

ND-AOMDV: SELEKSI PENERUSAN RREQ BERBASIS KEPADATAN NODE TETANGGA PADA PROTOKOL ROUTING AOMDV DI JARINGAN MANET BERKEPADATAN TINGGI

(ND-AOMDV: Neighbor Density-Based RREQ Forwarding Selection in the AOMDV Routing Protocol for High-Density in MANETs)

Andy Hidayat Jatmika, Raphael Bianco Huwae
Dept Informatics Engineering, Mataram University
Jl. Majapahit 62, Mataram, Lombok NTB, INDONESIA
Email: [andy, raphael.bianco.huwae]@unram.ac.id

Abstract

Route discovery in the Ad hoc On-demand Multipath Distance Vector (AOMDV) protocol relies on flooding Route Request (RREQ) packets, a mechanism that becomes increasingly wasteful as more nodes share the same radio neighborhood. In dense Mobile Ad Hoc Networks (MANETs), most rebroadcasts carry redundant information and only add channel contention, collisions, and control traffic. This paper presents Node Density-AOMDV (ND-AOMDV), in which every intermediate node regulates its own participation in route discovery using only its number of active neighbors. Nodes with at most $k=11$ neighbors always rebroadcast, whereas nodes in crowded neighborhoods rebroadcast with a probability inversely proportional to their neighbor count. The scheme was implemented in NS-2.35 and compared with standard AOMDV in a $1000 \times 1000 \text{ m}^2$ area with 25 to 275 nodes. Standard AOMDV remains superior up to 175 nodes, but from 200 nodes onward ND-AOMDV delivers higher throughput and packet delivery ratio (PDR) with lower end-to-end delay and routing overhead. With 275 nodes, ND-AOMDV sustains a PDR of 92.37% versus 82.9% and lowers delay and routing overhead by 13.2% and 13.0%, respectively. Neighbor density is therefore a lightweight and effective criterion for controlling RREQ flooding in dense MANETs.

Keywords: MANET, AOMDV, RREQ flooding, broadcast storm, neighbor density, routing overhead, NS-2

1. PENDAHULUAN

Mobile Ad Hoc Network (MANET) memungkinkan sekumpulan perangkat bergerak membentuk jaringan secara spontan tanpa bergantung pada infrastruktur seperti menara seluler atau *access point*. Karakteristik ini menjadikan MANET relevan untuk kondisi ketika infrastruktur komunikasi tidak tersedia atau rusak, misalnya pada operasi tanggap darurat bencana, komunikasi taktis di lapangan, dan jaringan antarkendaraan [1], [2]. Karena tidak ada perangkat pusat yang mengatur lalu lintas, setiap node harus berperan ganda sebagai *host* sekaligus *router* yang meneruskan paket milik node lain. Topologi jaringan pun terus berubah mengikuti pergerakan node, sehingga kinerja MANET sangat ditentukan oleh kemampuan protokol *routing* dalam menemukan dan memelihara jalur secara efisien [3], [4], [5].

Protokol *routing* reaktif menemukan rute hanya ketika dibutuhkan sehingga lebih hemat sumber daya dibandingkan protokol proaktif yang memperbarui tabel *routing* secara berkala. *Ad hoc On-demand Multipath Distance Vector* (AOMDV) merupakan

pengembangan AODV yang membangun beberapa jalur bebas *loop* dan saling terpisah (*link-disjoint*) dalam satu kali proses *route discovery* [6]. Keberadaan jalur cadangan tersebut memungkinkan pengiriman data dialihkan tanpa harus mengulang pencarian rute ketika jalur utama terputus, sehingga AOMDV banyak dijadikan dasar pengembangan untuk berbagai kebutuhan, mulai dari keamanan hingga efisiensi energi [7], [8]. Meskipun demikian, tahap *route discovery* pada AOMDV tetap mengandalkan penyebaran paket *Route Request* (RREQ) secara *flooding*, yaitu setiap node yang menerima RREQ untuk pertama kali akan menyiarkannya kembali ke seluruh tetangganya [9], [10].

Mekanisme *flooding* tersebut efektif pada jaringan yang jarang, tetapi menjadi boros ketika kepadatan node meningkat. Tseng dkk. [11] menunjukkan bahwa *rebroadcast* tanpa kendali pada jaringan padat menimbulkan *broadcast storm problem*, yaitu kombinasi redundansi, perebutan kanal, dan *collision*. Pada area yang padat, sebagian besar node menerima RREQ yang sama dari beberapa tetangga sekaligus, sehingga *rebroadcast* tambahan hampir tidak

memperluas jangkauan pencarian rute, tetapi tetap mengonsumsi kapasitas kanal. Paket kontrol yang menumpuk kemudian bersaing dengan paket data, sehingga *routing overhead* dan *end-to-end delay* meningkat, sedangkan *throughput* dan *Packet Delivery Ratio* (PDR) menurun [4], [12]. Kajian kinerja AODV dan AOMDV pada jaringan berkepadatan tinggi juga menegaskan bahwa kepadatan node merupakan faktor yang sangat memengaruhi kinerja protokol reaktif [13].

Berbagai pendekatan telah diusulkan untuk menekan redundansi RREQ. Skema probabilistik meneruskan RREQ dengan peluang tertentu, tetapi kinerjanya sangat bergantung pada nilai probabilitas yang dipilih secara manual dan diterapkan seragam pada semua kondisi jaringan [2]. Oleh karena itu, sejumlah penelitian menyesuaikan probabilitas penerusan dengan kondisi lokal, misalnya berdasarkan kombinasi jarak, ketersediaan link, dan rasio penerimaan paket [14] atau jumlah tetangga [15], [16]. Namun, sebagian besar pendekatan tersebut dikembangkan untuk AODV atau jenis jaringan lain. Di sisi lain, pengembangan AOMDV lebih banyak berfokus pada kriteria pemilihan rute, seperti optimasi berbasis algoritma metaheuristik [17], beban node [18], jarak node [19], dan energi [20], dan belum secara khusus mengendalikan jumlah node yang meneruskan RREQ. Selain itu, masih jarang penelitian yang mengidentifikasi pada tingkat kepadatan berapa pembatasan penerusan RREQ mulai memberikan manfaat bagi protokol *multipath*.

Berdasarkan celah tersebut, penelitian ini mengusulkan Node Density-AOMDV (ND-AOMDV), yaitu modifikasi AOMDV yang memungkinkan setiap node perantara mengatur keikutsertaannya dalam penerusan RREQ hanya berdasarkan jumlah tetangga aktif yang dimilikinya. Node yang berada di lingkungan jarang tetap meneruskan RREQ agar konektivitas pencarian rute terjaga, sedangkan node di lingkungan padat meneruskan RREQ dengan probabilitas yang berbanding terbalik dengan jumlah tetangganya. Mekanisme ini tidak memerlukan informasi lokasi maupun paket kontrol tambahan. Kontribusi penelitian ini adalah: (1) integrasi mekanisme penerusan RREQ berbasis kepadatan tetangga ke dalam AOMDV pada NS-2.35, dan (2) evaluasi perbandingan ND-AOMDV dan AOMDV standar pada tujuh tingkat kepadatan, yaitu 25 hingga 275 node, menggunakan metrik *throughput*, PDR, *end-to-end delay*, dan *routing overhead* untuk mengidentifikasi titik kepadatan ketika ND-AOMDV mulai lebih unggul.

