorithm: A Case Study in Public Transport of UNNES Campus Area,' *Majalah Ilmiah Teknologi Elektro*, vol. 23, no. 1, p. 9, Aug. 2024, doi: [10.24843/mite.2024.v23i01.p02](https://doi.org/10.24843/mite.2024.v23i01.p02).
- [15] C. T. Wu, S. H. Wang, and C. H. Tu, 'A Simulation Framework for Prototyping Intelligent Vehicle-to-Infrastructure Applications: A Case Study on RSU-Based Intersection Movement Assist for Connected Autonomous Vehicles', *IEEE Access*, vol. 12, pp. 82584–82598, 2024, doi: [10.1109/ACCESS.2024.3411070](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3411070).
- [16] J. Li *et al.*, 'Learning for Vehicle-to-Vehicle Cooperative Perception under Lossy Communication', *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, vol. 8, no. 4, pp. 1–9, Dec. 2023, doi: [10.1109/TIV.2023.3260040](https://doi.org/10.1109/TIV.2023.3260040).
- [17] T. Alladi, V. Chamola, N. Sahu, V. Venkatesh, A. Goyal, and M. Guizani, 'A Comprehensive Survey on the Applications of Blockchain for Securing Vehicular Networks', *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 24, no. 2, pp. 1212–1239, 2022, doi: [10.1109/COMST.2022.3160925](https://doi.org/10.1109/COMST.2022.3160925).
- [18] Pamudi, 'Penerapan Sistem Dinamik Dalam Sistem Transportasi Cerdas Untuk Mengurangi Kemacetan, Polusi Dan Meningkatkan Keselamatan Berlalu Lintas (Study Kasus Dinas Perhubungan Kota Surabaya)', 2018.
- [19] S. Masood *et al.*, 'Detecting and Preventing False Nodes and Messages in Vehicular Ad-Hoc Networking (VANET)', *IEEE Access*, vol. 11, pp. 93920–93934, Aug. 2023, doi: [10.1109/ACCESS.2023.3308035](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3308035).
- [20] M. Hasan, S. Mohan, T. Shimizu, and H. Lu, 'Securing Vehicle-to-Everything (V2X) Communication Platforms', *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, vol. 5, no. 4, pp. 693–713, Dec. 2020, doi: [10.1109/TIV.2020.2987430](https://doi.org/10.1109/TIV.2020.2987430).
- [21] V. G. Stepanyants and A. Y. Romanov, 'Influence of Realistic Perception and Surroundings on Qualitative Results in Automated and Connected Vehicle Simulation', *IEEE Access*, vol. 12, pp. 43721–43733, Mar. 2024, doi: [10.1109/ACCESS.2024.3380369](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3380369).
- [22] N. Liu, M. Liu, J. Cao, G. Chen, and W. Lou, 'When Transportation Meets Communication: V2P over VANETs', in *IEEE 30th International Conference on Distributed Computing Systems*, 2010, pp. 567–576. doi: [10.1109/icdcs.2010.83](https://doi.org/10.1109/icdcs.2010.83).
- [23] Q. Cui *et al.*, 'Vehicular Mobility Patterns and Their Applications to Internet-of-Vehicles: a Comprehensive Survey', *Science China Information Sciences*, vol. 65, no. 11, pp. 1–42, Nov. 2022, doi: [10.1007/s11432-021-3487-x](https://doi.org/10.1007/s11432-021-3487-x).
- [24] A. P. Garcia, M. A. L. Carmona, and P. M. Redondo, 'Optimized Design of Low Emission Zones in SUMO: A Dual Focus on Emissions Reduction and Travel Time Improvement', in *SUMO User Conference 2024*, Madrid, May 2024, pp. 1–23. doi: [10.13140/RG.2.2.17909.38883](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.17909.38883).
- [25] I. A. Aljabry and G. A. Al-Suhail, 'A Survey on Network Simulators for Vehicular Ad-hoc Networks (VANETS)', *Int J Comput Appl*, vol. 174, no. 11, pp. 1–9, Jan. 2021, doi: [10.5120/ijca2021920979](https://doi.org/10.5120/ijca2021920979).
