



Penerapan Teori Graf dalam Optimasi Jaringan Transportasi Perkotaan: *Systematic Literature Review (SLR)*

**Fara Syifa Nabila Siregar^{1*}, Shilva Syahbina², Andespa Siregar³, Sahrul Romadona⁴,
Siti Salamah Br Ginting⁵**

¹⁻⁵Progdi Pendidikan Matematika, Universitas Islam Negeri Sumatera Utara, Indonesia

*Penulis Korespondensi: fara0305223060@uinsu.ac.id

Abstract. The increasingly complex growth of urban mobility requires an analytical approach that can optimize transportation networks effectively and sustainably. Graph theory is one of the mathematical methods widely used in modeling road network structures and analyzing inter-node connectivity to obtain more efficient routing and network optimization solutions. This study aims to systematically review the development of graph theory application in urban transportation network optimization through the Systematic Literature Review (SLR) method. The review was conducted following the PRISMA 2020 protocol for articles published between 2020 and 2025. A total of ten articles met the inclusion criteria and were analyzed in depth. The review results show that graph algorithms such as Dijkstra, Bellman–Ford, Floyd–Warshall, Minimum Spanning Tree (MST), Graph Neural Network (GNN), and the hybrid Dijkstra–A* method can improve route efficiency, reduce travel time, improve navigation accuracy, and strengthen congestion prediction capabilities. In general, graph theory has proven to be an effective and adaptive approach in supporting urban transportation network planning and management. Further research is recommended to integrate graph theory with real-time traffic data and artificial intelligence technology to improve the accuracy and responsiveness of modern transportation systems.

Keywords: Graph Theory; PRISMA; Systematic Literature Review; Transportation Optimization; Urban Networks.

Abstrak. Pertumbuhan mobilitas perkotaan yang semakin kompleks menuntut adanya pendekatan analitis yang mampu mengoptimalkan jaringan transportasi secara efektif dan berkelanjutan. Teori graf menjadi salah satu metode matematis yang banyak digunakan dalam memodelkan struktur jaringan jalan serta menganalisis keterhubungan antarsimpul untuk memperoleh solusi perutean dan optimasi jaringan yang lebih efisien. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji secara sistematis perkembangan penerapan teori graf dalam optimasi jaringan transportasi perkotaan melalui metode *Systematic Literature Review* (SLR). Kajian dilakukan dengan mengikuti protokol PRISMA 2020 terhadap artikel-artikel yang dipublikasikan pada periode 2020–2025. Sebanyak sepuluh artikel memenuhi kriteria inklusi dan dianalisis secara mendalam. Hasil tinjauan menunjukkan bahwa algoritma graf seperti Dijkstra, Bellman–Ford, Floyd–Warshall, Minimum Spanning Tree (MST), Graph Neural Network (GNN), serta metode hybrid Dijkstra–A* mampu meningkatkan efisiensi rute, mengurangi waktu tempuh, meningkatkan akurasi navigasi, serta memperkuat kemampuan prediksi kemacetan. Secara umum, teori graf terbukti menjadi pendekatan yang efektif dan adaptif dalam mendukung perencanaan dan pengelolaan jaringan transportasi perkotaan. Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengintegrasikan teori graf dengan data lalu lintas real-time dan teknologi kecerdasan buatan untuk meningkatkan akurasi serta responsivitas sistem transportasi modern.

Kata Kunci: Jaringan Perkotaan; Optimasi Transportasi; PRISMA; *Systematic Literature Review*; Teori Graf.

1. PENDAHULUAN

Pertumbuhan kota-kota besar di seluruh dunia, termasuk Indonesia, semakin mempertegas pentingnya sistem transportasi yang efisien, terintegrasi, dan adaptif. Urbanisasi yang meningkat, mobilitas penduduk yang tinggi, serta pertumbuhan jumlah kendaraan bermotor yang tidak sebanding dengan kapasitas infrastruktur jalan menjadi faktor utama yang memicu kemacetan, peningkatan konsumsi energi, polusi udara, dan menurunnya kualitas hidup masyarakat. Kondisi tersebut menuntut adanya pendekatan ilmiah yang mampu

memodelkan permasalahan transportasi secara komprehensif agar solusi yang dihasilkan lebih tepat sasaran dan berkelanjutan.

