

## **RESEARCH REPORT**

# **Analisis Perbandingan Optimasi Protokol Vehicle to Vehicle berbasis AODV Standar dan AODV Berbasis Learning Automata untuk Lalu Lintas Perkotaan dan Jalan Raya Bebas Hambatan**



**Hanna Halimatu Sadiah  
Ketut Bayu Yogha Bintoro  
Fita Sari Letsoin**

**Program Studi Teknik Informatika Fakultas  
Industri Kreatif dan Telematika  
Universitas Trilogi  
2025**

---

## 1. Pendahuluan

Komunikasi antar-kendaraan (*Vehicle-to-Vehicle/V2V*)[1] kini menjadi elemen krusial dalam upaya meningkatkan keselamatan berkendara dan efisiensi manajemen lalu lintas, seiring dengan bertambahnya kompleksitas jaringan transportasi modern. Dalam konteks *Vehicular Ad Hoc Networks* (VANETs)[2], komunikasi V2V sangat bergantung pada efektivitas protokol routing dalam menjamin pertukaran informasi yang andal antar kendaraan[3,4]. VANET sendiri ditandai dengan mobilitas tinggi, perubahan topologi yang dinamis, dan seringnya terjadi pemutusan koneksi antar kendaraan, sehingga membuat komunikasi yang andal menjadi tantangan besar [5]. Protokol routing konvensional seperti *Ad Hoc On-Demand Distance Vector* (AODV)[6] menghadapi berbagai kendala signifikan, khususnya dalam lingkungan lalu lintas yang sangat dinamis ini[7], di mana kepadatan kendaraan, kecepatan, dan pola pergerakan dapat berubah secara drastis yang diakibatkan oleh topologi jaringan yang berubah dengan cepat [8]. Tantangan ini menjadi semakin nyata dalam situasi lalu lintas padat, di mana pendekatan routing reaktif AODV justru menimbulkan overhead pesan kontrol yang tinggi [9], waktu pembentukan rute yang lambat, serta pemilihan simpul perantara yang kurang efisien—semuanya berdampak negatif terhadap *Quality of Service* (QoS) komunikasi V2V[10,11].

Berbagai upaya telah dilakukan untuk menyempurnakan kinerja AODV, termasuk melalui pendekatan berbasis *Prediction Node Trends* dan *Learning Automata* [12] dan *Mobility Detection Aware AODV* (MDA-AODV)[13]. Inovasi-inovasi ini bertujuan untuk meningkatkan efisiensi routing dengan mengoptimalkan pemilihan simpul perantara serta meminimalkan beban jaringan yang tidak perlu. Namun demikian, sebagian besar pendekatan yang ada masih berfokus pada kondisi lalu lintas perkotaan[14,15] dan belum sepenuhnya mengakomodasi karakteristik khas lalu lintas jalan bebas hambatan—seperti kecepatan kendaraan yang lebih tinggi, perubahan mobilitas yang lebih cepat, serta variasi kepadatan yang lebih ekstrem[16]. Kondisi-kondisi ini menuntut strategi routing yang lebih adaptif guna mempertahankan kinerja QoS dalam hal *Packet Delivery Ratio* (PDR), *throughput*, *delay*, dan *jitter*.

Menjawab tantangan tersebut, penelitian ini mengusulkan protokol baru yang dinamakan *Learning Automata-enhanced AODV* (LA-AODV)[17]. Protokol ini memanfaatkan data kendaraan secara waktu nyata—termasuk posisi, kecepatan, dan percepatan—untuk memprediksi serta memilih simpul perantara secara dinamis dan cerdas. Pendekatan berbasis data real-time ini memungkinkan LA-AODV beradaptasi secara responsif terhadap perubahan kondisi lalu lintas, sehingga mampu meningkatkan efisiensi komunikasi V2V[18], mengurangi kemacetan jaringan[19], serta meminimalkan kelebihan informasi[20]. Keunggulan tersebut menjadikan LA-AODV sangat menjanjikan untuk diterapkan, khususnya dalam skenario jalan raya yang menuntut kecepatan dan stabilitas komunikasi yang tinggi.

Untuk menguji kinerja LA-AODV dalam berbagai kondisi lalu lintas, studi ini melakukan simulasi menggunakan NS-3, dengan membandingkan performa QoS-nya di lingkungan perkotaan dan jalan raya. Simulasi jalan raya secara khusus dimodelkan berdasarkan kondisi lalu lintas di sekitar Bandara Internasional Soekarno-Hatta di Jakarta—sebuah simpul transportasi utama dengan kepadatan lalu lintas yang tinggi, pola pergerakan kendaraan yang kompleks, serta fluktuasi kecepatan yang signifikan. Lokasi ini juga memiliki akses langsung ke jalan tol utama dan lalu lintas kendaraan yang konstan, baik dari kendaraan penumpang maupun logistik. Hal ini menjadikannya sebagai lingkungan yang sangat representatif dan menantang untuk menguji kapabilitas adaptif protokol yang diusulkan. Hasil dari simulasi ini memiliki relevansi praktis yang tinggi, mengingat kawasan bandara dan sekitarnya merupakan wilayah strategis yang sangat membutuhkan komunikasi V2V yang andal untuk mendukung keselamatan dan efisiensi lalu lintas.

Penelitian sebelumnya [17] telah mengevaluasi kinerja protokol routing AODV dan LA-AODV pada skenario komunikasi V2V menggunakan peta kawasan UGM Roundabout, yang merepresentasikan lingkungan lalu lintas perkotaan dengan tingkat kompleksitas sedang. Studi tersebut membandingkan performa protokol dalam berbagai kondisi trafik dinamis berbasis distribusi Poisson. Dalam penelitian ini, dilakukan pengembangan lebih lanjut dengan menggunakan peta kawasan Bandara Soekarno-Hatta yang memiliki karakteristik jalan raya lebih kompleks, kepadatan kendaraan lebih tinggi, serta dinamika pergerakan yang lebih variatif. Dengan pendekatan ini, penelitian tidak hanya kembali membandingkan kinerja LA-AODV dan AODV berdasarkan parameter QoS seperti *Packet Delivery Ratio* (PDR), *Packet Loss Ratio* (PLR), *Throughput*, *End-to-End Delay*, dan *Jitter*, tetapi juga mengevaluasi efektivitas kedua protokol tersebut dalam menghadapi kondisi trafik jalan raya yang lebih menantang dibandingkan skenario perkotaan sebelumnya.

