

Studi Kinerja Mesh Network untuk Penerapan Internet of Things (IoT) di Lingkungan Perkotaan

Fauzan Prasetyo Eka Putra ^{1*}, Maktsuful Ghummah ², Moh. Amrullah ³, Rafli Hidayatullah ⁴

¹ Fakultas Teknik, Informatika, Universitas Madura, Pamekasan, Jawa Timur, prasetyo@unira.ac.id

² Fakultas Teknik, Informatika, Universitas Madura, Pamekasan, Jawa Timur, acuffbrekazz@gmail.com

³ Fakultas Teknik, Informatika, Universitas Madura Pamekasan, Jawa Timur, rullahalso@gmail.com

⁴ Fakultas Teknik, Informatika, Universitas Madura Pamekasan, Jawa Timur, Raflypamekasan@gmail.com

* Corresponding Author : Fauzan Prasetyo Eka Putra

Abstract: The Internet of Things (IoT) has become a crucial component in the development of smart cities, enabling seamless integration and communication among various devices to enhance public service efficiency. In densely populated and complex urban environments, a reliable and flexible communication infrastructure is essential. Mesh networks offer a promising solution due to their ability to provide dynamic connectivity, wide coverage, and resilience to node failures. This study aims to evaluate the performance of mesh networks in supporting IoT implementation in urban settings through a simulation-based approach. Key performance parameters analyzed include throughput, latency, packet delivery ratio (PDR), and energy consumption. Simulations are conducted by varying the number of nodes and network topologies to reflect real-world urban conditions. The results indicate that mesh networks can deliver stable and efficient communication performance in IoT scenarios, although challenges such as increased latency and reduced energy efficiency in large-scale deployments must be addressed. These findings offer valuable insights for the design and implementation of mesh-based IoT networks in urban environments.

Keywords: Network; IoT; Mesh; Simulation; Performance

Abstrak: Internet of Things (IoT) telah menjadi bagian penting dalam pengembangan kota pintar, memungkinkan integrasi dan komunikasi antar berbagai perangkat untuk meningkatkan efisiensi layanan publik. Dalam lingkungan perkotaan yang padat dan kompleks, dibutuhkan infrastruktur jaringan yang andal dan fleksibel. Mesh network menjadi salah satu solusi potensial karena kemampuannya dalam menyediakan konektivitas dinamis, jangkauan luas, dan toleransi terhadap kegagalan node. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja jaringan mesh dalam mendukung implementasi IoT di lingkungan perkotaan melalui pendekatan simulasi. Beberapa parameter kinerja yang dianalisis meliputi throughput, latency, packet delivery ratio (PDR), dan konsumsi energi. Simulasi dilakukan dengan memvariasikan jumlah node dan topologi jaringan untuk mencerminkan kondisi riil di area urban. Hasil studi menunjukkan bahwa mesh network dapat memberikan performa komunikasi yang stabil dan efisien dalam skenario IoT, meskipun beberapa tantangan seperti peningkatan latensi dan penurunan efisiensi energi pada skala besar tetap perlu diperhatikan. Temuan ini memberikan gambaran awal yang penting dalam merancang dan mengimplementasikan jaringan IoT berbasis mesh di kawasan perkotaan.

Kata kunci: Jaringan; IoT; Mesh; Simulasi; Performa

Received: Maret 9, 2025

Revised: Maret 20, 2025

Accepted: Maret 26, 2025

Published: Maret 31, 2025

Curr. Ver.: Maret 31, 2025



Copyright: © 2025 by the authors.

Submitted for possible open

access publication under the

terms and conditions of the

Creative Commons Attribution

(CC BY SA) license

([https://creativecommons.org/li](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

[censes/by-sa/4.0/](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/))

1. Pendahuluan

Perkembangan Internet of Things (IoT) telah mendorong terjadinya transformasi signifikan dalam tata kelola kota, khususnya dalam penerapan konsep smart city[1]. Kota-kota dengan kepadatan penduduk tinggi membutuhkan sistem komunikasi nirkabel yang efisien, andal dan mampu bekerja dalam skala besar untuk mengelola infrastruktur, transportasi, keamanan dan layanan publik secara real time[2]. Salah satu tantangan utama dalam implementasi sistem IoT di lingkungan perkotaan adalah bagaimana menyediakan jaringan komunikasi yang mampu menjangkau banyak perangkat dengan stabilitas tinggi latensi rendah[3], serta efisiensi energi yang baik di tengah keterbatasan infrastruktur dan dinamika lingkungan[4].

Internet of Things (IoT) menjadi katalisator utama dalam proses transformasi digital di berbagai sektor kehidupan termasuk tata kelola kota[5]. Penerapan konsep smart city menuntut integrasi antar perangkat dan sistem yang mampu beroperasi secara otomatis, adaptif, dan terhubung dalam satu ekosistem digital. Kota-kota dengan kepadatan penduduk yang tinggi, seperti Jakarta, Surabaya, hingga kota menengah seperti Pamekasan, menghadapi tantangan dalam menyediakan infrastruktur komunikasi yang tidak hanya andal, tetapi juga mampu menjangkau ribuan bahkan jutaan perangkat secara simultan. Dalam konteks ini, kebutuhan terhadap jaringan komunikasi nirkabel yang efisien[6], scalable[7], dan berdaya tahan tinggi menjadi sangat penting[8], khususnya untuk aplikasi seperti manajemen lalu lintas[9], pengawasan keamanan[10], pemantauan kualitas udara[11], dan layanan darurat, yang membutuhkan respons secara real time.