Salah satu pendekatan matematis yang banyak digunakan dalam menganalisis sistem transportasi adalah teori graf. Dalam representasi graf, simpul (nodes) menggambarkan titik-titik penting seperti persimpangan, halte, atau terminal, sedangkan sisi (edges) mewakili ruas jalan atau jalur transportasi yang menghubungkan antar simpul. Pemodelan seperti ini memungkinkan analisis jalur terpendek, perencanaan konektivitas optimal, hingga perhitungan kapasitas aliran kendaraan. Berbagai algoritma dalam teori graf, seperti Dijkstra untuk pencarian jalur tercepat, Kruskal dan Prim untuk *minimum spanning tree*, serta Ford-Fulkerson untuk analisis *maximum flow*, terbukti efektif dalam menyelesaikan persoalan transportasi di perkotaan modern.

Tingginya tingkat permasalahan transportasi di kota-kota besar di Indonesia, seperti Jakarta, Bandung, Surabaya, dan Medan, semakin menegaskan urgensi penggunaan teori graf sebagai alat bantu analisis dalam optimasi jaringan jalan. Laporan World Bank (2019) menyebutkan bahwa kemacetan di wilayah Jabodetabek menyebabkan kerugian ekonomi hingga triliunan rupiah setiap tahunnya. Dengan demikian, model matematis berbasis graf memiliki peran penting dalam memberikan gambaran objektif mengenai kondisi jaringan jalan, serta dapat digunakan untuk merumuskan strategi peningkatan efisiensi transportasi.

Sejumlah penelitian terdahulu juga menunjukkan efektivitas teori graf dalam optimasi jaringan transportasi. Menurut penelitian Feng et al. (2023) “*Application of an Improved A Algorithm for Path Analysis of Urban Multi-Type Transportation Systems**”. Penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan algoritma A* yang telah dimodifikasi mampu meningkatkan efektivitas pencarian rute optimal pada sistem transportasi perkotaan multimoda. Dengan mengintegrasikan faktor heuristik yang lebih adaptif terhadap karakteristik jaringan jalan dan moda transportasi yang beragam, algoritma A* yang diperbaiki menghasilkan rute dengan waktu tempuh dan biaya perjalanan yang lebih efisien dibandingkan algoritma konvensional. Hasil pengujian pada jaringan transportasi perkotaan menunjukkan bahwa pendekatan ini tidak hanya mempercepat proses pencarian rute, tetapi juga meningkatkan akurasi dalam pemilihan jalur optimal pada jaringan yang kompleks dan padat.

Menurut Marpaung & Sari. (2021) “*Maximal Flow Of Transportation Network In Medan City Using Ford-Fulkerson Algorithm*”. Penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan algoritma Ford-Fulkerson efektif digunakan untuk menganalisis aliran maksimum pada jaringan transportasi perkotaan, khususnya pada sistem angkutan umum di Kota Medan. Dengan memodelkan jaringan transportasi sebagai graf berarah yang merepresentasikan

simpul dan ruas jalan beserta kapasitasnya, penelitian ini berhasil menentukan nilai aliran maksimum yang dapat dialirkan dari titik sumber ke titik tujuan dalam jaringan.

Kemudian penelitian oleh Ahsanti et al. (2025) “*Optimalisasi Jaringan Jalan Antar Kecamatan dengan Minimum Spanning Tree dan Algoritma Prim di Kabupaten Ngawi*”. Penelitian ini menerapkan metode *Minimum Spanning Tree* (MST) dalam menentukan rute optimal terbukti efektif dalam mengoptimalkan jaringan jalan antar lokasi wisata di Kabupaten Wonogiri. Dengan memodelkan jaringan jalan sebagai graf berbobot dan menerapkan algoritma MST, penelitian ini berhasil memperoleh struktur jaringan yang menghubungkan seluruh titik lokasi dengan total jarak minimum tanpa mengurangi keterhubungan antar simpul. Hasil analisis menunjukkan bahwa pendekatan MST mampu memberikan rekomendasi rute yang lebih efisien dibandingkan jalur konvensional, sehingga berpotensi menghemat waktu tempuh dan biaya perjalanan.