Bagian selanjutnya dari artikel ini disusun sebagai berikut. Bagian 2 membahas penelitian terkait dan teori penunjang, Bagian 3 menjelaskan metode yang diusulkan dan skenario simulasi, Bagian 4 menyajikan hasil dan pembahasan, dan Bagian 5 berisi kesimpulan serta saran penelitian selanjutnya.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Penelitian Terkait

Beberapa penelitian sebelumnya telah membahas pengaruh kepadatan node, proses penyebaran RREQ, dan optimasi *routing* pada jaringan MANET. Eltahlawy dkk. [4] melakukan penelitian mengenai pengaruh kepadatan node, tingkat mobilitas, dan model matematis terhadap performa *routing* di jaringan MANET. Penelitian tersebut menjelaskan bahwa semakin tinggi kepadatan node, maka kemungkinan terjadinya *broadcast storm* juga meningkat karena banyaknya node yang melakukan transmisi RREQ secara bersamaan. Kondisi ini dapat menimbulkan *routing overhead* yang signifikan serta memperbesar risiko *collision* antar paket pada medium nirkabel.

Geetha [10] menganalisis mekanisme penyebaran RREQ pada protokol AOMDV. Penelitian tersebut menjelaskan bahwa AOMDV memiliki kemampuan untuk mempertahankan beberapa jalur alternatif yang stabil. Namun, proses *flooding* pada AOMDV masih menghasilkan redundansi pesan yang tinggi. Dalam kondisi jaringan padat, sebagian besar node dapat menerima dan meneruskan RREQ dengan informasi yang sama. Hal ini menyebabkan peningkatan *network overhead* tanpa memberikan tambahan efektivitas yang besar dalam proses pencarian rute.

Li dkk. [14] mengusulkan skema *probabilistic broadcasting* untuk proses penyebaran pesan pada jaringan yang memiliki karakteristik penyebaran paket serupa dengan MANET. Skema ini menentukan kebutuhan *rebroadcast* berdasarkan probabilitas adaptif yang disesuaikan dengan kondisi lingkungan node. Pendekatan tersebut menunjukkan bahwa proses penyebaran pesan dapat dibuat lebih efisien dengan mengurangi redundansi *broadcast*, terutama pada kondisi jaringan dengan kepadatan tinggi.

Penelitian lain oleh Li, X. dkk. [15] mengusulkan algoritma berbasis *node density* yang menyesuaikan probabilitas penyiaran ulang paket berdasarkan kepadatan node di sekitarnya. Pendekatan ini digunakan untuk mengurangi *routing overhead* dan *collision* secara adaptif. Konsep tersebut menjadi salah satu dasar dalam pengembangan metode Node Density-AOMDV (ND-AOMDV), yaitu dengan

mempertimbangkan jumlah node tetangga dalam proses *forwarding* RREQ.

Kamarunisha dan Vimalanand [17] mengembangkan FF-AOMDV, yaitu varian AOMDV yang mengintegrasikan algoritma *Firefly Optimization* untuk meningkatkan kualitas pemilihan rute. Hasil simulasi menunjukkan adanya peningkatan *throughput*, pengurangan *end-to-end delay*, serta peningkatan efisiensi rute. Namun, metode tersebut belum secara langsung menangani permasalahan utama berupa redundansi *flooding* RREQ. Oleh karena itu, pada skenario jaringan dengan kepadatan tinggi, potensi *broadcast storm* dan *routing overhead* masih dapat terjadi.

Modifikasi AOMDV lainnya dikembangkan melalui pencarian rute berdasarkan jarak node terdekat dan efisiensi energi [19], penerapan algoritma EA-SHORT untuk menemukan rute yang andal berbasis energi [20], serta pemilihan *multipath* berdasarkan status beban node [18]. Penelitian-penelitian tersebut berfokus pada kriteria pemilihan rute, sedangkan penelitian ini berfokus pada pengendalian jumlah node yang meneruskan RREQ pada tahap *route discovery*.

2.2. Teori Penunjang

Teori-teori penunjang yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

2.2.1. Mobile Ad Hoc Network (MANET)

Mobile Ad Hoc Network (MANET) merupakan jaringan nirkabel yang bersifat *self-organizing* dan *decentralized*. Pada jaringan ini, setiap node dapat berfungsi sebagai pengirim, penerima, sekaligus *router* untuk meneruskan paket data ke node lain tanpa memerlukan infrastruktur tetap. Topologi jaringan pada MANET bersifat dinamis karena node dapat bergerak bebas, sehingga perubahan rute dapat terjadi secara terus-menerus [5]. Kondisi tersebut menimbulkan tantangan dalam proses *routing*, terutama berkaitan dengan *overhead* jaringan, *delay*, dan *packet loss*.

2.2.2. Protokol routing pada MANET

Routing pada MANET berfungsi untuk menentukan jalur komunikasi antar node. Berdasarkan mekanismenya, protokol *routing* MANET dapat dibagi menjadi tiga kategori, yaitu proaktif, reaktif, dan hibrid. Protokol proaktif melakukan pembaruan tabel *routing* secara berkala pada seluruh node, tetapi cenderung menghasilkan *overhead* yang tinggi karena banyaknya paket kontrol yang dikirim. Sebaliknya, protokol reaktif seperti AODV dan AOMDV hanya melakukan pencarian rute ketika dibutuhkan, sehingga lebih efisien pada

jaringan yang dinamis. Dalam penelitian ini, fokus diberikan pada AOMDV karena protokol ini mendukung *multipath routing* dengan menyediakan beberapa jalur alternatif antara node sumber dan node tujuan.

2.2.3. Ad hoc On-demand Multipath Distance Vector (AOMDV)

AOMDV merupakan pengembangan dari AODV yang mendukung mekanisme *multipath routing*. Protokol ini dapat membangun beberapa jalur bebas *loop* secara bersamaan, sehingga ketika satu jalur terputus, data dapat dialihkan ke jalur lain tanpa harus melakukan proses *route discovery* ulang. Proses utama dalam AOMDV meliputi *route discovery* melalui penyebaran pesan RREQ dan *route maintenance* untuk menjaga kestabilan jalur selama proses transmisi data berlangsung.

2.2.4. Node density

Node density menggambarkan tingkat kepadatan node dalam suatu area jaringan. Kepadatan node berpengaruh langsung terhadap kinerja protokol *routing*. Pada kondisi kepadatan tinggi, kemungkinan terjadinya *packet collision* dan *broadcast redundancy* meningkat. Sebaliknya, jika kepadatan terlalu rendah, peluang terjadinya *link breakage* dapat meningkat karena keterbatasan jangkauan komunikasi antar node. Dengan mempertimbangkan *node density*, proses pemilihan node tetangga dapat dioptimalkan agar hanya node yang relevan yang dilibatkan dalam proses *forwarding* RREQ. Hal ini dapat membantu mengurangi *routing overhead* dan meningkatkan *Packet Delivery Ratio* (PDR).

2.2.5. Network overhead dan collision

Network overhead merupakan salah satu parameter penting dalam evaluasi kinerja *routing* MANET. *Overhead* menunjukkan jumlah paket kontrol seperti RREQ, RREP, dan RERR yang dihasilkan selama proses komunikasi. Nilai *overhead* yang tinggi menunjukkan penggunaan sumber daya jaringan yang tidak efisien dan dapat berdampak pada penurunan *throughput* serta peningkatan *delay*. Dalam konteks AOMDV berbasis *node density*, pengendalian jumlah RREQ yang dikirim dapat membantu menurunkan *overhead* tanpa mengorbankan konektivitas jaringan.