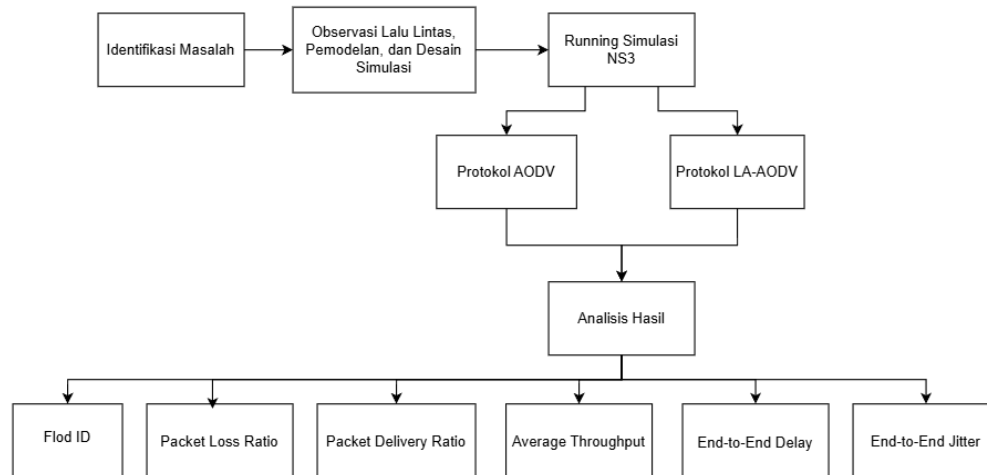
Dengan membandingkan kinerja LA-AODV terhadap AODV standar di dua skenario berbeda—perkotaan dan jalan raya—penelitian ini memberikan wawasan yang mendalam mengenai potensi peningkatan QoS melalui protokol adaptif berbasis *Learning Automata*. Temuan yang diperoleh menegaskan fleksibilitas dan ketangguhan LA-AODV dalam menghadapi dinamika lalu lintas yang kompleks, baik di kawasan padat kendaraan maupun di jalan raya berkecepatan tinggi. Analisis komparatif ini tidak hanya memperkaya pemahaman mengenai aplikasi LA-AODV dalam sistem komunikasi V2V nyata, tetapi juga memberikan keyakinan akan kapabilitas protokol ini dalam menjawab tantangan komunikasi kendaraan di masa depan.

Struktur artikel ini disusun sebagai berikut: Pendahuluan disajikan pada Bagian 1, rancangan penelitian pada Bagian 2, pendekatan yang diusulkan pada Bagian 3, serta hasil dan pembahasan perbandingan kinerja LA-AODV dan AODV pada Bagian 4. Kesimpulan penelitian dapat ditemukan pada Bagian 6.

## 2. Metodologi

---

Penelitian ini mengikuti serangkaian tahapan yang sistematis mulai dari identifikasi masalah sampai analisis hasil simulasi. Setiap tahapan dirancang untuk memastikan bahwa proses simulasi jaringan berjalan terstruktur serta menghasilkan data yang seksama, seperti yang dapat dilihat pada Gambar 1.

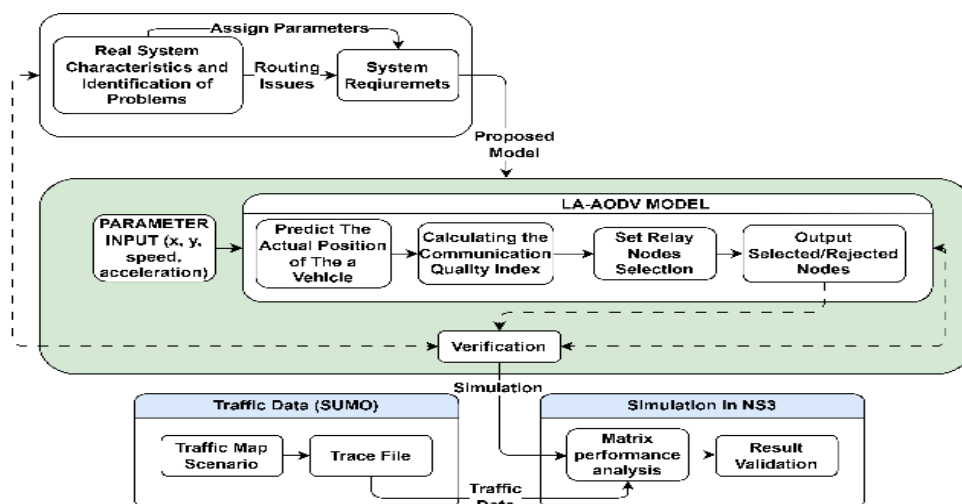


**Gambar 1.** Struktur proses dari rancangan penelitian

Dalam penelitian ini, simulasi digunakan sebagai metode utama untuk membangun dan menganalisis lingkungan komunikasi kendaraan-ke-kendaraan (V2V). Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1, lingkungan simulasi memiliki peranan penting. Sistem operasi Linux Ubuntu 20.04 dipilih sebagai platform karena stabilitas dan keandalannya dalam mendukung proses simulasi. Untuk merepresentasikan pergerakan kendaraan secara realistis dalam berbagai skenario lalu lintas, maka menggunakan SUMO-GUI, sementara aspek komunikasi jaringannya dimodelkan menggunakan NS3 versi 3.35. Integrasi antara SUMO dan NS3 memungkinkan sinkronisasi antara dinamika lalu lintas dan komunikasi jaringan, sehingga tercipta lingkungan simulasi yang realistis dan terkontrol.

Penelitian dimulai dengan mengidentifikasi masalah untuk memahami dan merumuskan masalah jaringan. Selain itu, pengamatan lalu lintas, pemodelan, dan desain simulasi dilakukan untuk menggambarkan kondisi aktual dari versi format yang dapat diuji. Simulasi NS3 dijalankan untuk menguji dua protokol yaitu AODV dan la-AODV. Hasil simulasi dianalisis untuk membandingkan kinerja kedua protokol berdasarkan parameter seperti delay, throughput, PDR, dan routing overhead.

Metode penelitian ini melibatkan evaluasi sistematis terhadap protokol perutean dalam jaringan kendaraan dinamis guna meningkatkan efisiensi komunikasi, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.



**Gambar 2.** Struktur Proses Model LA-AODV dan Desain Simulasi

Gambar 2 mengilustrasikan prosedur langkah demi langkah dari proses modifikasi tersebut, yang dimulai dengan observasi visual untuk mengenali karakteristik khusus dan memahami aturan operasional dari sistem nyata. Setelah kebutuhan sistem ditentukan, dilakukan perancangan model dan simulasi. Model yang telah dirancang kemudian diuji dengan menggunakan data lalu lintas dunia nyata untuk memverifikasi kecocokannya dengan sistem asli. Berbagai parameter simulasi seperti jumlah node, durasi simulasi, pemilihan rute, kecepatan dan pergerakan node, peta jaringan, jenis protokol, lalu lintas, serta metrik kualitas layanan (QoS) dianalisis secara mendalam. Tahap terakhir adalah validasi hasil untuk memastikan bahwa model secara akurat merepresentasikan sistem yang sebenarnya. Dalam skema ini, node sumber dalam jaringan dapat memanfaatkan layanan GPS untuk menentukan lokasi node tujuan serta node-node di sekitarnya. Untuk memastikan bahwa setiap node dalam jaringan memperoleh pembaruan berkala mengenai lokasi kendaraan secara aktual, setiap kendaraan secara independen memprediksi posisi masa depannya dengan memanfaatkan kemampuan komputasi internal, kemudian membagikan hasil prediksi tersebut kepada node-node di sekitarnya. Proses ini digunakan untuk menentukan apakah suatu node layak dijadikan sebagai simpul perantara (*relay node*).

