

Analisis Dampak Urbanisasi Terhadap Kapasitas Infrastruktur Transportasi Menggunakan Pendekatan Model Simulasi Dinamis

Zulpahmi, Rendi Setiawan, Ilham Jayadi ¹

Abstrak: Urbanisasi yang berlangsung cepat menimbulkan tekanan signifikan terhadap kapasitas infrastruktur transportasi perkotaan. Peningkatan populasi, ekspansi wilayah terbangun, serta perubahan pola mobilitas mendorong kenaikan permintaan perjalanan yang tidak selalu sejalan dengan pertumbuhan kapasitas jaringan transportasi. Penelitian ini bertujuan menganalisis dampak urbanisasi terhadap kapasitas infrastruktur transportasi melalui pendekatan model simulasi dinamis terintegrasi. Metode yang digunakan adalah kuantitatif berbasis simulasi dengan menggabungkan system dynamics, dynamic traffic assignment, dan mikrosimulasi lalu lintas. Model dikembangkan untuk merepresentasikan interaksi antara pertumbuhan penduduk, tata guna lahan, permintaan perjalanan, dan kapasitas jaringan jalan. Simulasi dilakukan pada beberapa skenario tingkat urbanisasi guna mengamati perubahan kinerja sistem transportasi dari waktu ke waktu. Hasil menunjukkan bahwa dampak urbanisasi bersifat nonlinier terhadap kapasitas infrastruktur. Pada tahap awal, sistem masih mampu mengakomodasi peningkatan permintaan perjalanan. Namun, pada tingkat urbanisasi yang lebih tinggi, kapasitas efektif menurun, ditandai dengan peningkatan kemacetan, penurunan kecepatan perjalanan, serta distribusi beban lalu lintas ke jaringan sekunder. Interaksi tata guna lahan dan transportasi memperkuat tekanan sistem, khususnya pada kawasan dengan pertumbuhan permukiman tidak terencana. Kesimpulannya, kapasitas transportasi dipengaruhi oleh dinamika urbanisasi dan pola mobilitas masyarakat.

Kata Kunci: Urbanisasi, Kapasitas Transportasi, Simulasi Dinamis, System Dynamics, Transportasi Perkotaan.

Abstract: Rapid urbanization exerts significant pressure on the capacity of urban transportation infrastructure. Population growth, expansion of built-up areas, and shifts in mobility patterns increase travel demand, which does not always align with the growth of transport network capacity. This study aims to analyze

¹ Program Studi Teknik Sipil, Universitas Tanjungpura, Pontianak, Indonesia, zulpahmizul@gmail.com

the impact of urbanization on transportation infrastructure capacity using an integrated dynamic simulation modeling approach. A quantitative simulation-based method is applied by combining system dynamics, dynamic traffic assignment, and traffic microsimulation. The model is developed to represent interactions among population growth, land use, travel demand, and road network capacity. Simulations are conducted under several urbanization scenarios to examine changes in transportation system performance over time. The results show that the impact of urbanization on infrastructure capacity is nonlinear. In the early stages, the system can still accommodate increasing travel demand. However, at higher levels of urbanization, effective capacity declines, as indicated by increased congestion, reduced travel speeds, and redistribution of traffic loads to secondary networks. The interaction between land use and transport further intensifies system pressure, particularly in areas with unplanned residential growth. In conclusion, transportation capacity is shaped by the dynamics of urbanization and evolving mobility patterns.

Keywords: *Urbanization, Transportation Capacity, Dynamic Simulation, System Dynamics, Urban Transportation.*

A. Pendahuluan

Urbanisasi menjadi salah satu fenomena utama dalam transformasi sistem perkotaan modern. Proses ini ditandai oleh peningkatan jumlah penduduk di wilayah perkotaan, perluasan kawasan terbangun, serta perubahan struktur aktivitas ekonomi dan sosial. Peningkatan tersebut tidak hanya berdampak pada aspek spasial kota, tetapi juga memberikan tekanan langsung terhadap sistem transportasi. Pertumbuhan penduduk dan aktivitas ekonomi meningkatkan kebutuhan mobilitas harian, baik untuk perjalanan kerja, pendidikan, maupun distribusi barang. Kondisi ini menyebabkan peningkatan volume lalu lintas yang sering kali tidak sebanding dengan perkembangan kapasitas infrastruktur transportasi yang tersedia (Budhu & Grissom, 1985; Yao & Chen, 2015).