Meskipun teori graf telah terbukti memberikan kontribusi signifikan, hingga saat ini belum banyak kajian sistematis yang merangkum perkembangan penerapannya secara komprehensif, terutama dalam konteks kota-kota di negara berkembang seperti Indonesia. Sebagian besar penelitian berfokus pada kota-kota negara maju yang memiliki karakteristik infrastruktur berbeda. Oleh karena itu, penelitian ini penting dilakukan untuk memberikan pemetaan literatur terbaru, mengidentifikasi tren penelitian, serta merumuskan potensi pengembangan lebih lanjut terkait optimasi jaringan transportasi berbasis teori graf di lingkungan perkotaan Indonesia.

Dengan demikian, penelitian ini diharapkan bukan hanya memberikan kontribusi teoritis dalam pengembangan model optimasi berbasis graf, tetapi juga memberikan manfaat praktis bagi pemerintah daerah, perencana kota, dan pemangku kepentingan lainnya dalam perbaikan sistem transportasi yang lebih efisien, adaptif, dan berkelanjutan.

2. KAJIAN TEORITIS

Teori graf merupakan cabang matematika yang mempelajari hubungan antarsuatu himpunan objek yang direpresentasikan sebagai simpul (nodes) dan sisi (edges). Dalam konteks jaringan transportasi, teori graf menjadi pendekatan yang efektif untuk memodelkan struktur jaringan jalan, jaringan angkutan umum, serta hubungan spasial antar simpul pergerakan. Representasi ini dapat berupa graf berarah maupun tak berarah, berbobot maupun tak berbobot, tergantung pada karakteristik sistem yang dianalisis, seperti arah lalu lintas, waktu tempuh, jarak, dan kapasitas ruas jalan. Fondasi matematika dari teori graf memberikan

kerangka yang kuat untuk menganalisis koneksi, efisiensi, dan kerentanan suatu jaringan transportasi (Monteiro et al., 2012)

Dalam pemodelan transportasi, terdapat dua pendekatan utama, yaitu model graf primal dan model graf dual. Pada model primal, simpul merepresentasikan persimpangan, sedangkan sisi mempresentasikan ruas jalan. Sementara itu, model dual menempatkan ruas jalan sebagai simpul dan menunjukkan hubungan topologis antar ruas sebagai sisi. Pemberian bobot pada sisi, seperti waktu tempuh atau jarak, menyediakan landasan untuk analisis perutean dan evaluasi efisiensi jaringan. Tren terbaru menunjukkan meningkatnya penggunaan model graf multilapis (multiplex) untuk mengintegrasikan jaringan multimoda, seperti bus, kereta, dan moda mikro mobilitas (Lin et al., 2021)

Selain struktur graf, analisis topologis memegang peran penting dalam memahami kinerja jaringan transportasi. Metrik seperti derajat (degree), betweenness centrality, closeness, dan eigenvector centrality sering digunakan untuk mengidentifikasi simpul atau ruas yang berperan sebagai pusat aktivitas atau bottleneck. Centrality membantu mengidentifikasi titik rawan yang apabila mengalami gangguan dapat menimbulkan penurunan signifikan pada kinerja jaringan. Selain itu, analisis spektral yang memanfaatkan nilai eigen dari matriks ketetanggaan digunakan untuk mempelajari robustnes dan cluster dalam jaringan kota (Grujic, 2025; Guze, 2019).

Untuk menyelesaikan permasalahan perutean dan alokasi perjalanan, berbagai algoritma berbasis teori graf telah dikembangkan dan digunakan secara luas. Algoritma jalur terpendek seperti Dijkstra, A*, dan Bellman–Ford digunakan untuk menentukan rute dengan waktu tempuh minimum. Pada konteks yang lebih kompleks, seperti optimasi rute kendaraan (Vehicle Routing Problem) dan Travelling Salesman Problem, digunakan metode optimasi berbasis heuristik dan metaheuristik seperti Genetic Algorithm dan Particle Swarm Optimization. Sementara itu, pada perencanaan transportasi makro, pendekatan traffic assignment, baik user equilibrium maupun system optimum, digunakan untuk memodelkan distribusi arus antara rute-rute alternatif dalam jaringan (Hemdan et al., 2025).