Protokol LA-AODV menjamin estimasi jalur dan pemilihan rute yang lebih akurat dengan memanfaatkan data yang diperoleh dari jaringan komunikasi antar kendaraan. Estimasi ini dilakukan melalui penggunaan Persamaan (1), yang berfungsi untuk menghitung posisi relatif antar kendaraan serta menentukan posisi aktual berdasarkan parameter kecepatan dan percepatan. Pendekatan ini memungkinkan pembentukan rute yang lebih responsif terhadap dinamika lalu lintas dan mobilitas kendaraan secara real-time.

$$SET_{point_x} = \sum_{x=1}^{x \leq J} certain_{point_\alpha}, certain_{point_\beta}, z_x \quad (1)$$

Protokol LA-AODV menggunakan Persamaan (1) untuk merutekan kendaraan dalam jaringan komunikasi. Protokol ini mempertimbangkan beberapa faktor penting, seperti kedekatan antar kendaraan, jumlah kendaraan dalam jangkauan transmisi, kecepatan kendaraan, serta waktu yang telah berlalu. Dua persamaan tambahan digunakan untuk mengevaluasi kedekatan kendaraan dan memprediksi posisi kendaraan di masa mendatang, dengan tujuan meningkatkan keselamatan di jalan raya. Pendekatan ini sejalan dengan konsep yang diuraikan dalam Persamaan (2) dan Persamaan (3).

$$fut_{point_\alpha} = \sum_{x=1, t=1}^{x \leq J, t \leq L} (certain_{point_\alpha} + (z_x \cdot t) + \left( \left( \frac{1}{2} (\Delta z) \right) * 2 \right)) \quad (2)$$

$$fut_{point_\beta} = \sum_{x=1, t=1}^{x \leq J, t \leq L} (certain_{point_\beta} + (z_x \cdot t) + \left( \left( \frac{1}{2} (\Delta z) \right) * 2 \right)) \quad (3)$$

dimana:

$$\Delta c = (c_t - c_{t-1}) \text{ pada awal iterasi } c_{t-1} = 0$$

dan:

- t: waktu prediksi, dimana  $t = 1, 2, 3, \dots$  dan  $t < L$ ,
- L: Iterasi maksimum,
- x: kendaraan x,
- J: Jumlah total kendaraan pada jangkauan komunikasi,
- $z_x$ : kendaraan pada waktu t.

Dua persamaan digunakan untuk memperkirakan posisi kendaraan secara akurat. Persamaan (2) digunakan untuk memprediksi posisi horizontal ( $\alpha$ ) berdasarkan kecepatan, jarak, dan waktu. Sementara itu, Persamaan (3) memprediksi posisi vertikal ( $\beta$ ) dengan mempertimbangkan status kendaraan, kecepatan, kendaraan di sekitarnya, serta waktu simulasi. Kedua persamaan tersebut berperan penting dalam mendukung komunikasi V2V yang efektif. Batasan waktu ( $t$ ) dan panjang lintasan ( $L$ ) digunakan untuk memastikan prediksi dilakukan secara tepat waktu.

Protokol LA-AODV meningkatkan kinerja jaringan komunikasi kendaraan dengan memprediksi posisi kendaraan melalui komunikasi antar kendaraan serta memperbarui tabel rute secara dinamis. Proses ini secara signifikan meningkatkan efisiensi komunikasi V2V, terutama dalam kondisi lalu lintas yang dinamis.

$$fut_{eff_{\alpha\beta}} = \sqrt{(|\Delta fut_{point_\alpha} - \Delta fut_{point_\beta}|)} \quad (4)$$

dimana:

$$\Delta fut_{point_\alpha} = (fut_{point_{\alpha+1}} - fut_{point_\alpha}) \quad (5)$$

$$\Delta fut_{point_\beta} = (fut_{point_{\beta+1}} - fut_{point_\beta}) \quad (6)$$

Persamaan (4) digunakan untuk menghitung posisi kendaraan secara keseluruhan dengan mempertimbangkan variasi pada titik horizontal dan vertikal. Nilai perubahan posisi pada kedua arah tersebut dihitung terlebih dahulu melalui Persamaan (5) dan Persamaan (6). Perubahan posisi pada arah horizontal diperoleh dengan mengurangi posisi yang diprediksi pada waktu mendatang dari posisi yang diperkirakan saat ini. Dengan prinsip yang sama, perubahan posisi vertikal dihitung dengan mengurangi prediksi posisi vertikal berikutnya dari posisi saat ini.

Hasil perhitungan tersebut memungkinkan sistem untuk memperkirakan lokasi kendaraan-kendaraan di sekitar dalam selang waktu simulasi tertentu, dengan mempertimbangkan pergerakan relatif dalam arah horizontal dan vertikal secara simultan. Selanjutnya, Persamaan (7) digunakan untuk membandingkan perubahan ideal dalam pergerakan kendaraan pada arah horizontal dan vertikal dalam dua interval waktu prediksi. Perbandingan ini menjadi dasar untuk mengevaluasi akurasi prediksi pergerakan dan meningkatkan efektivitas komunikasi V2V dalam kondisi lalu lintas yang cepat berubah.

$$fut_{eff_{\alpha\beta}} = MIN \left( \sum_{x=1, t=1}^{x \leq J, t \leq K} \sqrt{(|\Delta fut_{point_{\alpha}}|)^2 - (|\Delta fut_{point_{\beta}}|)^2} \right) \quad (7)$$

Persamaan (7) menggunakan metode jarak *Euclidean* dan koordinat dinamis untuk memperkirakan serta membandingkan posisi kendaraan guna menentukan rute terbaik. Kondisi perutean yang paling efektif akan memastikan komunikasi antar kendaraan berlangsung secara responsif. Sementara itu, Persamaan (8) digunakan untuk menentukan node perantara (*relay node*) dengan menghitung indeks stabilitas komunikasi antara dua node, yaitu node  $q$  dan  $r$ .

$$com_{stab\_idx_{xy}} = \left\lfloor \left( \frac{fut_{point_{\alpha\beta}}}{Max_{rad}} \right) \right\rfloor \quad (8)$$

dimana:

$$com_{stab\_idx_{xy}} = \left\{ \left( \frac{stab, if \leq 1}{unstab, if > 1} \right) \right\} \quad (9)$$

Protokol LA-AODV memperkenalkan indeks stabilitas komunikasi dalam Persamaan (8), yang berperan penting dalam mengevaluasi kestabilan komunikasi antar node. Indeks ini diperoleh dengan membagi total posisi kendaraan di sekitar dengan jari-jari maksimum komunikasi. Jika nilai indeks kurang dari atau sama dengan 1, maka kondisi komunikasi dianggap stabil, sedangkan nilai lebih dari 1 menunjukkan lingkungan komunikasi yang tidak stabil. Selanjutnya, Persamaan (9) digunakan untuk menentukan bobot kendaraan berdasarkan beberapa faktor, seperti posisi, kecepatan, percepatan, dan kualitas komunikasi. Nilai bobot ini berfungsi sebagai dasar dalam pemilihan node perantara yang paling efektif dalam jaringan komunikasi antar kendaraan.

$$TWR_x = \sum_{x=1}^{x \rightarrow J} (e_s * (|s_n - s_d|)) + (e_a * (|a_n - a_d|)) + (e_d * (|d_n - d_d|)) + (e_q * com\_qty_x) \quad (10)$$