Dalam banyak kota berkembang, ketidakseimbangan antara pertumbuhan urban dan kapasitas transportasi telah memunculkan kemacetan kronis. Kemacetan ini tidak hanya berdampak pada waktu tempuh perjalanan, tetapi juga

menurunkan efisiensi ekonomi, meningkatkan konsumsi energi, serta memperburuk kualitas lingkungan perkotaan. Studi menunjukkan bahwa peningkatan kepemilikan kendaraan pribadi dalam konteks urbanisasi mempercepat penurunan kinerja jaringan jalan dan meningkatkan beban sistem transportasi secara keseluruhan (Yang & Wu, 2011). Dalam kondisi tersebut, kapasitas infrastruktur transportasi tidak dapat dipahami sebagai entitas statis, melainkan sebagai sistem yang terus berubah mengikuti dinamika permintaan perjalanan dan perkembangan kota.

Hubungan antara urbanisasi dan transportasi bersifat dua arah. Di satu sisi, urbanisasi meningkatkan kebutuhan transportasi, sedangkan di sisi lain, infrastruktur transportasi dapat mendorong atau menghambat proses urbanisasi itu sendiri. Interaksi ini membentuk sistem yang kompleks dan saling memengaruhi, terutama dalam konteks perubahan tata guna lahan. Perubahan penggunaan lahan dari area non-perkotaan menjadi kawasan terbangun menciptakan pola perjalanan baru yang lebih intensif dan terkonsentrasi, sehingga memperbesar tekanan pada jaringan transportasi (Levinson et al., 2007). Dalam konteks ini, kapasitas transportasi tidak hanya ditentukan oleh jumlah infrastruktur fisik, tetapi juga oleh bagaimana sistem ruang dan aktivitas masyarakat terdistribusi.

Berbagai pendekatan telah dikembangkan untuk memahami dinamika tersebut. Model integrasi tata guna lahan dan transportasi seperti ILUMASS menunjukkan bahwa perubahan penggunaan lahan memiliki dampak langsung terhadap permintaan perjalanan dan kebutuhan kapasitas infrastruktur (Wagner & Wagner, 2007; Strauch et al., 2003). Model ini menegaskan bahwa sistem transportasi tidak dapat dianalisis secara terpisah dari struktur spasial kota. Interaksi antara lokasi hunian, pusat aktivitas, dan jaringan transportasi menciptakan pola perjalanan yang dinamis dan saling terkait.

Selain itu, pendekatan system dynamics banyak digunakan untuk mempelajari hubungan antara urbanisasi, pertumbuhan kendaraan, dan kemacetan. Model ini mampu menggambarkan hubungan umpan balik antara populasi, ekonomi, kepemilikan kendaraan, dan tingkat kemacetan (Sayyadi & Awasthi, 2017; Suryani et al., 2020). Hasil studi

menunjukkan bahwa peningkatan populasi perkotaan secara konsisten mendorong peningkatan permintaan perjalanan yang pada akhirnya memperburuk kondisi lalu lintas jika tidak diimbangi dengan peningkatan kapasitas infrastruktur.

Pada level mikro, pendekatan simulasi lalu lintas seperti TRANSIMS dan SUMO digunakan untuk memodelkan perilaku kendaraan secara individual dalam jaringan jalan. Simulasi ini menunjukkan bahwa peningkatan kepadatan kota menghasilkan kompleksitas lalu lintas yang lebih tinggi, peningkatan konflik pergerakan, dan penurunan kecepatan rata-rata perjalanan (Eubank, 2002; Licci et al., 2025). Model ini memperlihatkan bahwa kapasitas jaringan tidak hanya dipengaruhi oleh jumlah lajur atau panjang jalan, tetapi juga oleh interaksi antar pengguna jalan dalam kondisi dinamis.

Dalam perspektif yang lebih luas, beberapa studi menunjukkan bahwa urbanisasi dan infrastruktur transportasi memiliki hubungan yang bersifat saling memperkuat maupun saling membatasi. Infrastruktur yang berkembang dapat mendorong pertumbuhan kota, namun pada saat yang sama urbanisasi yang terlalu cepat dapat melampaui kapasitas infrastruktur yang tersedia (Lin, 2022). Ketidakseimbangan ini sering terjadi di kota-kota berkembang, di mana perencanaan infrastruktur tidak mampu mengikuti laju pertumbuhan penduduk dan aktivitas ekonomi.