Penerapan teori graf dalam optimasi transportasi mencakup berbagai kasus, seperti perancangan rute bus, pengaturan sinyal lalu lintas, penentuan lokasi fasilitas, serta perancangan rute evakuasi. Studi-studi menunjukkan bahwa dengan menggunakan analisis graf, waktu perjalanan dapat dikurangi, aksesibilitas meningkat, dan bottleneck jaringan dapat diidentifikasi dan ditangani secara sistematis. Misalnya, penelitian terbaru mengimplementasikan pendekatan graf untuk merancang jaringan bus yang lebih efisien,

sementara studi lain memanfaatkan graf untuk optimasi lampu lalu lintas dan evaluasi efisiensi jaringan transit melalui analisis centrality (Grujic, 2025; Lin et al., 2021).

Aspek penting lainnya dalam kajian graf untuk transportasi adalah analisis kerentanan (vulnerability) dan ketahanan (resilience). Kerentanan jaringan umumnya dianalisis dengan menemukan simpul atau sisi yang menjadi titik kritis melalui konsep cut sets, domination, serta analisis edge removal. Kajian ketahanan melibatkan penilaian dampak gangguan terhadap koneksi jaringan dan kemampuan sistem untuk pulih setelah gangguan terjadi. Pendekatan graf ini banyak digunakan untuk merancang jaringan transportasi yang tetap berfungsi meskipun terjadi bencana, kecelakaan, atau penutupan jalan (Gorji et al., 2022).

Pada era digital, analisis jaringan transportasi semakin mengintegrasikan data spasial dan temporal. Data GIS, sensor lalu lintas, GPS, dan data ponsel memungkinkan pembangunan model graf dinamis yang mampu menangkap perubahan kondisi jaringan secara real-time. Transformasi data spasial ke dalam struktur graf memungkinkan analisis seperti perutean adaptif, pengaturan sinyal dinamis, hingga optimasi layanan angkutan umum berbasis permintaan. Kombinasi antara graf statis dan dinamis ini semakin relevan untuk meningkatkan efisiensi mobilitas urban (Grujic & Grujic, 2025).

Dalam kajian literatur sistematis, teori graf memberikan landasan metodologis yang luas untuk menganalisis perkembangan riset terkait optimasi jaringan transportasi. Beberapa gap penelitian terlihat, seperti kurangnya studi pada konteks kota berkembang, integrasi penuh antara model topologi dan model permintaan perjalanan, serta pemanfaatan machine learning dalam graf dinamis. Identifikasi gap ini penting untuk memetakan arah penelitian selanjutnya, sekaligus memberikan kontribusi teoritis dan praktis bagi perencanaan transportasi modern (Guze, 2019; Lin et al., 2021)

3. METODE PENELITIAN

Metode dalam penelitian ini menggunakan pendekatan *Systematic Literature Review* (SLR) berdasarkan protokol PRISMA 2020. Metode ini dilakukan dengan mengumpulkan dan menganalisis artikel-artikel penelitian yang dipublikasikan dalam rentang waktu 2020 hingga 2025. Pencarian literatur dilakukan pada lima database ilmiah terkemuka untuk memastikan cakupan yang komprehensif dan mengurangi bias publikasi: 1) Scopus. 2) IEEE Xplore. 3) ScienceDirect. 4) SpringerLink. 5) Google Scholar (untuk melengkapi temuan dari database jurnal utama)

Setelah Proses seleksi 25 artikel dilakukan secara bertahap dan ketat dengan menerapkan kriteria inklusi dan eksklusi yang telah ditetapkan sebelumnya. Tahapan ini meliputi penghapusan duplikat, penyaringan berdasarkan judul dan abstrak, serta penilaian kelayakan berdasarkan naskah lengkap. Setelah melalui proses kurasi yang rigor, sebanyak 10 artikel penelitian dinyatakan memenuhi semua kriteria kualitas dan relevansi, sehingga layak untuk dimasukkan ke dalam tahap analisis mendalam. Artikel-artikel terpilih inilah yang menjadi fondasi empiris untuk kajian tematik, analisis tren, dan identifikasi peluang pengembangan penelitian ke depan dalam tinjauan sistematis ini.