Where:

$$0.6 \geq TWR=1, \text{Optimal, and } TWR \leq 0.59, \text{suboptimal}$$

Total Weight Route (TWR) adalah metrik yang digunakan untuk mengevaluasi kualitas rute standar, dan dihitung oleh protokol LA-AODV menggunakan Persamaan (10). TWR mempertimbangkan berbagai faktor, termasuk jarak tempuh, kecepatan, percepatan, serta kualitas komunikasi. Berdasarkan rumus yang tercantum dalam Persamaan (11), masing-masing variabel tersebut diberikan bobot yang sama, yaitu sebesar satu.

$$W_{sum} = e_s + e_a + e_d + e_q = 1 \quad (11)$$

$$i_{t+1} = \begin{cases} Q(t), i_{selected} = 1, reward \\ Q(t), +1, i_{ignore} = 0, penalize \end{cases} \quad (12)$$

$$TWR_{new} = TWR_{old} + I \cdot \Delta \quad (13)$$

dimana:

$TWR_{new}$  = update nilai TWR

$TWR_{old}$  = Nilai TWR sebelumnya.

$\Delta$  = sebuah variabel yang merepresentasikan perubahan dalam kondisi atau parameter perutean

Persamaan (11) menggabungkan berbagai faktor dengan bobot yang telah ditentukan untuk menghasilkan penilaian yang seimbang dalam pemilihan rute, berdasarkan parameter kecepatan, jarak, percepatan, dan kualitas komunikasi pada protokol LA-AODV. Dalam proses perhitungan *Total Weight Route* (TWR), digunakan algoritma *Learning Rate by Iteration* (LRI) sebagai

parameter laju pembelajaran guna mengevaluasi kualitas rute secara adaptif. Persamaan (12) menjelaskan mekanisme penyesuaian LRI berdasarkan pengalaman sebelumnya, memungkinkan sistem belajar dan beradaptasi seiring waktu. Selanjutnya, Persamaan (13) mengintegrasikan nilai  $I$  ke dalam nilai TWR terbaru untuk memperbarui nilai TWR secara berkala. Hal ini memungkinkan penyempurnaan dan penyesuaian berkelanjutan terhadap kondisi kendaraan atau node yang berbeda.

Pendekatan dinamis ini secara signifikan meningkatkan efisiensi perutean serta kualitas komunikasi antar kendaraan selama simulasi berlangsung. Integrasi antara SUMO dan NS-3 memungkinkan pemodelan pergerakan kendaraan secara akurat sekaligus mengevaluasi efektivitas komunikasi V2V dalam berbagai kondisi lalu lintas. Tabel 1 menyajikan konfigurasi simulasi komunikasi V2V yang digunakan dalam penelitian ini.

**Tabel 1.** Variabel Simulasi pada SUMO dan NS3

| NO | Parameters                               | Value(s)                                                                                                                                                                    |
|----|------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | Total Numbers of actual Nodes (Vehicles) | Random, based on poisson distribution                                                                                                                                       |
| 2  | Simulation Time (s)                      | 300-700 seconds                                                                                                                                                             |
| 3  | Traffic Scenario                         | <ul style="list-style-type: none"> <li>Smooth Flow (prob 0.55)</li> <li>Steady Flow (prob 0.33)</li> <li>Heavy Traffic (prob 0.1)</li> </ul> *Based on Poisson Distribution |
| 4  | Route Selection                          | Random Route Selection                                                                                                                                                      |
| 5  | Node Speed                               | Random Speed                                                                                                                                                                |
| 6  | Initial node position                    | Random position                                                                                                                                                             |
| 7  | Node Movement                            | All moving nodes                                                                                                                                                            |
| 8  | Data Packets Configuration               | Real-time traffic data packets from the Buluksumur traffic maps.                                                                                                            |
| 9  | Type of Protocol                         | AODV[5] and LAAODV[8]                                                                                                                                                       |
| 10 | Type of Traffic                          | Urban and Highway Traffic                                                                                                                                                   |
| 11 | Performance Matrix (QOS)                 | Flod Id, PDR, PLR, Throughput, end to end delay                                                                                                                             |
| 12 | LAAODV parameter setup                   | $f_s : 0.4$ ; $f_a : 0.3$ ; $f_d : 0.3$ ; $\alpha : 0.2$ ; Reward : 1;                                                                                                      |

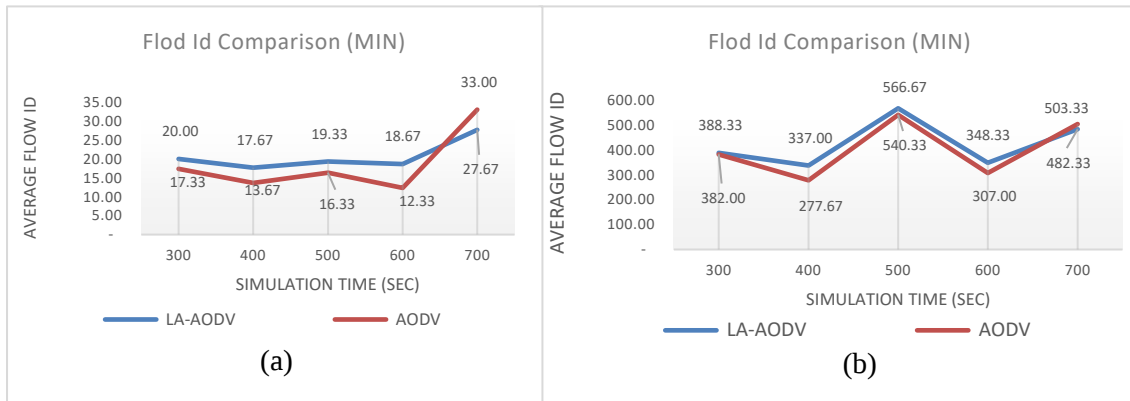
Tabel 1 mengategorikan simulasi kendaraan dunia nyata ke dalam tiga skenario lalu lintas: arus lancar, arus sedang, dan lalu lintas padat. Untuk mengevaluasi protokol LA-AODV, digunakan beberapa metrik seperti *Packet Delivery Ratio*, *delay*, *throughput*, *packet loss*, dan *jitter*. Efisiensi komunikasi antar kendaraan bergantung pada kecepatan, percepatan, dan jarak antar kendaraan. Dalam penelitian ini, digunakan rumus distribusi Poisson, sebagaimana ditunjukkan dalam Persamaan (14), untuk menghitung probabilitas kemunculan kendaraan dalam berbagai skenario lalu lintas.

$$P(X=I)= \frac{e^{-\lambda} \cdot \lambda^i}{i!} \quad (14)$$

Distribusi Poisson, sebagaimana ditunjukkan dalam Persamaan (14), digunakan untuk melacak jumlah kendaraan yang melewati suatu titik tertentu berdasarkan rata-rata laju kejadian ( $\lambda$ ). Distribusi ini melibatkan bilangan Euler (sekitar 2,71) dan mampu memprediksi kemungkinan terjadinya beberapa kendaraan dalam suatu interval waktu atau lokasi tertentu.