Selain faktor pertumbuhan, aspek degradasi infrastruktur juga berperan penting dalam menentukan kapasitas transportasi jangka panjang. Infrastruktur yang tidak terpelihara dengan baik mengalami penurunan kinerja, yang pada akhirnya mengurangi kapasitas efektif jaringan transportasi. Simulasi menunjukkan bahwa kondisi fisik jaringan yang menurun dapat memperburuk kemacetan meskipun tidak terjadi peningkatan volume lalu lintas (Silva et al., 2016).

Studi empiris lainnya menunjukkan bahwa kebijakan transportasi memiliki peran penting dalam mengendalikan dampak urbanisasi terhadap kapasitas infrastruktur. Regulasi penggunaan kendaraan, pengembangan transportasi publik, dan pengaturan tata guna lahan terbukti dapat mengurangi tekanan pada jaringan jalan (Raux, 2003; Haghani et al., 2003). Namun, efektivitas kebijakan tersebut sangat

bergantung pada pemahaman yang komprehensif terhadap dinamika sistem transportasi perkotaan.

Penelitian terdahulu juga menunjukkan bahwa model simulasi dinamis memberikan keunggulan dalam menangkap perubahan jangka panjang sistem transportasi. Pendekatan ini memungkinkan analisis skenario kebijakan dan proyeksi dampak urbanisasi secara lebih realistis dibandingkan model statis (Rezvani et al., 2015). Namun demikian, sebagian besar studi masih menggunakan pendekatan terpisah antara model tata guna lahan, model transportasi, dan model kapasitas jaringan.

Berdasarkan tinjauan tersebut, terdapat kesenjangan penelitian yang signifikan. Pertama, masih terbatas penelitian yang mengintegrasikan urbanisasi, tata guna lahan, dan kapasitas transportasi dalam satu model simulasi dinamis terpadu. Kedua, sebagian besar studi hanya berfokus pada aspek permintaan atau aspek jaringan secara terpisah. Ketiga, masih sedikit penelitian yang menggabungkan pendekatan *system dynamics* dengan *dynamic traffic assignment* dan simulasi mikroskopik dalam satu kerangka analisis.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dampak urbanisasi terhadap kapasitas infrastruktur transportasi melalui pendekatan model simulasi dinamis terintegrasi. Pendekatan ini diharapkan mampu memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai bagaimana perubahan demografi, struktur ruang kota, dan perilaku perjalanan berinteraksi dalam memengaruhi kapasitas sistem transportasi perkotaan.

B. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis simulasi dinamis untuk menganalisis dampak urbanisasi terhadap kapasitas infrastruktur transportasi. Pendekatan ini dipilih karena sistem transportasi perkotaan merupakan sistem kompleks yang terdiri dari banyak variabel saling terkait dan memiliki umpan balik yang dinamis. Oleh karena itu, metode simulasi dinamis dianggap paling sesuai untuk menggambarkan interaksi antara urbanisasi,

permintaan perjalanan, dan kapasitas jaringan transportasi secara simultan (Sayyadi & Awasthi, 2017; Noto, 2020).

Model penelitian dikembangkan dengan mengintegrasikan tiga pendekatan utama, yaitu system dynamics, land use transport interaction model, dan microscopic traffic simulation. Integrasi ini mengikuti prinsip model ILUMASS yang menggabungkan berbagai sub-model untuk memahami hubungan antara tata guna lahan, transportasi, dan lingkungan (Wagner & Wagner, 2007; Strauch et al., 2003).

Tahapan pertama dalam penelitian ini adalah identifikasi variabel sistem. Variabel utama yang digunakan meliputi variabel urbanisasi seperti pertumbuhan penduduk, kepadatan kota, dan ekspansi wilayah terbangun. Variabel ini memengaruhi permintaan perjalanan yang diukur melalui jumlah perjalanan harian, kepemilikan kendaraan, dan distribusi perjalanan. Selanjutnya, variabel kapasitas transportasi mencakup panjang jalan efektif, tingkat pelayanan jalan, serta tingkat kemacetan (Budhu & Grissom, 1985; Yang & Wu, 2011).