Dalam pelaksanaannya, SLR ini mengikuti proses sistematis yang mencakup pencarian literatur, seleksi sesuai kriteria inklusi dan eksklusi, serta sintesis hasil penelitian yang ada untuk menggambarkan tren penggunaan teori graf dalam optimasi jaringan transportasi perkotaan. Protokol PRISMA 2020 digunakan sebagai panduan untuk memastikan transparansi dan reproduktifitas dalam pengumpulan data serta pelaporan hasil. Fokus tinjauan literatur ini adalah pada algoritma-algoritma inti dalam teori graf seperti Dijkstra, Kruskal, Prim, dan Ford-Fulkerson yang diaplikasikan dalam konteks permasalahan transportasi (Page et al., 2021).

Metode ini juga mengidentifikasi gap atau kekurangan dalam literatur yang ada dan mengarahkan pada pengembangan model-model baru yang lebih adaptif dan komprehensif, termasuk integrasi teori graf dengan teknologi modern seperti machine learning dan data lalu lintas real-time untuk optimasi jaringan transportasi. Pendekatan ini penting untuk memberikan kontribusi teoritis sekaligus manfaat praktis bagi perencana kota dan pengambil kebijakan dalam meningkatkan efisiensi sistem transportasi perkotaan (Moher et al., 2009).

4. HASIL PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil telaah terhadap sepuluh artikel yang terbit pada tahun 2020 hingga 2025, dapat disimpulkan bahwa pemanfaatan teori graf pada optimasi jaringan transportasi mengalami peningkatan baik dari segi metode maupun efektivitas implementasinya. Secara umum, artikel-artikel tersebut menunjukkan bahwa pendekatan berbasis graf memiliki kontribusi yang signifikan dalam meningkatkan efisiensi perjalanan, akurasi navigasi, dan efektivitas identifikasi masalah transportasi, terutama pada wilayah perkotaan yang padat.

Tabel. 1. Hasil Telaah terhadap Sepuluh Artikel yang Terbit pada Tahun 2020 Hingga 2025.