### 3. Hasil Dan Pembahasan

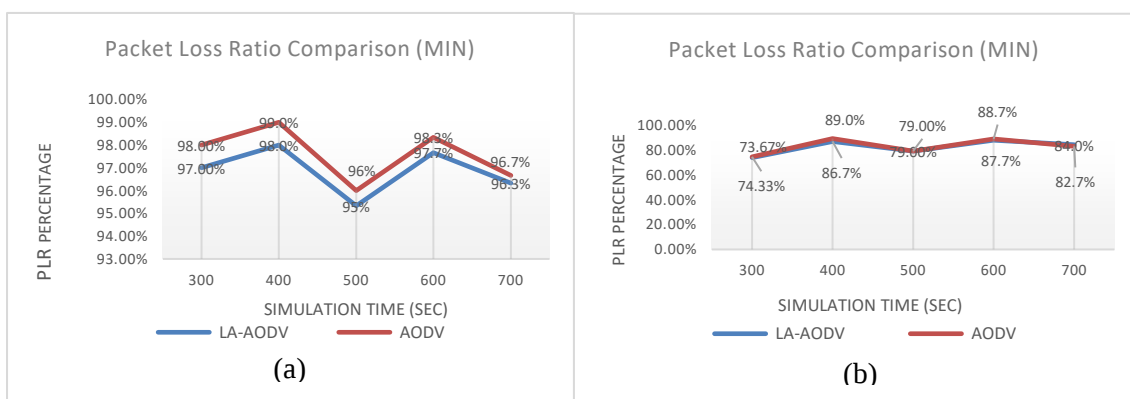
Penelitian ini mengevaluasi *Quality of Service* (QoS) dari protokol LA-AODV dan AODV konvensional untuk komunikasi *Vehicle-to-Vehicle* (V2V). Beberapa metrik utama yang dianalisis meliputi *Packet Loss Ratio*, *Packet Delivery Ratio*, *Throughput* Rata-rata, *Delay end-to-end*, dan *Jitter*, dengan menggunakan simulasi pada kondisi lalu lintas perkotaan dan jalan raya guna menilai kinerja serta keandalannya. Pada penelitian sebelumnya [10], uji coba skenario dilakukan dalam periode waktu 50, 100, dan 200 detik, sedangkan penelitian ini menguji skenario dalam periode waktu 300 hingga 700 detik, dimana memberikan keuntungan dalam mencerminkan kondisi dunia nyata serta memungkinkan evaluasi performa protokol dalam jangka panjang dengan fluktuasi lalu lintas yang lebih dinamis dan realistis. Gambar 3 menunjukkan tren total Flod ID selama periode waktu 300 hingga 700 detik, memberikan gambaran yang jelas tentang beban perutean (*routing overhead*) pada protokol AODV dan LA-AODV dalam lingkungan lalu lintas yang dinamis.



**Gambar 3.** Perbandingan *Flod ID* pada Lingkungan (a) Perkotaan dan (b) Jalan Raya untuk Protokol Routing LA-AODV dan AODV

Gambar 3 mendeskripsikan hasil analisis terhadap *Flod ID* pada lingkungan perkotaan dan jalan raya menunjukkan bahwa LA-AODV memiliki kinerja yang lebih unggul dibandingkan AODV dalam mengelola pembajakan pesan (*message flooding*). Dalam penelitian sebelumnya [8] yang hanya berfokus pada skenario lalu lintas perkotaan, LA-AODV mencatat *Flod ID* sebesar 17,33 pada detik ke-300, lebih rendah dibandingkan AODV yang mencapai 20,00. Pada detik ke-700, LA-AODV meningkat menjadi 27,67, sedangkan AODV naik lebih tinggi ke 33,00. Hasil ini menunjukkan bahwa LA-AODV lebih efektif dalam mengurangi pembajakan pesan, yang sangat penting untuk menjaga keandalan komunikasi V2V di wilayah dengan kepadatan kendaraan yang tinggi.

Sementara itu, dengan perluasan penelitian ini pada skenario jalan raya, perbedaan kinerja terlihat lebih signifikan. Pada detik ke-300, LA-AODV mencatat *Flod ID* sebesar 277,67, jauh lebih rendah dibandingkan AODV yang mencapai 337,00. Pada detik ke-500, AODV mencapai puncaknya di 566,67, sedangkan LA-AODV tetap lebih rendah di 540,33. Pada detik ke-700, LA-AODV turun menjadi 482,33, sementara AODV berada di 503,33. Kemampuan LA-AODV dalam beradaptasi dengan kondisi lalu lintas yang cepat berubah memungkinkan pengurangan pembajakan pesan yang tidak perlu, sehingga meningkatkan efisiensi komunikasi V2V, terutama untuk peringatan lalu lintas *real-time* dan pencegahan tabrakan.

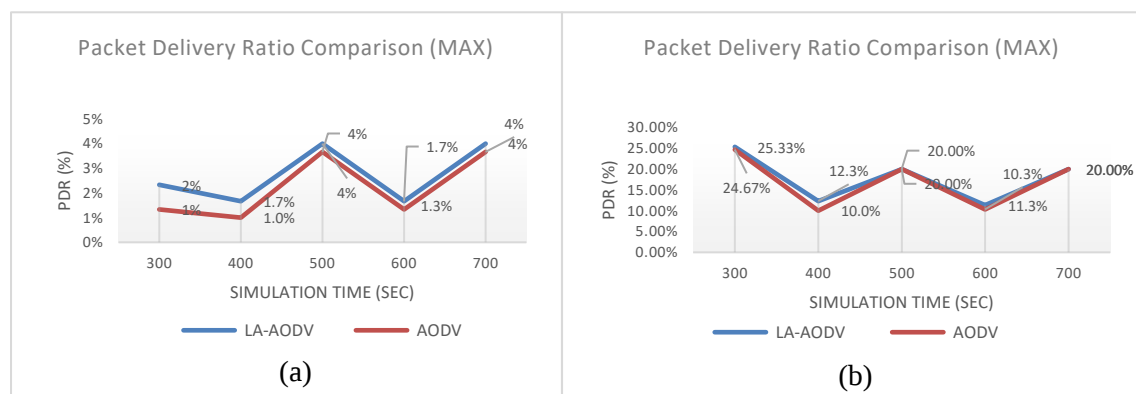


**Gambar 4.** Perbandingan *Packet Loss Ratio* (PLR) pada Lingkungan (a) Perkotaan dan (b) Jalan Raya untuk Protokol Routing LA-AODV dan AODV

Gambar 4 menampilkan tren signifikan dari *Packet Loss Ratio* (PLR) selama interval waktu 300–700 detik untuk komunikasi V2V dalam kondisi lalu lintas perkotaan dan jalan raya. Analisis terhadap *Packet Loss Ratio* (PLR) yang ditampilkan pada Gambar 3 menyoroti keunggulan kinerja LA-AODV dibandingkan dengan AODV. Dalam skenario lalu lintas perkotaan, LA-AODV memulai dengan PLR sebesar 97,0% pada detik ke-300, sedikit lebih baik dibandingkan AODV yang mencapai 98,0%. Seiring berjalannya simulasi, LA-AODV secara konsisten mempertahankan PLR yang lebih rendah, yakni 96,7% pada detik ke-500, sementara AODV meningkat menjadi 98,7%. Pada penelitian sebelumnya yang juga menguji protokol DSDV

menunjukkan PLR yang lebih tinggi sebesar 98,33% [17]. Hal ini menandakan bahwa LA-AODV lebih efektif dalam meminimalkan kehilangan paket, berkat kemampuannya dalam beradaptasi dengan perubahan rute yang sering terjadi serta kemacetan di area padat kendaraan.