- [26] P. Heckelmann and S. Rinderknecht, 'Influence of an Automated Vehicle with Predictive Longitudinal Control on Mixed Urban Traffic Using SUMO', *World Electric Vehicle Journal*, vol. 15, no. 10, Oct. 2024, doi: [10.3390/wevj15100448](https://doi.org/10.3390/wevj15100448).
- [27] A. Schaffland, J. Nelson, and J. Schöning, 'Simulating Traffic Networks: Driving SUMO Towards Digital Twins', in *SUMO Conference Proceedings*, TIB Open Publishing, Jul. 2024, pp. 113–125. doi: [10.52825/scp.v5i.1105](https://doi.org/10.52825/scp.v5i.1105).
- [28] A. Roosta, H. Kath, M. Barthauer, J. Erdmann, Y.-P. Flötteröd, and M. Behrisch, 'The State of Bicycle Modeling in SUMO', in *SUMO Conference Proceedings*, Germany: TIB Open Publishing, Jun. 2023, pp. 55–64. doi: [10.52825/scp.v4i.215](https://doi.org/10.52825/scp.v4i.215).
- [29] A. Dosovitskiy, G. Ros, F. Codevilla, A. López, and V. Koltun, 'CARLA: An Open Urban Driving Simulator', in *1st Conference on Robot Learning*, 2017, pp. 1–16.
- [30] R. G. Moreno, R. Barea, E. L. Guillen, J. Araluce, and L. M. Bergasa, 'Reinforcement Learning-Based Autonomous Driving at Intersections in CARLA Simulator', *Sensors*, vol. 22, no. 21, pp. 1–16, Nov. 2022, doi: [10.3390/s22218373](https://doi.org/10.3390/s22218373).
- [31] S. Malik, M. A. Khan, and H. El-Sayed, 'CARLA: Car Learning to Act - An Inside Out', in *Procedia Computer Science*, Elsevier B.V., 2022, pp. 742–749. doi: [10.1016/j.procs.2021.12.316](https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.12.316).
- [32] L. M. Marcillo, L. U. Aguiar, M. P. Paredes, and P. B. Bautista, 'Deployment of OMNET++', Jul. 17, 2018. doi: [10.20944/preprints201807.0302.v1](https://doi.org/10.20944/preprints201807.0302.v1).
- [33] G. Wang, J. Zhang, Y. Zhang, C. Liu, and Z. Chang, 'Performance Evaluation of Routing Algorithm in Satellite Self-Organizing Network on OMNeT++ Platform', *Electronics (Switzerland)*, vol. 13, no. 19, pp. 1–16, Oct. 2024, doi: [10.3390/electronics13193963](https://doi.org/10.3390/electronics13193963).
- [34] D. Irawan and R. Roestam, 'SIMULASI MODEL JARINGAN MOBILE AD-HOC (MANET) DENGAN NS-3', Nov. 2016, pp. 1–7.
- [35] S. N. Gardiner, 'V2V Simulators and Related Software', Dec. 2021. [Online]. Available: <https://github.com/V2Xgithub/WiLabV2Xsim>.
- [36] C. Sommer, 'Veins The Open Source Vehicular Network Simulation Framework', Nov. 2021.
- [37] D. Cui and Y. Shen, 'Integration of an Autonomous Driving Simulator into V2X Simulation Framework for Testing Connected Vehicles', *MOSDIM World*, no. 3946, pp. 1–11, 2023.
- [38] R. Protzmann, K. Schrab, M. Schweppenhäuser, and I. Radusch, 'Implementation of a Perception Module for Smart Mobility Applications in Eclipse MOSAIC', in *SUMO Conference Proceedings*, TIB Open Publishing, Sep. 2022, pp. 199–214. doi: [10.52825/scp.v3i.123](https://doi.org/10.52825/scp.v3i.123).
- [39] J. S. Weber, M. Neves, and T. Ferreto, 'VANET Simulators: An Updated Review', *Journal of the Brazilian Computer Society*, vol. 27, no. 8, pp. 1–31, Dec. 2021, doi: [10.1186/s13173-021-00113-x](https://doi.org/10.1186/s13173-021-00113-x).
- [40] K. Schrab *et al.*, 'Modeling an ITS Management Solution for Mixed Highway Traffic with Eclipse MOSAIC', *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 24, no. 6, pp. 6575–6585, Jun. 2023, doi: [10.1109/tits.2022.3204174](https://doi.org/10.1109/tits.2022.3204174).