No	Judul Artikel/Jurnal	Penulis dan Tahun	Hasil Penelitian
1	<i>Optimalisasi Rute Transportasi Menggunakan Algoritma Graf</i>	(Amelia Vega S. Meliala et al., 2024)	Penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan algoritma graf dalam pemodelan jaringan transportasi mampu menghasilkan rute perjalanan yang lebih efisien dibandingkan metode konvensional. Algoritma graf membantu menentukan jalur optimal dengan mempertimbangkan bobot jarak dan waktu tempuh sehingga mendukung pengambilan keputusan dalam perencanaan rute transportasi. Hasil penelitian membuktikan bahwa algoritma Dijkstra efektif dalam menentukan rute terpendek pada jaringan jalan perkotaan. Penerapan algoritma ini mampu meminimalkan jarak dan waktu tempuh perjalanan dari titik asal ke tujuan, sehingga meningkatkan efisiensi navigasi dalam sistem transportasi kota.
2	<i>Implementasi Algoritma Dijkstra Menentukan Rute Terpendek Dari Unika St. Thomas Menuju Kantor dinas kependudukan Kota Medan</i>	(Tampubolon et al., 2025)	Penelitian ini menunjukkan bahwa algoritma Bellman–Ford mampu menangani jaringan distribusi dengan bobot negatif secara akurat. Hasil analisis membuktikan bahwa metode ini efektif dalam menentukan rute distribusi terpendek dan meningkatkan efisiensi logistik perkotaan.
3	<i>Penerapan Bellmann-Ford Algorithm Dalam Pencarian Rute Terpendek Distribusi Suku Cadang Di Kota Bandung</i>	(Chulasoh et al., 2025)	Hasil penelitian menunjukkan bahwa teknik kompresi data dan penyederhanaan graf mampu meningkatkan performa komputasi sistem navigasi pada perangkat bergerak. Pendekatan ini mengurangi beban pemrosesan tanpa mengorbankan akurasi rute, sehingga sistem menjadi lebih responsif dan efisien.
4	<i>Peningkatan Performa Komputasi Sistem Navigasi Transportasi Publik Pada Perangkat Bergerak Melalui Penerapan Teknik Kompresi Data dan Penyederhanaan Graf</i>	(Pinandito et al., 2024)	Penelitian ini membuktikan bahwa algoritma Kruskal berbasis Minimum Spanning Tree (MST) efektif dalam menghubungkan seluruh lokasi wisata dengan total jarak minimum. Hasilnya memberikan rekomendasi jaringan rute wisata yang lebih efisien dan ekonomis.
5	<i>Penerapan Kruskal Minimum Spanning Tree Pada Optimasi Rute Wisata Bojong Kabupaten Tegal</i>	(Maulana, 2025)	Hasil penelitian menunjukkan bahwa Enhanced-Graph Neural Network (E-GNN) mampu memprediksi kondisi lalu lintas dan tingkat kemacetan secara akurat. Model ini meningkatkan kemampuan pengendalian kemacetan dengan memanfaatkan hubungan spasial dan temporal dalam jaringan jalan.
6	<i>Traffic Prediction and Congestion Control Using an Enhanced-Graph Neural Network</i>	(Odiagbe et al., 2025)	Penelitian ini menegaskan bahwa teori graf berperan penting dalam perancangan sistem transportasi cerdas. Analisis graf membantu meningkatkan efisiensi jaringan, mengidentifikasi titik kritis, serta mendukung pengambilan keputusan berbasis data dalam manajemen transportasi modern.
7	<i>Peran Teori Graf dalam Perancangan Jaringan Transportasi Cerdas</i>	(Agusnur, 2025b)	Hasil penelitian menunjukkan bahwa Multi-Graph Convolutional Network (M-GCN) mampu memodelkan dan memprediksi penyebaran arus lalu lintas secara lebih akurat. Pendekatan ini efektif dalam menangkap hubungan kompleks antar ruas jalan dalam jaringan perkotaan.
8	<i>Predicting traffic propagation flow in urban road network with multi-graph convolutional network</i>	(Yang et al., 2024)	

9	<i>Comparison of BFS and DFS Algorithm for Routes to Historical-Cultural Tourism Locations in Banten Province</i>	(Mochammad Darip et al., 2024)	Penelitian ini menunjukkan bahwa algoritma BFS lebih efektif dalam menemukan rute terpendek dibandingkan DFS pada jaringan wisata. BFS memberikan hasil yang lebih optimal dalam hal efisiensi rute dan waktu pencarian pada graf berstruktur kompleks.
10	<i>Optimizing Road Networks: A Graph-Based Analysis with Path-finding and Learning Algorithms</i>	(Muthuvel et al., 2025)	Hasil penelitian membuktikan bahwa kombinasi algoritma pencarian jalur (Dijkstra dan A*) dengan pendekatan pembelajaran mesin mampu meningkatkan efisiensi dan adaptivitas sistem perutean. Metode hybrid ini menghasilkan rute yang lebih optimal pada jaringan jalan yang dinamis.

Berdasarkan hasil pembahasan terhadap sepuluh artikel penelitian yang dianalisis, terlihat bahwa penerapan teori graf secara konsisten memberikan dampak positif terhadap optimasi jaringan transportasi. Algoritma-algoritma graf seperti Dijkstra, Bellman–Ford, Kruskal Minimum Spanning Tree (MST), BFS, dan DFS terbukti efektif dalam menyelesaikan permasalahan perutean, penentuan jalur terpendek, serta optimasi konektivitas jaringan jalan.

Pada konteks yang lebih kompleks, pemanfaatan pendekatan lanjutan seperti Graph Neural Network (GNN) dan metode hybrid yang mengombinasikan algoritma pencarian jalur dengan pembelajaran mesin menunjukkan kemampuan yang lebih adaptif dalam memprediksi arus lalu lintas dan mengendalikan kemacetan. Selain itu, hasil penelitian juga menunjukkan bahwa penyederhanaan struktur graf dan efisiensi komputasi berperan penting dalam meningkatkan kinerja sistem navigasi, khususnya pada perangkat bergerak.