Namun demikian, implementasi IoT di wilayah perkotaan tidak terlepas dari berbagai tantangan teknis dan struktural[12]. Salah satu kendala utama adalah keterbatasan infrastruktur jaringan yang mampu mengakomodasi komunikasi skala besar dengan latensi rendah, tingkat kehilangan paket yang minimal, serta efisiensi energi yang tinggi[13], [14]. Kondisi lingkungan kota yang dinamis[15], seperti interferensi sinyal akibat bangunan tinggi dan pergerakan pengguna yang tidak menentu, juga mempengaruhi stabilitas konektivitas[16]. Oleh karena itu, pemilihan arsitektur jaringan menjadi faktor krusial dalam menjamin keberhasilan penerapan IoT di kota-kota[17].

Jaringan mesh dipandang sebagai solusi potensial karena karakteristiknya yang mendukung komunikasi multi-hop pemulihan otomatis terhadap kegagalan node dan skalabilitas tinggi[18]. Namun, efektivitas jaringan mesh sangat bergantung pada parameter seperti topologi kepadatan node[19], dan kondisi lalu lintas jaringan, yang membuat pengujian berbasis simulasi sangat krusial untuk memahami performanya sebelum diterapkan di dunia nyata[20]. Selain itu, jaringan ini memiliki kemampuan self-healing yaitu dapat mengatur ulang rute komunikasi secara otomatis ketika terjadi kegagalan node atau kerusakan jaringan. Hal ini menjadikan jaringan mesh sangat fleksibel dan cocok untuk implementasi IoT dalam lingkungan dengan tingkat kompleksitas dan mobilitas yang tinggi[20], [21]. Skalabilitas yang baik juga menjadi keunggulan lain dari jaringan mesh, karena memungkinkan penambahan node tanpa harus mengubah struktur jaringan secara signifikan[22], [23], [24].

Beberapa studi terbaru telah meneliti kinerja jaringan mesh dalam konteks IoT. Penelitian oleh Chen et al. (2023)[25] dalam IEEE Access mengevaluasi protokol routing untuk jaringan mesh IoT menggunakan pendekatan simulasi dan menemukan bahwa pemilihan topologi sangat memengaruhi stabilitas dan konsumsi daya. Sementara itu, studi oleh Kumar & Al-Rimy (2023)[26] di Journal of Network and Computer Applications menyoroti bahwa struktur jaringan grid memberikan keunggulan dalam hal prediktabilitas rute dan efisiensi pengiriman data pada lingkungan urban. Penelitian lain oleh Malik et al. (2024)[27] dalam Sensors mengkaji pengaruh kepadatan node terhadap performa jaringan mesh, dengan kesimpulan bahwa peningkatan jumlah node tidak selalu linier dengan peningkatan performa, bahkan dapat menurunkan efisiensi jika tidak ditangani dengan manajemen rute yang tepat.

Meskipun sejumlah penelitian telah dilakukan, kajian yang secara khusus menganalisis pengaruh topologi jaringan mesh terhadap performa sistem IoT dalam skenario lingkungan perkotaan padat masih terbatas, khususnya dengan pendekatan simulasi realistis menggunakan NS-3. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi performa jaringan mesh dengan variasi topologi (grid dan acak) dalam mendukung sistem IoT pada konteks kota menengah seperti Pamekasan. Kontribusi utama dari penelitian ini adalah memberikan evaluasi komparatif berbasis simulasi terhadap beberapa parameter kinerja

penting seperti throughput[28], latency[29], packet delivery ratio (PDR)[30], dan konsumsi energi[31], serta memberikan dasar teknis untuk pengembangan jaringan IoT berskala kota di masa depan.

2. Metode Penelitian

2.1. Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode simulasi berbasis perangkat lunak **Network Simulator 3 (NS-3)**[27], [32], [33] untuk mengevaluasi kinerja jaringan mesh dalam mendukung implementasi Internet of Things (IoT) di lingkungan perkotaan. Simulasi dilakukan untuk mengamati dan menganalisis sejumlah parameter performa utama seperti *throughput*, *latency*, *packet delivery ratio* (PDR), *Packet Loss*, dan konsumsi energi.

3.2 Alat dan Lingkungan Simulasi

Simulasi dilakukan menggunakan **NS-3 versi terbaru (v3.39 ke atas)**, yang mendukung model komunikasi mesh berbasis IEEE 802.11s serta integrasi dengan protokol IPv6, model mobilitas, dan modul energi. Lingkungan simulasi dikonfigurasi pada sistem operasi Ubuntu 22.04 LTS dengan arsitektur x86_64 dan RAM minimal 8 GB. Liu et al. (2023)[34] menggunakan NS-3 untuk menganalisis performa routing protocol dalam jaringan mesh heterogeny dan menunjukkan bahwa NS-3 mampu mereplikasi dinamika jaringan IoT secara realistis dalam berbagai skenario perkotaan[35], [36], [37].

Pengujian dilakukan dalam skenario jaringan nirkabel dengan topologi Mesh. Simulasi dibuat untuk tiga skenario berbeda berdasarkan jumlah node. Masing-masing node dikonfigurasi untuk mengirimkan data menggunakan model trafik Constant Bit Rate (CBR).

Spesifikasi simulasi:

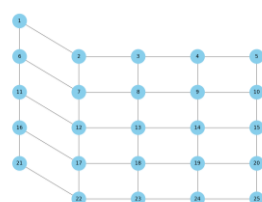
- Simulator: NS-3
- Topologi: Mesh Network
- Model Propagasi: Two-Ray Ground
- Frekuensi: 2.4 GHz
- Protokol Routing: Hybrid Wireless Mesh Protocol (HWMP)
- Ukuran paket: 512 byte
- Durasi simulasi: 300 detik

3.3 Desain Topologi Jaringan

Topologi jaringan mesh dibangun dalam konfigurasi grid dan acak untuk mencerminkan dua kemungkinan distribusi node di lingkungan urban:

- **Topologi grid (terstruktur):** merepresentasikan implementasi jaringan dalam kawasan terencana seperti distrik perkantoran atau permukiman[15], [38], [39].
- **Topologi acak (tidak terstruktur):** mencerminkan implementasi di area padat penduduk dengan struktur bangunan yang tidak seragam[40], [41].