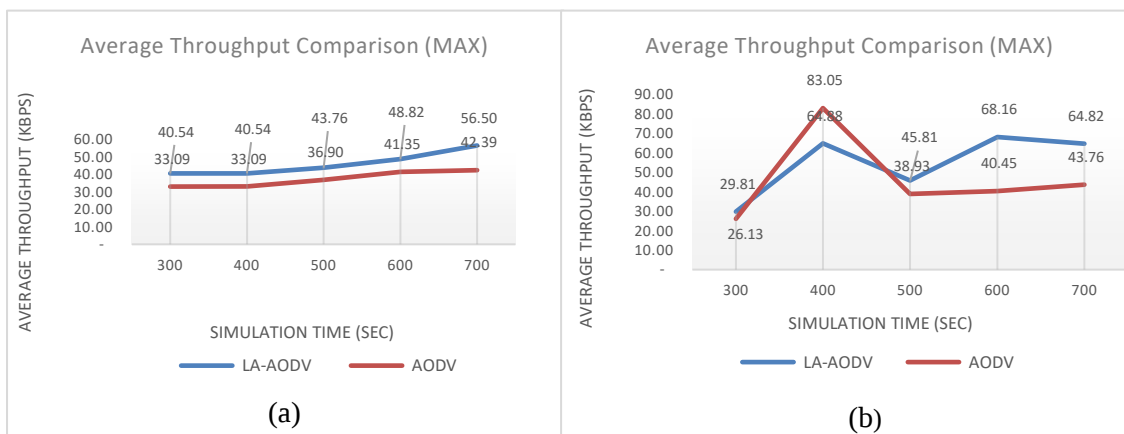
Pada skenario jalan raya, LA-AODV juga menunjukkan kinerja lebih unggul. Pada detik ke-300, LA-AODV mencatat PLR sebesar 74,33%, sedikit lebih tinggi dibandingkan AODV yang sebesar 73,67%. Namun, pada detik ke-400, PLR LA-AODV meningkat ke 86,7%, sementara AODV lebih tinggi di angka 89,0%. Keduanya kemudian menyentuh angka 79,0% pada detik ke-500. Hasil ini mengindikasikan bahwa LA-AODV mampu mengelola perubahan topologi jaringan yang cepat secara lebih efisien dalam komunikasi kendaraan berkecepatan tinggi. Temuan ini sangat penting untuk komunikasi V2V, di mana PLR yang lebih rendah dari LA-AODV memastikan pengiriman informasi manajemen lalu lintas dan peringatan keselamatan yang lebih andal, sekaligus mengurangi kehilangan data pada jalan raya dan meningkatkan efektivitas transmisi informasi penting seperti peringatan tabrakan.



**Gambar 5.** Perbandingan *Packet Delivery Ratio* (PDR) pada Lingkungan (a) Perkotaan dan (b) Jalan Raya untuk Protokol Routing LA-AODV dan AODV

Gambar 5 menunjukkan bahwa PDR lebih fluktuatif di area perkotaan akibat kondisi lalu lintas yang dinamis serta tingkat interferensi yang tinggi. Oleh karena itu, protokol routing harus mampu beradaptasi secara cepat untuk menjaga konektivitas jaringan dalam kondisi tersebut. LA-AODV, yang telah terbukti efektif di kedua lingkungan tersebut, secara konsisten menunjukkan performa lebih baik dibandingkan AODV dalam menjamin pengiriman paket secara andal. Gambar 4 menegaskan tantangan besar dalam komunikasi V2V di kawasan perkotaan, di mana mobilitas tinggi dan interferensi intens menuntut keberadaan protokol routing yang tangguh. Dalam konteks ini, LA-AODV tampil sebagai solusi menjanjikan karena kemampuannya yang unggul dalam menangani kondisi interferensi tinggi dan topologi jaringan yang cepat berubah.

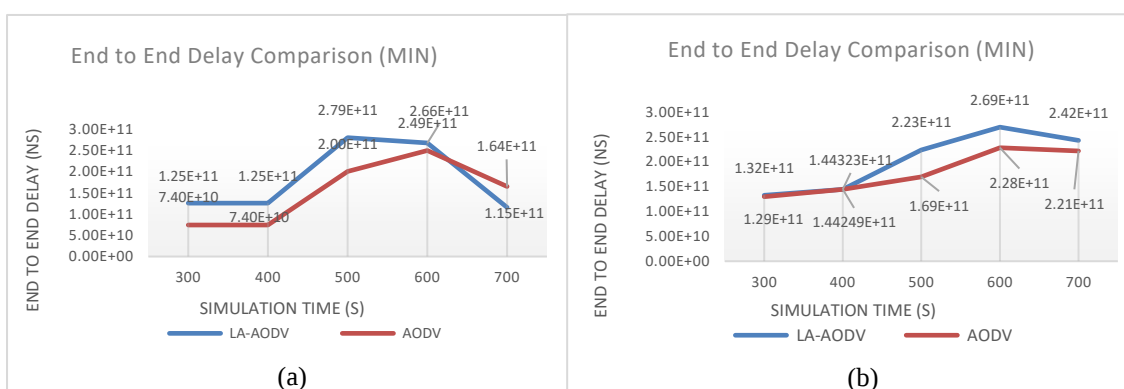
Selain itu, *throughput* rata-rata menjadi metrik penting dalam mengevaluasi kinerja kedua protokol tersebut, karena mencerminkan efektivitas protokol dalam mengelola transmisi data di tengah berbagai kondisi lalu lintas. Hasil analisis *throughput* rata-rata disajikan dalam Gambar 5, yang merangkum performa transmisi data di seluruh skenario simulasi yang telah diuji.



**Gambar 6.** Perbandingan Rata-rata *Throughput* pada Lingkungan (a) Perkotaan dan (b) Jalan Raya untuk Protokol Routing LA-AODV dan AODV

Analisis Gambar 6 menunjukkan bahwa *throughput* rata-rata cenderung lebih fluktuatif di wilayah perkotaan karena pola lalu lintas yang dinamis dan tingkat interferensi yang lebih tinggi, yang menjadi tantangan besar bagi efektivitas protokol routing. Meski demikian, LA-AODV secara konsisten mencatatkan *throughput* yang lebih tinggi dibandingkan AODV di kedua jenis lingkungan, menandakan kemampuannya dalam menangani kondisi lalu lintas yang berubah-ubah.