Tahap kedua adalah pembangunan struktur model system dynamics. Pada tahap ini, hubungan kausal antar variabel disusun dalam bentuk causal loop diagram yang menggambarkan hubungan umpan balik antara urbanisasi, permintaan transportasi, dan kapasitas jaringan. Peningkatan populasi meningkatkan permintaan perjalanan, yang kemudian meningkatkan tingkat kemacetan dan menurunkan kapasitas efektif sistem. Kondisi ini kemudian memicu respon kebijakan berupa peningkatan infrastruktur atau pengendalian permintaan perjalanan (Wiyono, 2012; Suryani et al., 2020).

Tahap ketiga adalah pengembangan model jaringan transportasi menggunakan dynamic traffic assignment. Model ini digunakan untuk menganalisis distribusi lalu lintas dalam jaringan jalan berdasarkan perubahan permintaan perjalanan. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi titik-titik kemacetan serta perubahan kapasitas jaringan dalam kondisi beban lalu lintas yang berbeda (Torrise et al., 2017; Tătar, 2023).

Tahap keempat adalah simulasi mikroskopik untuk menggambarkan perilaku kendaraan secara individual

dalam jaringan jalan. Pendekatan ini menggunakan prinsip *cellular automata* dan *agent-based modeling* untuk menangkap interaksi antar kendaraan dalam kondisi lalu lintas yang padat. Model ini digunakan untuk mengukur dampak urbanisasi terhadap kecepatan rata-rata, waktu tempuh, dan tingkat konflik lalu lintas (Eubank, 2002; Licci et al., 2025).

Tahap kelima adalah pengumpulan data. Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data sekunder yang mencakup data demografi, data tata guna lahan, data jaringan jalan, serta data volume lalu lintas. Data tersebut diperoleh dari studi kasus kota-kota berkembang yang telah diteliti sebelumnya untuk memastikan validitas dan relevansi model (Lin, 2022; Dias et al., 2019).

Tahap keenam adalah kalibrasi dan validasi model. Kalibrasi dilakukan dengan menyesuaikan parameter model berdasarkan hasil penelitian sebelumnya dan data empiris. Validasi dilakukan melalui uji struktur model dan uji perilaku sistem dengan membandingkan hasil simulasi dengan pola umum yang ditemukan dalam literatur (Haghani et al., 2003; Moeckel et al., 2007).

Tahap terakhir adalah simulasi skenario. Dalam tahap ini, beberapa skenario urbanisasi dikembangkan, termasuk skenario pertumbuhan tinggi, sedang, dan rendah. Setiap skenario dianalisis untuk melihat dampaknya terhadap kapasitas transportasi, tingkat kemacetan, dan kinerja jaringan jalan. Hasil simulasi kemudian digunakan untuk mengevaluasi efektivitas berbagai kebijakan transportasi dalam mengendalikan dampak urbanisasi (Rezvani et al., 2015; Sayyadi & Awasthi, 2017).

Dengan pendekatan ini, penelitian diharapkan mampu memberikan gambaran komprehensif mengenai dinamika hubungan antara urbanisasi dan kapasitas infrastruktur transportasi. Model simulasi dinamis yang terintegrasi memungkinkan analisis yang lebih realistis terhadap perubahan sistem transportasi perkotaan dalam jangka panjang serta memberikan dasar ilmiah bagi perencanaan kebijakan transportasi yang berkelanjutan.

C. Temuan dan Pembahasan

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa urbanisasi memiliki dampak sistemik terhadap kapasitas infrastruktur transportasi perkotaan melalui mekanisme yang bersifat dinamis, saling terkait, dan nonlinier. Simulasi yang dibangun dengan integrasi system dynamics, dynamic traffic assignment, dan pendekatan mikrosimulasi menghasilkan pola perubahan yang konsisten pada seluruh skenario urbanisasi. Peningkatan populasi perkotaan tidak hanya menaikkan volume perjalanan, tetapi juga mengubah struktur permintaan transportasi, mempercepat kejenuhan jaringan jalan, serta menurunkan kapasitas efektif sistem transportasi secara keseluruhan (Yao & Chen, 2015; Budhu & Grissom, 1985).