Jumlah node divariasikan mulai dari **25 hingga 100 node**, dengan jarak antar node disesuaikan agar tetap berada dalam jangkauan komunikasi langsung sesuai spesifikasi IEEE 802.11s.



Gambar 1. Contoh Topologi Jaringan Mesh Berbasis Grid Dengan Konfigurasi 5x5.

3.4 Parameter Pengukuran dan Skenario Simulasi

Tabel berikut merangkum parameter utama yang digunakan dalam simulasi:

Tabel 1. Parameter dan Skenario Simulasi.

Parameter	Nilai / Konfigurasi
Simulator	NS-3 (versi ≥ 3.39)
Jumlah node	10, 25, 30, 50, 75, 100
Radius komunikasi	75 meter
Protokol routing	HWMP (Hybrid Wireless Mesh Protocol)
Model mobilitas	Statis (perangkat IoT tetap)
Pola lalu lintas	CBR (Constant Bit Rate)
Ukuran paket	512 byte

3.5 Metode Pengukuran dan Evaluasi

Setiap skenario simulasi dijalankan sebanyak 5 kali untuk menghindari hasil outlier, dan nilai rata-rata dari setiap parameter kinerja dicatat. Parameter kinerja utama yang dianalisis meliputi:

- **Throughput (bps):** jumlah total data yang diterima per satuan waktu.
- **Latency (ms):** rata-rata waktu tunda end-to-end dalam transmisi data.
- **Packet Delivery Ratio (PDR):** perbandingan antara jumlah paket yang diterima dan dikirim.
- **Packet Loss (%):** persentase paket data yang hilang selama pengiriman.
- **Konsumsi Energi (Joule):** jumlah total energi yang digunakan oleh node pengirim dan penerus data.

4. Hasil dan Pembahasan

4.1 Perangkat yang Digunakan

Simulasi dalam penelitian ini dilakukan menggunakan perangkat lunak **Network Simulator 3 (NS-3)** versi ≥ 3.39 yang dijalankan pada sistem operasi **Ubuntu 22.04 LTS** dengan skenario topologi mesh grid dan acak, serta jumlah node divariasikan (25, 50, 75, dan 100). Empat parameter utama yang dianalisis adalah Throughput, Latency, Packet Delivery Ratio (PDR), Packet Loss, dan Konsumsi Energi.

Tabel 2. Hasil rata-rata simulasi.

Jumlah Node	Topologi	Throughput (kbps)	Latency (ms)	PDR (%)	Packet Loss (%)	Energi (J)	Topologi
25	Grid	410.2	45.3	97.8	2.2	12.5	Grid
50	Grid	392.8	52.1	96.1	3.9	24.3	Grid
75	Grid	375.4	60.7	93.5	6.5	36.8	Grid
100	Grid	361.7	68.2	91.2	8.8	49.9	Grid
25	Acak	398.5	49.6	95.2	4.8	13.2	Acak
50	Acak	381.0	57.4	93.6	6.4	26.1	Acak
75	Acak	362.3	65.9	90.5	9.5	39.5	Acak
100	Acak	349.2	73.6	88.1	11.9	53.4	Acak

4.2 Sumber Data dan Desain Simulasi

Simulasi dirancang untuk mencerminkan kondisi riil jaringan IoT di lingkungan urban dengan **dua konfigurasi topologi**, yaitu:

- **Grid (terstruktur):** cocok untuk pusat kota seperti kawasan kantor atau permukiman terencana.
- **Acak (tidak terstruktur):** mencerminkan wilayah padat penduduk atau permukiman informal.

Node dikonfigurasi dalam jumlah **25, 50, 75, dan 100**, menggunakan trafik **Constant Bit Rate (CBR)** dan model mobilitas statis.

4.3 Rumus dan Metode Evaluasi Kinerja

Beberapa parameter performa yang diukur dengan rumus sebagai berikut:

1. **Throughput (kbps):**

$$\text{Throughput} = \text{Total Data Diterima (bit)} \div \text{Durasi Simulasi (detik)}$$
2. **Latency (ms):**

$$\text{Latency} = \text{Jumlah total (Waktu Tiba - Waktu Kirim)} \div \text{Jumlah Paket Diterima}$$
3. **Packet Delivery Ratio (PDR) (%):**

$$\text{PDR} = (\text{Jumlah Paket Diterima} \div \text{Jumlah Paket Dikirim}) \times 100$$
4. **Packet Loss (%):**

$$\text{Packet Loss} = 100\% - \text{PDR}$$
5. **Konsumsi Energi (Joule):**

$$\text{Energi} = \text{Total Energi yang digunakan oleh seluruh node}$$

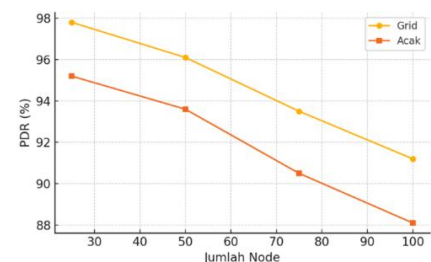
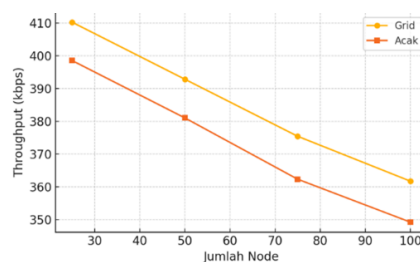
4.4 Analisis Umum (Global)