Keunggulan ini dikaitkan dengan mekanisme routing berbasis lokasi yang digunakan LA-AODV, yang memungkinkan pemilihan rute dengan kapasitas lebih besar dan tingkat kemacetan lebih rendah. Dengan demikian, protokol ini lebih unggul dalam menangani perubahan topologi jaringan secara cepat, yang umum terjadi di lingkungan kendaraan. Faktor lingkungan memainkan peran penting dalam memengaruhi *throughput* komunikasi V2V, di mana lingkungan perkotaan menimbulkan tantangan yang lebih kompleks dibanding jalan raya. Adaptabilitas LA-AODV menjadikannya kandidat kuat untuk diterapkan dalam skenario komunikasi di kedua lingkungan tersebut. Bagi perencana jaringan, penting untuk mempertimbangkan kebutuhan *throughput* yang bervariasi dan menerapkan strategi alokasi sumber daya yang dinamis guna mengoptimalkan performa sistem V2V. Selanjutnya, rata-rata *delay end-to-end*, sebagai metrik kinerja yang krusial, disajikan dalam Gambar 6, dan memberikan wawasan penting dalam mengevaluasi efisiensi dan responsivitas sistem komunikasi kendaraan.

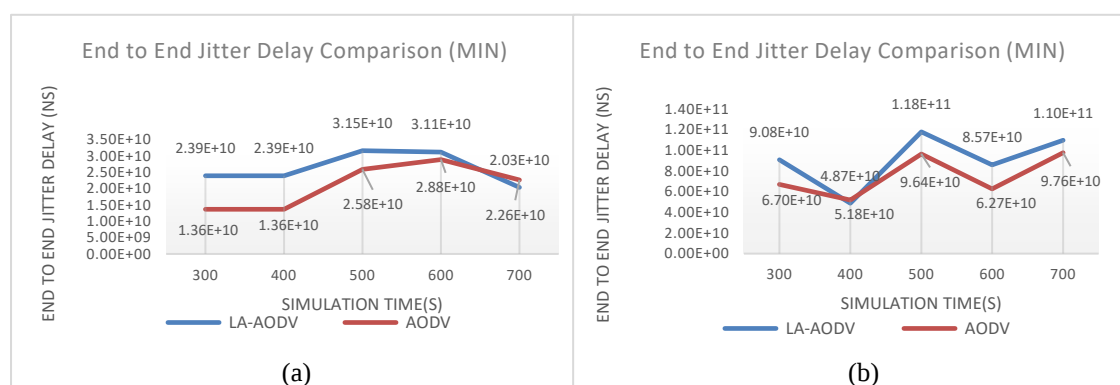


**Gambar 7.** Perbandingan Rata-rata *Delay End-to-End* pada Lingkungan (a) Perkotaan dan (b) Jalan Raya untuk Protokol Routing LA-AODV dan AODV

Data berikut membandingkan rata-rata *delay end-to-end* dari paket data dalam skenario perkotaan dan jalan raya, menggunakan dua protokol routing: LA-AODV dan AODV. Sumbu y menunjukkan delay dalam satuan milidetik, sedangkan sumbu x merepresentasikan waktu simulasi. Gambar 7 menunjukkan bahwa lingkungan perkotaan mengalami fluktuasi *delay* yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan lingkungan jalan raya. Hal ini disebabkan oleh karakteristik lalu lintas perkotaan

yang dinamis dan padat, yang membuat pemeliharaan koneksi komunikasi yang stabil menjadi lebih kompleks. Dengan demikian, protokol routing dituntut untuk beradaptasi secara cepat dalam mengelola gangguan tersebut. Dalam kedua skenario, LA-AODV secara konsisten menunjukkan performa lebih baik dibandingkan AODV, ditandai dengan *delay end-to-end* rata-rata yang lebih rendah. Mekanisme routing berbasis lokasi yang diadopsi LA-AODV memanfaatkan informasi geografis untuk pengambilan keputusan rute yang lebih efisien, sehingga mengurangi kemungkinan terjadinya lintasan yang berputar atau kehilangan paket. Faktor lalu lintas sangat memengaruhi *delay end-to-end* dalam komunikasi V2V, dan lingkungan perkotaan menghadirkan tantangan tersendiri. Namun demikian, LA-AODV menunjukkan kemampuan adaptasi yang baik terhadap kondisi tersebut dan berhasil mengurangi *delay* secara signifikan.

Temuan ini menegaskan pentingnya penerapan kesadaran lokasi (*location awareness*) dalam proses pemilihan rute untuk mengoptimalkan performa komunikasi V2V. Selanjutnya, jitter rata-rata — yang merefleksikan stabilitas pengiriman paket — juga merupakan metrik penting. Jitter menunjukkan variabilitas waktu kedatangan paket, yang berpengaruh terhadap efektivitas protokol routing. Evaluasi terhadap metrik ini ditampilkan dalam Gambar 8.



**Gambar 8.** Perbandingan Rata-rata *Jitter* dalam Komunikasi V2V pada Lingkungan (a) Perkotaan dan (b) Jalan Raya Menggunakan Protokol LA-AODV dan AODV

Gambar 8 membandingkan *jitter* rata-rata, yaitu variasi waktu kedatangan paket, dalam komunikasi V2V pada kondisi lalu lintas perkotaan dan jalan raya, menggunakan dua protokol routing: LA-AODV dan AODV. Nilai *jitter* ditampilkan dalam satuan milidetik, dan menunjukkan fluktuasi signifikan dari waktu ke waktu, mengindikasikan lingkungan perkotaan mengalami fluktuasi *jitter* yang jauh lebih tinggi dibandingkan jalan raya. Hal ini disebabkan oleh tingkat kemacetan yang tinggi serta kondisi lalu lintas yang dinamis di daerah perkotaan, yang memicu perubahan topologi jaringan secara sering dan meningkatkan interferensi, sehingga menyebabkan waktu kedatangan paket menjadi tidak teratur. Sebaliknya, jalan raya cenderung memiliki aliran lalu lintas yang lebih stabil, sehingga menghasilkan *jitter* yang lebih rendah.

Dalam kedua skenario, LA-AODV secara konsisten menunjukkan nilai *jitter* yang lebih rendah dibandingkan AODV. Keunggulan ini berasal dari mekanisme routing berbasis lokasi (*location-aware*) yang dimiliki LA-AODV, memungkinkan pemilihan jalur komunikasi yang optimal dan meminimalkan gangguan dalam pengiriman paket. Kemampuan LA-AODV dalam menstabilkan waktu kedatangan paket sangat penting untuk menjaga kualitas komunikasi V2V. Hasil penelitian ini menegaskan bahwa faktor lingkungan sangat memengaruhi *jitter*, khususnya dalam skenario perkotaan. Protokol LA-AODV terbukti lebih unggul dibandingkan AODV konvensional dalam mengendalikan *jitter*, yang merupakan aspek krusial untuk aplikasi seperti streaming waktu nyata (*real-time streaming*).