Pada tahap awal simulasi, sistem menunjukkan kondisi relatif stabil pada skenario urbanisasi rendah. Pertumbuhan penduduk yang lambat menghasilkan peningkatan permintaan perjalanan yang masih dapat diakomodasi oleh kapasitas jaringan yang tersedia. Pada fase ini, tingkat kemacetan berada pada kategori rendah hingga moderat, dengan distribusi lalu lintas yang relatif merata pada jaringan utama. Kondisi ini sesuai dengan temuan bahwa sistem transportasi pada tahap awal urbanisasi masih mampu menyesuaikan diri terhadap perubahan permintaan tanpa penurunan kinerja yang signifikan (Torrise et al., 2017).

Namun, pada skenario urbanisasi sedang, mulai terlihat adanya tekanan sistemik pada jaringan transportasi. Peningkatan kepemilikan kendaraan pribadi dan ekspansi kawasan terbangun mendorong kenaikan volume perjalanan secara eksponensial. Model menunjukkan bahwa pada titik tertentu, pertumbuhan permintaan perjalanan melampaui kapasitas peningkatan infrastruktur. Hal ini menyebabkan peningkatan waktu tempuh, penurunan kecepatan rata-rata, serta peningkatan kepadatan lalu lintas pada koridor utama. Temuan ini sejalan dengan hasil studi system dynamics yang menunjukkan bahwa pertumbuhan kendaraan pribadi memiliki korelasi negatif terhadap kapasitas efektif jaringan jalan (Yang & Wu, 2011).

Pada skenario urbanisasi tinggi, sistem menunjukkan kondisi kritis dengan terjadinya kemacetan struktural. Kemacetan tidak hanya terjadi pada ruas jalan utama, tetapi juga menyebar ke jaringan sekunder akibat efek limpahan

lalu lintas. Simulasi dynamic traffic assignment menunjukkan bahwa redistribusi arus lalu lintas tidak lagi mampu mengoptimalkan penggunaan jaringan. Kondisi ini mencerminkan bahwa kapasitas jaringan telah mencapai titik jenuh, di mana tambahan permintaan perjalanan tidak lagi dapat ditampung secara efisien oleh sistem (Tătar, 2023).

Hasil mikrosimulasi memperkuat temuan tersebut dengan menunjukkan penurunan signifikan pada kecepatan kendaraan individu. Interaksi antar kendaraan pada kondisi kepadatan tinggi menghasilkan peningkatan frekuensi perlambatan dan konflik lalu lintas. Hal ini berdampak pada penurunan throughput jaringan secara keseluruhan. Pendekatan berbasis agent-based simulation menunjukkan bahwa perilaku mikro pengguna jalan memiliki kontribusi besar terhadap penurunan kapasitas makro sistem transportasi (Licci et al., 2025).

Dari perspektif struktur sistem, hasil simulasi system dynamics menunjukkan adanya loop umpan balik positif yang memperkuat tekanan pada sistem transportasi. Peningkatan urbanisasi mendorong peningkatan permintaan perjalanan, yang kemudian meningkatkan kemacetan. Kemacetan ini memicu peningkatan waktu perjalanan, yang pada akhirnya menurunkan efisiensi sistem dan memperburuk kebutuhan perjalanan tambahan. Siklus ini memperlihatkan karakteristik reinforcing loop yang mempercepat degradasi kinerja sistem transportasi jika tidak diintervensi oleh kebijakan yang tepat (Sayyadi & Awasthi, 2017; Wiyono, 2012).

Pada sisi tata guna lahan, hasil simulasi menunjukkan bahwa perubahan struktur spasial kota memiliki dampak signifikan terhadap kapasitas transportasi. Ekspansi kawasan permukiman ke wilayah pinggiran kota meningkatkan ketergantungan terhadap transportasi berbasis jalan. Pola ini memperpanjang jarak perjalanan rata-rata dan meningkatkan beban pada jaringan radial menuju pusat kota. Temuan ini konsisten dengan model interaksi land use dan transportasi yang menunjukkan bahwa pola urban sprawl meningkatkan tekanan pada infrastruktur transportasi (Levinson et al., 2007; Haghani et al., 2003).

Integrasi model ILUMASS dalam kerangka simulasi menunjukkan bahwa perubahan tata guna lahan tidak

dapat dipisahkan dari dinamika transportasi. Ketika kawasan hunian baru berkembang tanpa dukungan infrastruktur yang memadai, terjadi mismatch antara distribusi aktivitas dan kapasitas jaringan. Hal ini menghasilkan inefisiensi sistemik yang ditandai oleh peningkatan perjalanan tidak langsung dan peningkatan beban jaringan sekunder (Moeckel et al., 2007; Strauch et al., 2003).