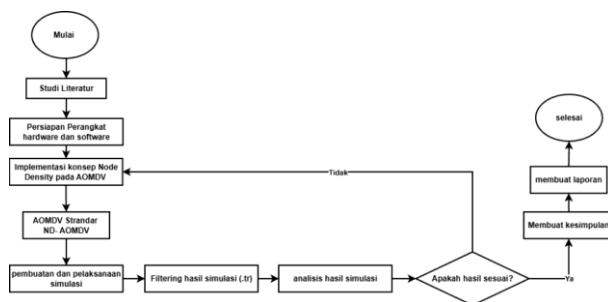
Collision terjadi ketika beberapa sinyal radio beroperasi pada frekuensi yang sama dan saling bertabrakan, sehingga sinyal yang diterima menjadi terganggu. Fenomena ini umum terjadi pada lingkungan dengan kepadatan node tinggi karena area jangkauan komunikasi dari banyak node saling

tumpang tindih. Dampak dari *collision* antara lain penurunan kualitas komunikasi, menurunnya *throughput*, meningkatnya *end-to-end delay*, dan berkurangnya *Packet Delivery Ratio* (PDR).

3. METODE PENELITIAN

3.1. Alur Penelitian

Tahapan penelitian ditunjukkan pada Gambar 1. Penelitian diawali dengan studi literatur mengenai MANET, protokol AOMDV, dan teknik pengendalian *broadcast* RREQ, kemudian dilanjutkan dengan persiapan perangkat keras dan perangkat lunak simulasi. Tahap berikutnya adalah mengimplementasikan konsep *node density* pada AOMDV sehingga dihasilkan ND-AOMDV. AOMDV standar dan ND-AOMDV selanjutnya disimulasikan dengan skenario yang sama, dan *trace file* (.tr) hasil simulasi difilter serta dianalisis. Jika hasil analisis belum sesuai, misalnya karena kesalahan implementasi atau hasil yang tidak konsisten, penelitian kembali ke tahap implementasi. Jika hasil telah sesuai, penelitian dilanjutkan dengan penarikan kesimpulan dan penyusunan laporan.



Gambar 1. Alur penelitian

3.2. Lingkungan Simulasi

Simulasi dijalankan pada laptop Lenovo IdeaPad Gaming 3 dengan spesifikasi perangkat keras dan perangkat lunak seperti pada Tabel 1. *Network Simulator 2* (NS-2) versi 2.35 dipilih karena menyediakan implementasi protokol AOMDV yang dapat dimodifikasi langsung pada tingkat kode sumber. NS-2 merupakan perangkat lunak *open-source* berlisensi GNU General Public License (GPL) yang dapat diunduh melalui laman resminya (<https://www.isi.edu/nsnam/ns/>). NS-2.35 dijalankan pada sistem operasi Linux Ubuntu 14.04 yang divirtualisasikan menggunakan Oracle VM VirtualBox 7.2.4.

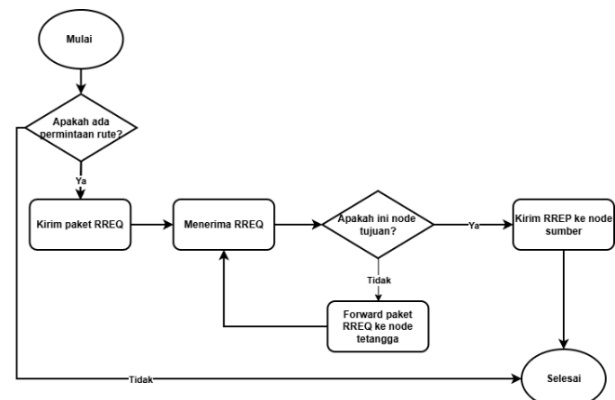
TABEL 1. SPESIFIKASI LINGKUNGAN SIMULASI

Komponen	Spesifikasi
Prosesor	AMD Ryzen 5 4600H

Komponen	Spesifikasi
Memori utama	18 GB
Penyimpanan	SSD 516 GB
Simulator	<i>Network Simulator 2</i> (NS-2) versi 2.35
Sistem operasi	Linux Ubuntu 14.04
Virtualisasi	Oracle VM VirtualBox 7.2.4

3.3. Route Discovery pada AOMDV Standar

Mekanisme *route discovery* pada AOMDV standar ditunjukkan pada Gambar 2. Ketika node sumber membutuhkan rute menuju node tujuan dan belum memiliki rute yang valid, node sumber mengirimkan paket RREQ secara *broadcast* ke seluruh tetangganya. Setiap node yang menerima RREQ memeriksa apakah dirinya merupakan node tujuan. Jika ya, node tersebut mengirimkan RREP kembali ke node sumber. Jika bukan, node tersebut meneruskan RREQ ke seluruh tetangganya hingga rute menuju node tujuan ditemukan. Karena setiap node perantara meneruskan RREQ tanpa seleksi, jumlah transmisi RREQ meningkat seiring bertambahnya kepadatan node, dan sebagian besar transmisi tersebut bersifat redundan.



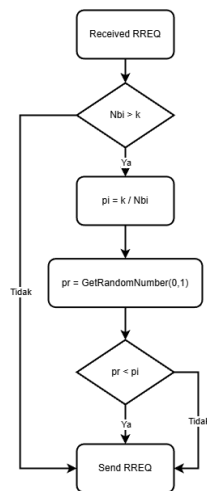
Gambar 2. Diagram alir *route discovery* pada AOMDV standar

3.4. Metode yang Diusulkan: ND-AOMDV

3.4.1. Seleksi penerusan RREQ berbasis kepadatan node

ND-AOMDV menambahkan mekanisme seleksi pada tahap penerusan RREQ di setiap node perantara, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3. Ketika node i menerima RREQ, node tersebut terlebih dahulu menghitung jumlah tetangga aktifnya, Nb_i , lalu membandingkannya dengan nilai ambang batas kepadatan k . Jika $Nb_i \leq k$, lingkungan node dianggap belum padat sehingga RREQ langsung diteruskan agar konektivitas pencarian rute tetap terjaga. Jika $Nb_i > k$,

node menghitung probabilitas penerusan p_i menggunakan Persamaan (1).



Gambar 3. Diagram alir penerusan RREQ berbasis kepadatan node

$$p_i = \frac{k}{Nb_i} \quad (1)$$

Selanjutnya, node membangkitkan bilangan acak p_r yang terdistribusi seragam pada interval $[0, 1]$. RREQ diteruskan jika $p_r < p_i$ dan tidak diteruskan jika sebaliknya. Dengan demikian, keputusan penerusan RREQ oleh node i , dinotasikan F_i , dapat dirumuskan seperti pada Persamaan (2), dengan nilai 1 berarti RREQ diteruskan dan 0 berarti RREQ tidak diteruskan.

$$F_i = \begin{cases} 1, & \text{jika } Nb_i \leq k \text{ atau } p_r < p_i \\ 0, & \text{lainnya} \end{cases} \quad (2)$$

Berdasarkan Persamaan (1), semakin banyak tetangga yang dimiliki sebuah node, semakin kecil peluang node tersebut meneruskan RREQ. Pada wilayah dengan kepadatan yang relatif seragam, setiap tetangga memiliki jumlah tetangga yang hampir sama, sehingga jumlah node yang meneruskan RREQ di sekitar sebuah node secara rata-rata mendekati k , berapa pun kepadatan wilayah tersebut.