#### 4. Kesimpulan

Hasil simulasi menunjukkan bahwa protokol LA-AODV secara konsisten mengungguli AODV standar pada berbagai metrik kinerja, baik di lingkungan perkotaan maupun jalan raya. Di area perkotaan, LA-AODV mencatat penurunan Flood ID sebesar 15%, menandakan proses penemuan rute yang lebih cepat dan efisien dalam kondisi lalu lintas yang dinamis. *Jitter* berkurang sekitar 20%, menunjukkan kestabilan waktu kedatangan paket yang lebih tinggi—faktor penting dalam komunikasi kendaraan-ke-kendaraan (V2V) yang sensitif terhadap waktu. Rasio kehilangan paket juga turun 8–10% di perkotaan dan 5–7% di jalan raya, menandakan keandalan transmisi data yang lebih baik. Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa LA-AODV lebih efisien dan tangguh, terutama di lingkungan yang padat dan dinamis, menjadikannya solusi yang menjanjikan untuk komunikasi V2V. Untuk pengembangan selanjutnya, penelitian disarankan untuk mengoptimalkan LA-AODV pada skenario mobilitas tinggi

dengan menerapkan teknik machine learning guna meningkatkan pengambilan keputusan secara real-time. Pengujian skalabilitas pada jaringan VANET yang lebih besar dan kompleks juga penting untuk menilai performa protokol dalam kondisi lalu lintas padat. Selain itu, implementasi langsung di dunia nyata akan membantu memvalidasi hasil simulasi dan menilai efektivitasnya secara praktis. Aspek keamanan juga perlu diperkuat, seperti perlindungan terhadap serangan denial-of-service (DoS), agar LA-AODV tidak hanya efisien dan adaptif, tetapi juga aman untuk digunakan dalam sistem komunikasi V2V modern

## Daftar Pustaka

- [1] J. Naskath, B. Paramasivan, Z. Mustafa, and H. Aldabbas, "Connectivity analysis of V2V communication with discretionary lane changing approach," *J. Supercomput.*, vol. 78, no. 4, pp. 5526–5546, 2022, doi: 10.1007/s11227-021-04086-8.
- [2] P. Sharma and S. Jain, "Review of VANET challenges and protocol for architecture design and intelligent traffic system," *2nd Int. Conf. Data, Eng. Appl. IDEA 2020*, 2020, doi: 10.1109/IDEA49133.2020.9170685.
- [3] A. Y. Gadalla, Y. S. Mohammed, A. I. Galal, and M. El-Zorkany, "Design and implementation of a safety algorithm on V2V routing protocol," *Int. J. Smart Sens. Intell. Syst.*, vol. 15, no. 1, pp. 1–18, 2022, doi: 10.2478/IJSSIS-2022-0004.
- [4] S. Z. Liu and S. H. Hwang, "Vehicle Anti-collision Warning System Based on V2V Communication Technology," *Int. Conf. ICT Conver.*, vol. 2021-Octob, pp. 1348–1350, 2021, doi: 10.1109/ICTC52510.2021.9620948.
- [5] K. Afzal, R. Tariq, F. Aadil, Z. Iqbal, N. Ali, and M. Sajid, "An Optimized and Efficient Routing Protocol Application for IoV," *Math. Probl. Eng.*, vol. 2021, 2021, doi: 10.1155/2021/9977252.
- [6] T. K. Priyambodo, D. Wijayanto, and M. S. Gitakarma, "Performance optimization of MANET networks through routing protocol analysis," *Computers*, vol. 10, no. 1, pp. 1–13, 2021, doi: 10.3390/computers10010002.
- [7] P. K. Shrivastava and L. K. Vishwamitra, "Comparative analysis of proactive and reactive routing protocols in VANET environment," *Meas. Sensors*, vol. 16, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.measen.2021.100051.
- [8] K. B. Y. Bintoro and T. K. Priyambodo, "Learning Automata-Based AODV to Improve V2V Communication in A Dynamic Traffic Simulation," *Int. J. Intell. Eng. Syst.*, vol. 17, no. 1, pp. 666–678, 2024, doi: 10.22266/ijies2024.0229.56.
- [9] A. Bhatia *et al.*, "Networked control system with MANET communication and AODV routing," *Heliyon*, vol. 8, no. 11, p. e11678, 2022, doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e11678.
- [10] K. B. Yogha Bintoro, T. K. Priyambodo, D. Nurul Fitria, and F. A. Putra, "Performance Optimization of V2V Communication Reactive Routing Protocol Through Simulation Analysis," *Proc. - 11th Int. Conf. Inf. Technol. Comput. Electr. Eng. ICITACEE 2024*, pp. 175–180, 2024, doi: 10.1109/ICITACEE62763.2024.10762771.
- [11] F. Belamri, S. Boulfekhar, and D. Aissani, "A survey on QoS routing protocols in Vehicular Ad Hoc Network (VANET)," *Telecommun. Syst.*, vol. 78, no. 1, pp. 117–153, 2021, doi: 10.1007/s11235-021-00797-8.
- [12] R. Arief, R. Anggoro, and F. X. Arunanto, "Implementation of Aodv Routing Protocol With Vehicle Movement Prediction in Vanet," *Surabaya Inst. Teknol. Sepuluh Novemb.*, 2016.
- [13] K. A. Darabkh, M. S. A. Judeh, H. Bany Salameh, and S. Althunibat, "Mobility aware and dual phase AODV protocol with adaptive hello messages over vehicular ad hoc networks," *AEU - Int. J. Electron. Commun.*, vol. 94, no. July, pp. 277–292, 2018, doi: 10.1016/j.aeue.2018.07.020.
- [14] D. Peldon, S. Banihashemi, K. LeNguyen, and S. Derrible, "Navigating urban complexity: The transformative role of digital twins in smart city development," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 111, no. June, p. 105583, 2024, doi: 10.1016/j.scs.2024.105583.
- [15] U. A. Mughal, J. Xiao, I. Ahmad, and K. H. Chang, "Cooperative resource management for C-V2I communications in a dense urban environment," *Veh. Commun.*, vol. 26, p. 100282, 2020, doi: 10.1016/j.vehcom.2020.100282.
- [16] S. Mazhar *et al.*, "State-of-the-art authentication and verification schemes in VANETs: A survey," *Veh. Commun.*, vol. 49, no. May, p. 100804, 2024, doi: 10.1016/j.vehcom.2024.100804.
- [17] K. Bayu, Y. Bintoro, A. Syahputra, A. H. Rismanto, and M. Marchenko, "The Performance Analysis of Reactive and Proactive Routing Protocols for V2V Communication in Dynamic Traffic Simulation," *J. Tek. Inform.*, vol. 5, no. 4, pp. 1277–1286, 2024, doi: 10.52436/1.jutif.2024.5.5.2237.
- [18] H. Hejazi and L. Bokor, "Modeling and evaluation of cooperative Vulnerable Road User protection schemes in realistic C-ITS environments," *Comput. Networks*, vol. 246, no. February, p. 110396, 2024, doi: 10.1016/j.comnet.2024.110396.
- [19] X. Liu, B. S. Amour, and A. Jaekel, "A Reinforcement Learning-Based Congestion Control Approach for V2V Communication in VANET," *Appl. Sci.*, vol. 13, no. 6, 2023, doi: 10.3390/app13063640.
- [20] M. R. Hasan, Y. Zhao, Y. Luo, G. Wang, and R. M. Winter, "An Effective AODV-based Flooding Detection and Prevention for Smart Meter Network," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 129, pp. 454–460, 2018, doi: 10.1016/j.procs.2018.03.024.