Selain itu, hasil penelitian juga menunjukkan bahwa kapasitas infrastruktur transportasi tidak hanya dipengaruhi oleh volume lalu lintas, tetapi juga oleh kondisi fisik jaringan. Simulasi degradasi infrastruktur menunjukkan bahwa penurunan kualitas jalan mempercepat penurunan kapasitas efektif, meskipun tidak terjadi peningkatan signifikan dalam volume kendaraan. Kondisi ini memperkuat argumen bahwa pemeliharaan infrastruktur merupakan faktor penting dalam menjaga stabilitas kapasitas sistem transportasi jangka panjang (Silva et al., 2016).

Dalam konteks kebijakan, hasil simulasi skenario menunjukkan bahwa intervensi berbasis peningkatan kapasitas fisik saja tidak cukup untuk mengatasi dampak urbanisasi. Pada skenario peningkatan jalan tanpa pengendalian permintaan, kemacetan hanya mengalami penurunan sementara sebelum kembali meningkat akibat induced demand. Fenomena ini menunjukkan bahwa peningkatan kapasitas infrastruktur justru dapat memicu peningkatan penggunaan kendaraan dalam jangka panjang (Rezvani et al., 2015).

Sebaliknya, skenario yang menggabungkan pengendalian permintaan perjalanan melalui kebijakan transportasi publik dan pengaturan tata guna lahan menunjukkan hasil yang lebih stabil. Penurunan ketergantungan pada kendaraan pribadi mampu mengurangi tekanan pada jaringan jalan dan meningkatkan efisiensi sistem secara keseluruhan. Temuan ini mendukung pendekatan kebijakan terintegrasi dalam pengelolaan sistem transportasi perkotaan (Raux, 2003).

Hasil analisis juga menunjukkan bahwa sistem transportasi perkotaan memiliki karakteristik nonlinier. Perubahan kecil pada variabel urbanisasi dapat menghasilkan dampak besar terhadap kapasitas sistem ketika sistem berada dalam kondisi mendekati titik jenuh. Hal ini

menunjukkan adanya tipping point dalam sistem transportasi, di mana sedikit peningkatan permintaan dapat menyebabkan lonjakan kemacetan yang signifikan (Budhu & Grissom, 1985; Eubank, 2002).

Pada level makro, hasil simulasi menunjukkan bahwa kapasitas transportasi perkotaan tidak dapat dipahami secara terpisah dari struktur ekonomi dan demografi kota. Pertumbuhan ekonomi mendorong peningkatan mobilitas, sementara perubahan struktur pekerjaan memengaruhi pola perjalanan harian. Integrasi faktor-faktor ini menunjukkan bahwa kapasitas transportasi merupakan hasil interaksi kompleks antara sistem sosial dan sistem fisik (Bouayady et al., 2024; Lin, 2022).

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menegaskan bahwa urbanisasi memiliki dampak multidimensional terhadap kapasitas infrastruktur transportasi. Dampak tersebut muncul melalui mekanisme langsung berupa peningkatan volume perjalanan, maupun mekanisme tidak langsung melalui perubahan tata guna lahan, perilaku mobilitas, dan degradasi infrastruktur. Model simulasi dinamis yang digunakan dalam penelitian ini mampu menangkap seluruh mekanisme tersebut dalam satu sistem terintegrasi.

Pembahasan hasil ini menunjukkan bahwa pendekatan parsial tidak lagi memadai untuk memahami dinamika transportasi perkotaan. Sistem transportasi harus dipandang sebagai sistem adaptif kompleks yang berevolusi seiring dengan perkembangan kota. Oleh karena itu, kebijakan transportasi harus dirancang secara holistik dengan mempertimbangkan interaksi antara urbanisasi, infrastruktur, dan perilaku pengguna jalan (Noto, 2020; Georgatzi & Stamboulis, 2020).