3.4.2. Penetapan nilai ambang kepadatan k

Nilai ambang k menentukan seberapa besar penekanan penerusan RREQ yang dilakukan. Pada penelitian ini digunakan $k = 11$, mengikuti nilai yang dilaporkan optimal pada ND-AODV [21], yaitu protokol AODV dengan aturan penerusan berbasis kepadatan node yang berbentuk sama, sebagaimana dirangkum pada [15]. Nilai tersebut juga sejalan dengan hasil kajian mengenai derajat node optimal pada jaringan nirkabel ad hoc. Kleinrock dan Silvester [22] menunjukkan bahwa jumlah tetangga di sekitar enam node memberikan kinerja terbaik pada jaringan radio

paket, sedangkan Royer dkk. [23] memperoleh rentang optimum sekitar tujuh sampai delapan tetangga per node pada jaringan tanpa mobilitas dan menunjukkan bahwa nilai optimum tersebut bergeser naik ketika mobilitas node meningkat. Nilai $k = 11$ berada sedikit di atas rentang tersebut sehingga menyediakan margin untuk kondisi bergerak, ketika jumlah tetangga yang tercatat pada sebuah node dapat berbeda dari kondisi sesaatnya.

Pemilihan k juga dapat ditinjau secara analitis melalui peluang sebuah node tidak menerima RREQ. Misalkan sebuah node memiliki Nb tetangga yang telah menerima RREQ dan masing-masing meneruskannya secara bebas dengan probabilitas $p = k/Nb$ sesuai Persamaan (1). Peluang node tersebut tidak menerima satu pun salinan RREQ adalah $(1 - k/Nb)^{Nb}$, yang untuk $Nb \gg k$ mendekati e^{-k} . Peluang tersebut hanya bergantung pada k dan praktis tidak bergantung pada kepadatan, sehingga jangkauan pencarian rute tetap terjaga pada berbagai tingkat kepadatan node. Tabel II menyajikan nilai peluang tersebut beserta rasio penerusan pada skenario terpadat dalam penelitian ini, yaitu 275 node dengan rata-rata 54 tetangga per node.

TABEL II. PERBANDINGAN PILIHAN NILAI AMBANG KEPADATAN k

Nilai k	Peluang node tidak menerima RREQ	Rasio penerusan pada $Nb = 54$
6	$2,5 \times 10^{-3}$	0,11
8	$3,4 \times 10^{-4}$	0,15
11	$1,7 \times 10^{-5}$	0,20
15	$3,1 \times 10^{-7}$	0,28

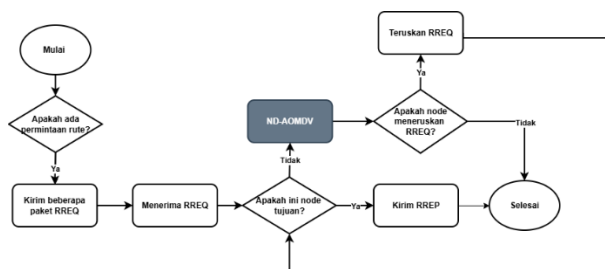
Berdasarkan Tabel II, $k = 11$ menjaga peluang sebuah node tidak menerima RREQ di bawah 2×10^{-5} . Pada lintasan sepanjang sepuluh hop, peluang pencarian rute terputus akibat mekanisme ini masih di bawah 2×10^{-4} . Pada saat yang sama, hanya sekitar 20% node yang meneruskan RREQ pada skenario 275 node, atau sekitar 80% transmisi RREQ ditekan dibandingkan *flooding* penuh. Menurunkan k menjadi 6 atau 8 hanya menghemat tambahan sekitar 5 sampai 9 poin persen transmisi, tetapi menaikkan peluang kegagalan penerimaan satu sampai dua orde. Sebaliknya, menaikkan k menjadi 15 menambah sekitar 40% transmisi RREQ dibandingkan $k = 11$ untuk perbaikan peluang yang sudah sangat kecil.

Nilai $k = 11$ sekaligus menjelaskan mengapa mekanisme ini baru memberikan manfaat pada kepadatan tinggi. Dengan jangkauan transmisi r dan luas area A , rata-rata jumlah tetangga sebuah node dapat didekati dengan $(N - 1)\pi r^2/A$. Pada area $1000 \times 1000 \text{ m}^2$ dengan $r = 250 \text{ m}$, rata-rata jumlah tetangga

sekitar 5 node pada skenario 25 node, 15 node pada 75 node, 34 node pada 175 node, dan 54 node pada 275 node. Pada kepadatan rendah, sebagian besar node memiliki tetangga lebih sedikit daripada k sehingga RREQ tetap diteruskan sepenuhnya dan ND-AOMDV berperilaku hampir sama dengan AOMDV standar; penekanan hanya terjadi pada node yang untuk sementara berada di kerumunan yang padat. Penekanan baru berpengaruh besar ketika rata-rata jumlah tetangga jauh melampaui k , yaitu mulai sekitar 175 sampai 200 node. Kondisi tersebut sejalan dengan titik peralihan kinerja yang teramati pada Subbab 4.3.

3.4.3. Route discovery pada ND-AOMDV

Gambar 4 menunjukkan integrasi mekanisme seleksi tersebut ke dalam proses *route discovery*. Node sumber mengirimkan RREQ ke node tetangga, kemudian setiap node penerima memeriksa apakah dirinya merupakan node tujuan. Jika ya, node tersebut mengirimkan RREP ke node sumber. Jika bukan, node menjalankan seleksi berbasis kepadatan pada Gambar 3 untuk menentukan apakah dirinya layak meneruskan RREQ. Node yang memenuhi kriteria meneruskan RREQ ke tetangganya, sedangkan node yang tidak memenuhi kriteria tidak meneruskan RREQ tersebut. Modifikasi hanya diterapkan pada keputusan penerusan RREQ di node perantara, sedangkan mekanisme lain pada AOMDV tetap dipertahankan. Karena node di wilayah yang jarang tetap meneruskan RREQ secara penuh, *broadcast* yang berlebihan dapat dikurangi tanpa menghilangkan peluang ditemukannya rute.

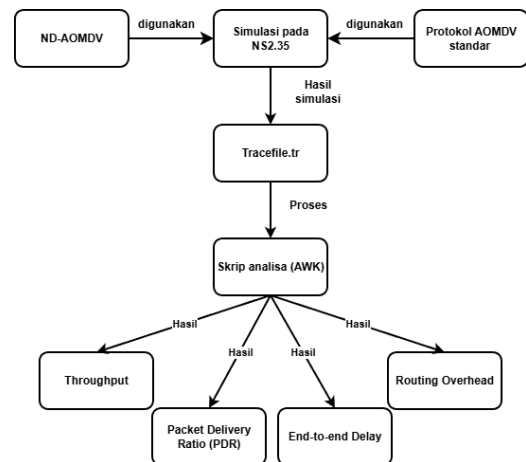


Gambar 4. Diagram alir *route discovery* pada ND-AOMDV

3.5. Perancangan dan Skenario Simulasi

Perancangan simulasi ditunjukkan pada Gambar 5. AOMDV standar sebagai pembandingan dan ND-AOMDV sebagai metode yang diusulkan disimulasikan pada NS-2.35 dengan skenario yang identik, sehingga perbedaan kinerja yang diperoleh dapat dikaitkan dengan mekanisme seleksi penerusan RREQ. Setiap simulasi menghasilkan *trace file* (.tr) yang merekam seluruh aktivitas jaringan, seperti pengiriman, penerimaan, dan pembuangan paket, termasuk paket

kontrol *routing*. *Trace file* tersebut kemudian diproses menggunakan skrip AWK untuk memperoleh nilai empat metrik evaluasi.