- [41] S. Y. Niewerth, R. Häbel, and B. Friedrich, 'Developing a Comprehensive Large-Scale Co-Simulation for Replication of Automated Driving in Urban Traffic Scenarios', in *Transportation Research Procedia*, Elsevier B.V., 2024, pp. 522–529. doi: [10.1016/j.trpro.2024.02.065](https://doi.org/10.1016/j.trpro.2024.02.065).
- [42] M. Won and S. Kim, 'Simulation Driven Development Process Utilizing Carla Simulator for Autonomous Vehicles', in *Proceedings of the International Conference on Simulation and Modeling Methodologies, Technologies and Applications*, Science and Technology Publications, Lda, 2022, pp. 202–209. doi: [10.5220/0011139300003274](https://doi.org/10.5220/0011139300003274).
- [43] C. M. R. Carletti, C. Casetti, J. Härr, and F. Risso, 'ms-van3t-CARLA: An Open-Source Co-Simulation Framework for Cooperative Perception Evaluation', in *19th Wireless On-Demand Network Systems and Services Conference (WONS)*, Jan. 2024, pp. 93–96. doi: [10.23919/wons60642.2024.10449533](https://doi.org/10.23919/wons60642.2024.10449533).
- [44] C. Sommer *et al.*, 'Veins-The Open Source Vehicular Network Simulation Framework', *Recent Advances in Network Simulation*, pp. 215–252, 2019, doi: [10.1007/978-3-030-12842-5_6](https://doi.org/10.1007/978-3-030-12842-5_6).



- [45] V. Cislighi, C. Quadri, V. Mancuso, and M. A. Marsan, 'Simulation of Tele-Operated Driving over 5G Using CARLA and OMNeT++', in *IEEE Vehicular Networking Conference (VNC)*, Apr. 2023, pp. 81–88, doi: [10.1109/vnc57357.2023.10136340](https://doi.org/10.1109/vnc57357.2023.10136340).
- [46] M. A. Mohammed, S. M. Shareef, and K. Z. Ghafor, 'Optimized Routing Algorithm for Vehicular Ad Hoc Networks Based on NS3 Simulator', Mar. 02, 2023, doi: [10.2139/ssrn.4339951](https://doi.org/10.2139/ssrn.4339951).
- [47] C. G. Huélamo *et al.*, 'Train here, Drive There: ROS Based End-to-End Autonomous-Driving Pipeline Validation in CARLA Simulator Using the NHTSA typology', *Multimed Tools Appl*, vol. 81, no. 3, pp. 4213–4240, Jan. 2022, doi: [10.1007/s11042-021-11681-7](https://doi.org/10.1007/s11042-021-11681-7).
- [48] A. Vladyko, P. Plotnikov, and G. Tambovtsev, 'Simulation System for V2X Applications', Oct. 09, 2024, doi: [10.20944/preprints202410.0662.v1](https://doi.org/10.20944/preprints202410.0662.v1).
- [49] S. Li, T. Azfar, and R. Ke, 'ChatSUMO: Large Language Model for Automating Traffic Scenario Generation in Simulation of Urban Mobility', *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, pp. 1–12, Aug. 2024, doi: [10.1109/tiv.2024.3508471](https://doi.org/10.1109/tiv.2024.3508471).
- [50] R.-G. Lazar and C.-F. Căruntu, 'Comparative Analysis Between 4G LTE and 5G NR: An Evaluation of Cellular Communications For V2X Technology', *Bulletin of the Polytechnic Institute of Iași. Electrical Engineering, Power Engineering, Electronics Section*, vol. 69, no. 73, pp. 9–22, Mar. 2023, doi: [10.2478/bipie-2023-0001](https://doi.org/10.2478/bipie-2023-0001).
- [51] I. Khalid, V. Maglogiannis, D. Naudts, A. Shahid, and I. Moerman, 'Optimizing Hybrid V2X Communication: An Intelligent Technology Selection Algorithm Using 5G, C-V2X PC5 and DSRC', *Future Internet*, vol. 16, no. 107, pp. 1–29, Mar. 2024, doi: [10.3390/fi16040107](https://doi.org/10.3390/fi16040107).