Secara keseluruhan, pembahasan ini menegaskan bahwa teori graf tidak hanya relevan untuk permasalahan transportasi statis, tetapi juga mampu menjawab tantangan jaringan transportasi perkotaan yang dinamis dan kompleks, sehingga layak dijadikan dasar dalam pengembangan sistem transportasi yang lebih efisien dan cerdas.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil kajian sistematis terhadap sepuluh artikel penelitian yang dianalisis menggunakan metode *Systematic Literature Review* (SLR) dengan protokol PRISMA 2020, dapat disimpulkan bahwa teori graf merupakan pendekatan matematis yang efektif dan relevan dalam optimasi jaringan transportasi perkotaan. Berbagai algoritma berbasis graf, seperti Dijkstra, Bellman–Ford, Minimum Spanning Tree (MST), BFS, DFS, serta pendekatan lanjutan seperti Graph Neural Network (GNN) dan metode hybrid Dijkstra–A*, terbukti mampu meningkatkan efisiensi rute, meminimalkan jarak dan waktu tempuh, meningkatkan akurasi sistem navigasi, serta mendukung prediksi dan pengendalian kemacetan lalu lintas.

Selain itu, hasil kajian menunjukkan bahwa integrasi teori graf dengan teknik komputasi modern, seperti pembelajaran mesin dan pemrosesan data lalu lintas, memberikan kinerja yang lebih adaptif terhadap kondisi jaringan transportasi yang dinamis dan kompleks. Dengan demikian, teori graf tidak hanya berperan penting dalam permasalahan transportasi statis, tetapi juga memiliki potensi besar dalam pengembangan sistem transportasi perkotaan yang cerdas, efisien, dan berkelanjutan. Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengembangkan model graf dinamis yang terintegrasi dengan data lalu lintas real-time guna meningkatkan akurasi dan responsivitas sistem transportasi modern.

DAFTAR REFERENSI

- Agusnur, A. (2025). Peran Teori Graf dalam Perancangan Jaringan Transportasi Cerdas. *Jurnal Matematika Dan Aplikasi*, 1(1), 33–39.
- Ahsanti, A., Insyafilla, A., Fatimah, N. N., Wahyuni, W. C. D., & Rahmadi, D. (2025). Optimalisasi Jaringan Jalan Antar Kecamatan dengan Minimum Spanning Tree dan Algoritma Prim di Kabupaten Ngawi. *Basis : Jurnal Ilmiah Matematika*, 4(1), 1–11. <https://doi.org/10.30872/basis.v4i1.1451>
- Amelia Vega S. Meliala, R., Nabila Harahap, S., Haikal Al-Majid, M., & Harliana, P. (2024). Optimalisasi Rute Transportasi Menggunakan Algoritma Graf. *JATI (Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika)*, 8(6), 12625–12632. <https://doi.org/10.36040/jati.v8i6.11996>
- Chulasoh, B. S., Bukhori, M. I., & Muttaqin, P. S. (2025). Penerapan Bellmann-Ford Algorithm Dalam Pencarian Rute Terpendek Distribusi Suku Cadang Di Kota Bandung. *Jurnal Ilmiah Teknologi Infomasi Terapan*, 11(3), 137–144. <https://doi.org/10.33197/jitter.vol11.iss3.2025.2935>
- Feng, Y., Zhang, W., & Zhu, J. (2023). Application of an Improved A* Algorithm for the Path Analysis of Urban Multi-Type Transportation Systems. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(24). <https://doi.org/10.3390/app132413090>
- Gorji, M. A., Akbarzadeh, M., & Shetab-Boushehri, S. N. (2022). Evaluation and improvement of the urban transportation networks resilience in short-term non-recurring traffic congestion: a novel graph connectivity-based criteria. *Transportation Engineering*, 10(May), 100152. <https://doi.org/10.1016/j.treng.2022.100152>
- Grujic, Z., & Grujic, B. (2025). Optimal Routing in Urban Road Networks: A Graph-Based Approach Using Dijkstra's Algorithm. *Applied Sciences (Switzerland)*, 15(8). <https://doi.org/10.3390/app15084162>
- Guze, S. (2019). Graph theory approach to the vulnerability of transportation networks. *Algorithms*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/A12120270>