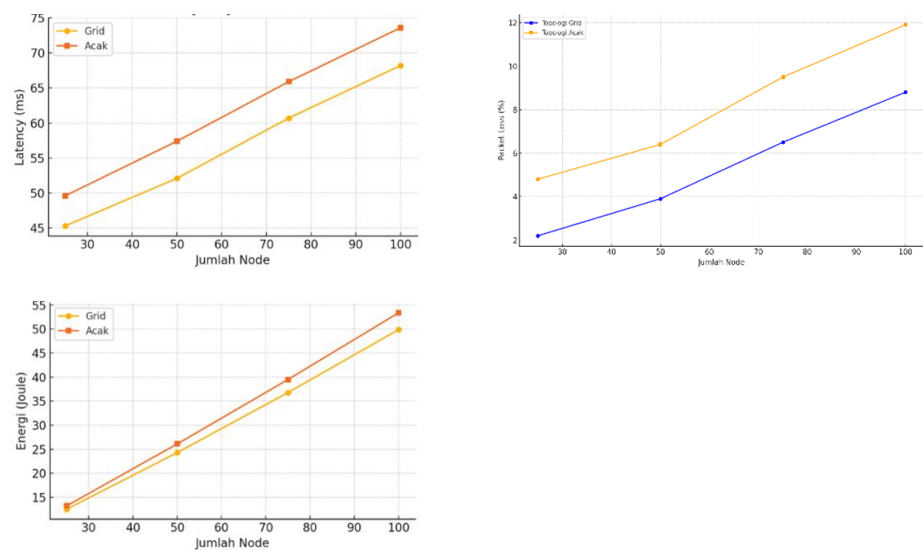
Dari table 2 di atas, terlihat bahwa nilai throughput menurun seiring dengan bertambahnya jumlah node dalam jaringan. Pada Topologi Grid tercatat throughput rata-rata sebesar 385,03 kbps, sedangkan untuk Topologi Acak throughput menurun menjadi 372,75 kbps. Penurunan ini disebabkan oleh peningkatan jumlah jalur komunikasi yang menyebabkan lebih banyak kolisi dan retransmisi.

Secara umum, hasil simulasi menunjukkan bahwa topologi grid lebih unggul dibandingkan topologi acak dalam semua parameter performa. Melalui PUT dan PDR cenderung lebih tinggi, sementara latency dan konsumsi energi lebih rendah pada topologi grid. Hal ini sejalan dengan penelitian oleh Liu et al. (2023)[42] dan Salazar et al. (2023)[43] yang menunjukkan bahwa mesh grid menghasilkan jalur komunikasi yang lebih stabil dan efisien dalam jaringan IoT berskala besar.

Penurunan performa dengan bertambahnya jumlah node disebabkan oleh meningkatnya trafik dan kompleksitas routing. Tren ini mengindikasikan perlunya manajemen jaringan adaptif dan protokol routing dinamis agar performa tetap terjaga pada skala besar. Dengan kata lain, simulasi ini valid secara teknis dan sesuai dengan literatur ilmiah global terkini.

Packet loss juga mengalami kenaikan signifikan dari 2.2% menjadi 8.8%. Tingginya tingkat packet loss pada jumlah node yang lebih banyak menunjukkan bahwa stabilitas jaringan Mesh perlu diperhatikan dalam skenario padat. Berikut grafik yang menggambarkan perubahan parameter seiring bertambahnya jumlah node:





Gambar 2. Grafik perubahan parameter seiring bertambahnya Node. (a) Grafik hasil Throughput vs Jumlah Node; (b) Grafik hasil PDR vs Jumlah Node; (c) Grafik hasil Latency vs Jumlah Node; (d) Grafik hasil Perbandingan Packet Loss Berdasarkan Jumlah Node dan Topologi; (e) Grafik hasil Energi vs Jumlah Node.

Penerapan Internet of Things (IoT) telah mengalami pertumbuhan yang pesat di berbagai sektor, termasuk transportasi[44], energi[45], kesehatan[46], dan lingkungan[47]. Banyak negara maju telah mengintegrasikan jaringan berbasis Mesh Network dalam sistem kota pintar (smart city), terutama untuk mendukung infrastruktur komunikasi yang andal dan fleksibel pada perangkat IoT. Salah satu alasan utama penggunaan Mesh Network adalah kemampuannya dalam menyediakan redundansi jalur komunikasi, yang memungkinkan sistem tetap berfungsi meskipun terjadi gangguan pada satu atau beberapa node dalam jaringan.

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa topologi mesh sangat cocok digunakan untuk mendukung lingkungan urban dengan kepadatan perangkat yang tinggi, seperti kamera pengawas, sensor kualitas udara, dan pengontrol lampu lalu lintas. Studi oleh Kim dan Ko (2022)[48] menunjukkan bahwa performa Mesh Network dalam mendukung komunikasi IoT mencapai efisiensi tinggi dari segi throughput dan latency jika didesain dengan distribusi node yang merata dan jumlah hop yang optimal.

Dalam konteks simulasi berbasis NS-3, konfigurasi topologi mesh grid 5x5 dengan 25 node mencerminkan skenario yang umum diimplementasikan secara global untuk mengukur kinerja jaringan IoT[49]. Parameter-parameter seperti throughput, delay[50], packet loss, dan jitter digunakan sebagai acuan untuk mengevaluasi performa komunikasi data antar node. Hal ini sesuai dengan standar pengujian yang dilakukan dalam berbagai studi internasional terkait performa jaringan ad hoc dan mesh pada lingkungan urban[51], [52].