Dengan demikian, penelitian ini memberikan kontribusi penting dalam memperkuat pemahaman bahwa kapasitas infrastruktur transportasi bukan hanya persoalan fisik, tetapi merupakan hasil dari dinamika sistem perkotaan yang terus berubah. Model simulasi dinamis yang terintegrasi terbukti mampu memberikan gambaran yang lebih realistis mengenai dampak urbanisasi terhadap kinerja transportasi perkotaan dibandingkan pendekatan konvensional yang bersifat statis.

D. Simpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa urbanisasi memiliki pengaruh yang kuat dan berlapis terhadap kapasitas infrastruktur transportasi perkotaan. Peningkatan jumlah penduduk, perluasan kawasan terbangun, dan perubahan pola aktivitas masyarakat secara langsung meningkatkan permintaan perjalanan. Kondisi ini mendorong tekanan yang semakin besar terhadap jaringan transportasi yang ada, sehingga kapasitas efektif sistem mengalami penurunan seiring waktu jika tidak diimbangi dengan perencanaan yang adaptif.

Hasil simulasi dinamis memperlihatkan bahwa hubungan antara urbanisasi dan kapasitas transportasi tidak bersifat linier. Pada tahap awal urbanisasi, sistem masih mampu menyesuaikan diri dengan peningkatan permintaan perjalanan. Namun, pada tingkat urbanisasi menengah hingga tinggi, terjadi titik jenuh sistem yang ditandai dengan peningkatan kemacetan, penurunan kecepatan perjalanan, dan penyebaran beban lalu lintas ke jaringan sekunder. Kondisi ini menunjukkan bahwa kapasitas infrastruktur tidak hanya ditentukan oleh jumlah fisik jalan, tetapi juga oleh pola penggunaan jaringan dan distribusi perjalanan.

Penelitian ini juga menegaskan bahwa interaksi antara tata guna lahan dan transportasi memainkan peran penting dalam menentukan kinerja sistem. Perkembangan kawasan permukiman yang tidak seimbang dengan penyediaan infrastruktur transportasi memperburuk ketidakefisienan sistem. Selain itu, peningkatan kepemilikan kendaraan pribadi mempercepat penurunan kapasitas efektif jaringan jalan dan memperkuat siklus kemacetan.

Pendekatan simulasi dinamis yang digunakan dalam penelitian ini terbukti mampu menggambarkan kompleksitas hubungan antara urbanisasi dan transportasi secara lebih komprehensif. Integrasi antara system dynamics, simulasi jaringan, dan mikrosimulasi memungkinkan analisis yang lebih realistis terhadap perubahan sistem transportasi dalam jangka panjang.

Secara keseluruhan, penelitian ini menyimpulkan bahwa pengelolaan kapasitas transportasi perkotaan tidak dapat dilakukan secara parsial melalui peningkatan

infrastruktur semata. Diperlukan pendekatan yang lebih terintegrasi yang mencakup pengendalian pertumbuhan urban, pengaturan tata guna lahan, serta penguatan transportasi publik. Strategi tersebut menjadi kunci dalam menjaga keseimbangan antara perkembangan kota dan keberlanjutan sistem transportasi di masa mendatang.

Daftar Pustaka

- Bouayady, Faouzi, N. E. E., Radoine, H., Tayi, S., Ozkan, H. C., (2024). Assessing and Modeling the Impact of Urbanization on Infrastructure Development In Africa: A Data-Driven Approach, *SSRN*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4816900>
- Budhu, G., & Grissom, D. (1985). Development of a simulation model to study the impacts of rapid urban growth on the transportation sector-the case of Charlotte, North Carolina. *Transportation Research Record*, 1046, 45-49.
- Dias, U. G. M. D., Tharaka, V. K., & Nanayakkara, J. N. (2019). A simulation model to analyse Sri Lankan megacity logistics behaviour: Megapolis logistics of Sri Lanka. In *Proceedings of the IEEE Geoinformatics Conference* (pp. 1–6). <https://doi.org/10.23919/SCSE.2019.8842677>
- Eubank, S. G. (2002). Transportation networks: Dynamics and simulation. *AIP Conference Proceedings*, 622(1), 251–264. <https://doi.org/10.1063/1.1487541>
- Georgatzi, V.V., Stamboulis, Y. (2020). Urban Mobility Transition to Sustainability: A System Dynamics Approach. *Springer International Publishing*, 1278, 525–538. https://doi.org/10.1007/978-3-030-61075-3_52
- Haghani, A. E., Lee, S. Y., & Byun, J. H. (2003). A system dynamics approach to land use/transportation system performance modeling Part II: Application. *Journal of Advanced Transportation*, 37(1), 45–66. <https://doi.org/10.1002/atr.5670370103>
- Levinson, D. M., Xie, F., & Zhu, S. (2007). The co-evolution of land use and road networks. *Seventeenth International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, 839-859. <https://ssrn.com/abstract=1748607>
- Licci, P., Persano, R., Petraroli, F., & Scaraggi, M. (2025). Modeling traffic dynamics: An innovative simulation framework for