Gambar 5. Perancangan simulasi

Parameter simulasi ditunjukkan pada Tabel III. Setiap simulasi berlangsung selama 600 s pada area $1000 \times 1000 \text{ m}^2$. Jumlah node divariasikan menjadi 25, 75, 125, 175, 200, 225, dan 275 untuk merepresentasikan kepadatan jaringan dari rendah hingga tinggi. Pergerakan node mengikuti model *Random Waypoint* dengan kecepatan 25 m/s, sedangkan lalu lintas data dibangkitkan menggunakan trafik CBR (*constant bit rate*) di atas UDP dengan ukuran paket 512 byte dan laju transmisi 2 Mbps.

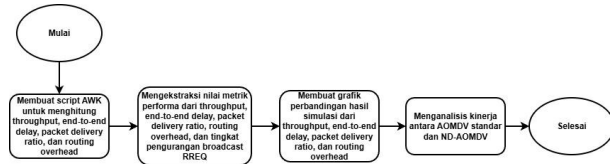
TABEL III. PARAMETER SKENARIO SIMULASI

Parameter	Nilai
Simulator	NS-2.35
Waktu simulasi	600 s
Protokol <i>routing</i>	AOMDV dan ND-AOMDV
Jumlah node	25, 75, 125, 175, 200, 225, 275
Protokol MAC	IEEE 802.11
Luas area	$1000 \times 1000 \text{ m}^2$
Model propagasi	<i>TwoRayGround</i>
Model mobilitas	<i>Random Waypoint</i>
Kecepatan node	25 m/s
Protokol transport	UDP
Jenis trafik	CBR (<i>constant bit rate</i>)
Ukuran paket	512 byte
Laju transmisi	2 Mbps
Ambang kepadatan (k)	11

3.6. Metrik Evaluasi dan Cara Analisis

Alur analisis ditunjukkan pada Gambar 6. Skrip AWK disusun untuk mengekstraksi nilai metrik dari *trace file* setiap skenario. Nilai yang diperoleh

kemudian disajikan dalam bentuk grafik dan tabel, lalu dibandingkan antara AOMDV standar dan ND-AOMDV pada setiap tingkat kepadatan node. Keempat metrik yang digunakan didefinisikan sebagai berikut.



Gambar 6. Diagram alir cara analisis

Throughput menyatakan jumlah data yang berhasil diterima node tujuan per satuan waktu dalam satuan kbps, seperti pada Persamaan (3), dengan B_r adalah ukuran paket data yang diterima (byte), serta t_{start} dan t_{stop} adalah waktu awal dan akhir pengiriman data (s).

$$\text{Throughput} = \frac{\sum B_r \times 8}{(t_{stop} - t_{start}) \times 1000} \quad (3)$$

Packet Delivery Ratio (PDR) menyatakan persentase paket data yang berhasil diterima node tujuan terhadap paket data yang dikirim node sumber, seperti pada Persamaan (4), dengan P_r adalah jumlah paket data yang diterima dan P_s adalah jumlah paket data yang dikirim.

$$\text{PDR} = \frac{\sum P_r}{\sum P_s} \times 100\% \quad (4)$$

End-to-end delay menyatakan waktu rata-rata yang dibutuhkan paket data untuk sampai dari node sumber ke node tujuan, seperti pada Persamaan (5), dengan $t_{r,j}$ dan $t_{s,j}$ adalah waktu penerimaan dan pengiriman paket ke- j , serta N adalah jumlah paket data yang diterima.

$$D = \frac{\sum_{j=1}^N (t_{r,j} - t_{s,j})}{N} \quad (5)$$

Routing overhead menyatakan beban paket kontrol *routing*, yaitu rasio antara jumlah paket *routing* (RREQ, RREP, dan RERR) $P_{routing}$ terhadap jumlah paket data yang diterima, seperti pada Persamaan (6). Semakin kecil nilainya, semakin ringan beban *routing* pada jaringan.

$$\text{RO} = \frac{\sum P_{routing}}{\sum P_r} \quad (6)$$

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Implementasi ND-AOMDV

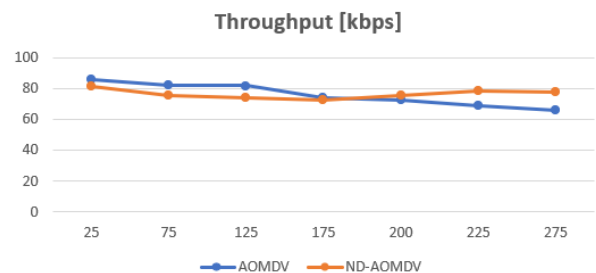
ND-AOMDV diimplementasikan dengan memodifikasi kode sumber protokol AOMDV pada NS-2.35 menggunakan bahasa pemrograman C++, khususnya pada berkas `aomdv.cc` dan `aomdv.h`. Modifikasi difokuskan pada bagian penanganan RREQ di node perantara. Pada AOMDV standar, node

perantara yang menerima RREQ membentuk *reverse path*, kemudian meneruskan RREQ ke seluruh tetangganya hingga paket mencapai node tujuan. Pada ND-AOMDV, sebelum RREQ diteruskan, node terlebih dahulu menghitung jumlah tetangga aktif di sekitarnya dan menerapkan aturan seleksi pada Persamaan (1) dan (2). Dengan demikian, hanya node yang memenuhi kriteria yang meneruskan RREQ, sehingga penyebaran paket kontrol pada wilayah yang padat menjadi lebih terkendali.

4.2. Hasil Simulasi

Simulasi dijalankan untuk AOMDV standar dan ND-AOMDV pada tujuh tingkat kepadatan node, yaitu 25 hingga 275 node, dengan skenario yang sama agar perbandingan kedua protokol adil. *Trace file* setiap skenario dianalisis menggunakan skrip AWK untuk memperoleh nilai *throughput*, PDR, *end-to-end delay*, dan *routing overhead* sesuai Persamaan (3) hingga (6). Hasil perbandingan disajikan pada Gambar 7 hingga Gambar 10, sedangkan nilai pada titik-titik kepadatan kunci diringkas pada Tabel IV.

4.2.1. Throughput



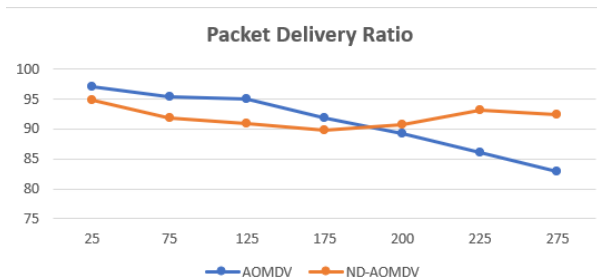
Gambar 7. Grafik perbandingan *throughput*

Gambar 7 menunjukkan perbandingan *throughput* AOMDV standar dan ND-AOMDV. Semakin tinggi nilai *throughput*, semakin baik kemampuan jaringan dalam mengirimkan data. Pada 25 hingga 175 node, *throughput* AOMDV standar sedikit lebih tinggi daripada ND-AOMDV. Pada kepadatan ini, *flooding* RREQ pada AOMDV standar belum membebani jaringan secara berarti dan justru membantu ditemukannya lebih banyak kandidat rute. Sebaliknya, pembatasan penerusan RREQ pada ND-AOMDV belum diperlukan sehingga justru mempersempit proses pencarian rute.