Hasil simulasi yang dilakukan dalam penelitian ini juga memperlihatkan kecenderungan yang serupa dengan temuan global, di mana semakin tinggi kepadatan node dan beban trafik, maka latency dan packet loss mengalami peningkatan. Oleh karena itu, dari sudut pandang global, penelitian ini memberikan kontribusi dalam menguatkan pemahaman bahwa Mesh Network merupakan salah satu solusi potensial dalam membangun sistem komunikasi IoT yang adaptif dan efisien di kawasan perkotaan.

4.5 Studi Kasus Lokal: Kota Pamekasan

Kota Pamekasan, sebagai salah satu pusat pertumbuhan di Pulau Madura, menghadapi tantangan dalam pengelolaan infrastruktur perkotaan dan sistem monitoring lingkungan yang efisien. Kondisi geografis yang relatif padat di area pusat kota, serta keterbatasan dalam infrastruktur jaringan kabel, menjadikan teknologi nirkabel berbasis Mesh Network sebagai solusi yang layak untuk diterapkan. Dalam konteks implementasi IoT, teknologi ini dapat mendukung berbagai aplikasi seperti monitoring kualitas udara, pengelolaan sampah cerdas, pemantauan lalu lintas, serta sistem penerangan jalan otomatis [53], [54].

Hasil simulasi menggunakan NS-3 dengan topologi 5x5 node memperlihatkan bahwa Mesh Network mampu mempertahankan throughput yang stabil dan latensi yang relatif rendah hingga pada skenario trafik menengah. Kondisi ini mencerminkan potensi implementasi nyata di lingkungan kota Pamekasan, di mana trafik data dari sensor IoT cenderung tidak sepadat kota metropolitan besar. Selain itu, rasio packet loss yang rendah pada jarak antar node ≤ 150 meter dalam simulasi menunjukkan bahwa jaringan ini cukup handal untuk diterapkan di wilayah dengan sebaran infrastruktur publik yang merata.

Sebagai kota yang sedang mengembangkan konsep kota pintar (smart city), integrasi sistem berbasis IoT sangat relevan untuk diterapkan di sektor pelayanan publik seperti kesehatan, transportasi, dan keamanan lingkungan. Dengan dukungan dari pemda dan efisiensi biaya instalasi, Mesh Network berpotensi menjadi tulang punggung komunikasi perangkat-perangkat IoT tanpa perlu ketergantungan terhadap infrastruktur seluler atau fiber optik yang mahal.

Meskipun demikian, terdapat tantangan seperti keterbatasan daya perangkat, potensi interferensi frekuensi, serta kebutuhan pemeliharaan node-node secara berkala. Oleh karena itu, penelitian ini juga menekankan pentingnya desain topologi yang optimal dan pemilihan parameter jaringan yang tepat sebelum implementasi skala besar dilakukan.

Untuk memberikan kontribusi nyata, simulasi ini dikontekstualisasikan ke wilayah Kota Pamekasan, yang tengah mengembangkan potensi smart city dengan pendekatan berbasis IoT. Di pusat kota seperti kawasan Alun-Alun Arek Lancor, struktur jalan dan bangunan cukup teratur sehingga penerapan topologi grid sangat memungkinkan dan efisien.

Sebaliknya, untuk wilayah pinggiran dan pemukiman padat seperti Pasar Kolpajung atau desa sekitar, struktur bangunan cenderung tidak teratur. Oleh karena itu, topologi acak dapat menjadi pilihan dengan catatan pengaturan routing dan distribusi node harus lebih adaptif.

Hasil dari simulasi ini tidak hanya valid untuk Kota Pamekasan tetapi juga dapat digeneralisasikan ke wilayah urban lain di Indonesia yang memiliki karakteristik serupa. Dengan demikian, penelitian ini memberikan kontribusi ilmiah yang dapat diadopsi oleh kota-kota kecil hingga menengah yang sedang bertransisi menuju penerapan IoT untuk layanan publik.

6. Kesimpulan

Penelitian ini telah menganalisis kinerja jaringan mesh untuk mendukung penerapan Internet of Things (IoT) di lingkungan perkotaan melalui pendekatan simulasi menggunakan Network Simulator 3 (NS-3). Berdasarkan hasil simulasi yang dilakukan dengan skenario topologi grid dan acak pada jumlah node yang bervariasi (25 hingga 100), dapat disimpulkan bahwa topologi grid secara umum memberikan performa yang lebih stabil dibandingkan dengan topologi acak. Hal ini terlihat dari nilai throughput yang lebih tinggi, latency yang lebih rendah, tingkat keberhasilan pengiriman paket (PDR) yang lebih baik, serta konsumsi energi yang lebih efisien pada topologi grid. Kelebihan utama dari topologi grid terletak pada struktur koneksi yang teratur dan prediktif, yang memungkinkan efisiensi rute dan penurunan potensi tabrakan data. Namun, penelitian ini juga menunjukkan bahwa seiring bertambahnya jumlah node, performa jaringan cenderung menurun pada kedua topologi, yang menunjukkan keterbatasan skalabilitas pada jaringan mesh yang digunakan.