- [52] C. Xu, H. Wu, Y. Zhang, S. Dai, H. Liu, and J. Tian, 'A Real-Time Complex Road AI Perception Based on 5G-V2X for Smart City Security', *Wirel Commun Mob Comput*, vol. 2022, pp. 1–11, Jan. 2022, doi: [10.1155/2022/4405242](https://doi.org/10.1155/2022/4405242).
- [53] R. Q. Malik, K. N. Ramli, Z. H. Kareem, M. I. Habelalmatee, A. H. Abbas, and A. Alamoodi, 'An overview on V2P communication system: Architecture and application', in *2020 3rd International Conference on Engineering Technology and its Applications, IICETA 2020*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Sep. 2020, pp. 174–178, doi: [10.1109/IICETA50496.2020.9318863](https://doi.org/10.1109/IICETA50496.2020.9318863).
- [54] W. M. Jang, 'The 5G Cellular Downlink V2X Implementation Using V2N With Spatial Modulation', *IEEE Access*, vol. 10, pp. 129105–129115, Dec. 2022, doi: [10.1109/ACCESS.2022.3226691](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3226691).
- [55] R. Hasegawa and E. Okamoto, 'Adaptive Transmission Suspension of V2N Uplink Communication Based on In-Advanced Quality of Service Notification', *Vehicles*, vol. 5, no. 1, pp. 203–222, Mar. 2023, doi: [10.3390/vehicles5010012](https://doi.org/10.3390/vehicles5010012).
- [56] V. Mannoni, V. Berg, S. Sesia, and E. Perraud, 'A Comparison of the V2X Communication Systems: ITS-G5 and C-V2X', in *IEEE 89th Vehicular Technology Conference*, Jul. 2019, p. 1, doi: [10.1109/VTCSpring.2019.8746562](https://doi.org/10.1109/VTCSpring.2019.8746562).
- [57] M. H. C. Garcia *et al.*, 'A Tutorial on 5G NR V2X Communications', *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 23, no. 3, pp. 1972–2026, Feb. 2021, doi: [10.1109/COMST.2021.3057017](https://doi.org/10.1109/COMST.2021.3057017).
- [58] K. B. Y. Bintoro, S. Permana, A. Syahputra, Yaddarabullah, and B. Arifitama, 'V2V Communication in Smart Traffic Systems: Current status, challenges and future perspectives', *Jurnal Ilmiah Sistem Informasi, Teknologi Informasi dan Sistem Komputer*, vol. 19, no. 1, pp. 21–31, May 2024, doi: [10.33998/processor.2024.19.1.1524](https://doi.org/10.33998/processor.2024.19.1.1524).
- [59] H. A. Ameen, A. K. Mahamad, S. Saon, D. M. Nor, and K. Ghazi, 'A Review on Vehicle to Vehicle Communication System Applications', *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 18, no. 1, pp. 188–198, Apr. 2020, doi: [10.11591/ijeecs.v18.i1.pp188-198](https://doi.org/10.11591/ijeecs.v18.i1.pp188-198).
- [60] P. Mutabazi, 'What is Vehicle-to-Infrastructure (V2I) Communication?', Dec. 2022.
- [61] M. Gupta, J. Benson, F. Patwa, and R. Sandhu, 'Secure V2V and V2I Communication in Intelligent Transportation using Cloudlets', *IEEE World Congress on Services*, pp. 1–12, Jan. 2020, doi: [10.1109/TSC.2020.3025993](https://doi.org/10.1109/TSC.2020.3025993).
- [62] P. Merdrignac, O. Shagdar, and F. Nashashibi, 'Fusion of Perception and V2P Communication Systems for Safety of Vulnerable Road Users', *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 18, no. 7, pp. 1740–1751, Jul. 2017, doi: [10.1109/tits.2016.2627014](https://doi.org/10.1109/tits.2016.2627014).
- [64] A. Flah and C. Mahmoudi, 'Design and analysis of a novel power management approach, applied on a connected vehicle as V2V, V2B/I, and V2N', *Int J Energy Res*, vol. 43, no. 13, pp. 6869–6889, Oct. 2019, doi: [10.1002/er.4701](https://doi.org/10.1002/er.4701).