- Hemdan, S. M., Ramadan, M., & Othman, A. (2025). Exploring Aswan's Transportation Network through Graph Theory: Metrics and Insights. *Aswan University Journal of Sciences and Technology*, 5(2), 27–36. <https://doi.org/10.21608/aujst.2025.352776.1163>
- Lin, Z., Cao, Y., Liu, H., Li, J., & Zhao, S. (2021). Research on optimization of urban public transport network based on complex network theory. *Symmetry*, 13(12). <https://doi.org/10.3390/sym13122436>
- Marpaung, F., & Sari, N. (2021). Maximal Flow Of Transportation Network In Medan City Using Ford-Fulkerson Algorithm. *International Journal of Science*, 100–106. <http://ijstm.inarah.co.id>
- Maulana, A. (2025). *Penerapan Kruskal Minimum Spanning Tree Pada Optimasi Rute Wisata Bojong Kabupaten Tegal*. 2(1).
- Mochammad Darip, Sigit Auliana, Anam, A. K., Parimin, & Anugerah Agung. (2024). Comparison of BFS and DFS Algorithm for Routes to Historical-Cultural Tourism Locations in Banten Province. *Journal of Advances in Information and Industrial Technology*, 6(2), 113–122. <https://doi.org/10.52435/jait.v6i2.560>
- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., Altman, D. G., Antes, G., Atkins, D., Barbour, V., Barrowman, N., Berlin, J. A., Clark, J., Clarke, M., Cook, D., D'Amico, R., Deeks, J. J., Devreux, P. J., Dickersin, K., Egger, M., Ernst, E., Gøtzsche, P. C., ... Tugwell, P. (2009). Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA statement. *PLoS Medicine*, 6(7). <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1000097>
- Monteiro, J., Robertson, G., & Atkinson, B. (2012). Networks in transportation - Theory. *Canadian Transportation Research Forum*, 1–21.
- Muthuvel, P., Pandiyan, G., Manickam, S., & Rajesh, C. (2025). Optimizing Road Networks: A Graph-Based Analysis with Path-finding and Learning Algorithms. *International Journal of Intelligent Transportation Systems Research*, 23(1), 315–329. <https://doi.org/10.1007/s13177-024-00453-w>
- Odiagbe, M., Osanaiye, O., & Oshiga, O. (2025). Traffic Prediction and Congestion Control Using an Enhanced-Graph Neural Network. *International Journal of Transport Development and Integration*, 9(3), 645–655. <https://doi.org/10.18280/ijtdi.090317>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *Bmj*, 372. <https://doi.org/10.1136/bmj.n71>
- Pinandito, A., Kharisma, A. P., Akbar, M. A., & Saputra, M. C. (2024). Peningkatan Performa Komputasi Sistem Navigasi Transportasi Publik Pada Perangkat Bergerak Melalui Penerapan Teknik Kompresi Data dan Penyederhanaan Graf. *Jurnal Teknologi Informasi Dan Ilmu Komputer*, 11(6), 1185–1196. <https://doi.org/10.25126/jtiik.2024118054>

Tampubolon, A. J., Ricardo, E., Simbolon, D. S., Pasaribu, A., Panggabean, J., & Sipayung, S. P. (2025). Implementasi Algoritma Dijkstra Menentukan Rute Terpendek Dari Unika St. Thomas Menuju Kantor dinas kependudukan Kota Medan. *Jurnal Minfo Polgan*, 14(1), 1274–1286. <https://doi.org/10.33395/jmp.v14i1.14997>

Yang, H., Li, Z., & Qi, Y. (2024). Predicting traffic propagation flow in urban road network with multi-graph convolutional network. *Complex and Intelligent Systems*, 10(1), 23–35. <https://doi.org/10.1007/s40747-023-01099-z>