Meski simulasi memberikan gambaran yang cukup akurat terhadap kinerja jaringan mesh dalam lingkungan perkotaan, penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Salah satu kekurangannya adalah tidak adanya elemen mobilitas dan dinamika lalu lintas jaringan yang lebih kompleks, seperti interferensi atau gangguan lingkungan yang kerap ditemukan di skenario dunia nyata. Selain itu, penelitian ini terbatas pada dua jenis topologi dan belum mengkaji pengaruh protokol routing yang berbeda terhadap performa jaringan. Oleh karena itu, penelitian lanjutan disarankan untuk memasukkan skenario mobilitas node, variasi protokol routing, serta simulasi pada kondisi lingkungan yang dinamis dan padat seperti pusat kota dengan gedung tinggi atau gang sempit. Pengembangan sistem prototipe berbasis perangkat riil juga penting sebagai langkah validasi dari hasil simulasi ini. Selain itu, perlu dilakukan pengujian dalam konteks kota-kota lain yang memiliki karakteristik geografis dan demografis berbeda untuk menguji generalisasi hasil ini di luar kasus Kota Pamekasan.

Daftar Pustaka

- [1] F. A. Almalki *et al.*, “Green IoT for Eco-Friendly and Sustainable Smart Cities: Future Directions and Opportunities,” *Mob. Networks Appl.*, vol. 28, no. 1, pp. 178–202, 2023, doi: 10.1007/s11036-021-01790-w.
- [2] E. C. P. Neto, S. Dadkhah, R. Ferreira, A. Zohourian, R. Lu, and A. A. Ghorbani, “CICIoT2023: A Real-Time Dataset and Benchmark for Large-Scale Attacks in IoT Environment,” *Sensors*, vol. 23, no. 13, 2023, doi: 10.3390/s23135941.
- [3] H. C. Altunay and Z. Albayrak, “A hybrid CNN + LSTMbased intrusion detection system for industrial IoT networks,” *Eng. Sci. Technol. an Int. J.*, vol. 38, 2023, doi: 10.1016/j.jestch.2022.101322.
- [4] D. Sousa, S. Sargento, and M. Luis, “A Simulation Environment for Software Defined Wireless Networks with Legacy Devices,” *Q2SWinet 2022 - Proc. 18th ACM Int. Symp. QoS Secur. Wirel. Mob. Networks*, pp. 1–10, 2022, doi: 10.1145/3551661.3561369.
- [5] Z. Liu, S. Zhang, X. Shao, and Z. Wu, “Accurate and efficient urban wind prediction at city-scale with memory-scalable graph neural network,” *Sustain. Cities Soc.*, vol. 99, 2023, doi: 10.1016/j.scs.2023.104935.
- [6] S. Mishra, V. K. Jain, K. Gyoda, and S. Jain, “An efficient content replacement policy to retain essential content in information-centric networking based internet of things network,” *Ad Hoc Networks*, vol. 155, 2024, doi: 10.1016/j.adhoc.2023.103389.
- [7] S. T. Ahmed, A. A. Ahmed, A. Annamalai, and M. F. Chouikha, “A Scalable and Energy-Efficient LoRaWAN-Based Geofencing System for Remote Monitoring of Vulnerable Communities,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 48540–48554, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3383778.
- [8] J. Logeshwaran, S. K. Patel, O. P. Kumar, and F. A. Al-Zahrani, “Hybrid optimization for efficient 6G IoT traffic management and multi-routing strategy,” 2024, *nature.com*. doi: 10.1038/s41598-024-81709-z.
- [9] R. Kumar, V. U., and V. Tiwari, “Optimized traffic engineering in Software Defined Wireless Network based IoT (SDWN-IoT): State-of-the-art, research opportunities and challenges,” *Comput. Sci. Rev.*, vol. 49, 2023, doi: 10.1016/j.cosrev.2023.100572.
- [10] P. Sharma, S. Namasudra, R. Gonzalez Crespo, J. Parra-Fuente, and M. Chandra Trivedi, “EHDHE: Enhancing security of healthcare documents in IoT-enabled digital healthcare ecosystems using blockchain,” *Inf. Sci. (Nij.)*, vol. 629, pp. 703–718, 2023, doi: 10.1016/j.ins.2023.01.148.
- [11] S. Bommu *et al.*, “Smart City IoT System Network Level Routing Analysis and Blockchain Security Based Implementation,” 2023, *Springer*. doi: 10.1007/s42835-022-01239-4.
- [12] K. Li *et al.*, “When Internet of Things Meets Metaverse: Convergence of Physical and Cyber Worlds,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 10, no. 5, pp. 4148–4173, 2023, doi: 10.1109/JIOT.2022.3232845.
- [13] M. Malnar and N. Jevtic, “An improvement of AODV protocol for the overhead reduction in scalable dynamic wireless ad hoc networks,” *Wirel. Networks*, vol. 28, no. 3, pp. 1039–1051, 2022, doi: 10.1007/s11276-022-02890-5.
- [14] A. I. Griva *et al.*, “LoRa-Based IoT Network Assessment in Rural and Urban Scenarios,” 2023, *mdpi.com*. doi: 10.3390/s23031695.
- [15] T. Mazhar *et al.*, “Analysis of Challenges and Solutions of IoT in Smart Grids Using AI and Machine Learning Techniques: A Review,” *Electron.*, vol. 12, no. 1, 2023, doi: 10.3390/electronics12010242.
- [16] R. A. Putra and A. Ma’arif, “Internet of Things (IoT) Based Speed Monitoring System for Electric Cars,” *Bul. Ilm. Sarj. Tek. Elektro*, vol. 6, no. 2, pp. 182–189, 2024, doi: 10.12928/biste.v6i2.11317.
- [17] G. Ramkumar, J. Seetha, R. Priyadarshini, M. Gopila, and G. Saranya, “IoT-based patient monitoring system for predicting heart disease using deep learning,” *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 218, 2023, doi: 10.1016/j.measurement.2023.113235.
- [18] X. L. Li, Z. N. Liu, T. Chen, T. J. Mu, R. R. Martin, and S. M. Hu, “Mesh Neural Networks Based on Dual Graph Pyramids,” *IEEE Trans. Vis. Comput. Graph.*, vol. 30, no. 7, pp. 4211–4224, 2024, doi: 10.1109/TVCG.2023.3257035.
- [19] P. Santhuja, C. S. Ranganathan, C. Sasi Kumar, S. Srinivasan, and N. Latha, “Route Stability with Node Reliability-Based Auto