Kurva kedua protokol bersilangan pada rentang 175 hingga 200 node. Mulai 200 node, *throughput* ND-AOMDV lebih tinggi dan relatif stabil hingga 275 node, sedangkan *throughput* AOMDV standar terus menurun. Hal ini menunjukkan bahwa pada jaringan padat, beban paket kontrol akibat *flooding* RREQ mulai mengurangi kapasitas kanal yang tersedia bagi paket

data. Mekanisme seleksi pada ND-AOMDV mampu menahan penurunan tersebut karena tidak semua node meneruskan RREQ.

4.2.2. Packet delivery ratio

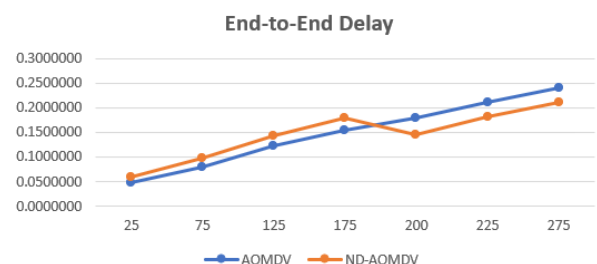


Gambar 8. Grafik perbandingan *packet delivery ratio*

Gambar 8 menunjukkan perbandingan PDR kedua protokol. Semakin tinggi nilai PDR, semakin baik kemampuan protokol dalam menjaga keberhasilan pengiriman paket. Pada 25 hingga 175 node, PDR AOMDV standar lebih tinggi daripada ND-AOMDV; misalnya, pada 25 node AOMDV standar memperoleh PDR 97,1%, sedangkan ND-AOMDV 95,3%. Pada kondisi ini, penyebaran RREQ secara penuh masih menguntungkan proses pencarian rute, sedangkan pembatasan RREQ pada ND-AOMDV mengurangi peluang ditemukannya rute.

Kurva PDR bersilangan pada rentang 175 hingga 200 node. Pada 175 node, PDR AOMDV standar masih lebih tinggi, yaitu 91,8% dibandingkan 90,07% pada ND-AOMDV. Pada 200 node, kondisi berbalik: PDR ND-AOMDV meningkat menjadi 91,03%, sedangkan AOMDV standar turun menjadi 89,2%. Setelah titik ini, PDR AOMDV standar terus menurun hingga 82,9% pada 275 node, sedangkan ND-AOMDV tetap berada di atas 90% dan mencapai 92,37% pada 275 node. Dengan paket kontrol yang lebih terkendali, kanal nirkabel tidak terlalu sesak sehingga paket data memiliki peluang lebih besar untuk sampai ke tujuan.

4.2.3. End-to-end delay



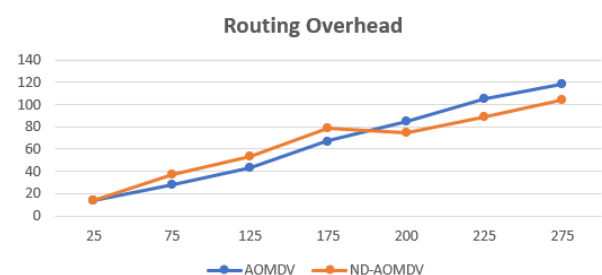
Gambar 9. Grafik perbandingan *end-to-end delay*

Gambar 9 menunjukkan perbandingan *end-to-end delay* kedua protokol. Pada metrik ini, nilai yang lebih

kecil menunjukkan kinerja yang lebih baik. Delay AOMDV standar meningkat secara konsisten dari 0,048058 s pada 25 node menjadi 0,240394 s pada 275 node, atau sekitar lima kali lipat. Peningkatan ini terjadi karena semakin banyak node yang meneruskan RREQ, sehingga paket data harus bersaing dengan paket kontrol untuk mengakses kanal.

Pada 25 hingga 175 node, *delay* ND-AOMDV lebih tinggi daripada AOMDV standar; misalnya, pada 175 node *delay* ND-AOMDV sebesar 0,179841 s, sedangkan AOMDV standar 0,153528 s. Pada kepadatan rendah hingga menengah, pembatasan penerusan RREQ mengurangi jumlah jalur alternatif yang terbentuk, sehingga rute yang ditemukan tidak selalu merupakan rute terpendek dan proses *route discovery* lebih sering perlu diulang ketika rute terputus. Kondisi ini diduga memperpanjang waktu tunggu paket data sebelum rute tersedia. Pola tersebut berbalik pada 200 node, ketika *delay* ND-AOMDV turun menjadi 0,147144 s, sedangkan *delay* AOMDV standar naik menjadi 0,180035 s. Pada 275 node, *delay* ND-AOMDV sebesar 0,208582 s, atau 13,2% lebih rendah daripada AOMDV standar.

4.2.4. Routing overhead



Gambar 10. Grafik perbandingan *routing overhead*

Gambar 10 menunjukkan perbandingan *routing overhead* kedua protokol. Nilai ini dihitung menggunakan Persamaan (6) sehingga tidak memiliki satuan, dan nilai yang lebih kecil menunjukkan beban *routing* yang lebih ringan. *Routing overhead* kedua protokol meningkat seiring bertambahnya jumlah node, karena semakin banyak node yang berpotensi terlibat dalam proses pencarian rute sehingga semakin banyak pula paket kontrol yang beredar.

Pada 25 hingga 175 node, *routing overhead* ND-AOMDV lebih tinggi daripada AOMDV standar; pada 175 node, misalnya, nilainya 78,426 dibandingkan 67,136. Karena *routing overhead* dihitung relatif terhadap jumlah paket data yang diterima, nilai PDR ND-AOMDV yang lebih rendah pada kepadatan ini turut memperbesar rasio tersebut. Selain itu, rute yang gagal ditemukan akibat pembatasan RREQ dapat

memicu pengiriman RREQ ulang oleh node sumber. Pola ini berbalik pada 200 node, ketika *routing overhead* AOMDV standar meningkat menjadi 85,223, sedangkan ND-AOMDV turun menjadi 75,003. Pada 275 node, *routing overhead* ND-AOMDV sebesar 103,374, atau 13,0% lebih rendah daripada AOMDV standar yang mencapai 118,813. Hasil ini menunjukkan bahwa pada kondisi node padat, mekanisme *node density* mampu mengurangi penyebaran RREQ yang berlebihan sehingga beban paket kontrol dapat ditekan.

4.3. Pembahasan Titik Peralihan Kinerja

Tabel IV merangkum nilai PDR, *end-to-end delay*, dan *routing overhead* pada 175, 200, dan 275 node, sedangkan nilai *throughput* dapat dilihat pada Gambar 7. Keempat metrik menunjukkan pola yang konsisten, yaitu AOMDV standar unggul pada kepadatan rendah hingga menengah, sedangkan ND-AOMDV unggul pada kepadatan tinggi, dengan titik peralihan pada rentang 175 hingga 200 node.