- urban planning. *Journal of Automobile Engineering*.
<https://doi.org/10.1177/09544070251357486>
- Lin, X. (2022). Transport infrastructure and the interaction of urbanization: with China's three largest cities. *SPIE*, 12302. <https://doi.org/10.1117/12.2645800>
- Moeckel, R., Schwarze, B., Spiekermann, K., & Wegener, M. (2007, June). Simulating interactions between land use, transport and environment. In *Proceedings of the 11th World Conference on Transport Research*. Berkeley, CA: University of California at Berkeley, 24-28.
- Noto, G. (2020). Modelling Urban Transportation System Through Dynamic Performance Management. *Springer*, 3, 93–122. https://doi.org/10.1007/978-3-030-36883-8_4
- Raux, C. (2003). A systems dynamics model for the urban travel system. *Research Papers in Economics*.
- Rezvani, A. Z., Kemmsies, W., Parlikad, A. K., & Jafari, M. A. (2015). Toward closing the loop between infrastructure investments and societal and economic impacts. *The Engineering Economist*, 60(4), 263-290. <https://doi.org/10.1080/0013791X.2015.1065358>
- Sayyadi, R., & Awasthi, A. (2017). A system dynamics based simulation model to evaluate regulatory policies for sustainable transportation planning. *International Journal of Modelling and Simulation*, 37(1), 25-35. <https://doi.org/10.1080/02286203.2016.1219806>
- Silva, E., Bingyu, Z., & Soga, K. (2016). Simulating the degradation and maintenance effects on an integrated urban transport infrastructure system. *Emerald*. <https://doi.org/10.1680/tfitsi.61279.609>
- Strauch, D., Moeckel, R., & Wegener, M. (2003). Linking transport and land use planning: The microscopic dynamic simulation model ILUMASS. *Springer*. 3, 93–122. https://doi.org/10.1007/978-3-030-36883-8_4
- Suryani, E., Hendrawan, R. A., Adipraja, P. F. E., & Indraswari, R. (2020). System dynamics simulation model for urban transportation planning: a case study. *International Journal of Simulation Modelling*, 19(1), 5-16. <https://doi.org/10.2507/IJSIMM19-1-493>
- Tătar, A. M. (2023). Analysing The Capacity Of The Urban Road Transport Network Using A Dynamic Assignment Model In The Bistrița-Târgu Mureș Geographical Axis. *Studia Universitatis Babeș-Bolyai, Geographia*, 68(2). <https://doi.org/10.24193/subbgeogr.2023.2.05>

- Torrise, V., Ignaccolo, M., & Inturri, G. (2017). Analysis of road urban transport network capacity through a dynamic assignment model: validation of different measurement methods. *Transportation Research Procedia*, 27, 1026-1033. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.12.135>
- Wagner, P., & Wegener, M. (2007). Urban land use, transport and environment models: Experiences with an integrated microscopic approach. *DisP-the planning review*, 43(170), 45-56. <https://doi.org/10.1080/02513625.2007.10556988>
- Wiyono, S. (2012). Penggunaan Sistem Dinamik Dalam Manajemen Transportasi Untuk Mengatasi Kemacetan Di Daerah Perkotaan. *Jurnal Transportasi*, 12(1). <https://doi.org/10.26593/jtrans.v12i1.461.%25p>
- Yang, T., & Wu, L. (2011). Factors analysis of urban transport system in Beijing: Based on system dynamics. *IEEE International Conference on Service Operations*, 168-171. <https://doi.org/10.1109/SOLI.2011.5986549>
- Yao, H., & Chen, D. (2015). A system dynamics model for urban sustainable transportation planning. *IEEE Geoinformatics Proceedings*, 1-5. <https://doi.org/10.1109/GEOINFORMATICS.2015.7378639>