- Reconfiguration in Wireless Mesh Network,” *2023 2nd Int. Conf. Smart Technol. Smart Nation, SmartTechCon 2023*, pp. 1271–1275, 2023, doi: 10.1109/SmartTechCon57526.2023.10391314.
- [20] A. Singh, S. Prakash, and S. Singh, “Optimization of reinforcement routing for wireless mesh network using machine learning and high-performance computing,” *Concurr. Comput. Pract. Exp.*, vol. 34, no. 15, 2022, doi: 10.1002/cpe.6960.
- [21] D. Zhou, M. Sheng, J. Li, and Z. Han, “Aerospace Integrated Networks Innovation for Empowering 6G: A Survey and Future Challenges,” *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 25, no. 2, pp. 975–1019, 2023, doi: 10.1109/COMST.2023.3245614.
- [22] N. Udugampola, X. Ai, B. Li, and A. Seneviratne, “Scalability Analysis of Linear LoRa Mesh Networks,” *Proc. - IEEE Comput. Soc. Annu. Int. Symp. Model. Anal. Simul. Comput. Telecommun. Syst. MASCOTS*, 2024, doi: 10.1109/MASCOTS64422.2024.10786574.
- [23] A. Gallegos Ramonet, T. Pecorella, B. Picano, and K. Kinoshita, “Perspectives on IoT-oriented network simulation systems,” 2024, *tokushima-u.repo.nii.ac.jp*. doi: 10.1016/j.comnet.2024.110749.
- [24] A. K. Tyagi, S. Dananjayan, D. Agarwal, and H. F. Thariq Ahmed, “Blockchain—Internet of Things Applications: Opportunities and Challenges for Industry 4.0 and Society 5.0,” *Sensors*, vol. 23, no. 2, 2023, doi: 10.3390/s23020947.
- [25] R. Chen, Y. Liu, Q. Han, D. Chen, and L. Zeng, “An Improved QoS-Aware Partially Multipath DSR Protocol for Wireless Mesh Networks,” *2023 7th Int. Conf. Commun. Inf. Syst. ICCIS 2023*, pp. 7–13, 2023, doi: 10.1109/ICCIS59958.2023.10453663.
- [26] V. K. Krishnamoorthy *et al.*, “Energy Saving Optimization Technique-Based Routing Protocol in Mobile Ad-Hoc Network with IoT Environment,” 2023, *mdpi.com*. doi: 10.3390/en16031385.
- [27] D. A. Turlykzhayeva *et al.*, “Evaluating Routing Algorithms Across Different Wireless Mesh Network Topologies Using Ns-3 Simulator,” 2024, *researchgate.net*. doi: 10.31489/2024No2/70-82.
- [28] R. Hari Sing and V. B. Narsimha, “Routing Protocols and Their Performance in Mobile Ad hoc Networks: A Quality of Service Optimization Perspective,” *2022 OPJU Int. Technol. Conf. Emerg. Technol. Sustain. Dev. OTCON 2022*, 2023, doi: 10.1109/OTCON56053.2023.10113987.
- [29] H. Kamyab *et al.*, “The latest innovative avenues for the utilization of artificial Intelligence and big data analytics in water resource management,” *Results Eng.*, vol. 20, 2023, doi: 10.1016/j.rineng.2023.101566.
- [30] J. P. Astudillo León, C. L. Duenas Santos, A. M. Mezher, J. Cárdenas Barrera, J. Meng, and E. Castillo Guerra, “Exploring the potential, limitations, and future directions of wireless technologies in smart grid networks: A comparative analysis,” *Comput. Networks*, vol. 235, 2023, doi: 10.1016/j.comnet.2023.109956.
- [31] A. Jansang, C. Simasathien, and A. Phonphoem, “Energy-aware wireless mesh network deployment using optimization mechanism,” *Telkomnika (Telecommunication Comput. Electron. Control)*, vol. 21, no. 1, pp. 26–40, 2023, doi: 10.12928/TELKOMNIKA.v21i1.23422.
- [32] Z. Jia, Q. Wu, C. Dong, C. Yuen, and Z. Han, “Hierarchical Aerial Computing for Internet of Things via Cooperation of HAPs and UAVs,” *IEEE Internet Things J.*, vol. 10, no. 7, pp. 5676–5688, 2023, doi: 10.1109/JIOT.2022.3151639.
- [33] A. Awajan, “A Novel Deep Learning-Based Intrusion Detection System for IoT Networks,” *Computers*, vol. 12, no. 2, 2023, doi: 10.3390/computers12020034.
- [34] L. Liu, Z. Wang, J. Zhang, O. Ruzimuradov, K. Dai, and J. Low, “Tunable Interfacial Charge Transfer in a 2D–2D Composite for Efficient Visible-Light-Driven CO₂ Conversion,” *Adv. Mater.*, vol. 35, no. 26, 2023, doi: 10.1002/adma.202300643.
- [35] F. Salazar *et al.*, “Drone Collaboration Using OLSR Protocol in a FANET Network for Traffic Monitoring in a Smart City Environment,” *Lect. Notes Networks Syst.*, vol. 678 LNNS, pp. 278–295, 2023, doi: 10.1007/978-3-031-30592-4_20.
- [36] Z. Zhang, H. Hu, and X. Hu, “Routing Protocol for Healthcare Applications Data Over the 6LoWPAN-based Wireless Sensor