TABEL IV. RINGKASAN KINERJA PADA TITIK KEPADATAN KUNCI

Metrik	Node	AOMDV	ND-AOMDV
PDR (%)	175	91,8	90,07
	200	89,2	91,03
	275	82,9	92,37
Delay (s)	175	0,153528	0,179841
	200	0,180035	0,147144
	275	0,240394	0,208582
Routing overhead	175	67,136	78,426
	200	85,223	75,003
	275	118,813	103,374

Di bawah titik peralihan, manfaat pengurangan redundansi RREQ lebih kecil daripada kerugian akibat berkurangnya kandidat rute. Di atas titik tersebut, redundansi RREQ pada AOMDV standar menjadi dominan sehingga menambah beban kanal dan risiko *collision*, sesuai dengan fenomena *broadcast storm* yang dilaporkan pada [4] dan [10]. Pada kondisi ini, pembatasan penerusan RREQ pada ND-AOMDV memberikan manfaat yang lebih besar, yang terlihat dari PDR yang tetap di atas 90% serta *delay* dan *routing overhead* yang masing-masing 13,2% dan 13,0% lebih rendah pada 275 node. Temuan ini sejalan dengan [15] yang menunjukkan bahwa penyesuaian penerusan paket berdasarkan kepadatan tetangga efektif dalam mengurangi *overhead*. Perlu dicatat bahwa letak titik peralihan ini berlaku untuk skenario yang diuji, yaitu area $1000 \times 1000 \text{ m}^2$ dengan kecepatan node 25 m/s,

dan kemungkinan bergeser apabila luas area, pola mobilitas, atau nilai ambang k diubah.

4.4. Pengaruh Model Mobilitas terhadap Hasil

Seluruh hasil pada Subbab 4.2 diperoleh dengan model mobilitas Random Waypoint pada kecepatan 25 m/s. Model tersebut memiliki dua sifat yang perlu diperhatikan saat menafsirkan hasil. Pertama, sebaran node pada Random Waypoint tidak seragam karena peluang node berada di bagian tengah area lebih besar daripada di tepi [24]. Kedua, kecepatan rata-rata node cenderung menurun seiring berjalannya waktu simulasi apabila kecepatan minimum ditetapkan mendekati nol, sehingga bagian awal simulasi bersifat transien [25].

Kedua sifat tersebut berpengaruh langsung pada ND-AOMDV karena mekanisme yang diusulkan bekerja berdasarkan jumlah tetangga sesaat di sekitar node. Sebaran yang memusat di bagian tengah membuat kepadatan lokal bervariasi meskipun jumlah node keseluruhan tetap, sehingga node di bagian tengah memiliki tetangga jauh lebih banyak daripada node di tepi. Karena probabilitas penerusan dihitung dari jumlah tetangga masing-masing node, penekanan RREQ terjadi lebih kuat di wilayah padat dan tidak terjadi di wilayah jarang. Perilaku adaptif seperti ini tidak dapat diperoleh skema probabilistik dengan nilai probabilitas tetap. Sebaliknya, pada model mobilitas yang menghasilkan sebaran node lebih seragam, perbedaan kepadatan lokal mengecil sehingga keunggulan mekanisme ini diperkirakan juga mengecil.

Kecepatan node memengaruhi ketepatan jumlah tetangga yang dipakai dalam perhitungan. Pada kecepatan 25 m/s, komposisi tetangga dapat berubah dalam hitungan detik sehingga nilai Nb_i yang dipakai node dapat berbeda dari kondisi sebenarnya ketika RREQ diteruskan. Karena probabilitas penerusan berbentuk rasio k/Nb_i , kesalahan relatif pada jumlah tetangga menghasilkan kesalahan relatif yang sebanding pada p_i , sehingga pengaruhnya bersifat bertahap dan tidak menimbulkan perubahan perilaku yang mendadak. Selain itu, mobilitas tinggi memperbanyak putusnya link sehingga proses *route discovery* lebih sering diulang. Kondisi ini menaikkan *routing overhead* pada kedua protokol, tetapi pada kepadatan tinggi kenaikannya lebih besar pada AOMDV standar karena setiap pencarian rute disebarkan oleh seluruh node, sebagaimana terlihat pada Gambar 10.

Dengan demikian, letak titik peralihan pada rentang 175 sampai 200 node berlaku untuk kombinasi model Random Waypoint, kecepatan 25 m/s, dan area $1000 \times 1000 \text{ m}^2$ yang digunakan pada penelitian ini.

Royer dkk. [23] menunjukkan bahwa derajat node yang optimal bergeser mengikuti tingkat mobilitas, sehingga nilai k terbaik maupun letak titik peralihan berpotensi bergeser pada kecepatan atau model mobilitas yang berbeda, misalnya Manhattan Grid atau Reference Point Group Mobility yang menghasilkan pola kepadatan berkelompok [26]. Pengujian pada beberapa model mobilitas dan tingkat kecepatan menjadi bagian dari rencana penelitian lanjutan sebagaimana disampaikan pada Subbab 5.2.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil implementasi dan analisis simulasi yang telah dilakukan, AOMDV standar dan ND-AOMDV menunjukkan perbedaan kinerja pada beberapa kondisi kepadatan node. Pada parameter *throughput* dan *Packet Delivery Ratio* (PDR), AOMDV standar masih menunjukkan hasil yang lebih baik pada kondisi kepadatan node rendah hingga menengah. Namun, ketika jumlah node mulai bertambah, terutama pada rentang 200 hingga 275 node, ND-AOMDV mulai menunjukkan kinerja yang lebih baik karena mekanisme *Node Density* mulai bekerja dalam membatasi penyebaran RREQ.

Perubahan pola kinerja terlihat pada rentang 175 ke 200 node, yang dapat disebut sebagai titik peralihan. Pada titik ini, kinerja ND-AOMDV mulai melewati AOMDV standar. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa jaringan mulai memasuki kondisi padat, sehingga penyebaran RREQ secara bebas pada AOMDV standar mulai menambah beban jaringan. Sebaliknya, ND-AOMDV mulai lebih efektif karena tidak semua node langsung meneruskan RREQ, melainkan dipilih berdasarkan jumlah tetangga aktif di sekitarnya.

Pada parameter *end-to-end delay* dan *routing overhead*, pola yang hampir sama juga terlihat. AOMDV standar mengalami peningkatan *delay* dan *routing overhead* seiring bertambahnya jumlah node, sedangkan ND-AOMDV mulai menunjukkan nilai yang lebih rendah pada kondisi node tinggi, yaitu 200 hingga 275 node. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa metode *Node Density* lebih sesuai diterapkan pada jaringan dengan kepadatan node tinggi karena mampu membuat penyebaran paket RREQ menjadi lebih terkontrol, mengurangi beban *routing*, menekan *delay*, dan menjaga performa jaringan agar lebih stabil.

5.2. Saran

Pada penelitian selanjutnya, metode ND-AOMDV masih dapat dikembangkan dengan mencoba

beberapa kondisi simulasi yang lebih bervariasi, misalnya variasi kecepatan node, jumlah node, pola mobilitas, jenis trafik, ukuran area jaringan, dan jumlah koneksi aktif. Hal ini perlu dilakukan agar hasil penelitian tidak hanya bergantung pada satu skenario simulasi, tetapi dapat menunjukkan kinerja metode pada kondisi jaringan yang lebih beragam. Selain itu, mekanisme *Node Density* yang digunakan pada penelitian ini juga dapat disempurnakan dengan mempertimbangkan faktor lain, seperti arah pergerakan node, kecepatan node, kualitas jalur, energi node, atau kestabilan link. Dengan begitu, keputusan *forwarding* RREQ tidak hanya bergantung pada jumlah tetangga aktif, tetapi juga mempertimbangkan kondisi rute yang lebih sesuai dengan kebutuhan jaringan.

Penelitian selanjutnya juga disarankan untuk melakukan analisis pola grafik secara lebih mendalam pada setiap parameter pengujian, khususnya untuk melihat titik perubahan performa ketika jaringan mulai memasuki kondisi padat. Selain itu, metode ND-AOMDV dapat dibandingkan dengan metode optimasi *routing* lain atau pendekatan lainnya, sehingga efektivitas metode yang diusulkan dapat dinilai dengan lebih kuat.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Q. Wang dkk., "An overview of emergency communication networks," *Remote Sensing*, vol. 15, no. 6, art. 1595, 2023, doi: 10.3390/rs15061595.
- [2] D. G. Kampitaki dan A. A. Economides, "Adaptive probabilistic RREQ rebroadcasting using Thompson sampling for mobile ad hoc sensor networks," *Sensors*, vol. 26, no. 15, art. 4870, 2026, doi: 10.3390/s26154870.
- [3] A. J. T. Segara dan F. D. Adhinata, "Perancangan Mobile Ad-Hoc Network menggunakan optimasi routing AOMDV," *Jurnal Media Informatika Budidarma*, vol. 5, no. 4, 2021, doi: 10.30865/mib.v5i4.3352.
- [4] A. M. Eltahlawy, H. K. Aslan, E. G. Abdallah, M. S. Elsayed, dan M. A. Azer, "A survey on parameters affecting MANET performance," *Information Systems Security Management*, Concordia University of Edmonton, Apr. 2023.
- [5] M. W. Anjani dan H. Nurwarsito, "Pengaruh pergerakan node pada protokol routing Dynamic MANET On Demand (DYMO) dalam Mobile Ad-Hoc Network (MANET)," *Jurnal Pengembangan Teknologi Informasi dan Ilmu Komputer*, vol. 5, no. 1, hal. 105–114, 2021. [Daring]. Tersedia: <http://j-ptiik.ub.ac.id>
- [6] M. K. Marina dan S. R. Das, "Ad hoc on-demand

- multipath distance vector routing,” *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 6, no. 7, hal. 969–988, 2006, doi: 10.1002/wcm.432.
- [7] T. Hai dkk., “Enhanced security using multiple paths routine scheme in cloud-MANETs,” *Journal of Cloud Computing: Advances, Systems and Applications*, 2023, doi: 10.1186/s13677-023-00443-5.
- [8] K. Vinayakan, M. V. Srinath, dan A. Adhiselvam, “Security for multipath routing protocol using trust-based AOMDV in MANETs,” *Special Education*, vol. 2, no. 43, 2022.
- [9] I. Alameri, J. Komarkova, T. Al-Hadhrami, dan A. Lotfi, “Systematic review on modification to the ad-hoc on-demand distance vector routing discovery mechanics,” Nottingham Trent University, Sep. 2022.
- [10] N. Geetha, “Performance evaluation of multipath routing protocol (AOMDV) in mobile ad hoc networks,” dalam *Proc. ICCAP 2021*, Chennai, India, Des. 2021, doi: 10.4108/eai.7-12-2021.2314973.
- [11] Y.-C. Tseng, S.-Y. Ni, Y.-S. Chen, dan J.-P. Sheu, “The broadcast storm problem in a mobile ad hoc network,” *Wireless Networks*, vol. 8, no. 2/3, hal. 153–167, 2002, doi: 10.1023/A:1013763825347.
- [12] B. H. Khudayer, L. R. Alzabin, M. Anbar, R. M. Tawafak, T. A. Alamiedy, S. I. Malik, dan G. M. Alfarsi, “An optimizing rebroadcast mechanism for minimizing the control overhead in mobile ad-hoc networks,” *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, vol. 100, no. 8, Apr. 2022.
- [13] A. Al-Ahwal, “Performance prediction for AODV, AOMDV, and hybrid protocols in high-density networks,” *Engineering Research Journal*, vol. 51, no. 3, hal. 152–162, Jul. 2022.
- [14] P. Li, Y. Zeng, C. Li, L. Chen, H. Wang, dan C. Chen, “A probabilistic broadcasting scheme for emergent message dissemination in urban Internet of Vehicles,” *IEEE Access*, vol. 9, hal. 113187–113198, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3103843.
- [15] X. Li, X. Bian, dan M. Li, “Routing selection algorithm for mobile ad hoc networks based on neighbor node density,” *Sensors*, vol. 24, no. 2, hal. 325, Jan. 2024, doi: 10.3390/s24020325.
- [16] X. Cai, H. Qian, dan J. Wang, “The AODV routing protocol based on probabilistic flooding and multi-constraint fusion strategy,” dalam *Proc. 2025 3rd Int. Conf. Communication Networks and Machine Learning (CNML '25)*, 2025, hal. 298–303, doi: 10.1145/3728199.3728248.
- [17] M. Kamarunisha dan S. Vimalanand, “Traffic congestion minimization and reliable data transmission in enhanced fast forwarding AOMDV (FF-AOMDV) in mesh-based multipath architecture in MANET,” *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*, 2024.
- [18] Y. Deng dan Z. Tang, “On-demand routing algorithm for multipath selection based on node load states in mobile ad hoc networks,” *Wireless Networks*, vol. 31, no. 2, hal. 1763–1782, 2025, doi: 10.1007/s11276-024-03849-4.
- [19] M. R. D. Pramudya, A. H. Jatmika, dan R. B. Huwae, “Pencarian rute berdasarkan jarak node terdekat dan efisiensi energi pada protokol routing AOMDV di jaringan MANET,” *Teknimedia*, vol. 6, no. 1, hal. 104–111, Jun. 2025.
- [20] B. Hairani, A. H. Jatmika, dan F. Bimantoro, “Penerapan algoritma EA-SHORT pada protokol routing AOMDV untuk menemukan rute yang handal berbasis energi di jaringan MANET,” *Jurnal Teknologi Informasi, Komputer, dan Aplikasinya (JTika)*, vol. 3, no. 1, hal. 13–23, 2021, doi: 10.29303/jtika.v3i1.110.
- [21] M. Malnar dan N. Jevtic, “An improvement of AODV protocol for the overhead reduction in scalable dynamic wireless ad hoc networks,” *Wireless Networks*, vol. 28, no. 3, hal. 1039–1051, 2022, doi: 10.1007/s11276-022-02890-5.
- [22] L. Kleinrock dan J. Silvester, “Optimum transmission radii for packet radio networks or why six is a magic number,” dalam *Proc. IEEE National Telecommunications Conference*, 1978.
- [23] E. M. Royer, P. M. Melliar-Smith, dan L. E. Moser, “An analysis of the optimum node density for ad hoc mobile networks,” dalam *Proc. IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Helsinki, Finlandia, Jun. 2001, doi: 10.1109/ICC.2001.937360.
- [24] C. Bettstetter, G. Resta, dan P. Santi, “The node distribution of the random waypoint mobility model for wireless ad hoc networks,” *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol. 2, no. 3, hal. 257–269, 2003, doi: 10.1109/TMC.2003.1233531.
- [25] J. Yoon, M. Liu, dan B. Noble, “Random waypoint considered harmful,” dalam *Proc. IEEE INFOCOM*, San Francisco, CA, USA, 2003.
- [26] T. Camp, J. Boleng, dan V. Davies, “A survey of mobility models for ad hoc network research,” *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2, no. 5, hal. 483–502, 2002, doi: 10.1002/wcm.72.