- Networks,” *Procedia Comput. Sci.*, vol. 225, pp. 2153–2162, 2023, doi: 10.1016/j.procs.2023.10.206.
- [37] M. Hammad *et al.*, “Security Framework for Network-Based Manufacturing Systems with Personalized Customization: An Industry 4.0 Approach,” 2023, *mdpi.com*. doi: 10.3390/s23177555.
- [38] F. Malandra, H. Mellah, A. D. Firouzabadi, C. Wette, and B. Sanso, “A Layered and Grid-Based Methodology to Characterize and Simulate IoT Traffic on Advanced Cellular Networks,” *IEEE Internet Things Mag.*, vol. 6, no. 1, pp. 134–140, 2023, doi: 10.1109/IOTM.001.2200156.
- [39] S. Mahajan, R. Harikrishnan, and K. Kotecha, “Adaptive Routing in Wireless Mesh Networks Using Hybrid Reinforcement Learning Algorithm,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 107961–107979, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3210993.
- [40] C. Panem, U. V. Rane, and R. S. Gad, “Data of multilayer mesh NoC performance analysis for throughput and delay over FTP and CBR applications,” 2022, *Elsevier*. doi: 10.1016/j.dib.2022.108196.
- [41] R. Shruthi, H. R. Shashidhara, R. Bhargavi, H. N. Dharanendra, N. Divyashree, and E. Rahul Raaj, “Study and Analysis of Wired and Wireless Network-on-Chip Using Noxim,” 2023 *Int. Conf. Network, Multimed. Inf. Technol. NMITCON 2023*, 2023, doi: 10.1109/NMITCON58196.2023.10276064.
- [42] X. Liu *et al.*, “Self-Supervised Learning: Generative or Contrastive,” *IEEE Trans. Knowl. Data Eng.*, vol. 35, no. 1, pp. 857–876, 2023, doi: 10.1109/TKDE.2021.3090866.
- [43] M. L. Valencia, T. Pfaff, and N. Thuerey, “Learning distributions of complex fluid simulations with diffusion graph networks,” *Thirteen. Int. ...*, 2025, [Online]. Available: <https://openreview.net/forum?id=uKZdlihDDn>
- [44] L. Liu, M. Zhao, M. Yu, M. A. Jan, D. Lan, and A. Taherkordi, “Mobility-Aware Multi-Hop Task Offloading for Autonomous Driving in Vehicular Edge Computing and Networks,” *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 24, no. 2, pp. 2169–2182, 2023, doi: 10.1109/TITS.2022.3142566.
- [45] H. Abdulrab *et al.*, “Energy efficient optimal deployment of industrial wireless mesh networks using transient trigonometric Harris Hawks optimizer,” 2024, *cell.com*. doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e28719.
- [46] A. Gallegos Ramonet, T. Pecorella, B. Picano, and K. Kinoshita, “Perspectives on IoT-oriented network simulation systems,” 2024, *Elsevier*. doi: 10.1016/j.comnet.2024.110749.
- [47] Jesse Emmanuel A. Encarnacion and Jerry I. Teleron, “Innovative Advancements in Network Topologies: A Comprehensive Investigation of Mesh Network, Tree Topology, and Hypercube Network,” 2023, *researchgate.net*. doi: 10.48175/ijarsct-13869.
- [48] Y. Kim *et al.*, “Evidence for the utility of quantum computing before fault tolerance,” *Nature*, vol. 618, no. 7965, pp. 500–505, 2023, doi: 10.1038/s41586-023-06096-3.
- [49] J. P. A. León, C. L. D. Santos, A. M. Mezher, J. C. Barrera, J. Meng, and E. C. Guerra, “How does the Selection of Wireless Technology Impact the Performance of the Smart Grid? A Simulation Approach,” *PE-WASUN 2022 - Proc. 19th ACM Int. Symp. Perform. Eval. Wirel. Ad Hoc, Sensor, Ubiquitous Networks*, pp. 67–74, 2022, doi: 10.1145/3551663.3558673.
- [50] A. H. Wheeb, R. Nordin, A. A. Samah, and D. Kanellopoulos, “Performance Evaluation of Standard and Modified OLSR Protocols for Uncoordinated UAV Ad-Hoc Networks in Search and Rescue Environments,” 2023, *mdpi.com*. doi: 10.3390/electronics12061334.
- [51] F. M. Salman, A. A. M. Lehmoud, and F. A. Joda, “Adaptation of the Ant Colony Algorithm to Avoid Congestion in Wireless Mesh Networks,” *J. Cyber Secur. Mobil.*, vol. 12, no. 5, pp. 785–812, 2023, doi: 10.13052/jcsm2245-1439.1258.
- [52] R. dos Reis Fontes, A. J. V. Neto, and C. E. Rothenberg, “Wireless mesh network emulation,” 2022, *researchgate.net*. doi: 10.1049/pbte101e_ch1.
- [53] F. P. E. Putra, U. Ubaidi, R. N. Saputra, F. M. Haris, and S. N. R. Barokah, “Application of Internet of Things Technology in

Monitoring Water Quality in Fishponds,” 2024. doi: 10.47709/brilliance.v4i1.4231.

- [54] A. Baidawi, “JARINGAN SENSOR NIRKABEL DAN IoT UNTUK KOTA PINTAR PAMEKASAN,” *J. Sist. Inf. Kaputama*, vol. 7, no. 2, pp. 104–110, 2023, doi: 10.59697/jsik.v7i2.108.